



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis y Aprovechamiento de la Energía Mareomotriz para la Generación Eléctrica en México

T E S I S

Q U E P A R A O B T E N E R
E L T Í T U L O D E:

INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N:

**H E R N Á N D E Z M O T E S A Ú L
L E Y V A S E R R A T O A L V A R O**

DIRECTOR DE TESIS: ING. JUAN JOSÉ LÓPEZ MÁRQUEZ



México, D.F.

2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi madre:
Por haberme dado apoyo y confianza.

A mi padre:
Que aunque no pudimos pasar más tiempo
juntos, siempre recuerdo cada cosa importante que me
dijiste y te recuerdo con cariño.

A mi hermana Rosaura:
Con cariño y profundo agradecimiento por creer en
mí y demostrármelo tantas veces y de maneras tan distintas.

A mis hermanos Sergio, Luis y Mauricio:
Por que cada uno, a su manera, me enseñó algo con su ejemplo.

A Alvaro:
Porque no sólo me gustó ser un gran compañero
de carrera hasta el final, sino que fuiste un amigo verdadero.

Al Ing. Juan José López Márquez:
Por el apoyo, asesoría y orientación para el abordar y llevar
a buen término este trabajo. Pero sobre todo por su confianza.

A esas buenas y bien logradas amistades que fuimos formando
en la Facultad.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Ingeniería.

A mis profesores.

A Sandra.

Gracias por contribuir a ser lo que ahora soy,
por darme una formación humana y
profesional y ayudarme
a alcanzar metas.

Saúl Hernández Mote

AGRADECIMIENTOS

A MI PADRE AGRADEZCO SU DEDICACIÓN, SACRIFICIO Y
ESFUERZO.

A MI MADRE QUE SIEMPRE DIÓ SOLO AMOR A SU FAMILIA; AUNQUE
YA NO ESTÉ AQUÍ, SÉ QUE DONDE ESTÉ SIEMPRE ESTARÁ
CONMIGO; TE RECORDARÉ POR SIMPRE.

A MIS HERMANOS POR CONFIAR EN MÍ.

A SAÚL POR TODO TU APOYO Y COMPAÑÍA.

A MIS AMIGOS QUE HICIERON DE MI VIDA UNIVERSITARIA, EN LA
FACULTAD DE INGENIERÍA, AGRADABLE EN TODO MOMENTO; A
LOS MIEMBROS DEL STONED RAIDER CREW: CARLOS (CARLIÑOS),
CARLOR F. (HIEDRA), RENATO (RENO), CHRISTIAN, MIGUEL ÁNGEL
S. (NERD), FABIAN (TACHO), HUICHO; A GINA, XITLALLY, JAVIER,
MARCOS (CHINO), HUGO CANO; A TODOS AQUELLOS
COMPAÑEROS, QUE A LO LARGO DE LA CARRERA FUE GRATO
CONOCERLOS.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, A LA
FACULTAD DE INGENIERÍA, POR TODO LO QUE EN ELLA APRENDÍ,
CONOCÍ Y QUE TANTO ME HA DADO.

AL ING. JUAN JOSÉ LÓPEZ MÁRQUEZ, POR SU APOYO, ASESORIA Y
CONFIANZA.

ALVARO LEYVA SERRATO

ÍNDICE GENERAL.

	Página
Introducción.	V
1. Antecedentes.	1
1.1. Orígenes de la Energía Eléctrica.	1
1.2. Desarrollo de la Energía Eléctrica en México.	2
1.3. Estado actual de la Energía Eléctrica en México.	4
1.4. Tendencia en la Generación de Energía Eléctrica.	6
2. Fuentes de generación de energía.	8
2.1. Fuentes Convencionales.	9
2.1.1. Petróleo.	9
2.1.2. Gas.	11
2.1.3. Carbón.	12
2.1.4. Energía Hidráulica.	13
2.1.5. Energía Nuclear.	13
2.2. Fuentes No Convencionales.	16
2.2.1. Energía Eólica.	16
2.2.2. Energía Solar.	19
2.2.3. Energía Geotérmica.	20
2.2.4. Energía de la Biomasa.	22
2.2.5. Energía del mar.	23
2.2.5.1.Olas.	24
2.2.5.2.Gradientes de temperatura.	25
2.2.5.3.Corrientes marinas.	26
2.2.5.4.Mareas.	27

	Página
3. Centrales Mareomotrices.	29
3.1. Ventajas de la energía mareomotriz.	29
3.2. Desventajas de la energía mareomotriz.	29
3.3. Tipos de configuración.	30
3.3.1. Vaso simple.	30
3.3.2. Vaso doble.	34
3.3.3. Vaso conjugado.	37
3.3.4. Vasos múltiples.	39
3.3.5. Bombeo.	40
3.4. Turbinas utilizadas en centrales mareomotrices.	48
3.4.1. Características de las turbinas tipo Bulbo.	48
3.4.2. Alternador.	51
3.4.3. Trazado hidráulico de los grupos Bulbo.	55
3.4.3.1.El tubo de aspiración.	56
3.4.3.2.Conductos.	58
3.4.3.3.Cavitación.	59
3.4.4. Potencias específicas de los grupos Bulbo.	60
3.4.5. Parámetros para selección.	60
3.5. Centrales mareomotrices en el mundo.	62
3.5.1. América.	64
3.5.2. Europa.	69
3.5.3. Asia.	71
3.5.4. África.	72
3.5.5. Oceanía.	72
3.6. Problemas presentados a nivel mundial.	74
3.6.1. Problemas científicos y tecnológicos.	74
3.6.2. Problemas sociales.	77
3.6.3. Problemas económicos.	77

	Página
4. Factibilidad para la construcción de centrales mareomotrices en México.	78
4.1. Lugares que reúnen las condiciones necesarias para su construcción.	78
4.1.1. Amplitud de mareas.	78
4.1.2. Embalse natural.	79
4.1.3. Condiciones topográficas.	79
4.2. Potencial de mareas.	79
4.2.1. Física de mareas.	80
4.2.2. Estadística de mareas.	87
4.2.3. Predicción de mareas.	88
4.3. Análisis comparativo del costo de la energía eléctrica con la energía mareomotriz.	96
4.3.1. Análisis comparativo del costo de la energía eléctrica mareomotriz con energía eléctrica convencional.	97
4.3.2. Análisis comparativo del costo de la energía eléctrica mareomotriz con energía eléctrica no convencional.	99
5. Propuesta para la construcción de una central mareomotriz en México.	101
5.1. Ubicación geográfica.	101
5.1.1. Características del lugar.	102
5.1.1.1. Hidrografía, topografía y geología.	102
5.1.1.2. Clima.	108
5.1.1.3. Ecosistema.	109
5.1.1.4. Características físico-químicas.	111
5.1.1.5. Potencial de mareas.	114
5.2. Tipo de turbina.	125

	Página
5.3. Ventajas	125
5.3.1. Energéticas.	125
5.3.2. Económicas.	126
5.3.3. Ecológicas.	127
5.3.4. Sociales.	127
5.4. Desventajas.	128
5.4.1. Energéticas.	128
5.4.2. Económicas.	128
5.4.3. Ecológicas.	128
5.4.4. Sociales.	129
6. Conclusiones.	130
Glosario.	134
Apéndice.	143
Índice de Figuras.	143
Índice de Tablas.	146
Bibliografía.	147

INTRODUCCIÓN.

En la actualidad se puede observar una tendencia a investigar y crear nuevas tecnologías para poder hacer uso de nuevas fuentes de energía distintas a las convencionales. Hay un particular interés en aquellas que son renovables.

Ese interés no es solamente por el cuidado del medio ambiente, que por sí solo es un buen motivo, sino también por el diversificar las fuentes de energía y no depender de unas pocas como aquellas que utilizan combustibles fósiles, los cuales han sido explotados con mucha rapidez para poder atender el desarrollo de la sociedad.

Es posible que en un futuro próximo las energías renovables lleguen a ser el principal suministro de energía que requiere la humanidad. Así, estas energías como la eólica, la solar, la mareomotriz y otras más jugarán un papel muy importante en el desarrollo de las naciones.

Es por lo anterior que este trabajo intenta exponer los aspectos de una de estas energías renovables: la *energía mareomotriz*. De tal manera que ayude a entender este tipo de energía y su aprovechamiento tanto a nivel mundial como en nuestro país. Para ello, en el primer capítulo se expondrán brevemente desde los orígenes de la energía eléctrica hasta las nuevas tendencias de generación en México. En el capítulo siguiente se expondrá el mosaico de posibilidades de generación de electricidad que hay.

De manera específica, en el capítulo 3, se explicarán todos los aspectos necesarios para entender el aprovechamiento de la energía de las mareas; prestando atención en las experiencias internacionales, con sus problemas, soluciones, ventajas y desventajas particulares de esta fuente de energía.

Para el caso de México, el cuarto capítulo tratará de los lugares que pueden ser utilizados para el aprovechamiento de la energía de las mareas, dando información que deberá ser considerada para su estudio y desarrollo. Con lo que, finalmente, en el quinto capítulo se propondrá un lugar para su implementación; incluyendo información particular de la región propuesta. Siempre tomando en consideración las ventajas y desventajas que pueden presentarse.

Así, presentamos este trabajo no para buscar en la energía mareomotriz a *la mejor energía*, sino una opción a considerarse en el país.

1. ANTECEDENTES.

El fenómeno de la electricidad ha sido de interés desde épocas remotas. Así, el estudio de este fenómeno está presente desde la antigua Grecia, donde se trataban de explicar el origen de este fenómeno, hasta los tiempos actuales en donde la humanidad trata de crearla a gran escala, barata, eficiente y ecológicamente.

1.1. ORÍGENES DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

Los primeros descubrimientos de los cuales se tiene noticia en relación con los fenómenos eléctricos, fueron realizados por los griegos en la Antigüedad. El filósofo y matemático *Tales*, que vivió en la ciudad de Mileto en el siglo V a.C., observó que un trozo de ámbar, después de ser frotado con una piel de animal, adquiría la propiedad de atraer cuerpos ligeros, como trozos de paja y pequeñas semillas.

Hasta después de 2000 años comenzaron a realizarse observaciones sistemáticas y cuidadosas de los fenómenos eléctricos, entre los cuales destacan los trabajos del científico inglés *William Gilbert*. Este científico observó que algunos cuerpos, como el ámbar, al frotarlos se ejerce una atracción que se manifiesta sobre cualquier otro cuerpo, aun cuando no sea ligero.

La designación griega para el ámbar es “elektron”, *Gilbert* comenzó a usar el término “eléctrico” para referirse a todo cuerpo que se comportaba como el ámbar, con lo cual surgieron las expresiones: “electricidad”, “electrizar”, “electrización”, etc.

En el siglo XVII, el científico francés *Francisco Dufay* experimentó y concluyó que existen materiales conductores y aislantes.

Durante el transcurso del siglo XVIII, los experimentos con cuerpos electrizados se volvieron muy populares y eran realizados en plazas públicas, con resultados espectaculares. Alguien que se sintió atraído por el fenómeno fue el científico estadounidense *Benjamín Franklin*. Este científico comenzó a realizar un gran número de experimentos que contribuyeron al desarrollo de la electricidad. Una importante aportación fue su “teoría del fluido único”, la cual introduce los conceptos de “carga positiva” y “carga negativa”.

Muchos avances tecnológicos sucedieron y se crearon necesidades humanas. Así, hace poco más de cien años no existía el concepto de servicio eléctrico ni existían tampoco las grandes obras para generar, transmitir y distribuir energía eléctrica; ni los aparatos electrodomésticos, ni los equipos industriales o los sistemas de telecomunicaciones que consumen electricidad, tampoco las empresas eléctricas. La iluminación se llevaba a cabo con velas y/o lámparas de gas. La fuerza mecánica del viento, el agua y el vapor era lo que mantenía activa a la industria. Todo era muy distinto hasta que la generación de electricidad a gran escala cambió a la sociedad y su entorno.

Con la invención del generador eléctrico en 1831 y la evolución de éste, hizo que Inglaterra, Francia y Alemania convirtieran sus instalaciones hidromecánicas en las primeras centrales hidroeléctricas de la historia. Casi medio siglo después, en 1876 la aparición de las lámparas de arco eléctrico, y posteriormente las incandescentes, permitieron que la iluminación artificial fuera con energía eléctrica. Modalidad bien recibida, debido a la seguridad que implicaba el no tener sistemas que provocaran incendios, explosiones y gases nocivos para la salud, debido a que se dejaron de usar sustancias volátiles para dicho fin.

Con el propósito de comercializar los servicios de iluminación, en 1881 se crearon las primeras empresas eléctricas: *Swan Electric Light Co.* y *Edison Electric Co.* Empresas que generaban electricidad con sistemas que hoy podrían llamarse pequeñas centrales hidroeléctricas y termoeléctricas.

La nueva forma de energía creó su propio mercado y la demanda se acrecentó, con lo cual empezaron a crearse los grandes sistemas eléctricos como se conocen actualmente. Esto fue acompañado por avances en la ingeniería de los sistemas y por la incorporación de nuevos materiales y nuevas técnicas que permitieron construir turbinas y generadores de mayor tamaño y eficiencia. A la vez, el crecimiento de los sistemas abarataba el costo de la generación y esto se veía reflejado en las ganancias de las empresas.

La primera central importante de corriente alterna se instaló en Gran Bretaña en donde la energía se generaba mediante máquinas de 10,000 HP y se transmitía a 10 kV a los consumidores de Londres. Al invento del transformador prevalecieron los defensores de la corriente alterna y comenzó un rápido desarrollo de las centrales generadoras de electricidad locales de modo que cada ciudad o centro en el cual se consumía una cantidad importante de energía eléctrica tenía su propia central en funcionamiento.

1.2. DESARROLLO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO.

El primer periodo se ubica en 1879 cuando se construyó la primer planta hidroeléctrica que consistía en un generador sencillo en la fábrica de textiles denominada *La Americana* en León, Guanajuato, posteriormente fue utilizado el fluido eléctrico para la operación de desagüe. Las primeras plantas generadoras tenían el propósito de satisfacer necesidades concretas de la industria. Gradualmente, diversos sectores industriales comenzaron a demandar energía eléctrica, al constatar que sus procesos productivos mostraban incrementos importantes en eficiencia, de manera que el servicio empezó a generalizarse.

Es así que, a principios del siglo pasado, la industria eléctrica estaba constituida por empresas particulares que estaban buscando satisfacer las necesidades propias de las industrias textil y minera. La electricidad era distribuida de manera regional, por lo tanto se habían constituido un centenar de empresas monopólicas verticalmente integradas que atendían las necesidades de los principales centros de consumo del país. La creciente demanda por electricidad, rápidamente superó la capacidad de las pequeñas plantas generadoras, propiciando la formación de empresas suministradoras de electricidad. La demanda del servicio eléctrico continuaba en ascenso y era controlada por unas cuantas

compañías, en 1920 el país contaba con 199 compañías con inversionistas extranjeros, así que la energía eléctrica comenzó a concebirse como un instrumento fundamental para el desarrollo económico y social del país.

La ausencia de un marco normativo e institucional capaz de regular la generación, transmisión y distribución de la electricidad, se reflejó en un suministro desigual que prácticamente excluía a las zonas rurales de los beneficios de la energía eléctrica. Desde 1934, respondiendo a las necesidades en regulación, el *H. Congreso de la Unión* cuenta entre sus facultades, la relativa a la legislación en materia de energía eléctrica, con lo que en 1937, atendiendo a la necesidad de ampliar el servicio eléctrico a las zonas donde no existía rentabilidad en proyectos, se crea la *Comisión Federal de Electricidad (CFE)*.

Sin embargo la industria eléctrica continúa operando con participación de empresas privadas nacionales y extranjeras, y del gobierno, en generación, distribución local y comercialización. En 1960 el presidente *Adolfo López Mateos*, modifica el artículo 27 constitucional en su párrafo sexto, estableciendo como un derecho exclusivo de la nación mexicana generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer de energía eléctrica al país. Asimismo, se prohíbe el otorgamiento de concesiones a los particulares y se reserva a la Nación el aprovechamiento de los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines.

No obstante la demanda ha ido obligando a incrementar la capacidad de generación eléctrica, y es así que en 1992 se reforma la *Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica*, para abrir posibilidades de inversión privada nacional y extranjera a través de los esquemas de autoabastecimiento y cogeneración, preservando, como responsabilidad del estado, el servicio público de energía eléctrica.

Ante la posibilidad de que el sector privado construyera, operara y tuviera en propiedad plantas de generación de energía eléctrica previamente reservadas al estado, fue necesario para satisfacer la creciente necesidad de recursos económicos para continuar con la expansión y modernización del sector eléctrico nacional, y principalmente para garantizar el servicio público de energía eléctrica. En diciembre de 1993 se publicó el *Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica*, con el objeto de reglamentar la Ley en lo que se refiere a la prestación del servicio público de energía eléctrica y a las actividades previstas en la propia Ley que no se consideran servicio público y uso temporal de la red del Sistema Eléctrico Nacional.

De igual forma, con la expedición de la *Ley de la Comisión Reguladora de Energía* en 1995, se le otorgó mayor autonomía de gestión, así como mayor capacidad técnica y administrativa y se inició el proceso de integración de un marco regulatorio vigente en gas natural y electricidad, a través del cual se brinda transparencia y certidumbre en la aplicación de la política energética nacional y el fomento a la participación privada.

En 1999 el presidente *Ernesto Zedillo* propone la privatización de la industria debido a que el estado ya no puede con el constante crecimiento que requiere el sector eléctrico y el gobierno no puede destinar recursos públicos para este sector. En el 2001 el presidente *Vicente Fox* envía una nueva propuesta anunciando que no privatizará la industria eléctrica

pero existirán algunos cambios estructurales entre ellos la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.

Con la reforma, se ha logrado desarrollar un gran número de nuevos proyectos de generación y transmisión eléctricos. No obstante, el Gobierno Federal no ha logrado que se produzcan inversiones suficientes para modernizar el sector eléctrico, pues en su mayoría, la participación ha sido de los *Productores Independientes de Energía (P.I.E.)*, los cuales celebran contratos de compraventa por 25 años para vender la totalidad de su producción a Comisión Federal de Electricidad. De manera que estos esquemas y los de Construcción-Arrendamiento-Transferencia (CAT), sólo han sido una solución transitoria para el financiamiento de nueva infraestructura, debido a que estos contratos constituyen pasivos contingentes para el Estado, y su efecto en las cuentas públicas es similar a la emisión de deuda pública.

1.3. ESTADO ACTUAL DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO.

La provisión del Servicio de Energía Eléctrica en gran escala consta principalmente de las siguientes actividades: *Generación, Despacho, Transmisión, Distribución y Comercialización*. Estas actividades, por disposición de ley son competencia exclusiva de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de Luz y Fuerza del Centro (LFC), cuando tengan por objeto la prestación del servicio público. CFE tiene a su cargo la prestación del Servicio Público de Energía Eléctrica en todo el Territorio Nacional, salvo en el Distrito Federal y parte de los estados de México, Morelos, Hidalgo y Puebla, áreas atendidas por LFC. Actualmente ambos organismos públicos atienden a 25 millones de usuarios.

La capacidad actual de generación de energía eléctrica del sector en su conjunto es de 50,679 MW, de la cual, el 74.0% corresponde a CFE, 1.7% a LFC, 3.9% a Petróleos Mexicanos (PEMEX), 14.3% a PIE, 4.3% a Autoabastecimiento, y 1.8% a Cogeneración, como se muestra en la tabla 1.1.

	MW	%
CFE	37,512	74.0
LFC	834	1.7
PEMEX	1,973	3.9
PIE	7,265	14.3
AUTOABASTECIMIENTO	2,185	4.3
COGENERACIÓN	909	1.8
TOTAL	50,679	100.0

Nota: Con información obtenida de la Secretaría de Energía (<http://www.sener.gob.mx>) a mayo de 2004.

Tabla 1.1: Capacidad instalada en México.

Hoy en día la expansión y modernización del Sector Eléctrico Nacional radica prácticamente en los ingresos públicos disponibles. A su vez, dichos ingresos públicos tienen una relación estrecha con el Producto Interno Bruto (PIB), ya que la disponibilidad de recursos públicos guarda una dependencia significativa con el desempeño económico del país.

Actualmente, el *Sistema Eléctrico Nacional (SEN)* se divide en ocho áreas de Control: *Central, Oriental, Occidental, Noroeste, Norte, Noreste, Peninsular, Baja California (Norte y Sur)* (figura 1.1) y 9 áreas de Transmisión: *Central, Oriental, Sureste, Occidental, Noroeste, Norte, Noreste, Peninsular, Baja California (Norte y Sur)*. Con excepción del área Baja California, todas las demás operan interconectadas y forman el Sistema Interconectado Nacional (SIN), con el fin de compartir recursos de capacidad y obtener así una operación más económica y confiable del sistema eléctrico, como se muestra en la figura 1.2.

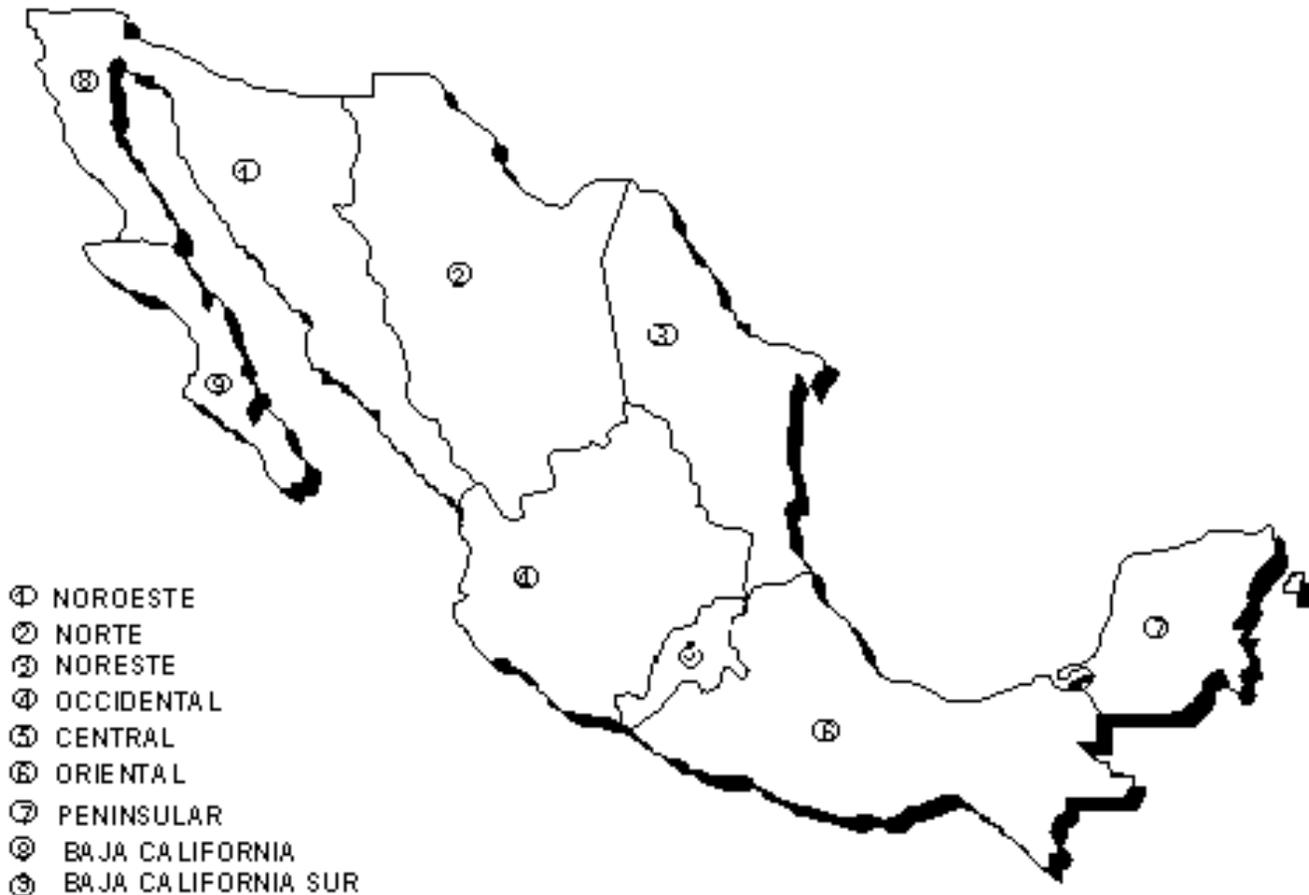


Figura 1.1: Áreas de Control del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). [58]

Por otro lado, las áreas de Baja California permanecen como sistemas independientes, debido a que actualmente no se justifica su interconexión, por razones técnicas, económicas y geográficas con el resto de la red nacional. El sistema de Baja California opera interconectado con la red eléctrica de la región Occidental de Estados Unidos por medio de dos líneas de transmisión de 230 kV, mediante las cuales CFE realiza transacciones comerciales de capacidad y energía con ese país.

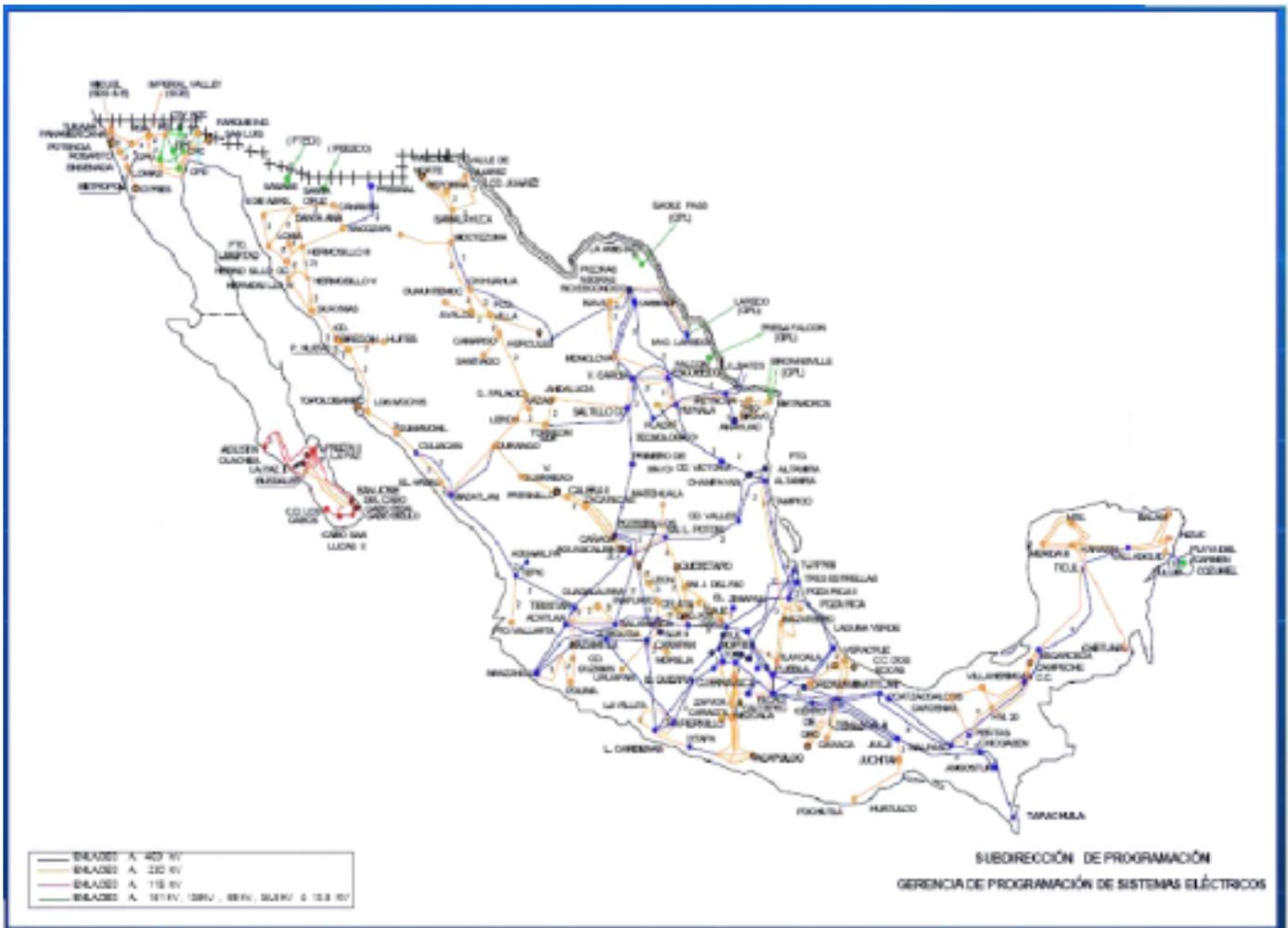


Figura 1.2: Sistema Interconectado Nacional (SIN). [58]

1.4. TENDENCIAS EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

La producción y el uso de la energía eléctrica han sido muy importantes a través de la historia del hombre contemporáneo, sin embargo, los combustibles que actualmente permiten la mayor parte de la generación eléctrica mundial no son renovables y poco a poco se van agotando, lo que lleva a pensar en diferentes opciones para continuar con esta actividad. Por lo cual el uso de recursos energéticos que sean casi inagotables, baratos y no contaminantes es una combinación de características que se busca para la producción de electricidad y para el bien de la humanidad.

Los combustibles fósiles resultan caros, contaminan y comenzarán a escasear. En la actualidad la mayor parte de la energía proviene de la quema de estos tipos de combustibles. Además, una gran cantidad de impactos ambientales y a la salud humana se han generado durante las actividades de exploración, extracción y preparación de estos recursos; de igual forma, durante la etapa de generación de.

Debido a lo anterior y tomando en cuenta que el uso de cualquier tecnología tiene beneficios o perjuicios a la vez, las empresas generadoras de energía eléctrica toman más en serio el concepto de *desarrollo sustentable*; lo cual engloba la capacidad de satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de satisfacer las propias necesidades de las generaciones futuras. Así, dos de los principios fundamentales del desarrollo sustentable son el no agotamiento de los recursos y el no deterioro del medio ambiente y la salud de los seres vivos.

De esta manera, la tendencia en este momento es la de buscar nuevas fuentes de energía que sean además de rentables, limpias y prácticamente inagotables. Es decir, se busca desarrollar y aplicar tecnología para explotar las energías renovables.

2. FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.

La generación de energía puede clasificarse por su carácter de disponibilidad; o bien por su carácter de utilización por la sociedad, como se explica a continuación.

Fuentes de Energía.

Las fuentes de energía se pueden clasificar según su disponibilidad:

- a) Renovables.
- b) No Renovables.

También pueden clasificarse según la importancia y el uso que les dan las sociedades humanas:

- a) Convencionales.
- b) No Convencionales.

Fuentes de Energía Renovables.

Las energías renovables son aquellas que provienen de fuentes naturales capaces de regenerarse y que en escalas de tiempo real parecen ser inagotables. Así tenemos como fuentes de energía renovable:

- Energía Hidráulica.
- Energía Solar.
- Energía de la Biomasa.
- Energía del Mar.
- Energía Eólica.
- Energía Geotérmica.

Fuentes de Energía No Renovables.

Las fuentes de energía no renovables son las que se encuentran en forma limitada en nuestro planeta y se agotan a medida que se les consume. En este caso tenemos:

- El Carbón.
- El Petróleo.
- El Gas.
- La Energía Nuclear.

Fuentes de Energía Convencionales.

Las fuentes de energía convencionales son aquellas que son o fueron usadas predominantemente por las sociedades humanas. En este sentido, son fuentes energéticas convencionales:

- El Petróleo.
- El Gas.
- El Carbón.
- La Energía Hidráulica.
- La Energía Nuclear.

Fuentes de Energía No Convencionales.

Las fuentes energéticas no convencionales son las que en su mayoría fueron desarrolladas hace pocos años o aún están siendo desarrolladas, y que su uso, por lo general, aún no es masivo y no confiable como la energía convencional. Las fuentes de energía no convencionales que podemos mencionar son:

- La Energía Eólica.
- La Energía Solar.
- La Energía Geotérmica.
- La Energía de la Biomasa.
- La Energía del Mar.

2.1. FUENTES CONVENCIONALES.

2.1.1. PETRÓLEO.

Constituye uno de los elementos líquidos más peligrosos del planeta, no por su naturaleza en sí, sino por el catastrófico uso que de él hace el hombre. La contaminación que provoca se manifiesta de varias formas: desde la extracción del crudo y la combustión, hasta los residuos.

El crudo

En la extracción se vierte parte del petróleo directamente al espacio que rodea la prospección. Esto es especialmente dañino cuando se trata de extracciones en mar abierto.

El transporte es especialmente perjudicial y contaminante por la diversidad de situaciones y circunstancias que suelen ocurrir, por los obsoletos e inseguros medios e infraestructuras que intervienen y por las grandes cantidades de crudo que se manejan ordinariamente.

Se presentan algunas de las principales consecuencias de este conjunto de circunstancias:

- Las operaciones de carga y descarga de crudo causan vertidos incontrolados en las localidades donde se producen.
- Los grandes petroleros sufren con demasiada frecuencia graves accidentes que de nuevo tienen como fatal consecuencia el vertido al mar.
- Las embarcaciones petroleras han de limpiar sus depósitos periódicamente para mantener una mínima garantía de calidad en el transporte. Para ello se introducen grandes cantidades de jabón, que después será expulsado directamente al mar

mezclado con los restos de crudo que contenían.

El petróleo, una vez en contacto con el agua, tenderá a flotar, lo que provocará, entre otros, los siguientes efectos:

- Rechazo de los rayos de sol.
- Dificultad de evaporación del agua, lo que condiciona la formación de nubes y, como consecuencia final, produce una modificación del microclima en la zona.
- Impide la renovación del oxígeno del agua.
- Ocasiona la formación de alquitrán, especialmente en los grandes vertidos debido a que las bacterias no han tenido el suficiente tiempo para asimilar los componentes del petróleo.
- La capa de crudo termina cubriendo la playa, lo que provoca:
 1. La muerte de toda la micro fauna de la zona. Estos microorganismos filtran y renuevan la arena, asimilando a la vez materia orgánica. Su desaparición desencadena el proceso de eutrofización y el deterioro general del medio.
 2. La pérdida de la capacidad de la arena para renovar y filtrar el agua del mar.
 3. La capa de hidrocarburos se pega al plancton y envenena a moluscos, crustáceos, peces y al hombre, cerrando así, el círculo de la contaminación a través de la cadena trófica y devolviendo al hombre su propio desecho contaminado.
 4. Las aves marinas también sufren las consecuencias. El alquitrán se deposita en su plumaje, lo que desencadena su muerte por intoxicación o ahogadas.

La Combustión

La combustión de derivados del petróleo, tanto en el transporte, como en las calderas de calefacción, o en las centrales térmicas, tiene como efecto inmediato la producción de elementos químicos, como el Dióxido de Azufre (SO₂), y el Dióxido de Nitrógeno (NO₂) que causan problemas ambientales como la *lluvia ácida*; el Dióxido de Carbono (CO₂) que causa el *efecto invernadero*; y, compuestos orgánicos volátiles.

El Efecto Invernadero: la emisión de determinados elementos químicos (CO₂) produce una barrera artificial en la atmósfera capaz de permitir el paso de la energía solar y a la vez retener la energía despedida por el planeta. Esta circunstancia provoca una aclimatación, parecida a la que ocurre en los invernaderos, cuyos efectos son:

- Modificación del clima.
- Desaparición de millones de ecosistemas.
- Alteración de los sistemas depurativos y defensivos del planeta.

La Lluvia Ácida: el agua de las nubes capta los elementos químicos producidos en la combustión de hidrocarburos (derivados del petróleo y el gas) y en la emisión de gases industriales, lo que produce una acidificación de las nubes y la posterior precipitación de elementos ácidos. Este proceso tiene como consecuencias directas:

- La caída de hojas y la inhibición del crecimiento en la vegetación.
- La pérdida de hábitat para la fauna.
- La acidificación del suelo, lo que afecta a los sistemas de nutrición de las cadenas tróficas primarias.
- La contaminación de aguas subterráneas y superficiales, que influye en la alimentación de animales y plantas, integrantes de cadenas tróficas secundarias.
- Empobrecimiento de la diversidad biológica.
- Contaminación acústica.
- Efecto bioacumulativo del plomo contenido en los carburantes, causante de patologías humanas graves.

Los Residuos

Una de las características más representativas del petróleo, como producto de consumo, es su capacidad de transformarse en residuos, generalmente poco degradables por los procesos degenerativos naturales. Sus manifestaciones más características son:

- Aceites usados.
- Desechos de maquinaria industrial.
- Alquitranes y grasas varias.
- Desmantelado de vehículos.
- Plásticos y en general todos aquellos productos que proceden directa o indirectamente de la industria del petróleo, etc.

2.1.2. GAS.

Constituye un tipo de energía no renovable, ligado muy directamente a la industria del petróleo, aunque las consecuencias derivadas de su consumo son menos perjudiciales para el entorno natural. En realidad, debido a su menor impacto, se podría utilizar como una energía de tránsito, capaz de sustituir con éxito al carbón y al petróleo, a corto o mediano plazo, hasta alcanzar un óptimo desarrollo y aplicación de las energías limpias. Esto representaría un freno a la dependencia hacia electricidad y petróleo y una reducción importante en la emisión de contaminantes. A continuación se enlistan sus ventajas e inconvenientes:

1. Ventajas:

- Rendimiento energético alto.
- Suministro continuo por medio de gasoductos, que no obliga a almacenamientos ni se arriesga a desabastecimientos. Reserva mundial alta (superior a la del petróleo), pero limitada.
- Menor contaminación directa, debido a que no contiene azufre. Menor contaminación indirecta, pues no necesita transporte por carretera.

2. Inconvenientes:

- No es una fuente energética renovable.
- La instalación de conductos produce impactos ambientales, aunque limitados.
- Genera elementos químicos en la combustión, aunque en menor proporción y con menor incidencia que los generados por el petróleo.
- En algunos casos, dependencia ante otras naciones que suministran esta fuente de energía.

2.1.3. CARBÓN.

Es un combustible fósil y sólido que se encuentra en el subsuelo de la corteza terrestre y que se ha formado a partir de la materia orgánica de los bosques del periodo Carbonífero, en la Era Primaria.

La explotación del carbón representa un múltiple y acusado impacto sobre el medio ambiente, clasificándose básicamente en las siguientes modalidades:

Impacto minero

- Consumo de recursos naturales como el carbón, el agua, la tierra y el aire.
- Producción de residuos potencialmente negativos (escorias, polvos, etc.).
- Desde el punto de vista de la seguridad e higiene, el trabajo en minas de carbón puede producir Silicosis, entre otras enfermedades.
- En caso de minas a cielo abierto, el sistema de producción utilizado supone la excavación de un hueco en la tierra que destruye de forma importante el paisaje y modifica el ecosistema en el que se implanta.
- Contaminación de aguas utilizadas para el lavado del carbón.
- La acumulación de escorias también es causante de contaminación por filtraciones hacia las aguas subterráneas.
- Las explotaciones mineras desestabilizan las tierras de superficie, facilitando la erosión por las aguas de escorrentía.

Impacto de centrales térmicas

- Gases emitidos en la combustión de carbón (que en el proceso pueden haberse añadido conjuntamente al petróleo o gas natural), como son el Dióxido de Azufre (SO₂) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂), que contribuyen directamente a aumentar la *lluvia ácida*; y, el Dióxido de Carbono (CO₂) causa el *efecto invernadero*. Además, se presenta la contaminación de los nutrientes del suelo y aguas de escorrentía, etc.
- Emisión de cenizas y polvo.
- Dispersión a grandes distancias de las partículas tóxicas emitidas.
- Contaminación de aguas utilizadas para reposición, almacenamiento y refrigeración de cenizas procedentes de la combustión.
- Tratamientos agresivos sobre el agua, para combatir las incrustaciones producidas en los equipos y componentes de la central.

2.1.4. ENERGÍA HIDRÁULICA.

Es aquella energía obtenida principalmente de las corrientes de agua de los ríos. El agua de un río se almacena en grandes embalses artificiales que se ubican a gran altura respecto a un nivel de referencia. Buscando con esto, almacenar grandes cantidades de energía potencial, la cual podrá transformarse, a través de elementos mecánicos o eléctricos, en otro tipo de energía, incluyendo la eléctrica (figura 2.1).

Constituye un sistema energético de los denominados renovables, pero debido al elevado impacto ambiental y humano que causan las presas y embalses, merecen ser considerados en un punto intermedio entre las energías limpias y las contaminantes.

Esta modalidad energética es aceptable ecológicamente, cuando se acepta la construcción de “mini-presas”, cuyo principio de funcionamiento es idéntico al de los grandes embalses y; sin embargo, su impacto ambiental es reducido aunque es menor su rendimiento.

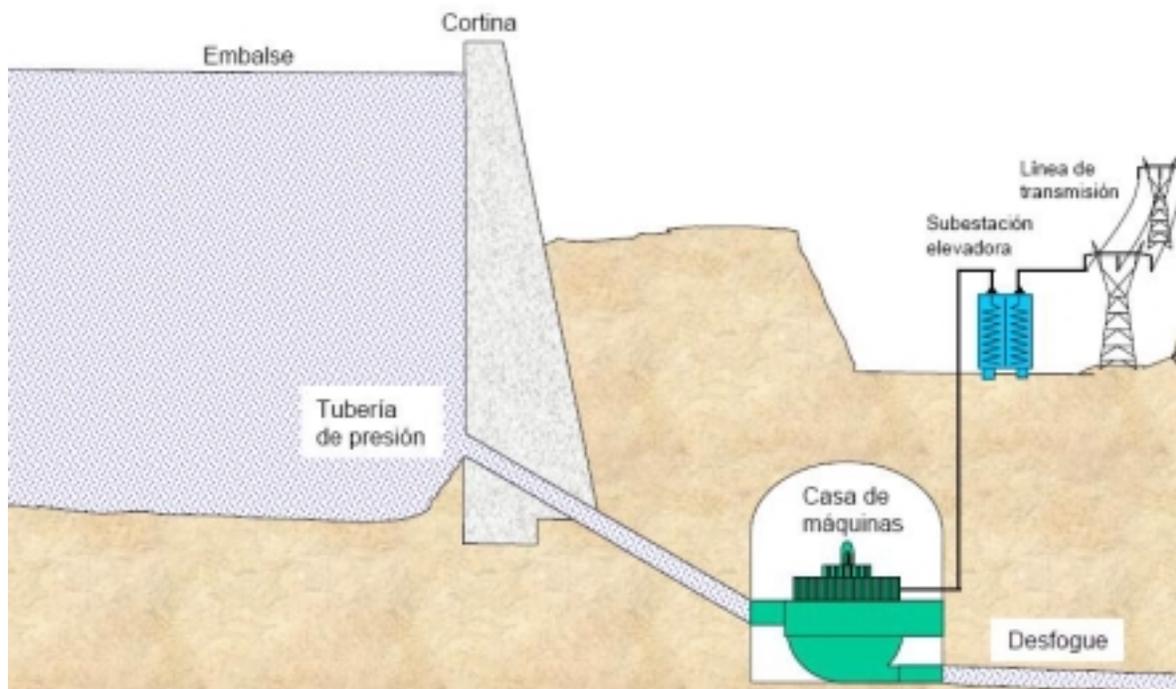


Figura 2.1: Central hidroeléctrica. [10]

2.1.5. ENERGÍA NUCLEAR.

Las cantidades de energía liberada durante la fisión o fusión de núcleos atómicos superan con mucho a las que pueden lograrse mediante procesos químicos, que sólo implican las regiones externas del átomo. La razón, es que en las reacciones nucleares se pierde masa

que es convertida en energía. Recuérdese que según *Einstein*, $E=mc^2$, en la que E es energía, m es la masa y c , la velocidad de la luz. Con esta fórmula se puede saber la cantidad de energía que tiene una masa, aunque no todas las masas son válidas para ser transformadas en energía.

Fisión nuclear.

El sistema más usado para generar energía nuclear utiliza el uranio como combustible. En concreto se usa el isótopo 235 del uranio que es sometido a fisión nuclear en los reactores. En este proceso el núcleo del átomo de uranio (U-235) es bombardeado por neutrones y se rompe originándose dos átomos de un tamaño aproximadamente mitad del de uranio y liberándose dos o tres neutrones que inciden sobre átomos de U-235 vecinos, que vuelven a romperse, originándose una reacción en cadena.

La fisión controlada del U-235 libera una gran cantidad de energía que se usa en la planta nuclear para convertir agua en vapor. Con este vapor se mueve una turbina que genera electricidad (figura 2.2).

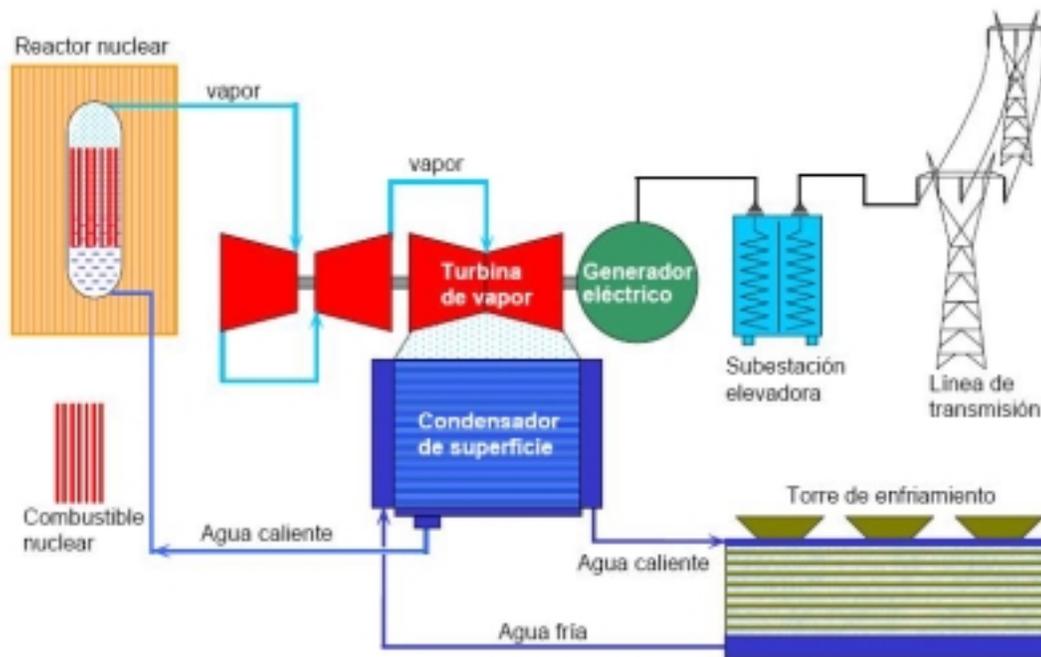


Figura 2.2: Central Nuclear. [10]

El mineral de uranio se encuentra en la naturaleza en cantidades limitadas. Es por tanto un recurso no renovable. Suele hallarse casi siempre junto a rocas sedimentarias. Hay depósitos importantes de este mineral en Norteamérica (27.4% de las reservas mundiales), África (33%) y Australia (22.5%).

El mineral del uranio contiene tres isótopos: U-238 (99.28%), U-235 (0.71%) y U-234 (menos que el 0.01%). Dado que el U-235 se encuentra en una pequeña proporción, el mineral debe ser enriquecido (purificado y refinado), hasta aumentar la concentración de U-235 a un 3%, haciéndolo así útil para la reacción.

El uranio que se va a usar en el reactor se prepara en pequeñas pastillas de dióxido de uranio de unos milímetros, cada una de las cuales contiene la energía equivalente a una tonelada de carbón. Estas pastillas se ponen en varillas, de unos 4 metros de largo, que se reúnen en grupos de unas 50 a 200 varillas. Un reactor nuclear típico puede contener unas 250 de estas agrupaciones de varillas.

Fusión nuclear.

Cuando dos núcleos atómicos (por ejemplo de hidrógeno) se unen para formar uno mayor (por ejemplo helio) se produce una reacción nuclear de fusión. Este tipo de reacciones son las que se están produciendo en el sol y en el resto de las estrellas, emitiendo gigantescas cantidades de energía.

Muchas personas que apoyan la energía nuclear ven en este proceso la solución al problema de la energía, pues el combustible que requiere es el hidrógeno, que es muy abundante. Además es un proceso que, en principio, produce muy escasa contaminación radiactiva.

La principal dificultad es que estas reacciones son muy difíciles de controlar porque se necesitan temperaturas de decenas de millones de grados centígrados para inducir la fusión y todavía, a pesar de que se está investigando con mucho interés, no hay reactores comerciales de fusión trabajando en ningún sitio.

Repercusiones ambientales de la energía nuclear.

Una de las ventajas que los defensores de la energía nuclear le encuentran es que es mucho menos contaminante que los combustibles fósiles. Comparativamente las centrales nucleares emiten muy pocos contaminantes a la atmósfera.

Los que se oponen a la energía nuclear argumentan que el hecho de que el carbón y, en menor medida el petróleo y el gas, sean sucios no es un dato a favor de las centrales nucleares. Que lo que hay que lograr es que se disminuyan las emisiones procedentes de las centrales que usan carbón y otros combustibles fósiles, lo que tecnológicamente es posible, aunque encarece la producción de electricidad

Es la fuente energética de mayor poder, aunque no la más rentable. Sus dos principales problemas son:

- Desechos radiactivos de larga vida.
- Alta potencialidad aniquiladora en caso de accidente. Aunque en toda la historia de la energía nuclear, sólo han ocurrido dos accidentes de este tipo: Chernobyl y la Isla Tres Millas. Es importante señalar que la energía nuclear tiene menor número de

muerres y daños por unidad de energía generada que el resto de las energías convencionales.

El estudio de su impacto ambiental debe llevarse a cabo, analizando todo el proceso de producción de la energía nuclear.

La extracción del mineral provoca la contaminación por:

- Sólidos: estériles de minería, que por su pobre concentración en Uranio son desechados, aunque sean radiactivos.
- Líquidos: aguas superficiales y subterráneas, que por procesos de lixiviación (filtración), arrastran los materiales de la mina.
- Gases: Radón, gas radiactivo, que se libera a la atmósfera una vez abierta la mina y que entre en contacto directo con los mineros.

El proceso de concentrado y enriquecimiento se realiza en plantas de tratamiento, que generan idénticos desechos que en el proceso de extracción, pero en diferentes concentraciones. Una vez enriquecido el Uranio, está en disposición de ser utilizado como combustible en centrales de producción eléctrica nuclear.

2.2. FUENTES NO CONVENCIONALES.

2.2.1. ENERGÍA EÓLICA.

Los molinos de viento se han usado desde hace muchos siglos para moler el grano, bombear agua u otras tareas que requieren energía. En la actualidad, sofisticados molinos de viento se usan para generar electricidad, especialmente en áreas expuestas a vientos frecuentes, como zonas costeras, en las alturas de las zonas montañosas o islas.

La fuente de energía eólica es el viento, o mejor dicho, la energía mecánica que, en forma de energía cinética transporta el aire en movimiento. Cuando una masa de aire m se mueve con una velocidad v , su energía cinética viene dada por la expresión:

$$E_c = 1/2mv^2 \text{ [J]}$$

La masa de aire, de densidad ρ , que pasa por la unidad de tiempo (caudal másico, M) a través de una sección de área perpendicular a su dirección, S , vale:

$$M = \rho Sv \text{ (k/s)}$$

Así pues, la energía eólicamente recuperable por unidad de tiempo, o sea, la potencia teórica, P_t será:

$$P_t = 1/2 M v^2 = 1/2 \rho Sv^3 \text{ [W]}$$

De aquí la importancia que la potencia obtenible, no sólo depende del área de las superficies captadoras, si no de forma mucho más acusada de la velocidad del viento.

El viento es originado por el desigual calentamiento de la superficie de nuestro planeta, originando movimientos convectivos de la masa atmosférica.

La Tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol. Esta energía, en lugares favorables, puede ser del orden de 2000 kWh/m^2 anuales. El 2% de ella se transforma en energía eólica con un valor capaz de dar una potencia de 10^{11} GW a nivel mundial. En la antigüedad no se conocían estos datos, pero lo que sí es cierto, es que intuitivamente conocían el gran potencial de esta energía.

Las formas de mayor utilización son las de producir energía eléctrica y mecánica, bien sea para autoabastecimiento de electricidad o bombeo de agua. Siendo un aerogenerador (figura 2.3) lo que accionan un generador eléctrico y un aeromotor los que accionan dispositivos, para realizar un trabajo mecánico.



Figura 2.3: Conjunto aerogenerador. [83]

Partes de un aerogenerador:

- Cimientos, generalmente constituidos por hormigón en tierra, sobre el cual se atornilla la torre del aerogenerador.
- Torre, fijada al suelo por los cimientos, proporciona la altura suficiente para evitar turbulencias y superar obstáculos cercanos; la torre y los cimientos son los encargados de transmitir las cargas al suelo.

- Chasis (figura 2.4), es el soporte donde se encuentra el generador, sistema de frenado, sistema de orientación, equipos auxiliares (hidráulico), caja de cambio, etc. Protege a estos equipos del ambiente y sirve, a su vez, de aislante acústico.
- El buje, pieza metálica de fundición que conecta las palas al eje de transmisión.
- Las palas, cuya misión es la de absorber energía del viento; el rendimiento del aerogenerador depende de la geometría de las palas, interviniendo varios factores:
 - Longitud
 - Perfil
 - Calaje
 - Anchura

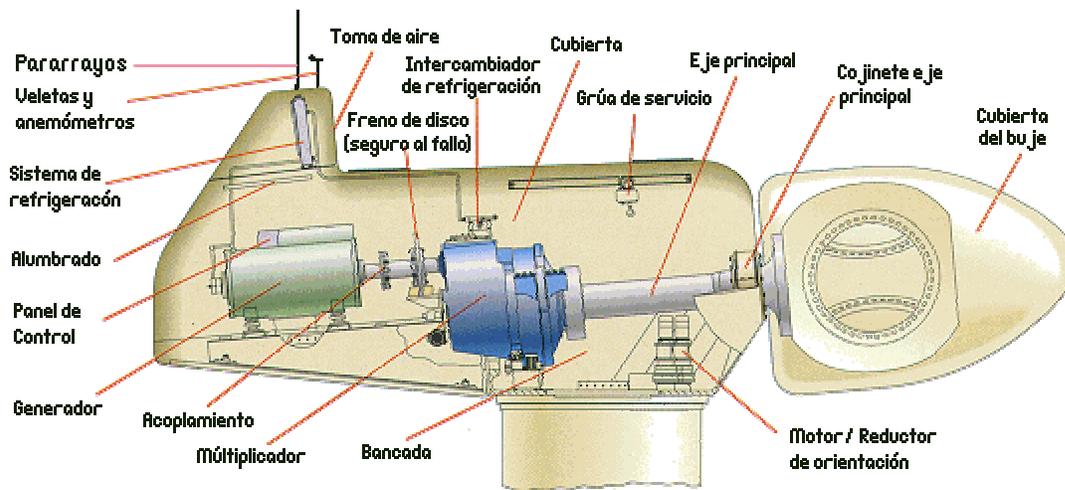


Figura 2.4: Partes constitutivas del chasis de un aerogenerador. [128]

Sistemas de un aerogenerador:

- Orientación, mantiene el rotor cara al viento, minimizando los cambios bruscos de dirección del rotor con los cambios de dirección de viento. Estos cambios de dirección provocan pérdidas de rendimiento y genera grandes esfuerzos con los cambios de velocidad.
- Regulación, controla la velocidad del rotor y el par motor en el eje del rotor, evitando fluctuaciones producidas por la velocidad del viento.
- Transmisión, utilizados para aumentar la velocidad de giro del rotor, para poder accionar un generador de corriente eléctrica, es un multiplicador, colocado entre el rotor y el generador.
- Generador, para la producción de corriente continua (DC) dinamo y para la producción de corriente alterna (AC) alternador, este puede ser síncrono o asíncrono.

El impacto ambiental de este sistema de obtención de energía es bajo. Es sobre todo estético, porque deforman el paisaje, aunque también hay que considerar la muerte de aves por choque con las aspas de los molinos.

2.2.2. ENERGÍA SOLAR.

En un principio, la energía solar es la energía radiante producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión. Llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del Sol, se llama constante solar, y su valor medio es $1.37 \times 10^6 \text{ erg/s/cm}^2$, o unas 2 cal/min/cm^2 , de otro modo 1367 W/m^2 . Sin embargo, esta cantidad no es constante, ya que parece ser que varía un 0.2% en un periodo de 30 años. La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera.

La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende, de forma complicada pero predecible, del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía solar que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor.

El aprovechamiento directo de la energía del sol se hace de diferentes formas:

a) Calentamiento directo de locales por el sol: En invernaderos, viviendas y otros locales, se aprovecha el sol para calentar el ambiente. Algunos diseños arquitectónicos buscan aprovechar al máximo este efecto y controlarlo para poder restringir el uso de calefacción o de aire acondicionado.

b) Acumulación del calor solar: Se hace con paneles o estructuras especiales colocadas en lugares expuestos al sol, como los tejados de las viviendas, en los que se calienta algún fluido que almacena el calor en depósitos. Se usa, sobre todo, para calentar agua y puede suponer un importante ahorro energético si tenemos en cuenta que en un país desarrollado más del 5% de la energía consumida se usa para calentar agua.

c) Generación de electricidad: Se puede generar electricidad a partir de la energía solar por varios procedimientos. En el sistema termal la energía solar se usa para convertir agua en vapor en dispositivos especiales. En algunos casos se usan espejos cóncavos que concentran el calor sobre tubos que contienen aceite. El aceite alcanza temperaturas de varios cientos de grados y con él se calienta agua hasta ebullición. Con el vapor se genera electricidad en turbinas clásicas. Con algunos dispositivos de estos se consiguen rendimientos de conversión en energía eléctrica del orden del 20% de la energía calorífica que llega a los colectores.

La luz del sol se puede convertir directamente en electricidad usando el efecto fotoeléctrico. Las celdas fotovoltaicas (figura 2.5) no tienen rendimientos muy altos. La eficiencia media en la actualidad es de un 10 a un 15%, aunque algunos prototipos experimentales logran eficiencias de hasta el 30%. Por esto se necesitan grandes extensiones si se quiere producir energía en grandes cantidades.

Uno de los problemas de la electricidad generada con el sol es que sólo se puede producir durante el día y es difícil y cara para almacenar. Para intentar solucionar este problema se están investigando diferentes tecnologías. Una de ellas usa la electricidad para disociar el agua, por electrólisis, en oxígeno e hidrógeno. Después el hidrógeno se usa como combustible para regenerar agua, produciendo energía por la noche.

La producción de electricidad por estos sistemas es más cara, en condiciones normales, que por los sistemas convencionales. Sólo en algunas situaciones especiales compensa su uso, aunque las tecnologías van avanzando rápidamente y en el futuro pueden jugar un importante papel en la producción de electricidad. En muchos países en desarrollo se están usando con gran aprovechamiento en las casas o granjas a las que no llega el suministro ordinario de electricidad porque están muy lejos de las centrales eléctricas.

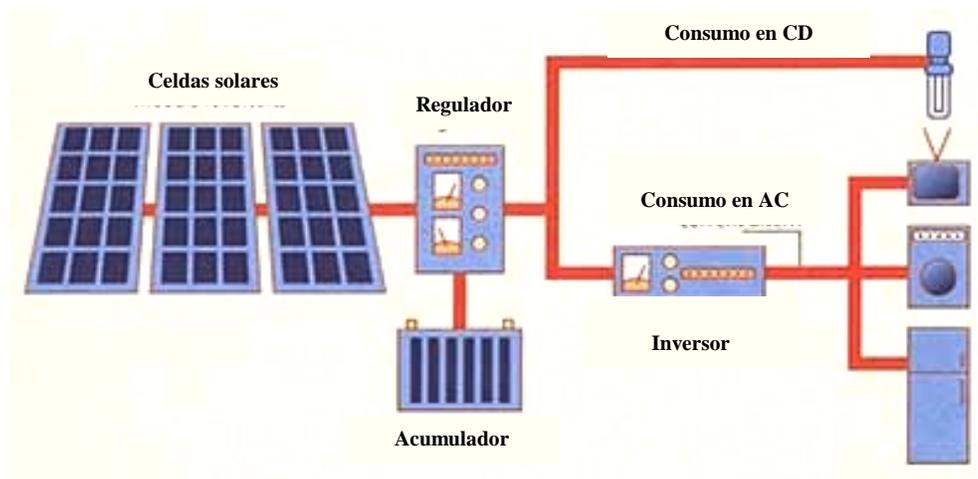


Figura 2.5: Panel solar. [123]

2.2.3. ENERGÍA GEOTÉRMICA.

Nuestro planeta guarda una enorme cantidad de energía en su interior. Un volcán o un geiser es una buena muestra de ello.

Son varias las teorías que tratan de explicar las elevadas temperaturas del interior de la Tierra. Unas sostienen que se debe a las enormes presiones existentes bajo la corteza terrestre; otras suponen que tienen origen en determinados procesos radiactivos internos; por último, hay una teoría que lo atribuye a la materia incandescente que formó nuestro planeta.

Diversos estudios científicos realizados en distintos puntos de la superficie terrestre han demostrado que, por término medio, la temperatura interior de la Tierra T , varía con la profundidad, z . En la corteza terrestre, normalmente la temperatura aumenta de forma regular $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ cada 33 m , a medida que se profundiza desde la superficie. Este valor representa el llamado “gradiente geotérmico normal”:

$$\Delta T/\Delta z = -1/33 (^{\circ}\text{C}/\text{m})$$

De lo dicho hasta ahora se deduce que, al existir un gradiente de temperaturas, necesariamente se producirá un flujo de calor, lo que da lugar a un flujo geotérmico, Φ , definido por la ley de Fourier de la conducción:

$$\Phi = -K \Delta T/\Delta z$$

siendo K la conductividad térmica del material ($\text{W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$).

Se supone que variará cuando se alcanzan grandes profundidades, ya que en el centro de la Tierra se superarían los 20,000 $^{\circ}\text{C}$, cuando en realidad se ha calculado que es, aproximadamente, de 6,000 $^{\circ}\text{C}$.

Es difícil el aprovechamiento de esta energía térmica, ocasionado por el bajo flujo de calor, debido a la baja conductividad de los materiales que la constituyen; pero existen puntos en el planeta que se producen anomalías geotérmicas, dando lugar a gradientes de temperatura de entre 100 y 200 $^{\circ}\text{C}$ por kilómetro, siendo estos puntos aptos para el aprovechamiento de esta energía.

Las alteraciones geotérmicas más interesantes están localizadas en sectores de actividades ígneas (volcánicas) actual o reciente, considerando recientes aquellos sectores donde hay datos para suponer que la actividad ha tenido hace pocos millones de años. Existen varios tipos de manifestaciones superficiales que indican la posible existencia de anomalías geotérmicas en las zonas donde se presentan. Estas manifestaciones pueden agruparse de la siguiente manera:

- Volcanismo reciente.
- Zonas de alteración hidrotermal.
- Emanaciones gaseosas.
- Fuentes termales y minerales.
- Anomalías térmicas.

Son muy numerosas las zonas de alto gradiente geotérmico asociado a un Volcanismo. En las áreas geotérmicas suelen encontrarse casi siempre alteraciones hidrotermales de las rocas, originadas por líquidos o gases que han circulado a través de los poros y fracturas de menor a mayor importancia. Esta alteración se manifiesta al producir un cambio químico y mineralógico en las rocas por las que han circulado estos fluidos. La identificación y delimitación de las distintas zonas de alteraciones pueden ayudar a establecer las condiciones físicas y químicas de formación de las rocas, lo que proporciona una gran ayuda en la investigación de un campo geotérmico.

Las emanaciones de gases y de vapor pueden tener un significado muy limitado. Se pueden originar sustancias volátiles simplemente por calentamiento de rocas. Otras veces las emanaciones son volcánicas, ya sea relacionadas con un volcanismo activo o con un residual.

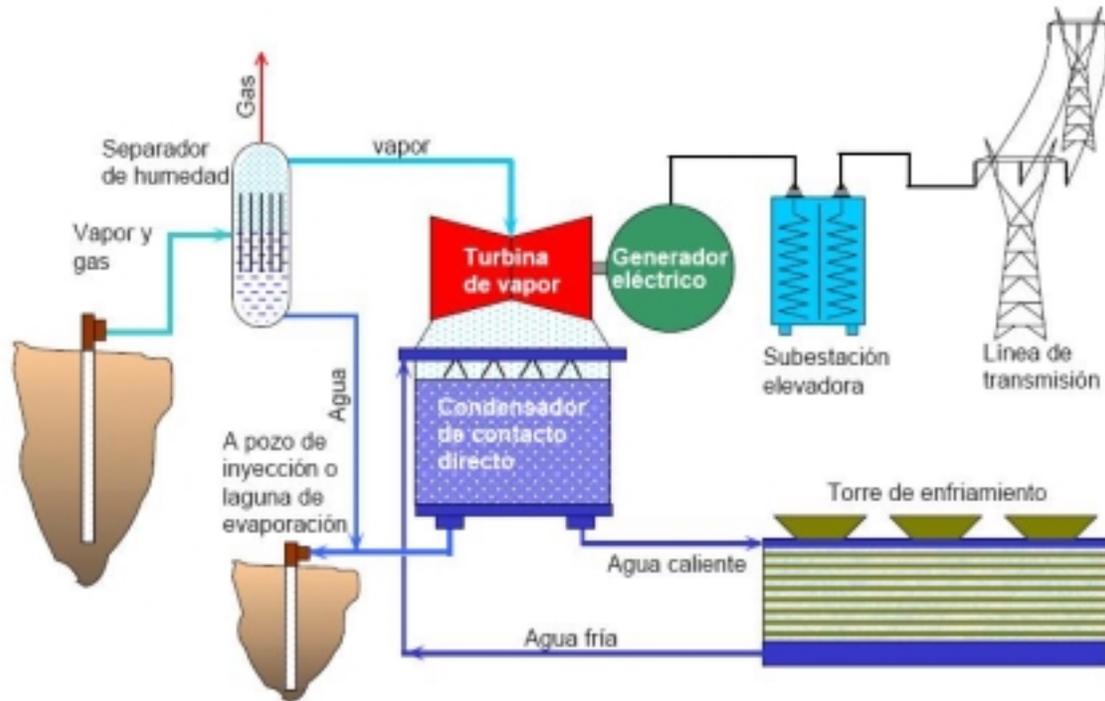


Figura 2.6: Central Geotermoeléctrica. [10]

Las fuentes termales y minerales están muy extendidas en las áreas geotérmicas. La forma más generalizada de explotarla, a excepción de fuentes y baños termales, consiste en perforar dos pozos, uno de extracción y otro de inyección. Cuando la zona está atravesada por un acuífero se extrae el agua caliente o el vapor, este se utiliza en redes de calefacción y se vuelve a inyectar, en otros casos se utiliza en turbinas de generación de electricidad (figura 2.6). Si no se dispone de un acuífero, se suele proceder a la fragmentación de las rocas calientes y a la inyección de algún fluido.

Lo más frecuente es que, en presencia de un foco calorífico en profundidad, se produce una anomalía térmica en superficie, que se pone en manifiesto por la presencia de un gradiente geotérmico anómalo superior a la normal, en la zona. Es, por tanto, de gran interés, la localización y delimitación precisa de estas anomalías, por lo cual se proyecta una prospección termométrica detallada.

2.2.4. ENERGÍA DE LA BIOMASA.

La biomasa incluye la madera, plantas de crecimiento rápido, algas cultivadas, restos de animales, etc. Es una fuente de energía procedente, en último lugar, del sol, y es renovable siempre que se use adecuadamente.

La biomasa puede ser usada directamente como combustible. Alrededor de la mitad de la población mundial sigue dependiendo de la biomasa como fuente principal de energía. El problema es que en muchos lugares se está quemando la madera y destruyendo los bosques

a un ritmo mayor que el que se reponen, por lo que se están causando graves daños ambientales: deforestación, pérdida de biodiversidad, desertificación, degradación de las fuentes de agua, etc.

También se puede usar la biomasa para preparar combustibles líquidos, como el metanol o el etanol, que luego se usan en los motores. El principal problema de este proceso es que su rendimiento es bajo: de un 30 a un 40% de la energía contenida en el material de origen se pierde en la preparación del alcohol.

Otra posibilidad es usar la biomasa para obtener biogás (figura 2.7). Esto se hace en depósitos en los que se van acumulando restos orgánicos, residuos de cosechas y otros materiales que pueden descomponerse, en un depósito al que se llama digestor. En ese depósito estos restos fermentan por la acción de los microorganismos y la mezcla de gases producidos se pueden almacenar o transportar para ser usados como combustible.

El uso de biomasa como combustible presenta la ventaja de que los gases producidos en la combustión tienen mucho menor proporción de compuestos de azufre, causantes de la lluvia ácida, que los procedentes de la combustión del carbono. Al ser quemados añaden CO_2 al ambiente, pero este efecto se puede contrarrestar con la siembra de nuevos bosques o plantas que retiran este gas de la atmósfera.

En la actualidad se están haciendo numerosos experimentos con distintos tipos de plantas para aprovechar de la mejor forma posible esta prometedora fuente de energía.

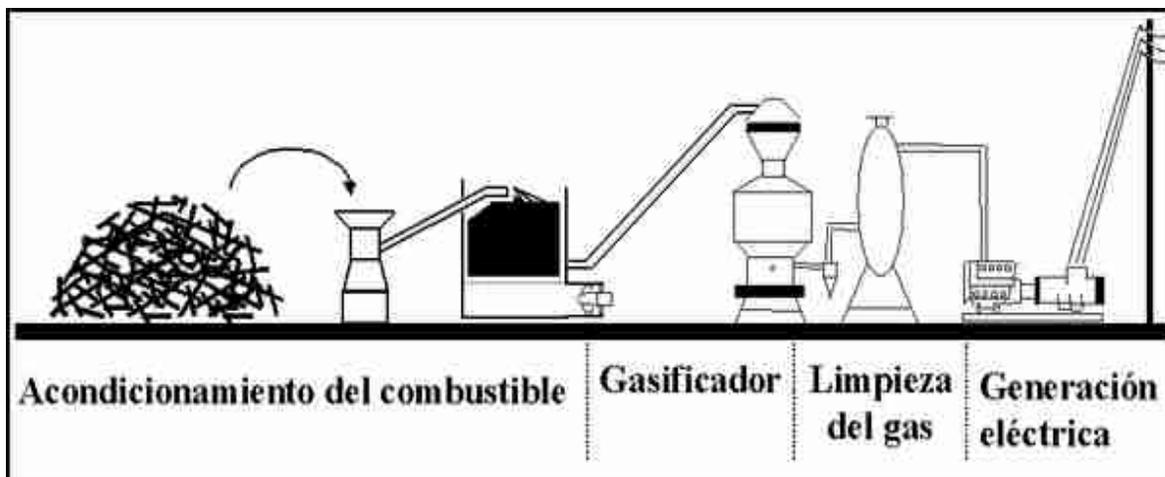


Figura 2.7: Esquema de aprovechamiento de la Biomasa. [117]

2.2.5. ENERGÍA DEL MAR.

La energía que es posible obtener de los mares es potencialmente enorme y, literalmente, muy variada en la forma de tomar la energía primaria. Los mares y los océanos son inmensos colectores solares, de los cuales se puede extraer energía de orígenes diversos.

Aunque en realidad en un principio el objetivo es aprovechar el movimiento, por la manera en que se produce el movimiento, se clasifican distintas formas de energía:

- **Olas:** La interacción de los vientos y las aguas son responsables del oleaje y de las corrientes marinas.
- **Gradiente de Temperatura:** La radiación solar incidente sobre los océanos, en determinadas condiciones atmosféricas, da lugar a los gradientes térmicos oceánicos (diferencia de temperaturas) a bajas latitudes y profundidades menores de 1000 metros.
- **Corrientes marinas:** El movimiento de las grandes masas de agua a lo largo y ancho de los mares y océanos del planeta en condiciones específicas.
- **Mareas:** La influencia gravitacional de los cuerpos celestes sobre las masas oceánicas provoca mareas.

2.2.5.1. OLAS

Se han desarrollado diversas tecnologías experimentales para convertir la energía de las olas en electricidad, aunque todavía no se ha logrado un sistema que sea económicamente rentable.

Las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar. El calentamiento de la superficie terrestre genera viento, y el viento genera las olas. Únicamente el 0.01% del flujo de la energía solar se transforma en energía de las olas. Una de las propiedades características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias con muy poca pérdida de energía. Por ello, la energía generada en cualquier parte del océano acaba en el borde continental. De este modo la energía de las olas se concentra en las costas, que totalizan 336,000 km de longitud aprovechables en el mundo. La densidad media de energía es del orden de 8 kW/m de costa. En comparación, las densidades de la energía solar son del orden de 300W/m². Por tanto, la densidad de energía de las olas es, en un orden de magnitud, mayor que la que los procesos que la generan. Las distribuciones geográficas y temporales de los recursos energéticos de las olas están controladas por los sistemas de viento que las generan (tormentas, alisios, monzones).

La densidad de energía disponible varía desde las más altas del mundo, entre 50 y 60 kW/m en Nueva Zelanda, hasta los 4 kW/m.

Los diseños actuales de mayor potencia se hallan a 1 MW de media, aunque en estado de desarrollo.

La tecnología de conversión de movimiento oscilatorio de las olas en energía eléctrica se fundamenta en que la ola incidente crea un movimiento relativo entre un absorbedor y un punto de reacción que impulsa un fluido a través del generador.

La potencia instalada en operación en el mundo apenas llega a 10 MWe. La mayor parte de las instalaciones lo son de tierra. Los costos fuera de la costa son considerablemente mayores. En el momento actual, la potencia instalada de los diseños más modernos varía entre 1 y 2 MW. Pero todos los diseños deben considerarse experimentales.

De los sistemas propuestos, para aprovechar la energía de las olas, se puede hacer una clasificación, los que se fijan a la plataforma continental y los flotantes, que se instalan en el mar.

Uno de los primeros fue el convertidor noruego *Kvaerner*, cuyo primer prototipo se construyó en Bergen en 1985. Consistente en un tubo hueco de hormigón, de diez metros de largo, dispuesto verticalmente en el hueco de un acantilado. Las olas penetran por la parte inferior del cilindro y desplazan hacia arriba la columna de aire, lo que impulsa una turbina instalada en el extremo superior del tubo. Esta central tiene una potencia de 500 kW y abastece a una aldea de cincuenta casas.

El pato de Salter, que consiste en un flotador alargado cuya sección tiene forma de pato. La parte más estrecha del flotador se enfrenta a la ola con el fin de absorber su movimiento lo mejor posible. Los flotadores giran bajo la acción de las olas alrededor de un eje cuyo movimiento de rotación acciona una bomba de aceite que se encarga de mover una turbina.

La dificultad que presenta este sistema es la generación de electricidad con los lentos movimientos que se producen.

La Balsa de Cockerell, que consta de un conjunto de plataformas articuladas que reciben el impacto de las crestas de las olas. Las balsas ascienden y descienden impulsando un fluido hasta un motor que mueve un generador por medio de un sistema hidráulico instalado en cada articulación.

El Rectificador de Russell, formado por módulos que se instalan en el fondo del mar, paralelos al avance de las olas. Cada módulo consta de dos cajas rectangulares, una encima de la otra. El agua pasa de la superior a la inferior a través de una turbina.

La Boya de Nasuda, consistente en un dispositivo flotante donde el movimiento de las olas se aprovecha para aspirar e impulsar aire a través de una turbina de baja presión que mueve un generador de electricidad.

2.2.5.2. GRADIENTE DE TEMPERATURA.

La temperatura del agua es más fría en el fondo que en la superficie, con diferencias que llegan a ser de más de 20 °C.

En algunos proyectos y estaciones experimentales se usa agua caliente de la superficie para poner amoníaco en ebullición y se bombea agua fría para refrigerar este amoníaco y devolverlo al estado líquido. En este ciclo el amoníaco pasa por una turbina generando electricidad.

Este sistema se encuentra muy poco desarrollado, aunque se ha demostrado que se produce más electricidad que la que se consume en el bombeo del agua fría desde el fondo. También es importante estudiar el impacto ambiental que tendría bombear tanta agua fría a la superficie.

La explotación de las diferencias de temperatura de los océanos ha sido propuesta multitud de veces, desde que *d'Arsonval* lo insinuara en el año 1881, pero el más conocido pionero de esta técnica fue el científico francés *George Claudi*, que invirtió toda su fortuna, obtenida por la invención del tubo de neón, en una central de conversión térmica.

La conversión de energía térmica oceánica es un método de convertir en energía útil la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y el agua que se encuentra a 100 m de profundidad. En las zonas tropicales esta diferencia varía entre 20 y 24 °C. Para el aprovechamiento es suficiente una diferencia de 20 °C.

Las ventajas de esta fuente de energía se asocian a que es un salto térmico permanente y benigno desde el punto de vista medioambiental. Puede tener ventajas secundarias, tales como alimentos y agua potable, debido a que el agua fría profunda es rica en sustancias nutritivas y sin agentes patógenos.

Las posibilidades de esta técnica se han potenciado debido a la transferencia de tecnología asociada a las explotaciones petrolíferas fuera de costa. El desarrollo tecnológico de instalación de plataformas profundas, la utilización de materiales compuestos y nuevas técnicas de unión harán posible el diseño de una plataforma, pero el máximo inconveniente es el económico.

Existen dos sistemas para el aprovechamiento de esta fuente de energía:

El primero consiste en utilizar directamente el agua de mar en un circuito abierto, evaporando el agua a baja presión y así mover una turbina. El departamento de energía americano está construyendo un prototipo de 165 kW en las islas Hawai, con él se pretende alcanzar la experiencia necesaria para construir plantas de 2 a 15 MW.

El segundo consiste en emplear un circuito cerrado y un fluido de baja temperatura de ebullición (amoníaco, freón, propano) que se evaporan en contacto con el agua caliente de la superficie. Este vapor mueve un turbogenerador, se condensa con agua fría de las profundidades y el fluido queda dispuesto de nuevo para su evaporación.

El inconveniente de este sistema es su bajo rendimiento, sobre un 7%, esto es debido a la baja temperatura del foco caliente y la poca diferencia de temperatura entre el foco frío y caliente. Además es preciso realizar un costo extra de energía, empleado para el bombeo de agua fría de las profundidades para el condensado de los fluidos.

2.2.5.3. CORRIENTES MARINAS.

Recientemente, se han creado nuevos dispositivos de los que se obtiene generación eléctrica renovable y libre de contaminantes a partir de la utilización de la fuerza que ejercen las corrientes marinas. Estos dispositivos son de dos tipos: los de eje vertical y los de eje horizontal. Esto obedece a la orientación de un eje submarino. Dicho eje gira una caja de cambios conectada a una turbina.

El funcionamiento de este tipo de dispositivos es análogo al de los aerogeneradores, sólo que en este caso, la fuerza de las corrientes marinas es captada por los alabes, los cuales provocan un movimiento giratorio que se transmite al generador eléctrico.

Este tipo de energía no necesita de construcción de diques, pero necesita condiciones especiales de instalación. Es decir, necesitan ser colocadas a profundidades específicas y en lugares donde las corrientes marinas sean lo suficientemente fuertes para producir energía.

2.2.5.4. MAREAS.

Se entiende por marea el movimiento periódico y alternativo de ascenso y descenso de las aguas del mar, producido por las acciones gravitatorias del Sol y de la Luna, aunque se ve asimismo influenciado por factores terrestres. Así, a pesar de que la diferencia entre los niveles más alto y más bajo ("amplitud de la marea") en mitad del océano es de apenas 1 m, en algunos puntos del globo llega a alcanzar hasta los 15 m. Por otro lado, la variación periódica de las pleamares y bajamares ("margen de la marea") es también muy diferente según el lugar geográfico. De esta forma queda patente que las mareas constituyen un fenómeno muy complejo que, aunque parezca una de las manifestaciones más potentes de la Naturaleza, sólo está provocado por fuerzas de muy pequeña magnitud.

Al subir el nivel del agua durante la marea, adquiere una energía potencial que podrá ser transformada en energía cinética y eléctrica, si esa agua puede retenerse a su nivel alto para dejarla caer cuando el nivel de la marea baje.

Aunque la caída que se puede obtener es relativamente pequeña, aún en los lugares del mundo donde las mareas tienen mayor amplitud en su oscilación, el caudal del agua es enorme, y la energía generada puede ser también muy grande.

La utilización de la energía de las mareas, o energía mareomotriz, consiste simplemente en separar un estuario del mar libre mediante un dique y aprovechar la diferencia de nivel en el sistema mar-estuario. Desde la antigüedad es conocida esta técnica, que ya fue aplicada para mover los primitivos molinos de marea egipcios. Su desarrollo histórico fue parecido al de los molinos hidráulicos: en el siglo XIII ya funcionaban algunas ruedas mareomotrices en Inglaterra y en el siglo XVIII aparecen varias instalaciones para moler grano y especias tanto en Francia como en EE.UU.

A partir de los años 1920 se realizaron los primeros estudios en profundidad en Francia, URSS, Canadá y EE.UU., alcanzándose los primeros resultados prácticos en la construcción de centrales mareomotrices en Francia (1966) y la URSS (1968). Como sucedió con otras fuentes energéticas renovables aprovechadas desde la antigüedad, el interés decreció ostensiblemente al producirse la electricidad a bajo costo en las centrales térmicas y nucleares, pero a raíz de las sucesivas crisis energéticas se ha vuelto a prestar una gran atención a esta fuente de energía.

Las mareas pueden tener variaciones de varios metros entre la bajamar y la pleamar. La mayor diferencia se da en la *Bahía de Fundy* (Nueva Escocia) en la que la diferencia llega a ser de 16 metros.

Para aprovechar las mareas se construyen presas que cierran una bahía y retienen el agua a un lado u otro, dejándola salir en las horas intermareales. En China, Canadá, Francia y Rusia hay sistemas de este tipo en funcionamiento.

3. CENTRALES MAREOMOTRICES.

3.1. VENTAJAS DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ.

A continuación se mencionan algunas ventajas:

- Auto renovable.
- No contaminante.
 - No produce gases que incrementen el efecto invernadero.
 - No produce calentamiento global o lluvia ácida.
 - No utiliza combustibles.
- Silenciosa.
- Bajo costo de materia prima y mantenimiento: una vez construida, las mareas son totalmente gratis.
- Las mareas son totalmente predecibles.
- No concentra población.
- Su estructura puede utilizarse como vía de comunicación terrestre.
- Disponible en cualquier clima y época del año: no hay años húmedos o años secos en cuanto a mareas.
- El periodo de vida de las centrales mareomotrices puede ser de más de 75 años.
- Se considera una eficiencia de alrededor del 80%.

3.2. DESVENTAJAS DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ.

A continuación se mencionan algunas desventajas:

- Impacto visual y estructural sobre el paisaje costero.
- Localización puntual: muy pocos lugares a nivel mundial.
- Traslado de energía muy costoso, si se encuentra en una zona aislada.
- Efecto negativo sobre la flora y la fauna.
- Energía limitada.
- No trabajan las 24 horas del día: solamente cuando se está llenando o vaciando el vaso.
- Es muy costoso el construir un vaso a través de un estuario.
- Tiempos de construcción muy prolongados.
- Dependiente de la amplitud de mareas.

3.3. TIPOS DE CONFIGURACIÓN.

3.3.1. VASO SIMPLE.

La configuración de una central mareomotriz de este tipo, se muestra en la figura 3.1. Consiste en un dique construido para llenar una rada. Se denominarán “compuertas” a las instaladas en el dique para permitir el paso del agua del mar al vaso o viceversa, y “válvulas” a las de admisión u obturación del agua para operar las turbinas.

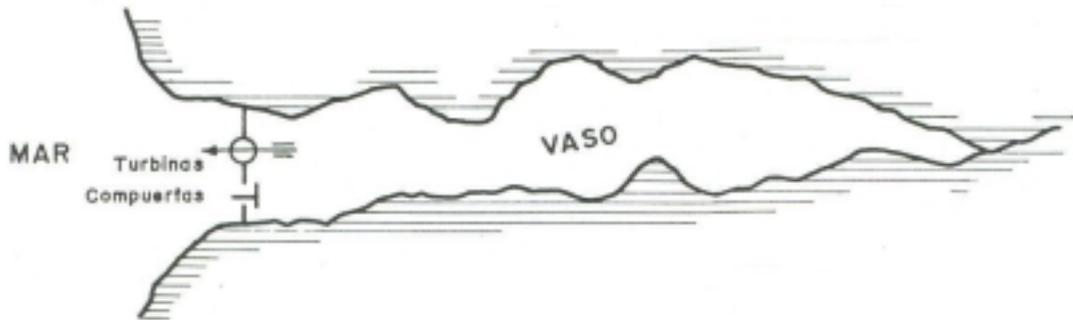


Figura 3.1: Disposición de obras mediante un solo vaso.[24]

Operación al simple efecto del vaciado.

Estando el embalse vacío y la marea en la bajamar, se abrirán las compuertas, y comenzará el llenado del vaso conforme vaya aumentando el flujo de la marea. Cuando la marea alcance la pleamar, las compuertas se cerrarán y el embalse se habrá llenado; a esta primera fase que se indica con el No.I de la figura 3.2, se le denomina fase de llenado: las turbinas estarán sin movimiento, por lo que no se genera energía eléctrica.

Posteriormente viene la fase No.II, llamada fase de espera, en la que tampoco habrá generación de energía eléctrica, dando tiempo para que la marea descienda lo suficiente para provocar un desnivel adecuado entre el embalse y el mar.

Por último, viene la fase de producción, marcada como No.III, donde se abren las válvulas para accionar las turbinas, cuyo desfogue va al mar, y que impulsan a los generadores de energía eléctrica.

En el transcurso de esta fase la marea continúa su reflujó, por lo que se seguirá conservando por algún tiempo una carga entre los niveles del vaso y del mar. Cuando ésta sea muy pequeña, se cierran las válvulas, dejándose de generar energía eléctrica; mientras tanto, la marea continuará bajando y se podrán abrir las compuertas para que el vaso se acabe de vaciar, conforme la marea continúe descendiendo; o también pueden dejarse cerradas, ya que el nivel de la marea alcanzará el nivel del vaso, cuando ésta comience nuevamente su ascenso, momento en el cual se volverán a abrir las compuertas para su llenado total y empezar así un nuevo ciclo.

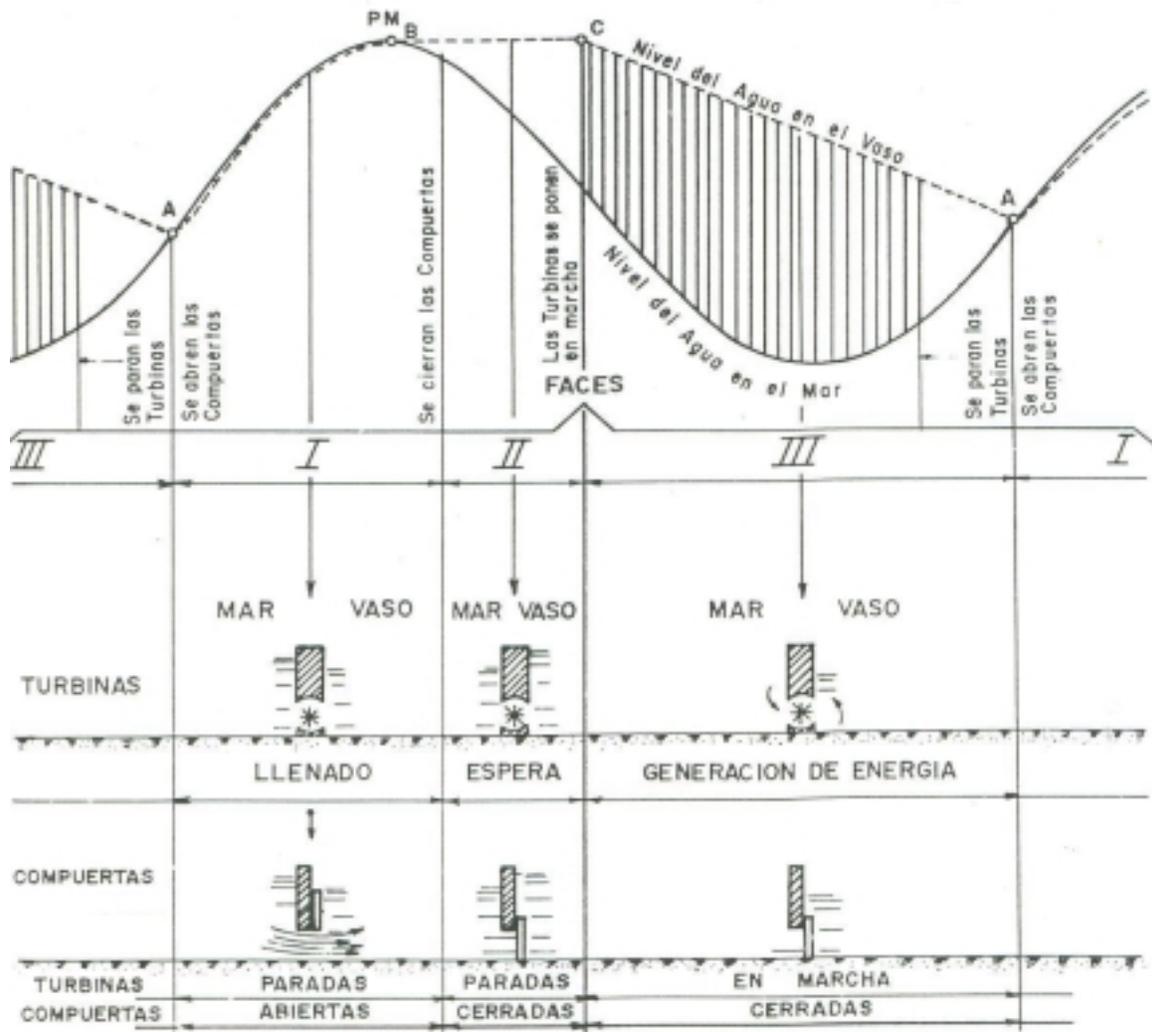


Figura 3.2: Funcionamiento del ciclo al simple efecto de vaciado. [24]

Operación al simple efecto del llenado.

Este funcionamiento tiene los mismos principios que el anterior, con la diferencia que se genera energía eléctrica mientras se llena el vaso.

Estando vacío el vaso, la marea en bajamar y las compuertas cerradas, se observa que conforme la marea está en el flujo se creará un desnivel entre el mar y el vaso, que se irá incrementando conforme vaya ascendiendo la marea; cuando alcance un valor adecuado se abrirán las válvulas para poner en movimiento a las turbinas que moverán a su vez al generador eléctrico. Las turbinas desfogarán al vaso que empieza a llenarse.

La marea llegará a la pleamar y la carga de agua será muy pequeña, debido a que el vaso ha ido aumentando su nivel, es entonces cuando se cierran las válvulas y se deja de generar electricidad.

Después del pleamar, el refluo llegará al nivel que tiene el agua en el vaso, y entonces se abrirán las compuertas; el vaso comenzará a vaciarse al igual que el refluo de la marea cuando alcance la bajamar al vaso se encontrará nuevamente vacío y se cerrarán las compuertas, concluyendo así el ciclo para repetirse nuevamente.

La energía eléctrica generada, mediante el simple efecto de llenado, es un poco menor que la generada al simple efecto de vaciado, pues a igualdad de caudal de agua que pase por las turbinas la carga disminuye más rápidamente en el llenado que en el vaciado ya que los volúmenes de almacenamiento de un vaso por metro de desnivel son menores en niveles inferiores que en la parte superior. Al ser menor la carga media se obtendrá menor cantidad de kWh generados.

Operación al doble efecto.

El doble efecto es un funcionamiento que combina los dos ciclos que mencionamos anteriormente, con el fin de generar una mayor cantidad de energía eléctrica. Lo cual es posible al aprovechar tanto al llenado como al vaciado para mover las turbinas. Este funcionamiento se ilustra en la figura 3.3, en las seis fases que comprende. Dichas fases se describen a continuación.

I. Primera fase de espera.

Estando vacío el embalse y la marea en bajamar, habrá un periodo de espera hasta que la marea ascienda un poco, y se forme una carga de agua entre el mar y el vaso. En esta fase, las compuertas y las válvulas se encontrarán cerradas y no habrá generación de energía.

II. Primera fase de producción.

Cuando el desnivel entre el mar y el vaso sea el apropiado, se abrirán las válvulas para generar energía mediante el agua que escurre del mar al vaso a través de las turbinas. La marea sigue en ascenso y el vaso llenándose, conservándose una carga de agua; pero sin embargo, poco antes del pleamar, ya será muy pequeña y se cerrarán las válvulas dejándose de generar la energía.

III. Fase de llenado.

Sin embargo, se podrá ver que el vaso no se ha llenado completamente y para que esto suceda, se abrirán las compuertas cuando se cierran las válvulas para que el vaso se acabe de llenar en la pleamar.

IV. Segunda fase de espera.

Ya cuando la marea ha alcanzado la pleamar, se cierran nuevamente las compuertas, entonces la marea comenzará su descenso y formará un desnivel ahora entre el vaso y el mar.

V. Segunda fase de producción.

Cuando el reflujó haya provocado un salto adecuado entre el vaso y el mar, se abrirán las válvulas; las turbinas empezarán a operar desfogando del vaso al mar y se generará energía eléctrica nuevamente. Se dejará de generar poco antes de que ocurra la bajamar cuando la carga de agua ya sea muy pequeña. Entonces se cierran las válvulas y se abren las compuertas.

VI. Fase de vaciado y fin de ciclo.

Cuando se ha dejado de generar energía, aún existirá un desnivel pequeño entre el vaso y el mar; el vaso se terminará de vaciar en la bajamar después de lo cual comenzará su ascenso iniciándose así la repetición del ciclo con sus seis fases descritas.

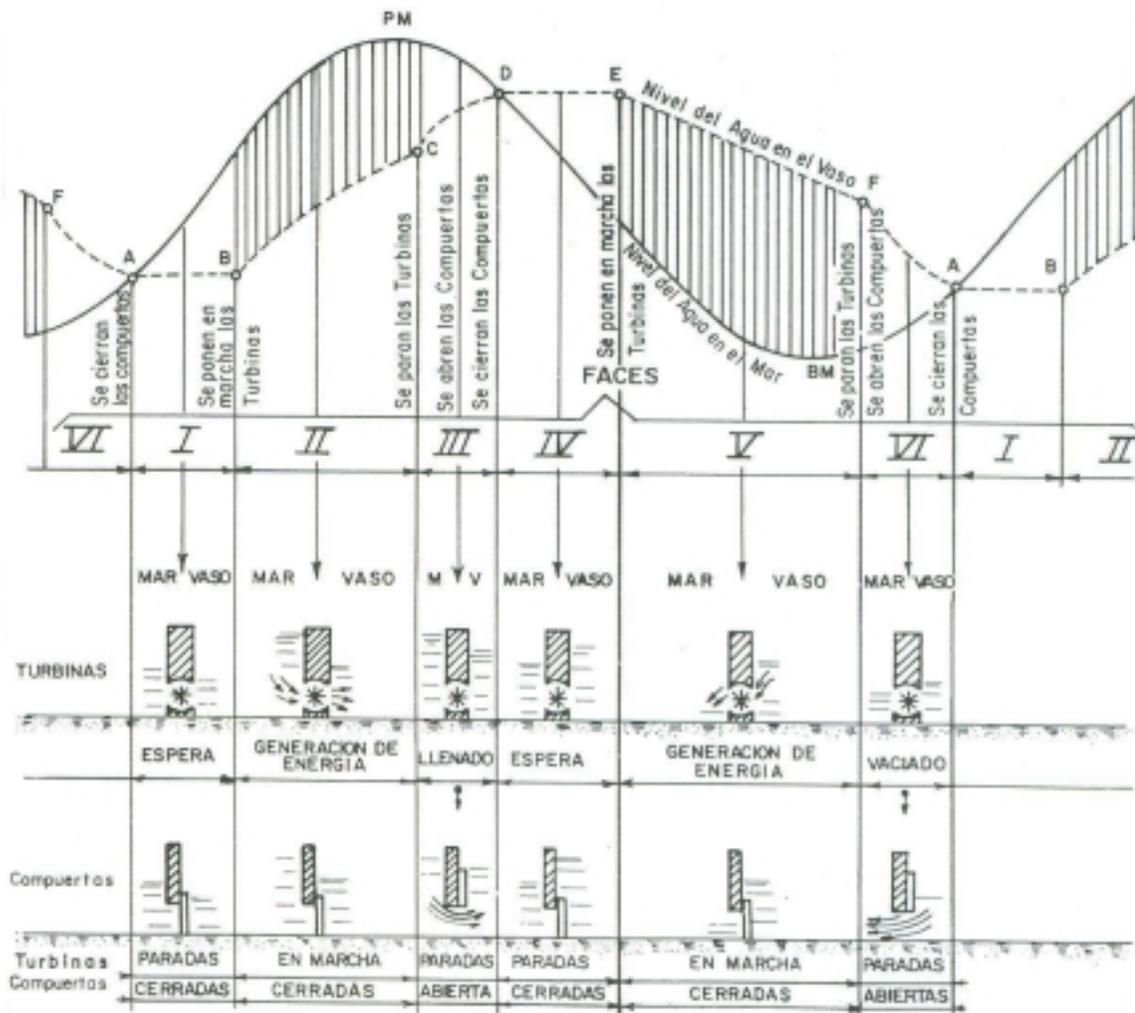


Figura 3.3: Funcionamiento y operación del ciclo al doble efecto. [24]

3.3.2. VASO DOBLE.

El dispositivo de vaso doble o vasos asociados, como también se le conoce, para formar una planta mareomotriz se muestra en la figura 3.4. Este dispositivo consiste en la construcción de dos diques que cierran dos vasos de almacenamiento no muy retirados entre sí, y en cada uno de los cuales se instalan unidades turbo-generadoras que están eléctricamente conectadas.

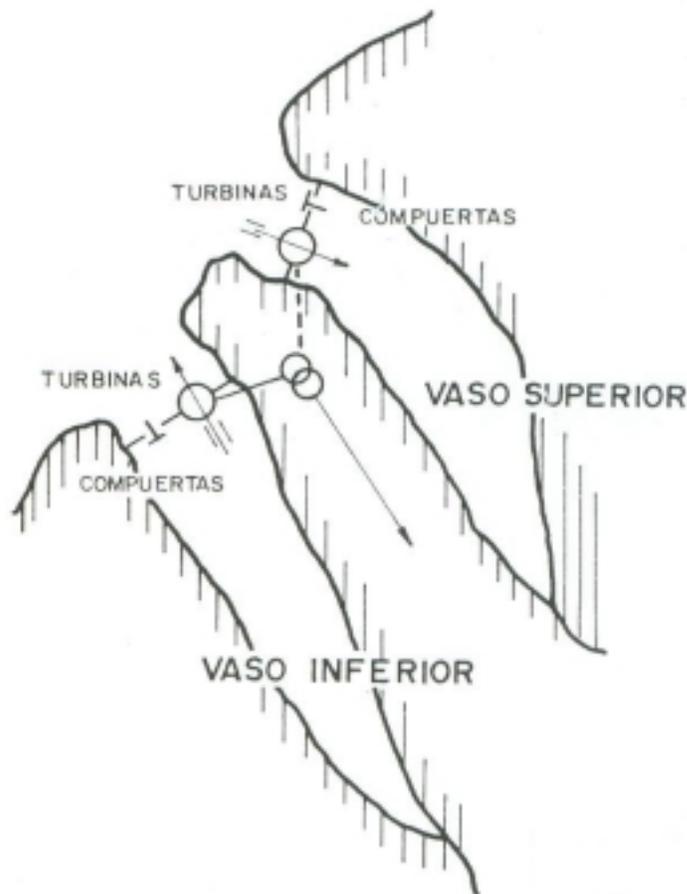


Figura 3.4: Disposición de obras mediante vasos asociados. [24]

Uno de los almacenamientos que se ha denominado "vaso superior", trabajará al simple efecto al llenado en tanto que el otro, "vaso inferior", trabajará al simple efecto al vaciado, siguiendo el funcionamiento que brevemente se describe a continuación, de acuerdo con la figura 3.5. En la gráfica la línea *M*, representa un ciclo de la onda de marea, en donde las ordenadas indican alturas y las abscisas los tiempos.

La línea *S* corresponde al nivel del agua en que se encuentra el vaso superior en tanto la línea *I*, representa el nivel en el vaso inferior. La parte achurada con líneas verticales muestra el periodo en que se genera energía eléctrica en el vaso superior y la achurada con líneas inclinadas el periodo de generación en el vaso inferior.

Funcionamiento del Vaso Superior.

Se harán las siguientes consideraciones en la iniciación del ciclo:

- La marea se encuentra en bajamar y que sólo para fines explicativos se considera que ocurre a las 0 horas.
- El vaso superior está completamente vacío y en el inferior se está generando energía eléctrica al vaciado del vaso hacía el mar.
- Las compuertas de ambos vasos están cerradas.

Cuando la marea comience su ascenso, debido a que las compuertas del vaso superior han permanecido cerradas, no entrará el agua al vaso y se conservará vacío, por lo que se va creando un desnivel, entre las líneas *M* y *S*, que muestran los niveles del mar y del vaso superior; este desnivel irá aumentando conforme mayor sea el ascenso de la marea y cuando tenga un valor adecuado el segmento *A-B* se abrirán las válvulas para accionar las turbinas, lo que ocurre aproximadamente a media marea, a las 3 horas cuando su amplitud es del orden de 5 metros ya que el vaso tiene el mismo nivel que a las 0 horas (Línea *S*).

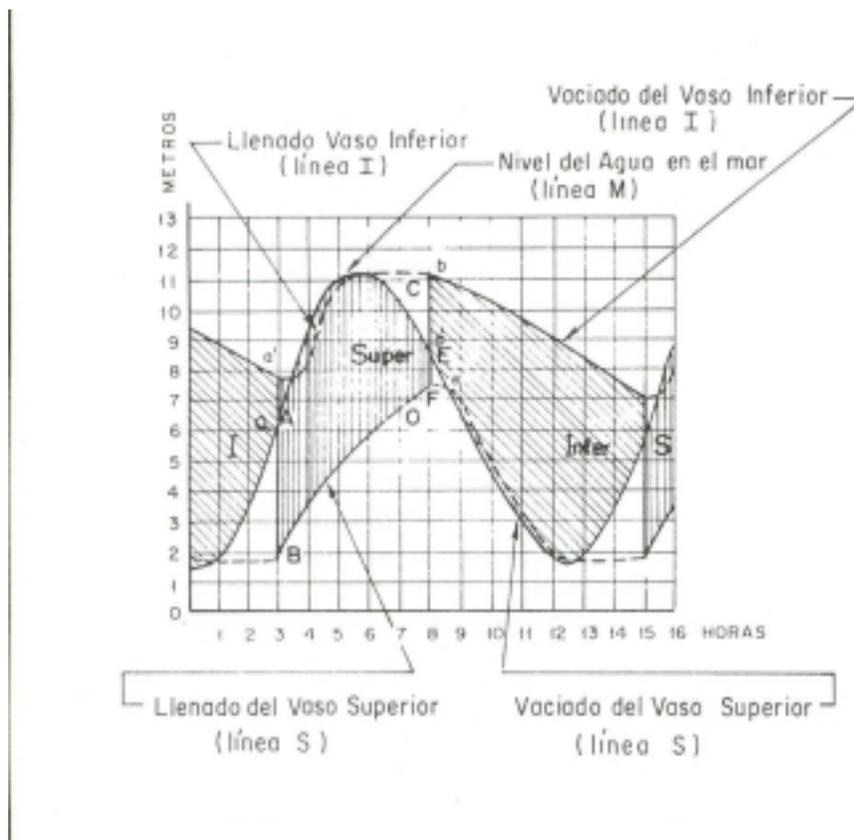


Figura 3.5: Funcionamiento y operación mediante vasos asociados. [24]

A las tres horas se abrirán las válvulas del vaso superior para accionar los generadores eléctricos y debido al agua desfogada por las turbinas, empezará a subir el nivel en este vaso superior, como lo muestra la línea "S", pero menos rápidamente que el nivel de la marea, obteniéndose una caída creciente debido a que el caudal de agua que se permite entrar a las turbinas se regula para obtener ese resultado.

Podría aprovecharse mayor cantidad de agua aumentando el número de turbinas, pero como en estos aprovechamientos se trata de que la generación de energía eléctrica sea lo más uniforme posible durante el ciclo, se procura reducir el caudal que alimenta las turbinas conforme aumenta la carga disponible y viceversa.

El no aprovechar todo el caudal, y consecuentemente toda la energía que de momento podría generarse, tiene la ventaja que mediante la operación combinada de los dos vasos, se puede generar energía eléctrica continuamente durante el ciclo, como se aclarará al explicar el funcionamiento del vaso inferior.

Así, el caudal de entrada al vaso superior es regulado en tal forma que cuando la marea alcance la pleamar la carga sea máxima y el caudal utilizado por las turbinas y que entra al vaso, sea menor. Esto permite que en el vaso superior se genere energía también durante parte del descenso de la marea y cuando éste se deje de generar existirá por el contrario, en el vaso inferior, un desnivel adecuado para que se empiece a generar energía en él.

Cuando comience el reflujó de la marea, el desnivel entre el mar y el agua en el vaso superior irá disminuyendo muy rápidamente por el propio hecho del descenso de la marea y porque el vaso se continúe llenando y ahora con una mayor entrada de agua para procurar obtener una generación de energía eléctrica lo más uniforme posible, no obstante que la carga va disminuyendo; se observa que la caída de agua, segmentos *C* y *O* disminuyen en un periodo muy corto y el vaso se llena en una forma más acelerada.

Llegará un momento que la caída, segmento *E-F*, sea tan pequeña, que no será práctico utilizarla por lo que se cerrarán las válvulas dejándose de generar en este vaso a las 8 horas; en este momento se abren las compuertas de comunicación al mar para que el vaso vaya vaciándose conforme la marea descienda y se encuentre completamente vacío cuando ocurra la bajamar 12.5 horas, momento en que cerrarán las compuertas del vaso, terminándose el ciclo por lo que corresponde al vaso superior y empezándose de nuevo.

Funcionamiento del Vaso Inferior.

Lo que ocurre durante este periodo en el vaso inferior es que se ha venido generando energía vaciando agua del vaso hacía el mar desde las 0 horas; a las 3 horas la carga *a-a'* ya es muy pequeña, se cierran las válvulas, se deja de generar y se abren las compuertas hacía el mar para que se llene el vaso; por otra parte, como ya se indicó, se inició la generación en el vaso superior.

Cuando la marea alcance la pleamar, el vaso inferior se habrá llenado; en este momento se cerrarán las compuertas del vaso y conforme se verifica el reflujó de la marea se va creando un desnivel creciente entre los niveles del vaso y del mar. Es interesante observar que mientras se crea el desnivel mencionado, en el vaso superior se está generando energía eléctrica como anteriormente se ha explicado, de tal manera que cuando en éste se deje de generar a las 8 horas, ya existe una carga adecuada *b-b'* en el vaso inferior para iniciar en él la operación abriendo las válvulas de sus turbinas que permanecerán operando hasta las 15 horas.

Al igual que en el vaso superior, el caudal de vaciado del vaso inferior hacía el mar se regula en forma apropiada para obtener una carga creciente que tiene un máximo cuando la marea alcance la bajamar 12.5 horas y habiendo un periodo de generación entre las 12 y las 15 horas durante el ascenso de la marea en el nuevo ciclo; lógicamente durante dicho ascenso la carga irá disminuyendo con rapidez debido al propio aumento del nivel del mar ya que el del vaso se abate por estarse vaciando con más celeridad debido a que el caudal extraído debe ser cada vez mayor para tratar de obtener una generación de energía, lo más uniforme posible durante el periodo en que la carga decrece.

Las válvulas de las turbinas en el vaso inferior estuvieron abiertas de las 8 a las 15 horas, hora en que se cierran para abrir las compuertas con lo que empezará su llenado para repetirse el ciclo. Debe notarse que también a las 15 horas en que se dejó de generar energía en el vaso inferior, se empezó a generar en el superior.

3.3.3. VASO CONJUGADO.

Este arreglo o disposición de obras para una central mareomotriz se muestra en la figura 3.6, y consiste en dos vasos con compuertas hacía el mar para el llenado o vaciado, y la planta mareomotriz con sus unidades turbo-generadoras que conecta a los dos vasos y que sólo trabajan vaciando el agua del superior al inferior, según el funcionamiento que brevemente se explica enseguida.

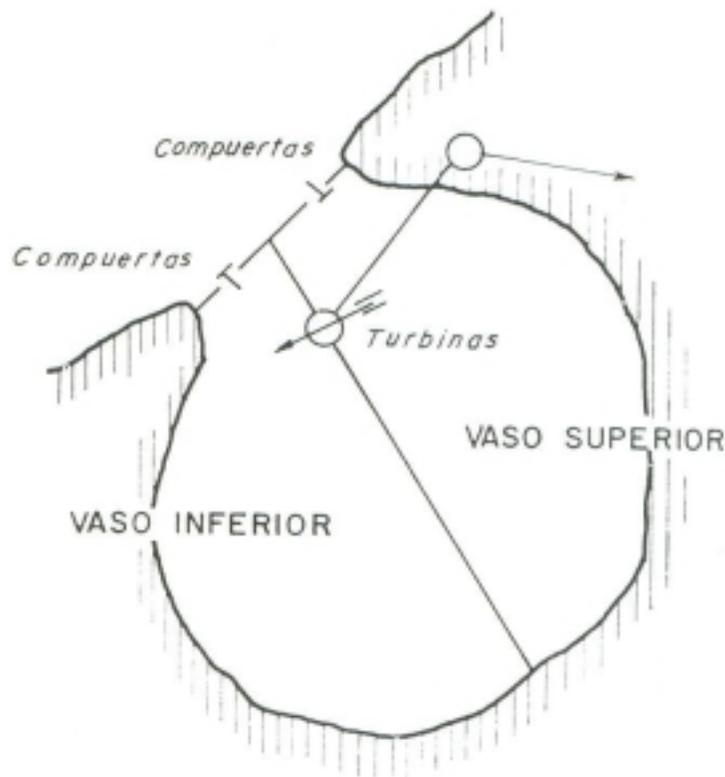


Figura 3.6: Disposición de obras mediante vasos conjugados. [28]

En la bajamar se cierra la compuerta del vaso inferior, de acuerdo a la figura 3.7, a las 0 horas; permanece cerrada hasta aproximadamente: la mitad del refluo, 9 horas, que es cuando el nivel de la marea iguala al del vaso que ha aumentado su nivel por las descargas que recibe del vaso superior.

Del vaso superior que previamente se había llenado se vacía el agua hacia el vaso inferior con caudales y volúmenes apropiados, accionando las turbinas con las cargas o desniveles mostrados por las achuras.

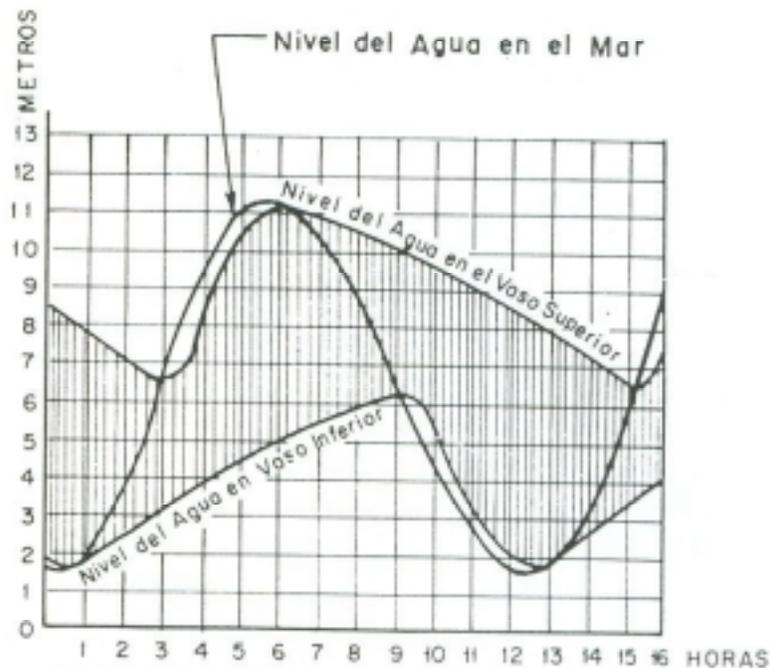


Figura 3.7: Funcionamiento y operación mediante vasos conjugados. [24]

Cuando el nivel de la marea y el del vaso superior se igualan, 3.5 horas, se abren las compuertas de este vaso que va aumentando su nivel, pero sin dejar de vaciar agua hacia el inferior, hasta que la marea alcanza su pleamar, 6 horas.

A esta hora se cierra la compuerta del vaso superior. Su nivel va bajando, debido a que sigue vaciando agua en el inferior, donde el nivel va subiendo, pero conservándose entre ambas una carga adecuada para accionar las turbinas.

A las 9 horas se abre la compuerta del vaso inferior comenzándose a vaciar rápidamente conforme la marea continúa su descenso, por lo que disminuye el nivel del agua en el vaso; en tanto el nivel en el superior se abate lentamente, conservándose una carga creciente cuyo máximo ocurre en la bajamar que es cuando el vaso inferior se encuentra completamente vacío; con esto se termina el ciclo para repetirse nuevamente.

3.3.4. VASOS MÚLTIPLES.

El arreglo de obras para el caso de 3 vasos, se muestra en la figura 3.8. Consiste en un vaso superior; uno inferior; un vaso intermedio con gran almacenamiento, dos pequeños vasos de distribución cercanos a la central mareomotriz y la propia central. Todos los vasos están dotados de compuertas, ya sea de comunicación al mar o de uno hacia otro.

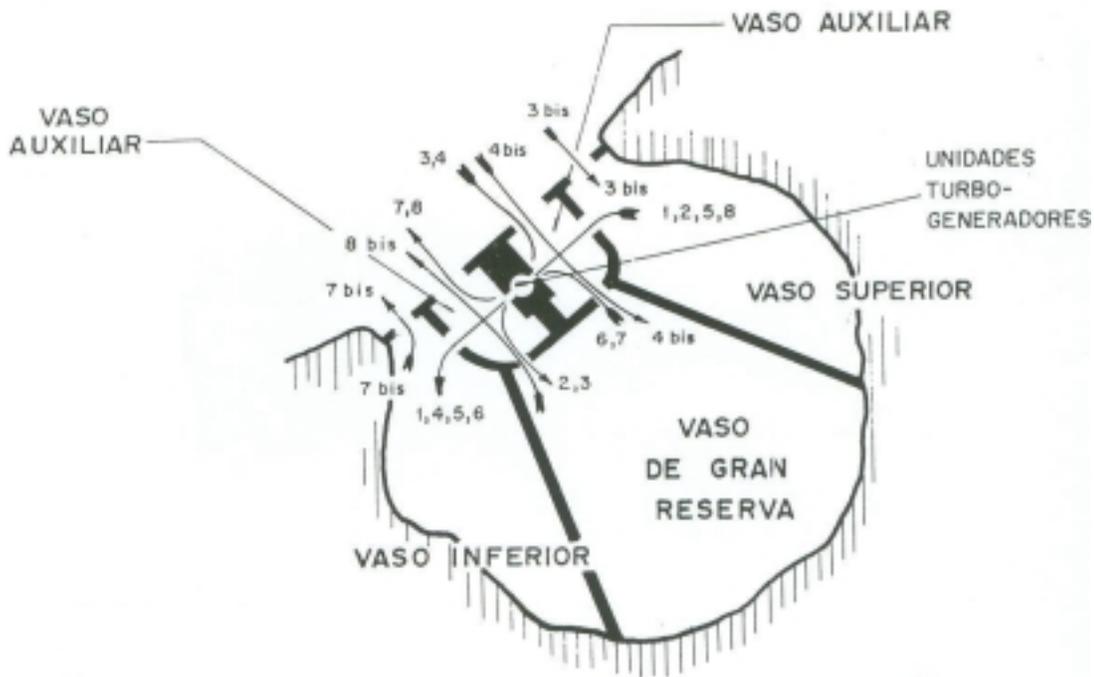


Figura 3.8: Disposición de obras mediante vasos múltiples. [28]

En la figura 3.8 se indican con flechas las direcciones del escurrimiento del agua en diversas fases del ciclo. También se muestra en la figura 3.9 la gráfica de funcionamiento con los niveles del agua en diversos vasos, el nivel según el ciclo de la marea, y los periodos de generación que se indican achurados.

El gran vaso de reserva, para este arreglo, se llena dos veces al mes cuando las mareas alcanzan su máxima amplitud o sea en la marea viva y proporciona volúmenes de agua, ya sea hacia el vaso inferior o hacia el mar, accionando las turbinas durante los periodos de mareas muertas; el vaso superior generalmente opera las turbinas al vaciado ya sea hacia el inferior o hacia el mar.

No se profundizará en la descripción del funcionamiento, pero por la simple inspección de esquema y de la gráfica de funcionamiento se aprecia, después de haberse descrito los funcionamientos para dispositivos de obras más sencillos, que puede existir un enorme número de combinaciones para operar un sistema de vasos múltiples y que de ellos puede, teóricamente, obtenerse generación de energía durante todo el ciclo y en forma no muy variable.

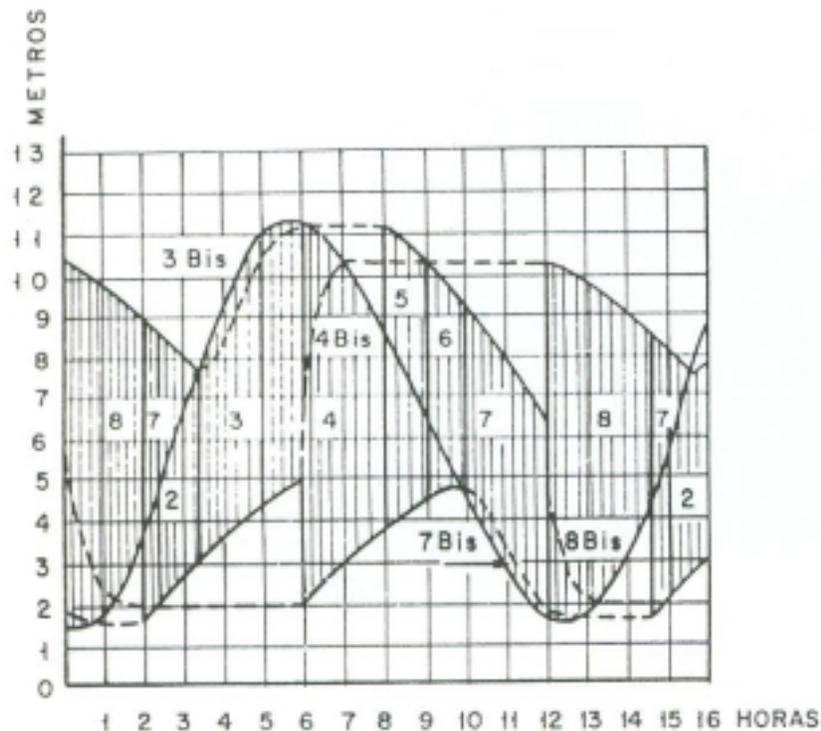


Figura 3.9: Funcionamiento y operación mediante vasos múltiples. [24]

Así como se ha presentado el ejemplo de 3 vasos, puede arreglarse una central con un mayor número; pueden también existir centrales mareomotrices interconectadas eléctricamente; en una alargada rada semejando a un "fiordo" en el que se construyen varios diques transversales con sus equipos de turbo-generadores, en fin, pueden existir varias centrales de diversos tipos que trabajen interconectadas, por lo que la forma de operarlas presentará un ilimitado número de variantes.

Las centrales a base de vasos múltiples requieren obras de ingeniería muy numerosas y complicadas que naturalmente hacen aumentar su costo por lo que es difícil que en la práctica se llegue a encontrar un lugar con condiciones topográficas tan favorables que permitan desde el punto de vista económico, instalar una central de este tipo.

3.3.5. BOMBEO.

Los equipos de turbo-generadores de una central mareomotriz pueden funcionar como Motor-Bomba para bombear agua. Cuando el generador se hace trabajar como motor consumirá energía eléctrica, producida en un sistema eléctrico exterior interconectado. La operación de la central con periodos de bombeo, acarrea ciertas ventajas.

Puede existir bombeo para todos los tipos de configuraciones descritos anteriormente; pero para comprender las bases de la operación con bombeo sólo explicaremos enseguida el funcionamiento cuando existe un solo vaso de almacenamiento.

En la figura 3.10 a), b) y c) se ilustra la operación con bombeo al trabajar la central al "Simple efecto al vaciado", "doble efecto" al vaciado y llenado, y la de "sesqui efecto o efecto a los 3/2".

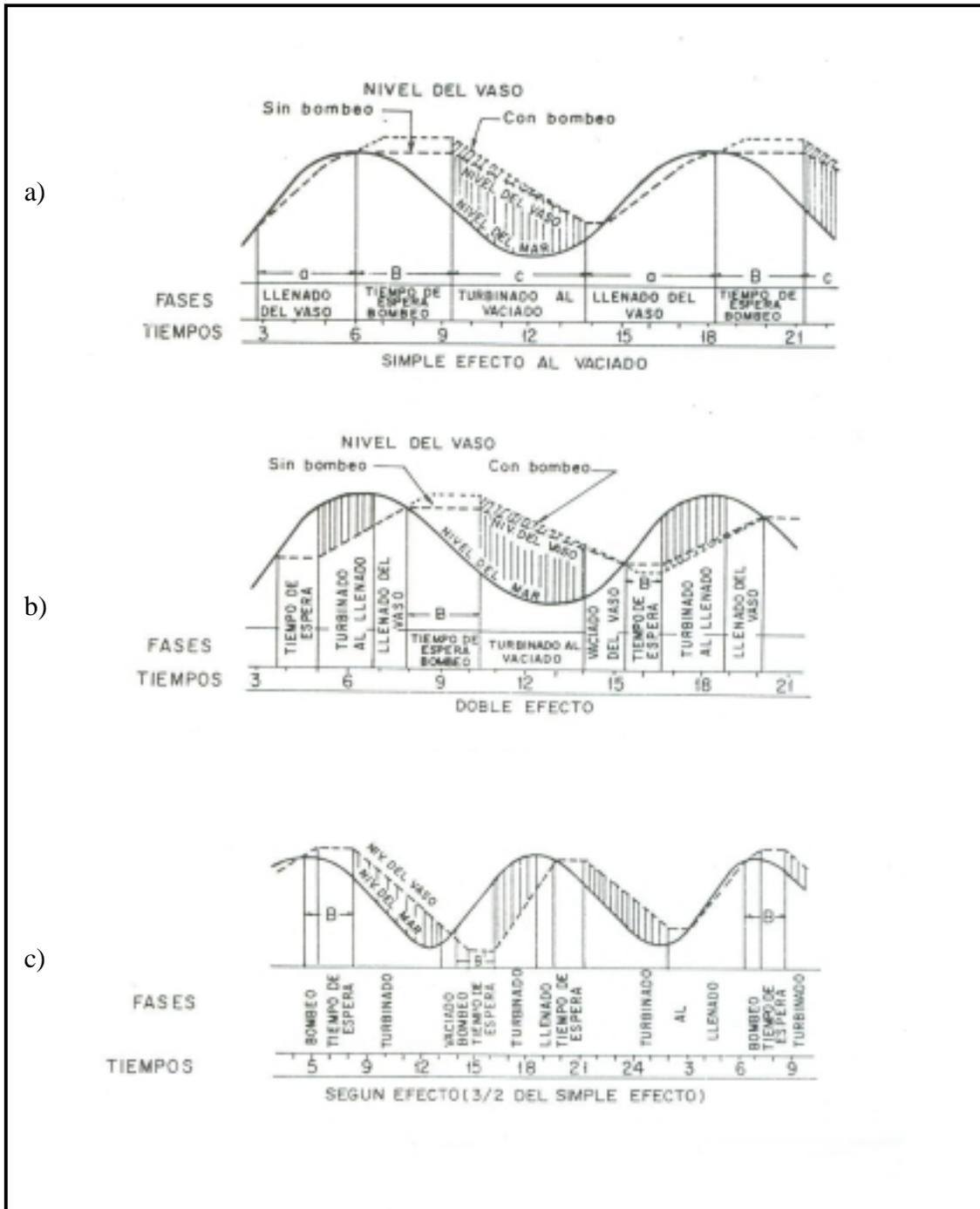


Figura 3.10: Operaciones con bombeo

- a) Simple efecto al vaciado,
- b) Doble efecto
- c) 3/2 del simple efecto. [24]

En determinados periodos mostrados como B o B' en las figuras 3.10(a), (b) y (c), en los que no se genera energía eléctrica, en vez de mantener los equipos de turbo-generador inactivos se les hace trabajar como motor-bomba lográndose en los periodos B un aumento del nivel en el vaso, y naturalmente un mayor volumen de agua almacenada, y en los indicados como B' un mayor abatimiento del nivel que cuando no se bombea.

Después de los periodos B , cuando empiece el periodo de turbinado podrá haber mayor generación que la obtenible cuando no hubo bombeo, debido a que la carga es mayor y se cuenta con mayor volumen de agua almacenada. Frecuentemente la generación adicional que se gana, es mayor que la que se consumió en el bombeo.

Para los periodos de generación después de los bombeos B' hay mayor generación debido a que la carga es mayor.

Determinar el modo más eficiente de operar la central cuando existe bombeo, resulta relativamente complicado. En efecto, para el caso más sencillo considerando una sola marea, podrá haber 4 movimientos: dos de turbinado y dos de bombeo, por lo que habrá teóricamente $2^4 = 16$ combinaciones de operación posibles.

La central mareomotriz debe estar interconectada con un sistema eléctrico exterior y lógicamente debe bombearse, en términos generales, sólo cuando el sistema tiene capacidad sobrante durante las horas de mínimas demandas del consumo o sea en los "valles", o cuando la demanda sea baja; siendo inapropiado generalmente bombear durante los picos que es cuando la energía tiene mayor valor.

Para el estudio del funcionamiento deberán escogerse cuando menos dos ciclos de marea cuya duración es un poco mayor de 24 horas, digamos 24 horas 50 minutos, debido a que abarcarán las horas de máxima, mínima y demanda normal; el valor de la energía es distinto a las diversas horas siendo máximo a las horas de los picos y mínimo durante los valles.

Con cuatro movimientos, dos de turbinado y dos de bombeo; y dos mareas se obtienen teóricamente $16^2 = 256$ posibles ciclos de operación; que aunque representa un trabajo tedioso, aún se pueden estudiar seleccionando previamente los más interesantes para elegir los ciclos que representen la forma más productiva de operar la central.

Pero el estudio de la más eficiente forma de operar la central se complica aún más. En efecto durante 14 días, en los que ocurren unas 27 mareas se presentan los siguientes hechos relevantes: a) las mareas cambian de amplitud día a día y hay dos mareas vivas o máximas; b) hay 2 sábados y 2 domingos en que la demanda del sistema eléctrico baja grandemente; y c) como dos mareas duran unos 50 minutos más de las 24 horas, la hora en que ocurren los "valles" y "picos" de la demanda varía en relación con las horas de pleamar y bajamar. Teniendo presentes esas circunstancias, el problema a estudiar es la determinación de la forma más eficaz de operar la central durante las 27 mareas.

Teóricamente el número de combinaciones de operación serían $16^{27} = 3.24^{32}$; que naturalmente es imposible e impráctico analizarlas en su totalidad; debiéndose estudiar sólo un número razonable de ciclos característicos.

En este punto se hará mención de las combinaciones de operación que podrán adaptarse para el caso de un solo vaso, existiendo bombeo considerando una sola marea, que denominaremos ciclos de primer orden, así como las que podrán presentarse con dos mareas que llamaremos ciclos de segundo orden; con lo cual se aportarán, al menos, las nociones fundamentales de operación para una central mareomotriz.

Ciclo de Primer Orden (Con una sola marea).

En este caso, los cuatro movimientos posibles de operación son: bombeo directo (del mar al vaso), que tendrá la notación a ; bombeo inverso (del vaso al mar), b ; turbinado directo (del vaso al mar), 1 ; y, turbinado inverso (del mar al vaso), 2 .

Atendiendo a esos cuatro movimientos, el número de ciclos posibles que podrán hacerse al considerar una sola marea, serán $2^4 = 16$ y que se muestran en la tabla 3.1.

Posibles movimientos	Sin Bombeo	Bombeo directo (mar a vaso)	Bombeo inverso (vaso a mar)	Dos bombeos
Sin turbinado		a	b	ab
Turbinado directo (vaso a mar)	1	a1	1b	a1b
Turbinado inverso (mar a vaso)	2	a2	b2	ab2
Dos turbinados	12	a12	1b2	a1b2

Tabla 3.1: Ciclos posibles considerando una sola marea. [24]

De los 16 ciclos mostrados en la tabla hay algunos que pueden ser favorables a la operación de la central, y que llamaremos positivos y otros que son desfavorables o ilógicos que se llamarán negativos. Por ejemplo, si no hay turbinado durante toda la marea, es ilógico bombear sin ninguna finalidad por ello las operaciones, a , b y ab son ciclos negativos. Similarmente, si durante la pleamar se abren las compuertas para aportar agua del mar hacia el vaso a fin de llenarlo sería absurdo bombear del vaso hacia el mar.

Analizando los diversos ciclos se pueden determinar cuales son negativos y cuales son positivos. Estos últimos se somborean en la tabla anterior y son como se muestran en la tabla 3.2:

Con el simple efecto	Sin bombeo	Al vaciado del vaso	1
		Al llenado del vaso	2
	Con bombeo	Directo al vaciado del vaso	a1
		Inverso al llenado del vaso	b2
	Sin bombeo		12
Con el doble efecto	Con bombeo		a12
			1b2
	Con dos bombeos		a1b2

Tabla 3.2: Ciclos positivos. [24]

Como ilustración, se muestra en la figura 3.11(a), el ciclo de operación positivo $a1b2$ de "doble efecto"; o sea, con dos turbinados y además con dos bombeos. Por claridad se indican las mareas y se principia y termina el ciclo estando el agua al mismo nivel N .

También se muestra en la figura 3.11(b), el ciclo negativo $1b$ en el que después del turbinado 1 , se bombea del vaso hacia el mar, mientras están abiertas las compuertas para llenar dicho vaso.

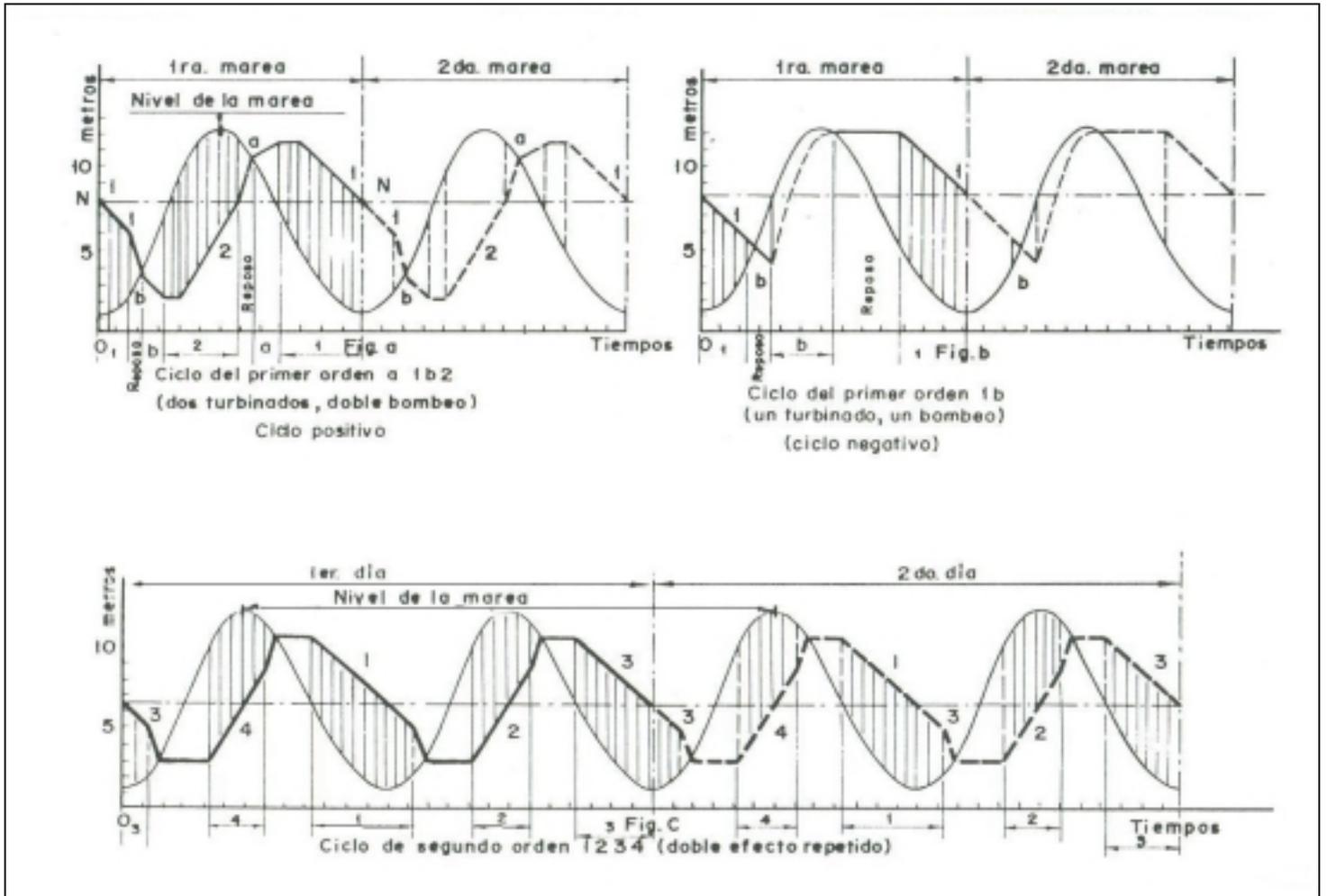


Figura 3.11: Ciclos de bombeo. [24]

Ciclo de Segundo Orden (Con dos mareas).

Los ocho posibles movimientos de operación son: dos funcionamientos al vaciado de vaso, 1 y 3 ; dos funcionamientos al llenado del vaso, 2 y 4 ; dos movimientos de bombeo del mar al vaso, a y b ; y, dos movimientos de bombeo del vaso al mar, c y d .

Por lo que el ciclo de doble efecto repetido figura 3.11(c) para las dos mareas, se podrá escribir con la notación $1\ 2\ 3\ 4$ en donde 1 indicará el primer turbinado después del primer pleamar, 2 el primer turbinado después al primer bajamar, 3 el segundo turbinado después del segundo pleamar y 4 al segundo turbinado después del segundo bajamar.

Así por ejemplo, también el simple efecto o sea un turbinado y además dos movimientos de bombeo figura 3.12(a) se escribirá con la notación $a1c$.

Los ciclos de segundo orden permitirán entonces ocho movimientos (*1 2 3 4 a b c d*), pudiéndose obtener $2^8 = 256$ combinaciones para operar la central.

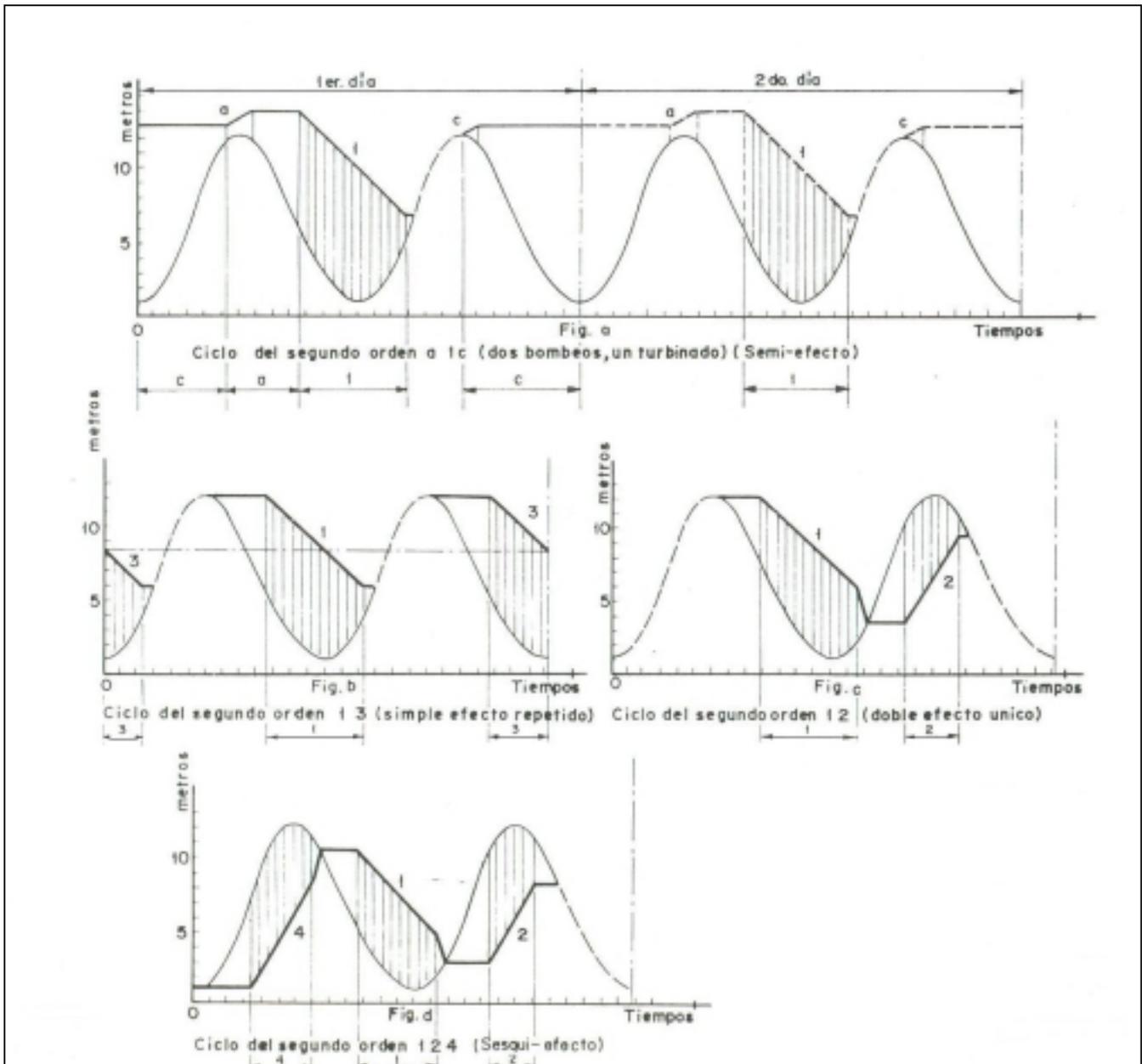


Figura 3.12: Ciclos de bombeo de segundo orden. [24]

Haciendo un paciente análisis se encontrará que de estas 256 formas de operar la central, 104 serán positivas quedando las 152 restantes como negativas.

Por el gran número de posibilidades en los ciclos de segundo orden, es muy conveniente clasificarlos atendiendo al número de movimientos del mismo orden que se repitan en el ciclo; uno, dos, tres, etc., bombeos a los que se denominarán efectos de consumo o también uno, dos, tres, etc., turbinados denominados efectos de producción; con dos mareas se podrán tener por ejemplo, dos movimientos al turbinado en un solo sentido,

mientras también se podrá operar la central con dos movimientos al turbinado en sentido opuesto.

Un ejemplo muy claro, será el de un simple efecto repetido $1-3$, en la figura 3.12(b), que tendrá el mismo movimiento de turbinado para cada marea y que es únicamente la simple operación de dos ciclos consecutivos del primer orden $1-1$; otro ejemplo es el caso de operar la central, sin tener turbinado a todo lo largo de una marea como lo muestra el doble efecto único de la figura 3.12(c), que podrá interpretarse como un ciclo del primer orden seguido de un reposo.

Así que atendiendo al número de movimientos que intervendrán en un ciclo, se clasificarán en: simple efecto único a los que únicamente tengan un solo movimiento; a los que tengan dos, como simple efecto repetido o de doble efecto único; y a los de cuatro de doble efecto repetido.

También habrá algunos ciclos que podrán estar formados por tres movimientos, a los que se denominará sesqui-efectos y que corresponden a un ciclo intermedio entre el simple efecto y doble efecto y que prácticamente se representará como $3/2$ de un ciclo del simple efecto, un ejemplo de ellos será el ciclo 124 que se muestra en la figura 3.12(d). Otros ciclos que también estarán formados por tres movimientos como el $a1c$, figura 3.12(a), se le denominan de hemi-efecto y que corresponderán a $1/2$ ciclo de un solo movimiento.

Siguiendo la clasificación que se ha mencionado, se presenta en la tabla 3.3, el número de ciclos originados para cada tipo de movimiento, que en total forman los 256 posibles ciclos de operación de segundo orden.

Tipo de movimiento	Sin bombeo	Con 1 bombeo	Con 2 bombeos	Con 3 bombeos	Con 4 bombeos	Total
Sin turbinado	1	4	6	4	1	16
Simple efecto único	4	16	24	16	4	64
Simple efecto repetido	2	8	12	8	2	32
Doble efecto único	8	16	24	12	4	64
Sesqui-efecto	4	16	24	16	4	64
Doble efecto repetido	1	4	6	4	1	16
Total	20	64	96	60	16	256

Tabla 3.3: Número de ciclos originados por cada tipo de movimiento. [24]

También en las tablas 3.4 y 3.5, se anotan en igual forma los ciclos positivos y negativos, respectivamente.

Tipo de movimiento	Sin bombeo	Con 1 bombeo	Con 2 bombeos	Con 3 bombeos	Con 4 bombeos	Total
Sin turbinado	-	-	-	-	-	-
Simple efecto único	4	8	4	-	-	16
Simple efecto repetido	2	4	2	-	-	8
Doble efecto único	4	12	12	4	-	32
Sesqui-efecto	4	12	12	4	-	32
Doble efecto repetido	1	4	6	4	1	16
Total	15	40	36	12	1	104

Tabla 3.4: Ciclos Positivos. [24]

Tipo de movimiento	Sin bombeo	Con 1 bombeo	Con 2 bombeos	Con 3 bombeos	Con 4 bombeos	Total
Sin turbinado	1	4	6	4	1	16
Simple efecto único	-	8	20	16	4	48
Simple efecto repetido	-	4	10	8	2	24
Doble efecto único	-	4	12	12	4	32
Sesqui-efecto	-	4	12	12	4	32
Doble efecto repetido	-	-	-	-	-	-
Total	1	24	60	52	15	152

Tabla 3.5: Ciclos Negativos. [24]

El funcionamiento de los 104 ciclos positivos, se podrá repartir en 29 series representativas que carecerá de sentido enumerar todas ellas. Bastará con mencionar, en la tabla 3.6, una de estas series ya que las demás se deducirán por transposición de efectos en cada serie.

Simple efecto único (4 series)	<i>1, a1, 1c, a1c</i>
Simple efecto repetido (3 series)	<i>13, a13, a1c3</i>
Doble efecto único (8 series)	<i>12, a12, 1b2, 12c, a1b2, a12c, 1bc, a1b2c</i>
Sesqui-efecto (8 series)	<i>123, a123, 1b23, 12c3, a1b23, a12c3, 1b2c3, a1b2c3</i>
Doble efecto repetido (6 series)	<i>1234, a1234, a1b234, a12c34, a1b2c34, a1b2c3d4</i>

Tabla 3.6: Serie tipo mostrando la sucesión de movimientos en un ciclo positivo de Segundo Orden. [24]

Con estos estudios se podrá lograr al operar la central:

1. Que la cantidad de kWh obtenidos cuando se ha operado con bombeo, menos los kWh gastados en él, sea mayor que los que se obtendrían si se hubiese operado sin bombeo.
2. Efectuar el bombeo en las horas de los valles o de baja demanda cuando el precio de la energía en el sistema interconectado es mínimo.
3. Generar, en buena parte, a las horas de los “picos” de demanda que es cuando la energía tiene mayor valor.

Lo descrito en todo este punto, da una idea del funcionamiento y de las múltiples variantes de operación cuando existe bombeo, cuando se toma en cuenta la hora en que debe bombearse de acuerdo con la demanda ocurrida en el sistema interconectado, y al considerar en forma realista los diferentes precios del kWh durante las diversas horas del día.

También puede apreciarse, que no obstante que las mareas siguen oscilaciones fuera del control humano, la generación de una central mareomotriz puede regularse con bastante versatilidad para que encaje mejor dentro de las demandas requeridas por el sistema eléctrico a que esté interconectada.

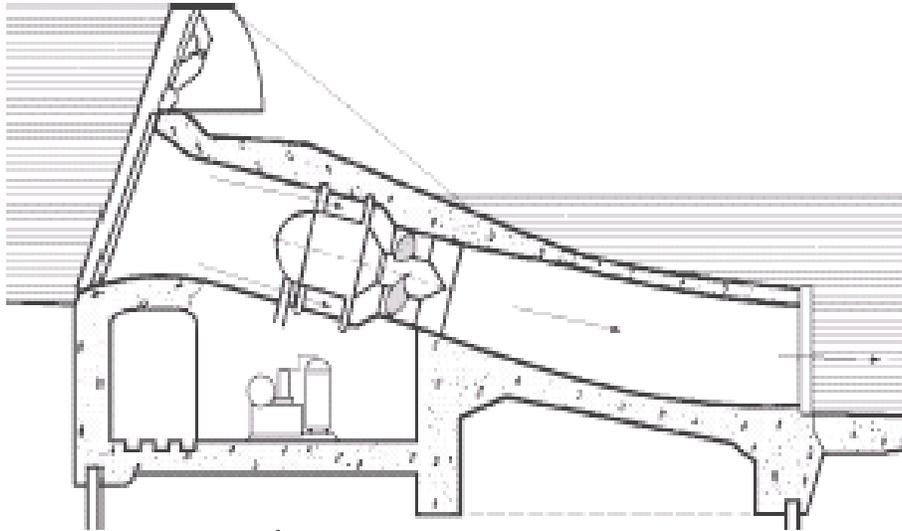
3.4. TURBINAS UTILIZADAS EN CENTRALES MAREOMOTRICES.

3.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS TURBINAS TIPO BULBO.

Los *grupos Bulbo*, como parte fundamental de las centrales mareomotrices, no son más que un tipo especial de turbina hélice, capaces de aprovechar saltos de pequeño desnivel, pero de gran caudal.

Estos grupos fueron concebidos en un principio para ser utilizados en cuencas fluviales de grandes caudales; posteriormente han sido empleados también por las centrales mareomotrices, que como sabemos se caracterizan, por pequeñas alturas y grandes

caudales. El nacimiento oficial de estos grupos Bulbo, tiene lugar el 27 de diciembre de 1933, adquiriendo el derecho de los mismos *Arno Fisher*, que en 1936 inaugura los dos primeros grupos de Rostin, figura 3.13, sobre el río Persante; la potencia de esta primera central era de 168 kW.



$H = 3.75 \text{ m}$; $Q = 6.3 \text{ m}^3/\text{s}$; $P = 195 \text{ kW}$; $n = 250 \text{ rpm}$; Diámetro del rodete = 1.35 m

Figura 3.13: Grupo Bulbo de Röstin, 1936. [94]

La ventaja de estos grupos, en los que el agua desliza axialmente, es muy superior a los tradicionales de eje vertical.

En primer lugar, se produce una mejor distribución de velocidades del agua sobre las palas, lo que permite disminuir el diámetro de las mismas, para una misma potencia en comparación con las de eje vertical; se ha comprobado que para una caída y consumo dados se obtiene la misma potencia, por ejemplo, con una rueda de 6.10 m de diámetro en deslizamiento axial, a una velocidad de 87 rpm, que con una rueda Kaplan de 7 m girando a 71 rpm.

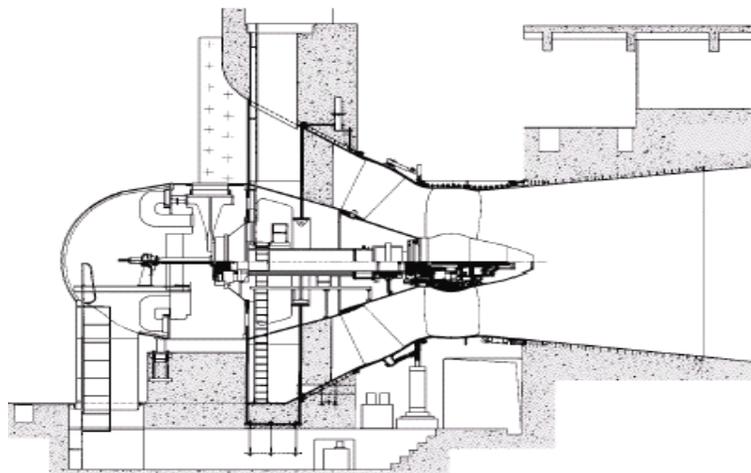


Figura 3.14: Turbina Bulbo y tubo de aspiración. [94]

En las figuras 3.14 y 3.15, se pueden observar la disposición del equipo en las obras, al ser instalados.

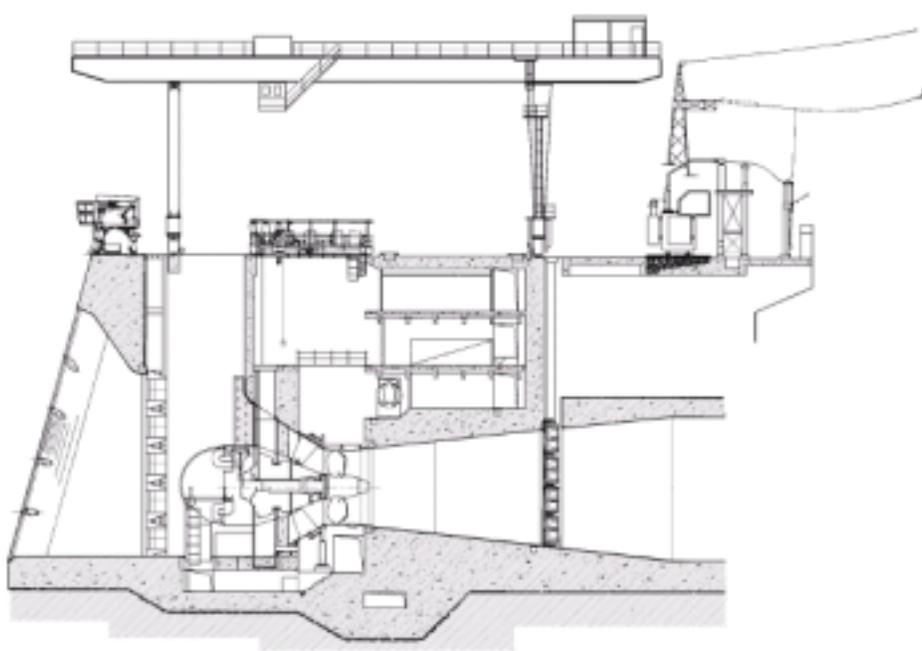


Figura 3.15: Turbina Bulbo instalada en el dique. [94]

Otra ventaja la constituye la disminución de las pérdidas de carga, tanto a la entrada como a la salida de la turbina lo que implica una mejora del rendimiento, presentando al mismo tiempo mejores condiciones a la cavitación, lo que origina una disminución del costo de la obra civil.

La búsqueda de turbo-máquinas que funcionen como turbina y como bomba, en ambos sentidos, con conductos hidráulicos de formas simples y por lo tanto económicos, que tiendan a mejorar la rentabilidad de las microcentrales y las centrales mareomotrices, condujo a la puesta a punto de los grupos Bulbo; para ello se han utilizado máquinas axiales, que requieren conductos hidráulicos de formas simples y dimensiones reducidas, y que permiten un aumento de la potencia específica, y una reducción del costo de la obra civil. La primera generación de turbinas Bulbo fueron las del tipo *Castet*, con un diámetro de rueda inferior a 2 m; con ellas se dio un paso decisivo en el conocimiento de los numerosos problemas que se fueron presentando, tanto hidráulicos como mecánicos.

Los grupos Bulbo comprenden:

- a) Un conducto troncocónico de entrada, que posteriormente se ensancha alrededor del Bulbo que contiene el generador-alternador.
- b) Un Bulbo o envoltura metálica 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. El conjunto, constituido por las aletas y las paredes exterior del Bulbo e interior del conducto conforman el predistribuidor.

- c) Un distribuidor, situado entre el predistribuidor y el rodete; está formado por un cierto número de álabes que dirigen el agua en la dirección conveniente hacia el rodete móvil; 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 buen rendimiento.
- d) La hélice, de cuatro palas orientables, permite mantener un valor alto del rendimiento para condiciones variables, tanto del salto como del caudal.
- e) El tubo de aspiración en que termina el trazado hidrodinámico, aguas abajo del rodete.

Cada grupo es capaz de funcionar en los dos sentidos de circulación del agua, bien como turbina o como bomba, siendo su potencia nominal de 10 MW por grupo; están calculados para un salto medio de 5.6 metros y un caudal de $285 \text{ m}^3/\text{s}$ en el turbinaje directo (cuando el agua circula en sentido directo, desde el embalse al mar) y para 7.15 m de salto y $240 \text{ m}^3/\text{s}$ en el turbinaje inverso, llenado, desde el mar al embalse.

3.4.2. ALTERNADOR.

Una de las ventajas y particularidades de este tipo de turbina es la disposición del conjunto formado por la turbina y el alternador. Lo cual trae en consecuencia variaciones en el rendimiento del conjunto y en el costo de las obras. En principio, los constructores se encontraron con tres alternativas para la instalación del alternador, que podía ir colocado en el exterior del Bulbo, en su periferia o en su interior.

Grupos Bulbo con el alternador en el exterior.- La idea data de la construcción de la primera presa de Asuán en 1927, pero nunca se han conseguido grandes resultados a causa de la aparición de vibraciones.

Grupos Bulbo con el alternador en la periferia.- La idea proviene del ingeniero americano, *Leroy Harza*, figura 3.16, y data de 1921; las palas hélice juegan el papel de

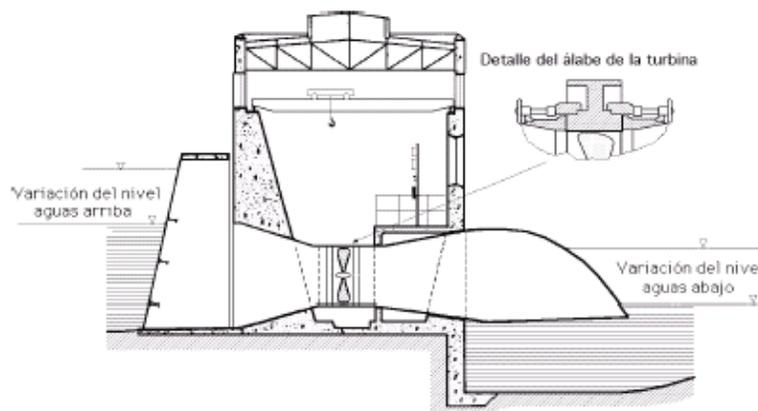
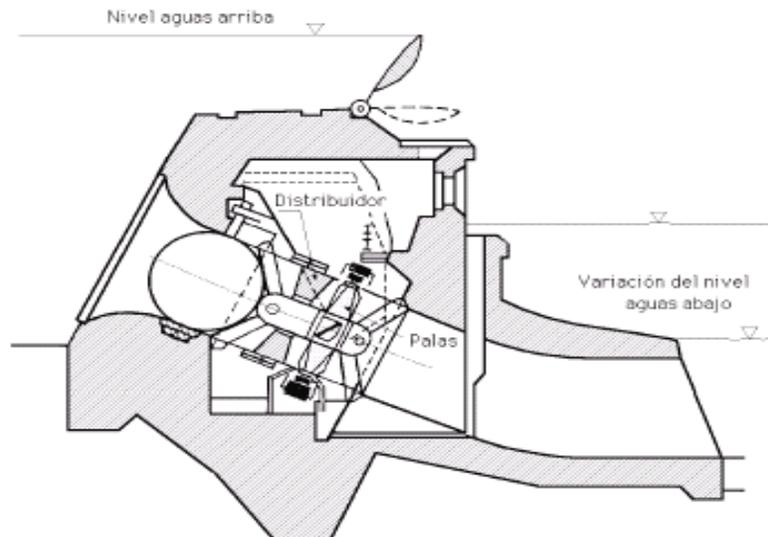


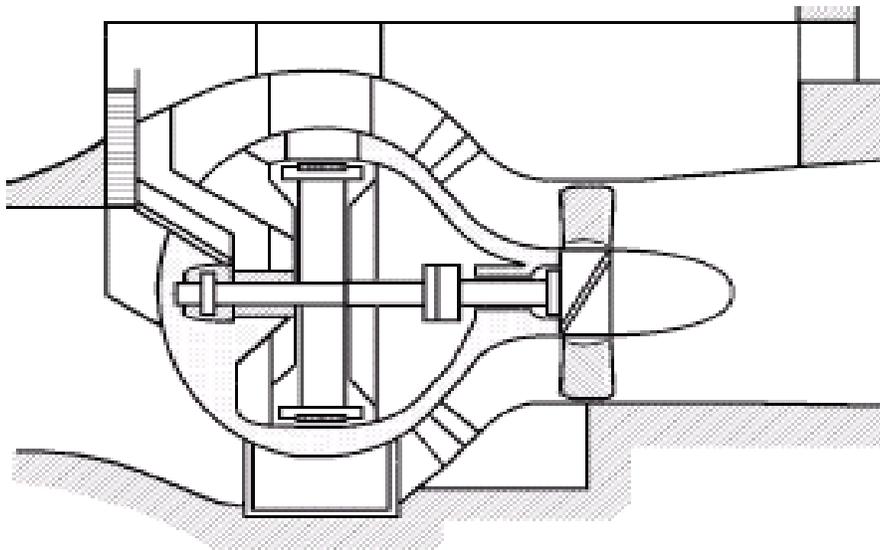
Figura 3.16: Grupo con alternador periférico (Harza). [94]

brazos del rotor lo cual hace que cuando éstas se construyen orientables, los problemas mecánicos son insalvables. Los polos magnéticos inductores del alternador se encuentran unidos solidamente a la periferia del rodete de la turbina y giran con él, turbinas Straflo.

Grupos Bulbo con el alternador en el interior.- Estos Bulbos son básicamente los que se emplean actualmente y datan como hemos mencionado de 1933, y aunque a priori fueron mal aceptados, acabaron imponiéndose. Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, Francia se interesa por la adopción de grupos reversibles mareomotrices y grupos para pequeños saltos.



$H = 9$ m; $Q = 25$ m³/s; $P = 1.75$ MW; $n = 214$ rpm; Diámetro del rodete $d = 2.15$ m
Figura 3.17: Grupo con alternador periférico de Steinbach (Baviera). [94]



Diámetro del rodete = 8 m; diámetro del Bulbo = 12 m
Figura 3.18: El primer proyecto de grupo Bulbo para el Rance, 1943. [94]

El empleo de los grupos Bulbo en las centrales mareomotrices se debe fundamentalmente a las condiciones de doble sentido tanto de funcionamiento, como a la necesidad de emplear los propios grupos Bulbo en funciones de bombeo para provocar el llenado del embalse, figura 3.18. Este tipo de funcionamiento originó problemas en los sistemas eléctricos que implicaron una disminución del tamaño del alternador, y en el sistema de refrigeración por aceite a presión, para evacuar el calor y evitar las entradas de agua en el recinto sumergido del alternador, lo que indujo a construir un grupo único (turbina-alternador) siendo en este momento cuando nacen los auténticos grupos Bulbo de aplicación exclusiva en las centrales mareomotrices, que tienen como características principales:

- Paso del agua a su través, axialmente.
- Funcionamiento en los dos sentidos y posibilidad de actuar como bomba para el llenado del embalse.

Entre otros tipos de grupos Bulbos hay que señalar aquellos que por su concepción están dedicados a aprovechar saltos pequeños con caudales relativamente pequeños; entre estos son de destacar los grupos en sifón, figura 3.19, que se emplean para saltos de 1.5 a 3 m con caudales del orden de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo sus potencias del orden de 50 a 300 kW.

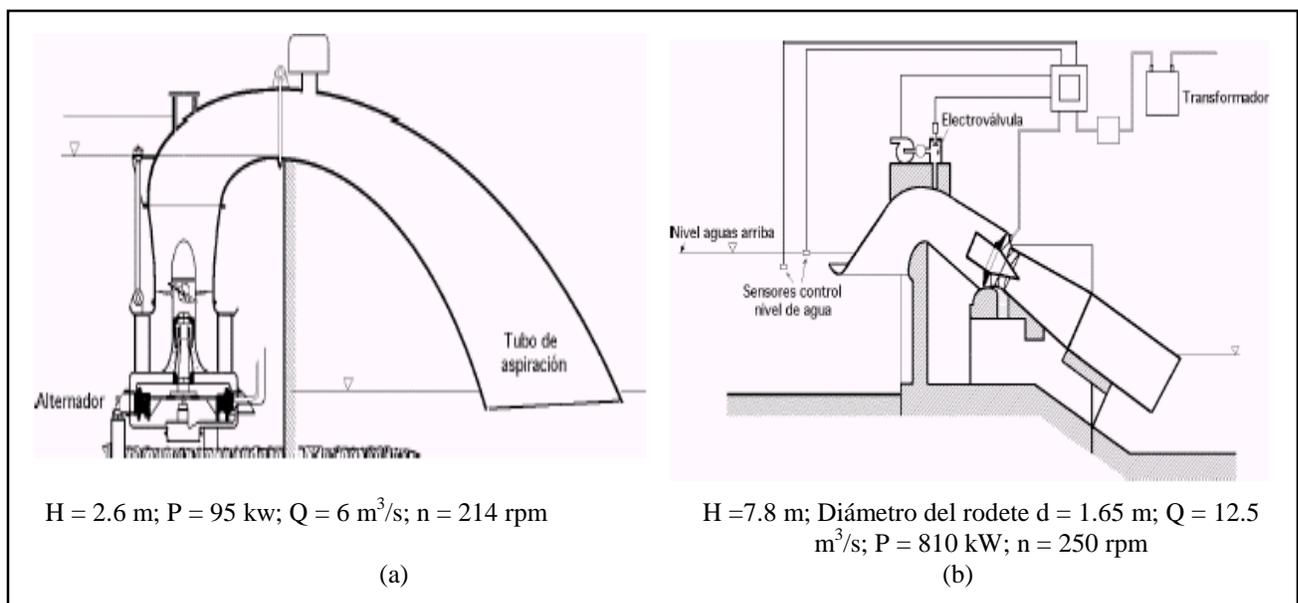
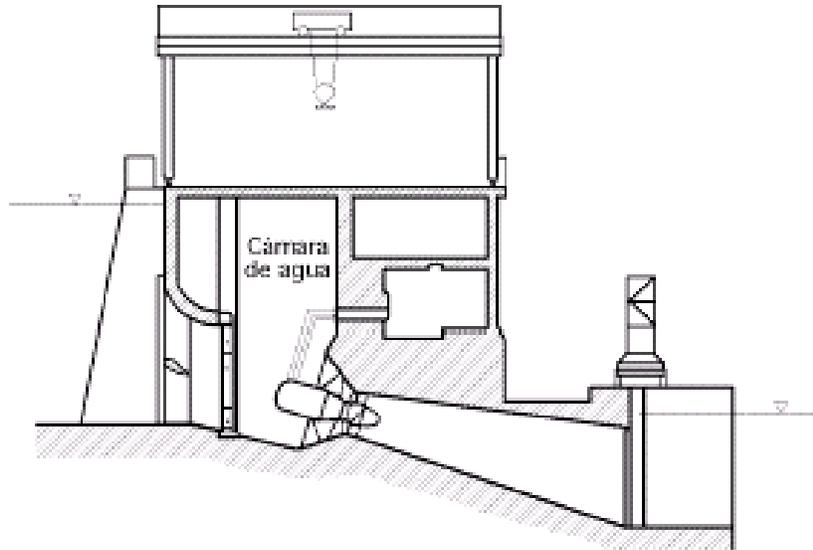


Figura 3.19: a) Sistema Bulbo con sifón-aspirador a la salida;
b) Sistema de Bulbo con depósito de agua
y sifón aguas arriba. [94]

Otro tipo lo constituyen los grupos en depósito de agua, para consumos del orden de 10 a $15 \text{ m}^3/\text{s}$, aunque excepcionalmente pueden alcanzar consumos de $28 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo las alturas del salto generalmente superiores a las de sifón, figura 3.20.



$Q = 7.5 \text{ m}^3/\text{s}$; $H = 15.5 \text{ m}$; $P = 0.8 \text{ MW}$; $n = 500 \text{ rpm}$; Diámetro del rodete $d = 1.12 \text{ m}$
 Figura 3.20: Sistema de grupo Bulbo instalado en cámara de agua (Castet), 1954. [94]

Otro modelo de características parecidas, aunque todavía de mayor caída, lo constituye los **Bulbos en conducción**, cuya principal característica es su sencillez, pues confunden la presa y la central en una única obra figura 3.21.

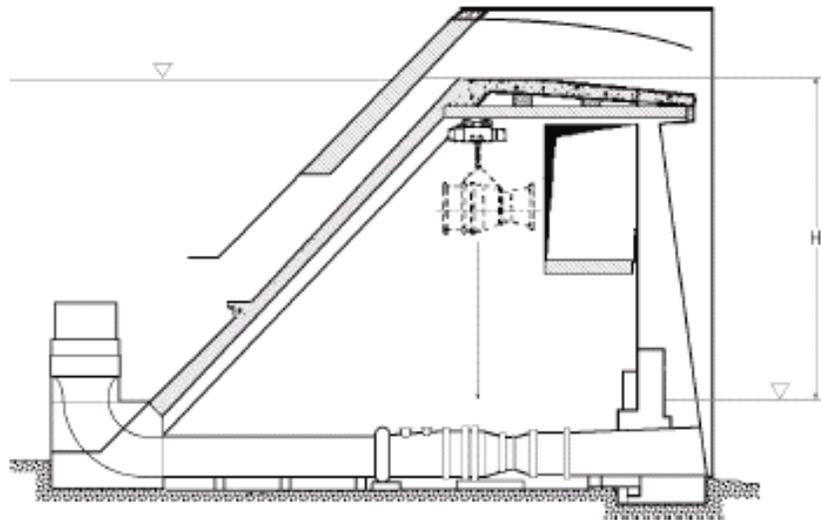


Figura 3.21: Sistema de Bulbo en conducción. [94]

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

$$P_N = K_u D L n$$

en la que:

D es el diámetro del estator en metros,

L la longitud axial del circuito magnético del estator en metros,
 n la velocidad de rotación en rpm, y
 K_u un coeficiente de utilización de la potencia.

El valor del diámetro D del estator viene impuesto por el diámetro D_e de la turbina, según la relación, $D \leq 2D_e$. Se observa, que al disminuir el diámetro del estator D y mantener constante la potencia, hay que aumentar la velocidad de giro, la longitud del alternador y el valor del coeficiente K_u . La posibilidad de aumentar en los grandes grupos el número n de revoluciones por minuto, es difícil debido a complicaciones técnicas, alcanzándose como máximo velocidades del orden de 140 rpm. La modificación de L viene condicionada por la ventilación axial del alternador, no pudiéndose utilizar ventilación radial debido al bajo número de revoluciones por minuto del rotor.

El coeficiente K_u es de la forma:

$$K_u = K B_d I,$$

en la que B_d es la inducción en el entrehierro en vacío, en Teslas, I es la corriente por centímetro periférico, en A/cm, y K es el factor de potencia.

- a) Para aumentar I es preciso aumentar la permeabilidad del medio.
- b) Para aumentar B_d es preciso aumentar la corriente de excitación y la densidad de corriente en las bobinas del rotor.

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

3.4.3. TRAZADO HIDRÁULICO DE LOS GRUPOS BULBO.

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

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

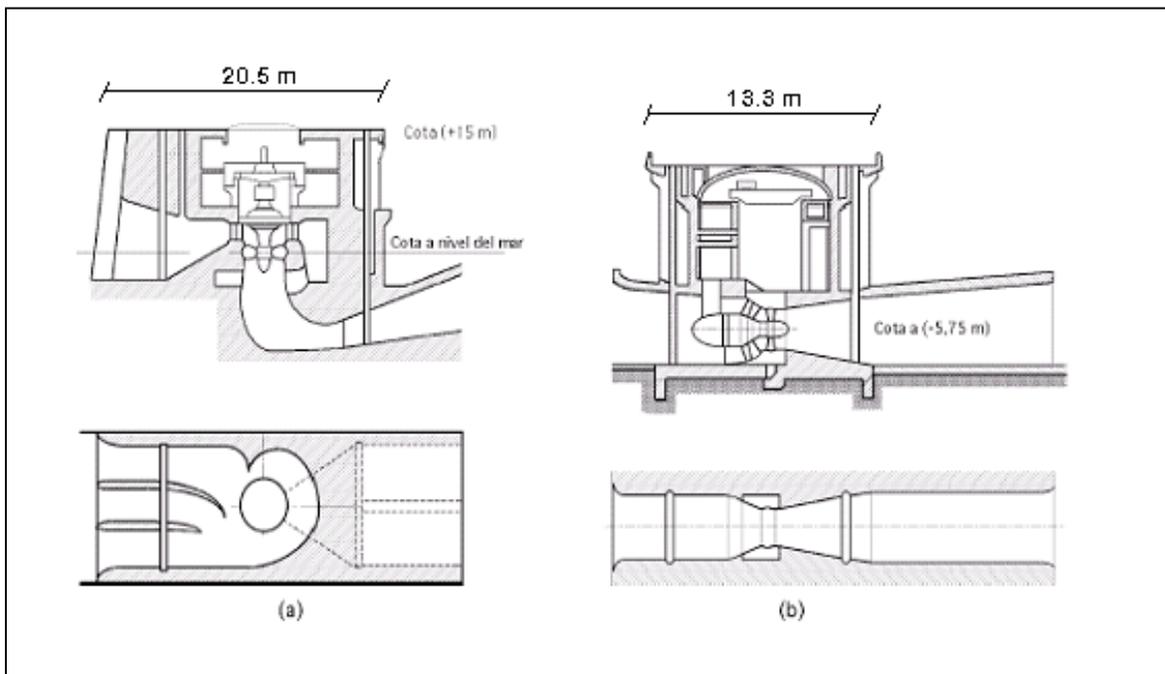


Figura 3.22: Conductos hidráulicos requeridos por una turbina Kaplan y un grupo Bulbo. [94]

En la figura 3.22 se comparan un grupo convencional Kaplan proyectado en principio para el Rance, con el tipo Bulbo definitivamente adoptado.

Mientras la turbina Kaplan, con 9 MW, necesitaba una longitud de dique de 20.5 m, la turbina Bulbo, con 1 MW más, ocupaba sólo 13.3 m, pudiéndose apreciar en la citada figura que las obras requeridas para este último son también más sencillas.

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

3.4.3.1. EL TUBO DE ASPIRACIÓN.

La energía cinética a la salida del rodete alcanza un valor próximo a la energía total del salto, lo que muestra la importancia del tubo de aspiración en las máquinas con grandes potencias específicas.

Un deslizamiento axial uniforme a la salida de la rueda es difícil de obtener, incluso para un solo sentido de funcionamiento; se obtendría un excelente rendimiento si se tomase la precaución de escoger un adecuado ángulo α_0 en el codo del tubo de aspiración.

Sin embargo, para este ángulo ideal α_0 la longitud del tubo de aspiración tendería a aumentar y llegaría a alcanzar valores económicamente inaceptables, por lo que la

ingeniería hidráulica se vería obligada a elegir una sección de salida igual a casi cuatro veces la sección de la rueda, lo que implicaría el riesgo de desprendimiento de la capa límite, con la consiguiente erosión del conducto. En la figura 3.23 se puede observar la denominación de los ángulos α , a través de una ley de reparto de velocidades, donde se usan diagramas de triángulo que corresponden a la mitad del paralelogramo formado por una velocidad tangencial, una velocidad relativa y una velocidad absoluta.

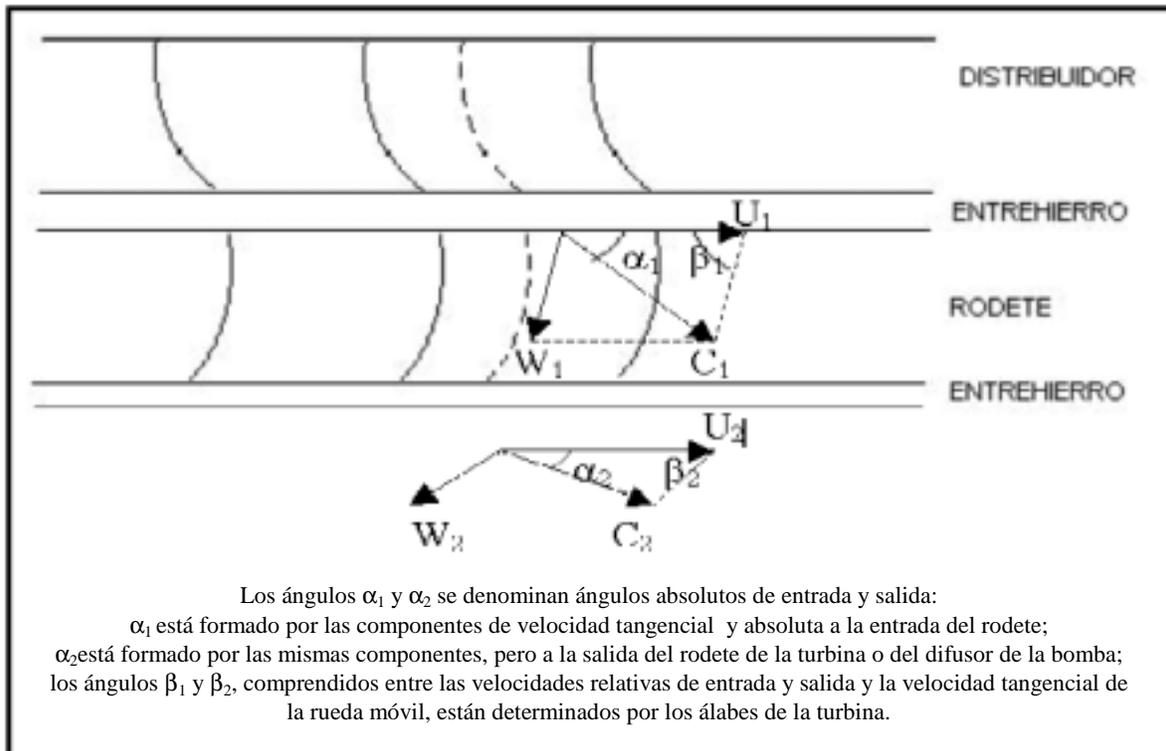


Figura 3.23: Diagrama de velocidad de una turbina axial. [53]

La elección de un momento cinético residual y de una ley de reparto de velocidades tangenciales a lo largo de la sección, es difícil, debido a que las pérdidas en el tubo de aspiración no provienen únicamente del desprendimiento de la capa límite, sino también de corrientes de retorno en la parte central. Cuando el momento cinético a la entrada del aspirador llega a ser demasiado grande, las pérdidas por estas corrientes de retorno, crecen también muy rápidamente.

La figura 3.24 proporciona las pérdidas en el aspirador de un grupo Bulbo y de uno Kaplan; se han llevado en ordenadas las pérdidas y en abscisas el ángulo que forma la velocidad absoluta en el aspirador con el eje de la máquina α , observándose que las pérdidas crecen más rápidamente para valores superiores al ángulo óptimo que para valores inferiores. En suma el flujo en el tubo aspirador depende del trazado del conjunto de los conductos hidráulicos y de la rueda.

Las pérdidas en el aspirador troncocónico provienen casi únicamente de los desprendimientos de la capa límite, de las turbulencias, y de los grandes remolinos que originan tales desprendimientos.

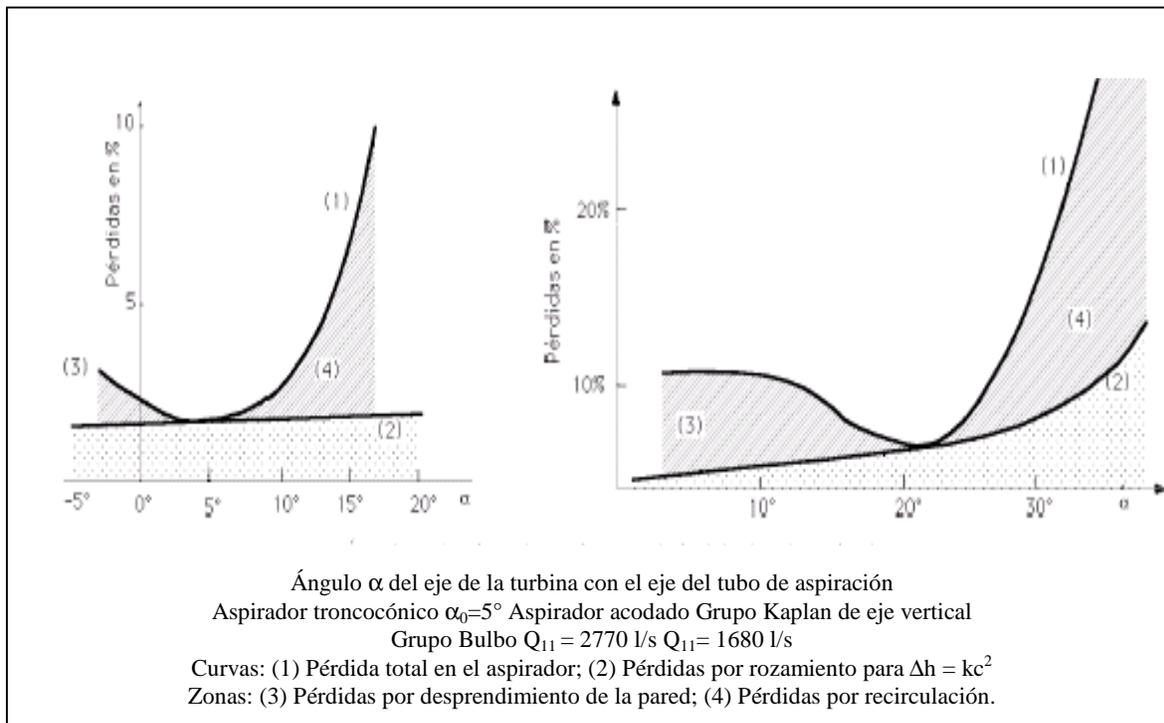


Figura 3.24: Pérdida de carga en algunos tipos de tubo de aspiración de turbinas Bulbo y Kaplan. [94]

La energía cinética a la salida del tubo aspirador de un grupo Bulbo es del orden de 1.4 a 1.5 veces la energía cinética a la salida del rodete ($1 \text{ cm}^2 / 2g$); en un grupo Kaplan llega a ser ($3 \text{ cm}^2 / 2g$).

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

3.4.3.2.CONDUCTOS.

Las pérdidas de carga en los conductos de los grupos Bulbo y Kaplan, son comparables; sin embargo, las dimensiones de los conductos aguas arriba del distribuidor del grupo Bulbo son más pequeños que los de la Kaplan. Una limitación de las dimensiones de los conductos aguas arriba, permite disminuir la longitud de la central y alojar el conjunto del grupo entre paredes planas, verticales y paralelas, obteniéndose así una mejora en la potencia para una longitud de central dada.

Estas disposiciones de conjunto exigen también que el diámetro del Bulbo y, por lo tanto, el del estator del alternador sea inferior al diámetro del rodete, por lo que el futuro desarrollo de estas máquinas se encuentra condicionado por la posibilidad de construir alternadores de diámetro reducido, que sería muy importante para los grupos mareomotores que funcionan en los dos sentidos.

El crecimiento de las potencias específicas, conduce a grupos con diámetro de rodets de 7.5 a 8 m. Para no aumentar el precio de los distribuidores móviles, se han adoptado álabes directrices de formas simples; las generatrices de los nervios de éstos álabes concurren en el vértice de un cono que contiene los ejes de las directrices; este vértice constituye un centro de homotecia para los diferentes nervios, por lo que estas formas en el diseño simplifican considerablemente su construcción.

El trazado óptimo del rodete exige que las directrices posean una cierta torsión (álaves alabeados), lo que supone un aumento en el costo del distribuidor, que lo pueden hacer económicamente inaceptable. Se obtiene un reparto correcto de las velocidades a la entrada del rodete, jugando con la forma de las paredes, con la geometría del distribuidor y con la forma de los perfiles homotéticos de las directrices; hasta el presente, para los grupos Bulbo con un solo apoyo aguas arriba, la relación entre los diámetros de entrada y de la rueda es del orden de 0.8 a 0.9; si se trata de grupos de 7.5 a 8 m de diámetro esta relación aumenta hasta 1.2 ó 1.3 para facilitar la construcción de la carcasa del alternador y su posterior montaje en varias piezas.

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

Se pueden concebir grupos de potencia específica elevada con una relación entre el diámetro del alternador y el de la rueda del orden de 1.2 a 1.3 adoptando un ángulo medio en el vértice del distribuidor del orden de 40° a 50° pero esto implica problemas en la alimentación de la rueda.

3.4.3.3.CAVITACIÓN.

Los grupos Bulbo entran en la categoría de turbinas alimentadas por saltos fuertemente variables por lo que las condiciones que provocan la cavitación se tienen que analizar con detenimiento, así como el diseño de las zonas que son propensas a su formación y desarrollo con la reducción de la tensión, estabilidad de los deslizamientos, vibraciones, etc.; por razones económicas no se puede adoptar un diseño que cumpla con todas estas premisas y garantice la máquina contra todo efecto de cavitación. Las observaciones sobre la aparición y desarrollo de la cavitación constituyen un conjunto de datos, sin los cuales no se podría realizar el trazado de las palas; pero sobre todo sirven para definir en las diferentes zonas de funcionamiento los márgenes que se pueden adoptar.

Para la determinación del diseño de los grupos Bulbo se adoptan las mismas reglas y los mismos parámetros obtenidos a partir de los resultados de explotación de las turbinas Kaplan, obteniéndose un margen de seguridad suficiente.

3.4.4.POTENCIAS ESPECÍFICAS DE LOS GRUPOS BULBO.

De acuerdo a especificaciones, se sabe que el caudal de una turbina unidad Bulbo alcanza los $4 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el de una turbina Kaplan no llega a los $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$; la velocidad en los grupos Bulbo llega a valores de $n= 250 \text{ rpm}$ y la de una Kaplan a 200 rpm . Para saltos equivalentes, la contrapresión sobre las palas de una turbina Bulbo es más elevada que sobre las de una Kaplan de la misma potencia nominal. Los límites citados se corresponden con una potencia máxima del alternador, con el límite de cavitación y con la abertura máxima del distribuidor.

Se puede hablar de una equivalencia entre el salto y el número de rpm del rodete bulbo y el salto y el número de rpm del rodete Kaplan. Para ejemplificar:

$$\frac{\text{Turbina Kaplan}}{\text{Turbina Bulbo}} = \frac{\text{Salto (7m)}}{\text{Salto (6.1m)}} = \frac{83.3\text{rpm}}{71.4 \text{rpm}} = 1.15,$$

la relación entre salto y número de revoluciones por minuto es 1.15.

El peso de la turbina Bulbo es sensiblemente inferior al de la turbina Kaplan, como se indica en la Tabla 3.7:

	Grupo Kaplan	Grupo Bulbo	% en peso
Turbina	720 Tm	575 Tm	-20%
Alternador	270 Tm	145 Tm	-45%
Grupo completo	990 Tm	720 Tm	-27%

Tabla 3.7: Relación en peso entre los grupos Bulbo y Kaplan. [94]

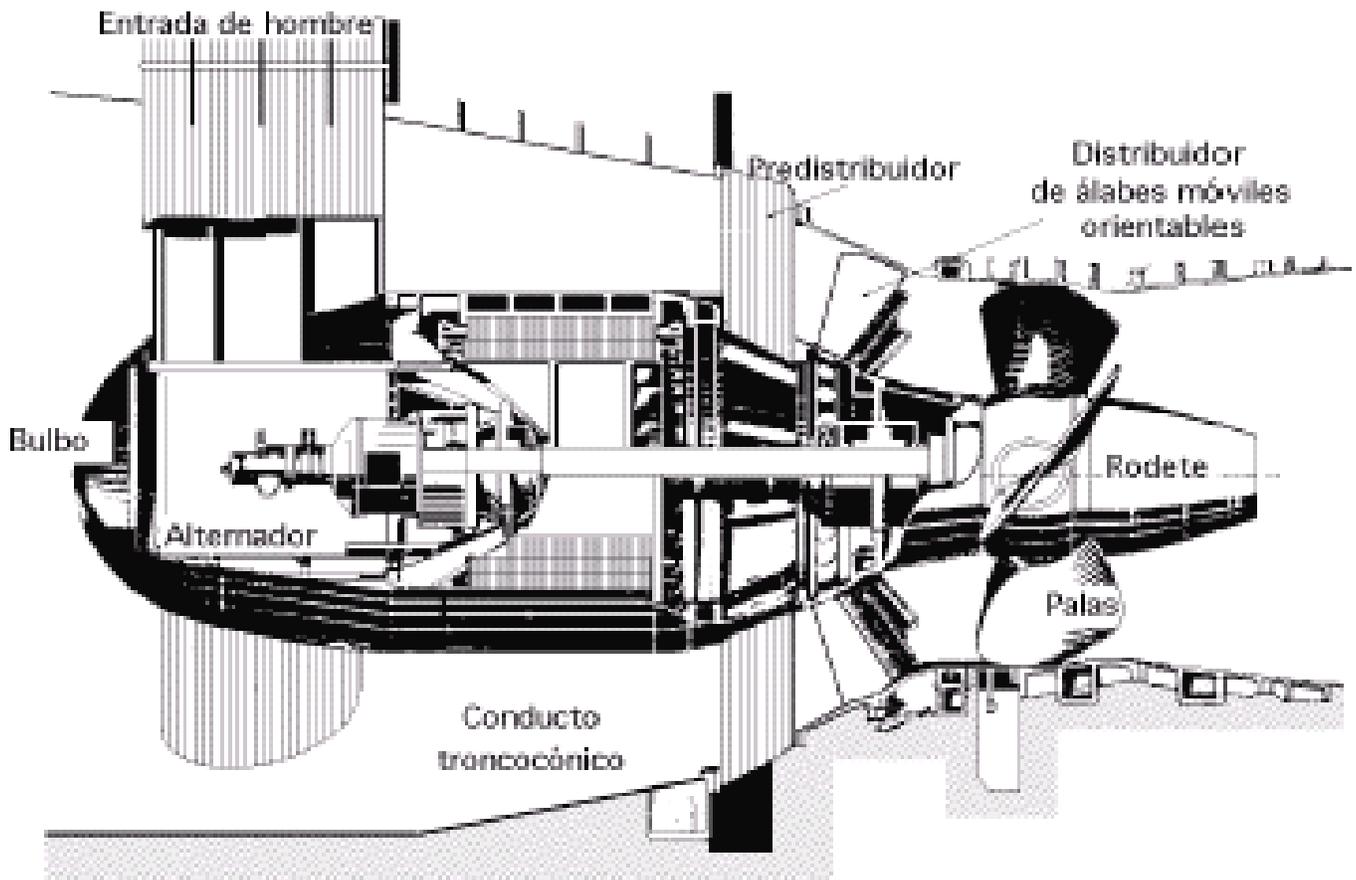
3.4.5.PARÁMETROS PARA SELECCIÓN.

Entre los parámetros característicos de los equipos empleados en una central mareomotriz, destacan los siguientes:

- La elección del diámetro del rodete que fija la escala de la obra civil de la instalación, siendo una necesidad económica la tendencia a los grandes diámetros.
- Las alturas nominales tienden a ser iguales a la altura mínima necesaria para obtener la potencia nominal; estas alturas nominales son lo bastante bajas como para satisfacer bien las pequeñas mareas, pero suficientes para no rebajar las grandes.

Estos dos parámetros condicionan la velocidad de rotación del grupo y por lo tanto las dimensiones del alternador.

En la figura 3.25 se muestran los elementos de una turbina tipo bulbo, así como sus dimensiones, con lo que se puede apreciar la magnitud de cada componente.



$H = 11.30 \text{ m}$; $Q = 89 \text{ m}^3/\text{s}$; $P = 8.5 \text{ MW}$; $n = 150 \text{ rpm}$; Diámetro del rodete, $d = 3.80 \text{ m}$

Figura 3.25: Grupo Bulbo de Beaumont-Montoux. [94]

En la tabla 3.8 se muestran algunos ejemplos de turbinas que ya se encuentran en funcionamiento y se describen algunas de sus características de mayor consideración.

Año	1980	1980	1980	1982	1983
País	Bélgica	Bélgica	Suiza	Austria	Canadá
Localidad	Andenne	Lixhe	Högg	Weizöde	Annapólis
Unidades	3	4	1	2	1
Diámetro de Rodete (m)	3.5	3.55	3	3.7	7.6
Salto (m)	5.5	5.5	3.5	11	7.1
Potencia (MW)	3.5	3.5	1.5	8	20

Tabla 3.8: Algunas realizaciones. [94]

Como los lugares apropiados para una instalación de este tipo están caracterizados por unos saltos variables entre cero y un máximo de 13 a 14 metros, los funcionamientos a baja altura de carga influyen fuertemente sobre la productividad de las instalaciones mareomotrices; las disposiciones posibles que intentan disminuir esta influencia son:

- a) La utilización de un multiplicador de velocidad colocado entre el rodete y el alternador, que permite a éste no sólo girar más deprisa, sino también reducir su diámetro y, por tanto, también el tamaño del Bulbo que condiciona en general, al grupo. Además su empleo permitiría la utilización de un alternador más clásico, de mayor rendimiento y de un precio más bajo, rentabilizando las instalaciones de baja altura, que son las de mayor interés para las centrales mareomotrices.
- b) El funcionamiento de los grupos a velocidad variable utilizando unos convertidores estáticos de frecuencia a potencia total o a potencia nominal, que permitan el desembrague automático del alternador cuando la velocidad pase de un umbral prefijado, lo que limitará la velocidad de embalamiento del alternador.

3.5. CENTRALES MAREOMOTRICES EN EL MUNDO.

En la actualidad, se considera que una condición necesaria, pero no suficiente, para el aprovechamiento de las mareas en la generación de energía eléctrica, es que se tengan amplitudes de mareas de por lo menos 4 m. Esto es, debido a que la tecnología actual requiere de esas condiciones para el buen funcionamiento de los equipos.

La extracción de la energía de las mareas es considerada práctica solamente en esos sitios donde la energía de las mareas es grande y la geografía suministra sitios apropiados para la construcción de la planta mareomotriz. Tales sitios no son comunes, pero se han identificados varios lugares alrededor del mundo.

Como se podrá observar en la tabla 3.9, hay países que cuentan con más de un lugar que presenta las condiciones necesarias para pensar en hacer uso de este recurso.

País	Localidad	Rango medio de marea (m)	Área del vaso (km ²)	Posible capacidad a instalar (MW)	Producto anual aproximado (TWh/año)	Factor de carga anual de la planta (%)
Argentina	San José	5.8	778	5 040	9.4	21
	Golfo Nuevo	3.7	2 376	6 570	16.8	29
	Río Deseado	3.6	73	180	0.45	28
	Santa Cruz	7.5	222	2 420	6.1	29
	Río de Gallegos	7.5	177	1 900	4.8	29
Australia	Secure Bay	7.0	140	1 480	2.9	22
	Ensenada de Walcott	7.0	260	2 800	5.4	22
Canadá	Cobequid	12.4	240	5 338	14.0	30
	Cumberland	10.9	90	1 400	3.4	28
	Shepody	10.0	115	1 800	4.8	30
India	Golfo de Kutch	5.0	170	900	1.6	22
	Golfo de Khambat	7.0	1 970	7 000	15.0	24
Corea	Garolim	4.7	100	400	0.836	24
	Cheonsu	4.5			1.2	
México	Río Colorado	6-7				
Reino Unido	Severn	7.0	520	8 640	17.0	23
	Mersey	6.5	61	700	1.4	23
	Duddon	5.6	20	100	0.212	22
	Wyre	6.0	5.8	64	0.131	24
	Conwy	5.2	5.5	33	0.060	21
Estados Unidos	Pasamaquoddy	5.5				
	Brazo de Knik	7.5		2 900	7.4	29
	Brazo de Turnagain	7.5		6 500	16.6	29
Consejo de Administración de la Reserva Federal Rusa.	Mezen	6.7	2 640	15 000	45	34
	Tugur	6.8	1 080	7 800	16.2	24
	Penzhinsk	11.4	20 530	87 400	190	25

Tabla 3.9: Posibles lugares para la generación de electricidad utilizando energía mareomotriz. [83]

3.5.1. AMÉRICA.

Argentina.

Las amplitudes de mareas en ciertas partes de la costa patagónica, se encuentran entre las cuatro más pronunciadas del mundo. Desde la Provincia de Santa Cruz, a medida que se avanza hacia el norte, las amplitudes van progresivamente disminuyendo excepto en Golfo de San Matías, Golfo de San José y Golfo Nuevo, en los cuales, por fenómenos de reflexión y corrientes diversas, las mareas son más altas que en las zonas vecinas, y es en la Península de Valdés donde la amplitud de mareas es considerable (seis metros).

Entre las mareas del Golfo San José y del Golfo Nuevo, existe una diferencia horaria de seis horas; hay que mencionar, que cuando el Golfo Nuevo está en pleamar, el Golfo de San José está en bajamar y viceversa. Esta característica puede ser muy provechosa si fuere debidamente explotada, mediante una central de energía mareomotriz, pues es la naturaleza misma la que nos ofrece una central de bombeo absolutamente gratuita. Desde hace más de medio siglo, esta peculiaridad geográfica ha despertado el interés de los estudiosos con el objeto de aprovecharla en sus capacidades energéticas que actualmente se “pierden” diariamente.

Características de la Península de Valdés.

Este extraño accidente costero de la provincia de Chubut se caracteriza por constituir una de las reservas de fauna más importantes del mundo. Se asemeja a una isla de forma casi rectangular, con dimensiones aproximadas de 17 km por 50 km, lo que supone una superficie algo superior a los 800 km² y un perímetro estimado en 160 km de costas marítimas. En la figura 3.26 se observa que está unida al continente por una estrecha franja de 35 km de largo y 7 km de ancho, denominada istmo Carlos Ameghino, que separa al Golfo de San José (al Norte) del Golfo Nuevo (al Sur). Predomina en la Península el clima marítimo, más templado que el continental, gracias a la corriente cálida del Brasil que eleva la temperatura del agua y suaviza el clima del litoral argentino.

La diferencia horaria entre las mareas de ambos golfos, tiene su explicación en la interferencia provocada por dos ondas de corriente del mismo origen y que provienen de las aguas antárticas. Una de ellas avanza de sur a norte contorneando las costas; la otra, más oriental, se desvía al topar con los fondos marinos que circundan a las Islas Malvinas, las bordea por el Este y posteriormente gira hacia el Oeste dirigiéndose hacia la costa patagónica, donde se encuentra con la onda de marea anterior.

Estas dos corrientes del mismo origen se encuentran desfasadas por la distinta longitud de su recorrido, creando niveles máximos y mínimos diferentes a los que cabría esperar de una marea normal. Y es precisamente en la Península de Valdés donde se produce una alta oscilación en los registros alternados en el horario, debido además a las particulares características de ambos golfos. El Golfo San José tiene su desembocadura orientada hacia el norte, mientras que la del Golfo Nuevo da frente al sudeste. Ello provoca un retraso en la marea del San José: se manifiesta más tarde en él que en el Golfo Nuevo.



Figura 3.26: Península de Valdés, Argentina. [117]

El desfase de mareas que ocurre al Norte y al Sur de la Península de Valdés no es el único en el mundo. En efecto, a ambos lados del istmo de Cotentín, en Francia, se produce un fenómeno similar.

Diversos estudios y proyectos fueron emprendidos para la evaluación de las posibilidades reales, entre los que se cuentan los de la firma Sogreah en 1959 (central de 600 MW) y los de Agua y Energía en 1975 (central de 5300 MW). Dentro de este variado rango de potencia a instalar, sea cual sea la solución a adoptar, es claro que una modificación en la circulación natural por corte del istmo puede llegar a provocar variaciones en el fenómeno de desfase, disminuyendo la caída neta y por lo tanto la producción energética.

Las mareas a lo largo de la costa sur argentina se clasifican entre las más grandes del mundo. De lo anterior se desprende que hay varios puntos costeros que pueden ofrecer interés energético; de ellos, el Golfo San José, y el Golfo Nuevo, separados por el Istmo Ameghino, en el comienzo de la Península Valdés, son los que hasta ahora han llamado más la atención.

A continuación se resumen las ideas y proyectos más importantes presentados a la fecha en relación con ese aprovechamiento energético.

Los aprovechamientos estudiados por Oca Balda y Romero (2000 MW, informe de la comisión Nacional Honoraria, 1928), Fenzloff (4900 a 6800 MW, 1972) y Aisicks y Zyngierman (5040 MW, 1984) se basan en lo que a priori aparece como solución inmediata: el cierre de uno de los golfos, en este caso el San José, creando un inmenso embalse instalando las turbinas necesarias de tal manera que las mismas puedan generar

energía traspasando el agua desde el océano al golfo y viceversa, aprovechando las diferencias de nivel que se crearían a uno y otro lado del cierre.

Sin embargo, el cierre del Golfo San José exigiría diques que van desde los 8 a los 13 km de longitud con profundidades en algunos casos de hasta 40 m, y agravado esto por las enormes corrientes de la zona, que poco tienen que ver con las condiciones imperantes en un estuario. O sea que, sin entrar en un estudio más detallado, surge la duda sobre la magnitud de las inversiones, que podrían no justificar este sistema de explotación.

La apertura del canal a través del istmo aparece como más viable, presentando el atractivo adicional de permitir la realización de una central no muy grande, con posibilidades de ampliación posterior. La propuesta de Erramuspe (55 MW, 1949) fue retomada sin mayores modificaciones por Sogreah (600 MW) en 1959.

La potencia que generaría esta central, sin embargo, tendría como desventaja una salida de magnitud oscilante variando en ciclos de 6 horas desde cero hasta un máximo y volviendo a cero de acuerdo a la fluctuación de la diferencia de niveles entre los golfos, lo que resulta inconveniente si la central se conecta a una red pequeña o de moderada capacidad. A fin de corregir esta situación, tratando de conseguir una salida más uniforme, se atacó el problema según dos líneas de estudio:

- Cerrando ambos golfos (Loschakoff, 1200 MW, 1957).
- Creando una central adicional de bombeo (Agua y Energía, 5300 MW, 1975).

A la primera selección se le critican los mismos inconvenientes señalados con respecto a los proyectos sobre el Golfo San José, ya que en este caso se pretende el cierre de ambos golfos, lo que además de los costos acarrearía seguramente un violentísimo impacto ambiental. La segunda propuesta parecería ser la más adecuada, pero el enorme caudal supuesto para descargar a través del canal ($220,000 \text{ m}^3/\text{s}$) se acerca peligrosamente a los caudales netos de ingreso a los Golfos Nuevo ($550,000 \text{ m}^3/\text{s}$) y San José ($340,000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Canadá.

La región más conocida en Canadá, es la Bahía de Fundy, figura 3.27, la cual en 1980 comenzó su construcción en una isla pequeña en la boca del río de Annápolis sobre una central mareomotriz experimental. La central mareomotriz de generación eléctrica Annápolis fue completada en 1984. Era un proyecto piloto patrocinado por los gobiernos provinciales y federales. Su finalidad era analizar el potencial de aprovechamiento de la energía del mar. Emplea la turbina más grande de flujo continuo del mundo entero, la cual genera más de 30,000,000 kWh de electricidad por año, suficiente para 4500 casas.

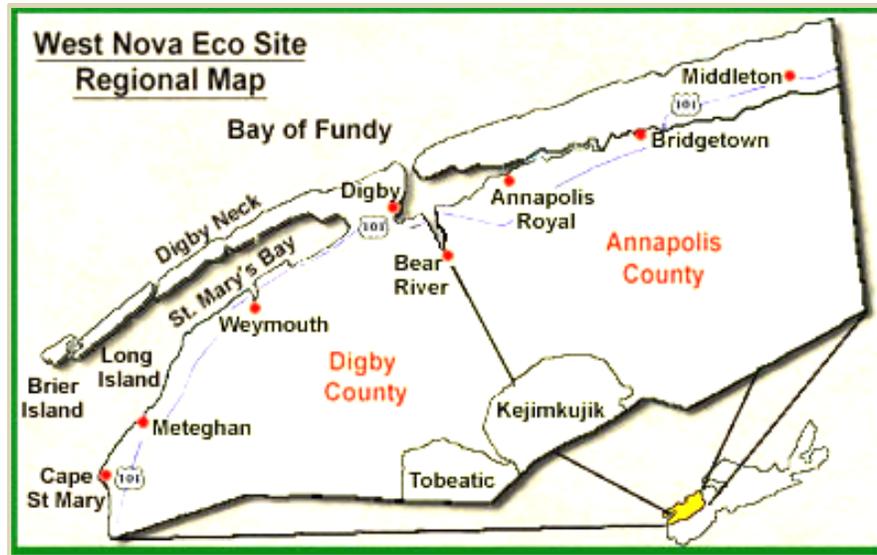


Figura 3.27: Bahía de Fundy, Canadá. [86]

El potencial durante la generación eléctrica en la Bahía de Fundy (figura 3.28) es enorme. La central mareomotriz en la cuenca de Minas y la cuenca de Cumberland podían generar más electricidad que el producido actualmente en Nueva Escocia. Sin embargo, el impacto ambiental de los aluviones inmensos podía ser trascendental. Serían requeridos estudios adicionales, por ejemplo, para determinar el posible impacto de estos aluviones sobre las mareas a lo largo de la costa oriental.

Las mareas más altas sobre la Tierra ocurren en la cuenca de Minas y la cuenca de Cumberland, al extremo oriental de la Bahía de Fundy, donde el alcance medio de marea es de 12 m y puede llegar a ser de 16 m cuando los distintos factores que afectan las mareas están en fase (aunque las mareas más altas ocurren típicamente a dos días después de que las influencias astronómicas llegan a su máximo apogeo). La capacidad de producto de mareas de Annapolis es 20 MW.



Figura 3.28: Obras de la Bahía de Fundy.[86]

Estados Unidos de Norteamérica.

En la región de Passamaquoddy; se proyectan 400 MW; con un área de vaso de 300 km²; y una amplitud de marea de 5.5 m.

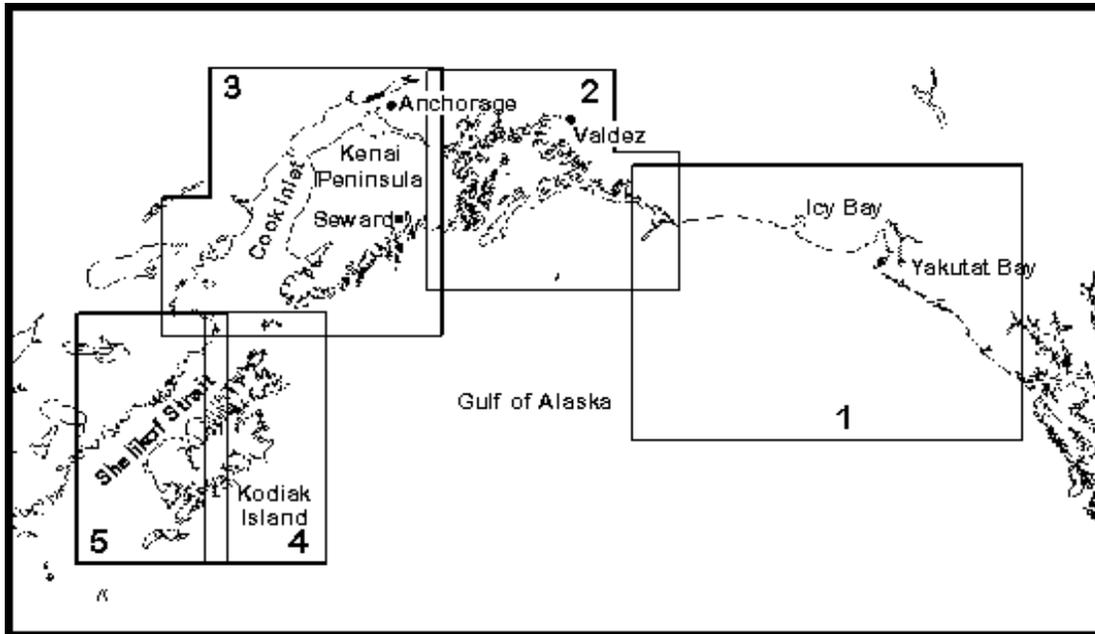


Figura 3.29: Golfo de Alaska. [134]

Además, en la Bahía de Cook (figura 3.29), en Alaska, el poder podría alcanzar hasta 18,000 MW; en un vaso de 3100 km², y hasta 4.35 m de variaciones de marea.

México.

Dos áreas en el Golfo de California han sido consideradas desde hace tiempo, una cerca a Isla Montague en la desembocadura del Río Colorado, y la otra en la isla de Tiburón más al Sur. Es relevante que en el Golfo de California se registran en varios lugares rangos de marea de entre 6 y 7 m. [83]

Si bien las profundidades que se tienen en la desembocadura del Río Colorado son relativamente pequeñas la longitud del dique requerido por la construcción de una planta comercial no será inferior a los 10 km, en caso de que se utilizaran para el cierre de las islas Montague, Gore y Pelicano.

El estrecho situado entre Isla Tiburón y el litoral Sonorense, es un embalse que reúne condiciones. Se sugiere como lo más conveniente, efectuar el cierre inferior de dicho estrecho mediante la construcción de un dique que una a la Punta San Miguel con la punta Narraganset y el cierre norte albergaría dos posibilidades, una de ellas se lograría mediante la construcción de un dique que partiendo normalmente del litoral de la Isla Cerrada con Punta Arenas, la otra posibilidad sería la construcción de un dique de orientación Norte-Sur que tendiera desde la Punta Sargento (en el Cabo Témpora) hasta el litoral de la Isla.

3.5.2. EUROPA.

Francia.

Relativamente pocas centrales mareomotrices han sido construidas en la era moderna. De éstos, la primera y más grande de 240 MW, está sobre el estuario del Rance en Bretaña del Norte. Los 0.8 km de largo del dique, también sirve de un puente de autopista que conecta Saint Malo y Dinard (figura 3.30). La central fue construida desde 1961 y fue inaugurada el 26 de noviembre 1967. La generación anual es aproximadamente 640,000,000 kWh.



Figura 3.30: Dique en el estuario del Rance, Francia. [91]

La propia central está situada en el interior de una estructura hueca de hormigón armado, que aloja 24 turbinas de bulbo reversibles de 10 MW de potencia cada una estando acopladas en grupos de cuatro, constituyendo así una unidad. La instalación se completó para el relleno y vaciado del estuario. La explotación de la central, exige el funcionamiento de los grupos y de las compuertas, tanto en el llenado como en el vaciado de la bahía; las turbo máquinas funcionan como máquinas directas con turbo-alternador y como máquinas inversas como turbo-bombas existiendo seis tipos de operaciones en dichas máquinas, Tabla 3.10.

a)	Turbina	Directa	57%	Vaciado de la bahía	Máquina acoplada a la red
b)	Bombeo	Inversa	1.5%		
c)	Compuerta	Directa		Vaciado de la bahía	Máquina desacoplada a la red
d)	Turbina	Inversa	16%	Llenado de la bahía	Máquina acoplada a la red
e)	Bombeo	Directa	8.5%		
f)	Compuerta	Inversa		Llenado de la bahía	Máquina desacoplada a la red

Tabla 3.10: Operaciones en las turbinas tipo Bulbo del Rance. [28]

El tiempo de funcionamiento de la central se desglosa entonces de la siguiente manera:

73% en turbinaje, 10% en bombeo y 17% en apertura de compuertas.

El sentido del trasvasamiento del agua, determina el sentido de rotación de las máquinas; cada turbina tiene las siguientes características: rodete Kaplan de tipo Bulbo con palas y directrices orientables, cuenta con 4 palas, un rodete de 5.35 m de diámetro, una potencia de 10 MW, velocidad de 94 rpm.

Un proyecto más ambicioso, es el que se ubica en la cercana bahía de Saint-Michel, que uniría las islas de Chausey. Requeriría de 40 km de diques, aprovechando mareas vivas de hasta 12.5 m de altura en un embalse de 650 km². Se instalarían 300 grupos de 40 MW que llegarían a producir 27,000,000 MW/h al año.

El estudio preliminar fue abandonado en 1965 por razones económicas y vuelto a actualizar en 1975 a raíz de los progresos más recientes en el campo de las turbinas de baja presión. Sin embargo, el proyecto está actualmente sin decidir, ya que la elevadísima inversión y el largo periodo de construcción (de 10 a 12 años) producirían un costo por kW instalado muy superior al del Rance.

Reino Unido.

La extensión de mareas grandes a lo largo de las costas del Oeste de Inglaterra y Gales suministra algunas de las condiciones más oportunas del mundo entero para la utilización del poder de mareas. Si todos los estuarios razonablemente explotables fueran utilizados, la generación anual de la electricidad de las centrales mareomotrices sería aproximadamente 50 TWh, equivalente a aproximadamente 15% del consumo de electricidad del Reino Unido.

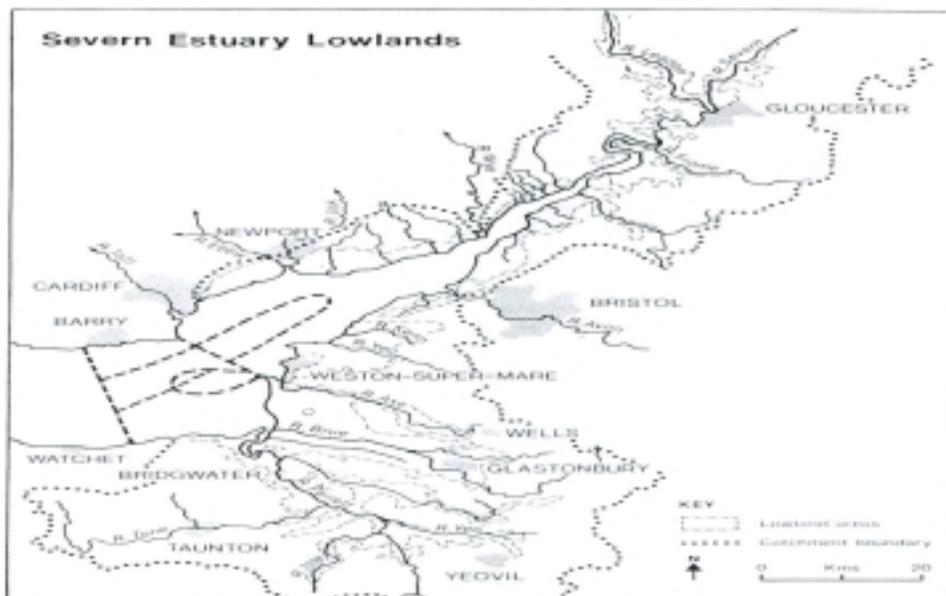


Figura 3.31: Estuario de Severn, Reino Unido. [49]

De seis sitios identificados con extensiones de mareas medias de 5.2 a 7.0 metros, los estudios de viabilidad han sido terminados para dos planes grandes: el Estuario de Severn (8,640 MW), mostrado en la figura 3.31 y el Estuario de Mersey (700 MW) y para los planes más pequeños sobre los estuarios del Duddon (100 MW), Wyre (64 MW), Conwy (33 MW) y Loughor (5 MW). Un programa gubernamental sobre energía de mareas (1978-1994) llegó a la conclusión de que teniendo en cuenta la combinación de gastos de capital altos, los periodos de construcción largos y el factor de carga relativamente bajo (21-24%), ninguno de estos planes es visto como económicamente atractivos en las circunstancias actuales [49]. Un futuro programa de energía de mareas del Reino Unido podría incluir la construcción de un plan en pequeña escala principalmente para demostrar la tecnología y sus efectos ambientales, antes de avanzar a los planes muy grandes sobre Severn.

Federación Rusa.

La segunda central mareomotriz instalada en el mundo fue un prototipo situado en la Bahía de Kislaya, en el mar de Berents. Esta central se puso en servicio en 1968, con apenas 400 kW.

El éxito de esta instalación resultó en varios estudios de diseño para muchas plantas de mareas más grandes en sitios en el norte y el este del país: Lumbov (67 MW) y bahía de Mezen (15,000 MW) en el mar blanco, bahía de Penzhinsk (87,400 MW) y bahía de Tugur (6,800 MW) en el mar de Okhotsk. Al final la estación de Tugur apareció como el único plan importante viable. El trabajo de diseño preliminar comenzó en 1972 pero el paso del tiempo para el trabajo de desarrollo adicional se queda incierto.

La planta usa una turbina ortogonal que conserva su dirección de rotación en la marea y el reflujó igual. La unidad experimental fue diseñada por el laboratorio de investigación de NIIES para la construcción industrial a motor de una orden por Intergeocom, y fue fabricado por Sevemash, ubicado en la región de Severodvinsk, Arkhangelsk.

3.5.3. ASIA.

China.

En este país, por las condiciones geográficas, se ha desarrollado más la utilización de plantas que utilizan las corrientes marinas.

Las áreas costeras del Sudeste de Zhejiang, Fujian y provincias de Guangdong son consideradas por tener potencial cuantioso para la energía de mareas. La utilización de la energía de mareas con tecnologías modernas en China comenzó en 1956: algunas plantas de mareas en pequeña escala fueron construidas para bombear el agua de irrigación. De allí en adelante la energía de mareas empezó a ser usada para la generación a motor. Empezando en 1958, cuarenta pequeñas estaciones de centrales hidroeléctricas de mareas (con una capacidad total de 12 kW) eran construidos con el propósito de generar electricidad. Éstos fueron complementados alrededor de 1970 junto con estaciones mucho más grandes, de 3 MW en Jiangxia y de 960 kW en Baishakou. La mayoría de las primeras plantas han sido decomisadas por una variedad de razones, incluyendo los defectos de

diseño, estaban mal ubicadas, etc. Actualmente hay siete centrales de energía de mareas (además una estación de inundación de marea) con una capacidad total de 11 MW.

Desde finales de los 1970's el énfasis fue puesto sobre optimizar las operaciones de plantas existentes y mejorar su rendimiento. Adicionalmente, ha sido emprendido un estudio de viabilidad para una central de energía de mareas experimental intermedia de 10 MW.

India.

Los principales sitios con potencial para la generación mareomotriz son el Golfo de Kutch y el Golfo de Khambat (Cambay), tanto en el Estado Federal Occidental de Gujarat, y la delta de Gangetic en la área de Sunderbans de Bengal Occidental, en India Oriental.

Las extensiones de mareas del Golfo de Kutch y el Golfo de Khambat son de 5 y 7 m respectivamente, las capacidades teóricas son de 900 MW y 7 000 MW respectivamente y el anual aproximadamente de 1.6 TWh y 15.0 TWh respectivamente. [83]

Corea.

La costa oeste tiene extensiones de mareas medias de hasta 6 m. Dos posibles sitios han sido considerados: bahía de Garolim, que ha sido estudiado a detalle, y el Golfo de Asam. El Instituto de Investigación y Desarrollo de Océano Coreano (KORDI, por sus siglas en inglés), ayudado por un consorcio de compañías británicas, examinó los planes en los mediados de 1980's pero ningún proyecto dio resultado.

3.5.4.ÁFRICA.

En esta zona del planeta no se han desarrollado estudios precisos referentes a los niveles de mareas o su aprovechamiento. Aunque se sabe que en la zona Centro Occidental del continente se pueden apreciar mareas del orden de 4.6 m o mayores.

3.5.5.OCEANÍA.

Australia.

El potencial de energía de mareas es particularmente habitual a lo largo de la costa del noroeste de Australia, donde las extensiones de mareas están entre las más grandes en el mundo entero. Este litoral tiene ensenadas numerosas y bahías que brindan sitios prometedores para aluviones, como Walcott Inlet, Secure Bay, la cuenca de St George y la King Sound (figura 3.32). El acontecimiento de la energía de mareas está desfavorecido, sin embargo, por el alcance pequeño de la marea muerta, que es demasiado bajo para la generación de alimentación, y lo impráctico de las grandes cantidades de absorbentes del poder intermitente en una región lejana sin instalar enlaces de transmisión suntuosos.

A finales de 1990 en Australia, una compañía del occidente, propuso un diseño de circulación de doble vaso de doble de combinación para Doctor's Creek, sobre el King

Sound cerca del pueblo de Derby de Kimberley. La ventaja de su plan era que podía suministrar el poder durante las 24 horas. Un vaso conserva un nivel de aguas altas y el otro un nivel más bajo. Usando un canal cortado por las turbinas usadas para la generación a motor entre los dos asideros. A la marea alta, el agua es dejada entrar al vaso superior, y a la marea baja, es dejado salir del vaso inferior. La planta, con una capacidad de 48 MW, habría sido la segunda central de energía de mareas más grande en el mundo y no solamente proveer el producto ininterrumpido. Esta capacidad lograría satisfacer las necesidades de la región completamente. La población de Derby mostró un gran apoyo para la planta de mareas pero el gobierno de Australia Occidental prefirió una alternativa de combustible fósil para generar la energía. Después de mucho debate, la planta de mareas fue rechazada. Sin embargo la energía de mareas ha mostrado que está en curso para asegurar a otros clientes y en particular, está trabajando en el desarrollo de una planta similar para una compañía de procesamiento de mineral, también en Australia Occidental.

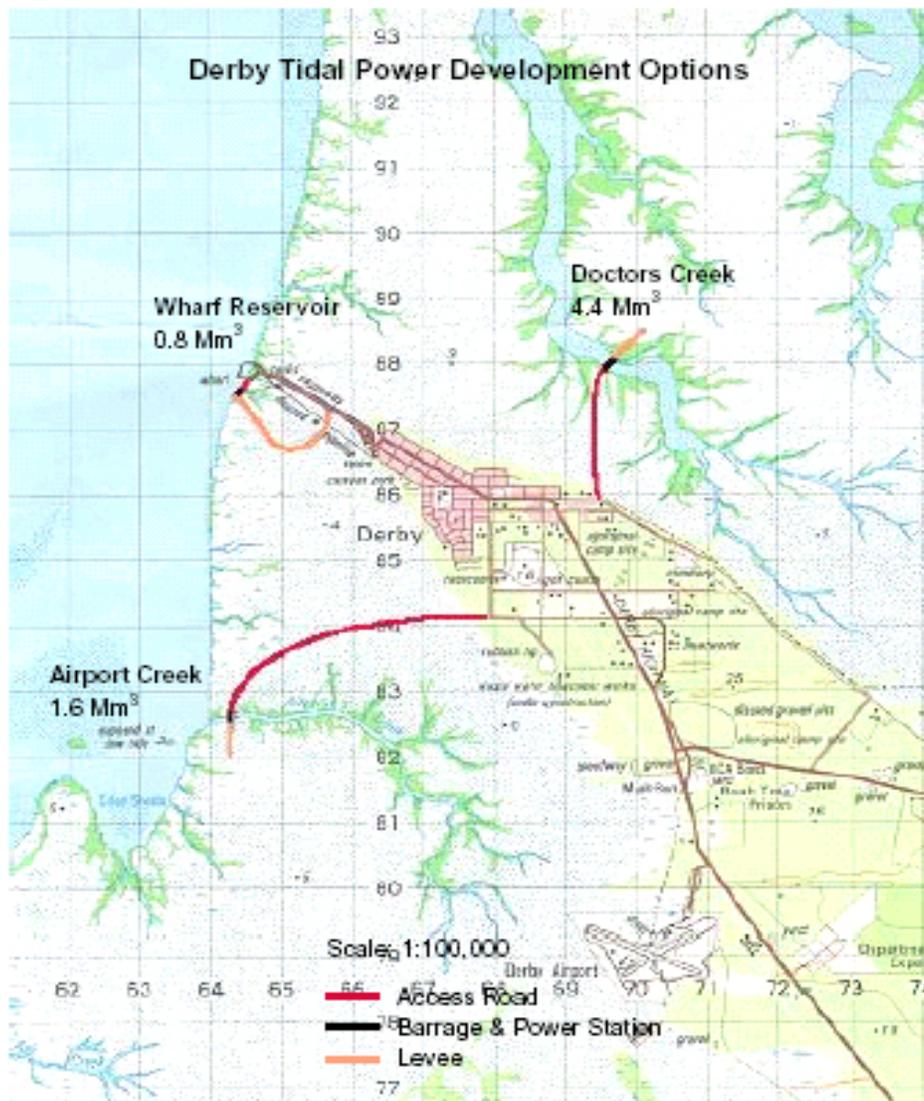


Figura 3.32: Costa noroeste de Australia. [126]

3.6. PROBLEMAS PRESENTADOS A NIVEL MUNDIAL.

El estudio de los proyectos plantea por supuesto, numerosos problemas, algunos de ellos guardan estrecha relación con teorías y técnicas elaboradas, otros en cambio, resultan de factores nuevos o pocos conocidos.

Estos problemas pueden ser económicos, sociales, científicos y tecnológicos.

3.6.1. PROBLEMAS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS.

En el área de la ciencia y la tecnología, son muchos los problemas a los que se tuvieron que enfrentar estos proyectos.

En primer lugar, el problema de entender y desarrollar los modelos matemáticos y físicos de las mareas en lugares y tiempos específicos; para así, lograr el mejor aprovechamiento de esta fuente renovable de energía. Pero eso no es todo, ya que una vez entendido el fenómeno de las mareas, se debió de abordar el problema de los procedimientos de construcción en zonas costeras con características muy particulares: profundidades de construcción incómodas, por no decir peligrosas, suelos llenos de arcilla o limo, detener causes de ríos o trabajar a pesar de éstos, etc.

Una de las problemáticas a resolver en este tipo de centrales fue el referente a los elementos que atacan a los materiales; si bien es cierto que, en los materiales para la construcción de presas y embalses hay desde hace muchos años estudios y avances importantes, en lo referente a los equipos como las turbinas, no los hubo hasta el desarrollado por los franceses para el equipamiento de la planta de la Rance.

Las turbinas tuvieron que desarrollarse en varios aspectos: corrosión marina, flujo o filtrado de cuerpos extraños, espacio, accesorios hidráulicos, etc. Uno de estos aspectos fue de capital importancia en el avance de este tipo de plantas, debido a la implicación práctica y económica: la corrosión marina.

Los elementos que forman la turbina estarían en contacto con agua de mar con características muy particulares, pero la peor de ellas es la salinidad del agua. Esta salinidad provocaría (en conjunto con los periodos en los que estarían mojadas y los periodos en los que se encontrarían secas, en contacto con el aire) un desgaste significativo en la turbina. Lo cual, implicaba un problema económico del proyecto, pues se vería reflejado en la vida útil del equipo y reemplazos periódicos de este.

Por tal motivo, se realizaron investigaciones de materiales y de su comportamiento en presencia de niveles salobres como los presentados en la Rance. De esta manera, llegaron a desarrollar las turbinas tipo Bulbo como las conocemos ahora; fabricadas con materiales más resistentes y en configuraciones que no permiten la acumulación de residuos en sus componentes.

Hubo que solucionar en este proyecto precisamente el problema del tipo de turbina a utilizar, ya que las convencionales del tipo Kaplan, no son 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 es 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 costo y crearía problemas de espacio. Por otra parte es conveniente eliminar en 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 generador poco voluminoso, capaz de funcionar en ambos sentidos y tanto como turbina como bomba, condujo al desarrollo de los conjuntos de turbo-máquinas axiales, llamados grupos Bulbo, que luego han resultado ser de gran interés para su aplicación en instalaciones de otros tipos, como minicentrales hidráulicas.

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

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

Los problemas fundamentales que se plantearon hace unas décadas, se encuentran hoy en día resueltos como lo confirma la explotación de la central de turbinas del Rance, a lo largo de estos años. Las próximas centrales mareomotrices estarán equipadas con grupos axiales que se revelan como los mejor adaptados a este tipo de centrales hidroeléctricas de pequeño salto.

Otros problemas que se presentaron en la central francesa, en el curso de la puesta a punto, fueron:

- a) En las juntas de estanqueidad del árbol, formadas por cuatro coronas de seis segmentos de carbón, la corona más exterior falló, solucionándose el problema aplicando una correcta lubricación.
- b) Otro fallo se detectó en el rotor del alternador, ya que éste había entrado en contacto con el estator (rozamiento); esta anomalía fue debida a una dilatación muy pequeña de la llanta y se solucionó modificando el rotor del alternador.

La central ha tenido otros fallos a lo largo de estos años, pero dada la cantidad y la calidad del material instalado, se pueden considerar éstos como normales.

Además, debido a la falta de antecedentes en algunos casos, se realizaron estudios específicos en los grupos Bulbo:

- c) 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 porcentaje de contracción en régimen permanente de 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 da a la bahía, cuando la pala estaba en la parte superior del giro, siendo la frecuencia de esta vibración del orden de 30 a 1000 Hz, no llegando a generar reacciones peligrosas, estando las contracciones bastante lejos del límite de fatiga admisible.
- d) Ensayo sobre el calentamiento de las barras del alternador cuando el grupo actúa 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:

- e) El arranque en turbina directa (embalse-mar), se realizó cerrando el distribuidor al máximo posible; al proceder a la apertura de las palas del distribuidor se provocaba el arranque paulatino de la turbina en sentido directo.
- f) Al arrancar la turbina en sentido 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 inverso buscado; algunos grupos precisaron para el arranque de un mecanismo auxiliar.
- g) 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 tal turbo-bomba 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 de las ruedas, destinadas a evitar la entrada de agua en el interior de la turbina; las diversas maniobras dañaron estas juntas, dejando que entrara 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 a 3 atm, siendo sustituidas a su vez todas las juntas.

Alternadores.- 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; estos inconvenientes, junto con los originados por el doble sentido de la rotación y el funcionamiento sin corriente durante algunos periodos, mostraron un desgaste de las escobillas del orden de 10 mm cada 1000 horas. El carbono 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.

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 esto se solucionó aplicando a los materiales en ellas empleados pinturas anticorrosivas y tratamientos galvánicos.

Una vez resueltos los problemas anteriores, habría que llevar la energía a los centros de carga, con lo que se enfrentaron a los problemas de interconexión y regulación de la energía.

Todos ellos problemas que, si no se resolvieron por completo en Francia para el Rance, si se lograron avances o bases científicas para las futuras centrales.

3.6.2. PROBLEMAS SOCIALES.

El principal problema social, es la aceptación. Este tipo de problema se presenta en casi todo tipo de obra de estas magnitudes. Estos problemas son muy variados: uso de suelo, afectación a pesquerías, modificación de centros poblacionales, desplazamiento del mercado, acercamiento o llegada de nuevas industrias, etc.

Otro problema que también podría considerarse de índole científica es la afectación del ecosistema, pero se considera más, en ocasiones, como problema social debido a que la afectación del ecosistema golpea en primera instancia a los centros de población cercanos y son éstos los que manifiestan su inconformidad al verse afectados en su entorno.

3.6.3. PROBLEMAS ECONÓMICOS.

Este tipo de problemas es derivado, generalmente, de los problemas antes mencionados. Además de los referentes a los estudios a realizar y de los plazos que éstos involucran. Esto es, la realización de este tipo de proyectos involucran un gran número de especialistas que deben de realizar estudios de precisión. Además, de tener que acceder en ocasiones a lugares poco accesibles y alejados a puntos de civilización. Por lo que en ocasiones se deben de crear las condiciones mínimas para la realización de los trabajos.

Es claro que, como en toda obra de gran tamaño, los materiales para la construcción, la maquinaria y las horas hombre son muchos y nada baratos. Además, del equipo propio para el funcionamiento de la central mareomotriz.

4. FACTIBILIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CENTRALES MAREOMOTRICES EN MÉXICO.

El territorio nacional cuenta con una longitud de costas muy importante: del Golfo de México, 2070 km; del Mar de las Antillas, 735 km; de la Baja California: Oriental, 1892 km; y del Océano Pacífico 3974 km [22].

Es decir, México cuenta con 8671 km de litorales. En estas costas encontramos manglares, estuarios, islas cercanas, etc. Todas con características topográficas, geológicas y oceanográficas distintas y muy particulares.

Para poder distinguir los lugares de interés de nuestro análisis a partir de esa gran cantidad de costas, debemos utilizar un criterio de selección basados en los factores básicos o consideraciones para el posible aprovechamiento de este tipo de energía. Dichos factores son los siguientes, comenzando con el más importante de ellos hasta el menos importante:

- 1°. La amplitud de la marea en el sitio considerado, la cual debe ser de al menos 4 m.
- 2°. La existencia de alguna ensenada o embalse natural que redujera notablemente la magnitud de la obra civil.
- 3°. Las condiciones topográficas de los lugares considerados para la construcción de los diques.

4.1. LUGARES QUE REÚNEN LAS CONDICIONES NECESARIAS PARA SU CONSTRUCCIÓN.

Analizaremos uno a uno estos factores para el caso de México.

4.1.1.AMPLITUD DE MAREAS.

La amplitud de las mareas a lo largo de nuestros litorales es sumamente variable; raros son los lugares en los que la amplitud de la marea excede los 3 m [47], lo que los hace despreciables desde el punto de vista energético.

Así, las costas del Golfo de México y Mar Caribe pueden descartarse. Sólo nos queda la costa occidente del país. Y aunque lugares como Ensenada e Isla Cedros; en Baja California, presentan amplitudes de marea muy cercanas a los 4 m, no alcanzan dicha amplitud.

Por lo que, sólo nos queda la zona del Golfo de California, donde los mareógrafos instalados indican que en los únicos lugares que se presentan niveles de marea superiores a los 4 m, y de manera considerable en cuanto a los periodos de tiempo en que se presentan, son en las estaciones mareográficas de San Felipe, en Baja California Norte; Puerto Peñasco y el Golfo de Santa Clara, en Sonora. [47]

Todos ellos en cercanía considerable a la desembocadura del Delta del Río Colorado, en la franja fronteriza de ambos estados. Donde se han reportado niveles de marea superiores a los 10 m, como lo indican las observaciones hechas por Ruiz Mijares en 1965 [43] y por Lavin en 1966 [28] quienes coinciden en niveles de 12.30 m; Muñoz [15] declara 10.7 m; y Marinone y Lavin [31] señalan que los niveles de marea incrementan considerablemente desde Guaymas, Sonora hasta la desembocadura del Río Colorado.

4.1.2. EMBALSE NATURAL.

Dado por descartada la posibilidad de instalación de plantas mareomotrices en todo el litoral mexicano, a excepción de la parte norte del Golfo de California, podemos enfocar nuestro análisis a la desembocadura del Río Colorado, el estrecho situado entre la Isla Tiburón y la costa sonorense, y el estrecho entre la isla Ángel de la Guarda y la costa de Baja California.

Pero haciendo uso del primer criterio, las posibilidades se reducen a la desembocadura del Río Colorado, dado que en el estrecho formado entre la isla Ángel de la Guarda y la costa de Baja California está muy cercana la estación mareográfica de Bahía de los Ángeles, la cual no registra amplitudes de marea superiores a los 3 m [47]. En lo referente a la Isla Tiburón, no contamos con registros de las mareas en ese lugar exacto, de hecho, el mareógrafo más cercano se encuentra en Guaymas, Sonora, donde la amplitud de mareas registradas no supera los 4 m [47]. Aunque hay literatura que menciona amplitudes de 6 m, no dan sus fuentes de información o si son observaciones realizadas por los propios autores.

4.1.3. CONDICIONES TOPOGRÁFICAS.

Un primer análisis de los lugares señalados nos indica que las profundidades presentadas en las cercanías de la Isla Tiburón son muy grandes: 500 m en el paralelo pasando el Sur de la Isla; y 1000 m 50 km al Sur del mismo paralelo [74]. Lo que implica grandes dificultades. Mientras que más al Norte del golfo se registran profundidades de 10 m [31].

Los estudios de las condiciones topográficas en general del Golfo de California son mínimos. Y la posibilidad de construcción de una planta mareomotriz se reduce a una zona específica en el norte del Golfo de California.

4.2. POTENCIAL DE MAREAS.

A nivel mundial, aproximadamente 3×10^6 MW de energía se encuentran constantemente disponibles originados por la acción de las mareas [83]. Debido a las restricciones ya mencionadas, se ha estimado que sólo el 2% ó 60 GW son potencialmente recuperables para la generación de energía eléctrica. Pero, si se consideran todas las posibles restricciones geográficas, técnicas y financieras, se estima que existe un potencial aprovechable de esta fuente de energía entre los 13 y los 15 GW[83].

El potencial de mareas puede definirse como la cantidad de energía contenida en las grandes masas de agua oceánicas. Este se ve reflejado de distintas maneras, en este caso en particular, en el movimiento ascendente y descendente, por lo que el potencial de mareas está directamente relacionado con la amplitud de las mareas. Por lo que a mayores amplitudes de mareas, se puede aprovechar mejor esa energía y convertirla en electricidad.

4.2.1. FÍSICA DE MAREAS.

Este trabajo no está dedicado a explicar a fondo el fenómeno de las mareas, ni a proponer o explorar nuevas teorías referentes a los fenómenos físicos que las generan, pero sí expondremos los conceptos básicos que permiten entender el fenómeno que nos interesa.

Todo lo que nos rodea se ve afectado de una u otra manera por la física de los astros; los seres vivos están sujetos a unos ritmos marcados por la alternancia del día y la noche, la sucesión de las estaciones y el sucederse de las mareas. Todos estos fenómenos dependen directamente de los movimientos de la Tierra y la Luna respecto al Sol.

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 fisonomía 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 la contribución del Sol a la marea es 0.45 veces la contribución lunar.

A continuación explicaremos en qué consisten estos elementos y sus movimientos.

Movimiento de rotación.

La Tierra da vueltas sobre sí misma alrededor de un eje de rotación imaginario que pasa por los polos (figura 4.1). La rotación terrestre es de oeste a este y tarda prácticamente 24 horas (el llamado día sideral) en dar una vuelta completa. Este movimiento de rotación es el responsable de la repetición regular del día y la noche.

1 rotación = 23h 56 minutos

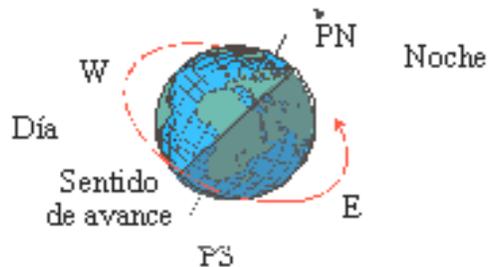


Figura 4.1: Movimiento de rotación Terrestre. [94]

Movimiento de traslación.

El otro movimiento principal de la Tierra es el de traslación alrededor del Sol (figura 4.2). En este movimiento sigue un recorrido (órbita) en forma de elipse. Prácticamente en el centro de la elipse se encuentra el Sol y al plano que la contiene, se le llama plano de la eclíptica. Dar una vuelta completa alrededor del Sol le cuesta a la Tierra 365.2422 días[28].

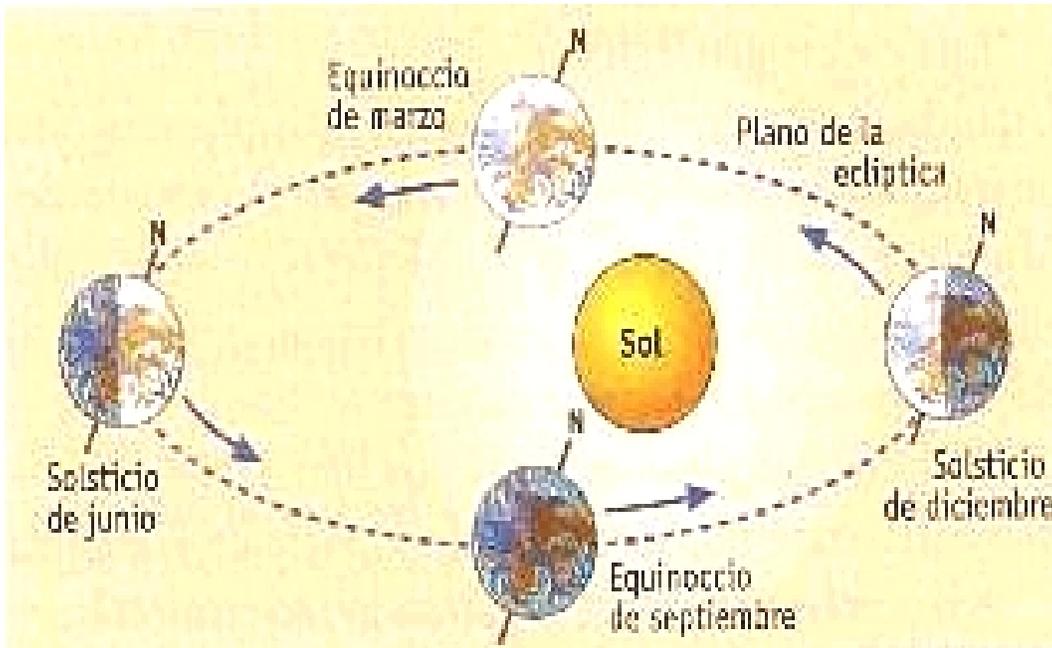


Figura 4.2: Movimiento de traslación terrestre. [94]

Movimiento de la Luna alrededor de la Tierra.

La atracción de la Luna varía constantemente, pues describe una órbita elíptica al girar alrededor de la Tierra; consecuentemente varía su distancia a ella, lo mismo que sucede con la atracción del Sol.



Figura 4.3: Fases de la Luna. [94]

El mes sideral de la Luna, es decir, el tiempo que tarda en dar una revolución completa, tomando como punto de observación las estrellas, es de 27.32 días [28]; en ese tiempo la Tierra ha recorrido una porción de su órbita, por lo que hasta después de 2.21 días [28], el Sol, la Tierra y la Luna, tendrán las mismas posiciones relativas, siendo el mes sinódico de la Luna 29.35 días [28]; entre dos novilunios existen posiciones intermedia que dan origen a las llamadas fases de la Luna (figura 4.3): Luna llena y Luna nueva (en posición), y cuartos creciente y menguante (en cuadratura).

Otro aspecto que se tiene que tomar en cuenta en el comportamiento de las mareas es su altura. Por ejemplo, en ciertos lugares la marea nocturna es más alta que la diurna; en otros, un arrecife de coral que cierto día, aun en la baja mar, quedó bien cubierto, puede quedar completamente expuesto quince días después. Esta variación quincenal está relacionada con los movimientos lunares: cuando la Luna está llena, la amplitud de las mareas es mayor, y cuando está en cuarto menguante o creciente, es mínima.

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, figura 4.4. Para justificar los desplazamientos de importantes masas de agua, la fuerza de atracción F_a , (que no sigue la vertical), 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 90° de diferencia en longitud.

La fuerza centrífuga originada por el movimiento de rotación de la Tierra al recorrer su órbita alrededor del centro de gravedad del sistema Tierra-Sol 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.

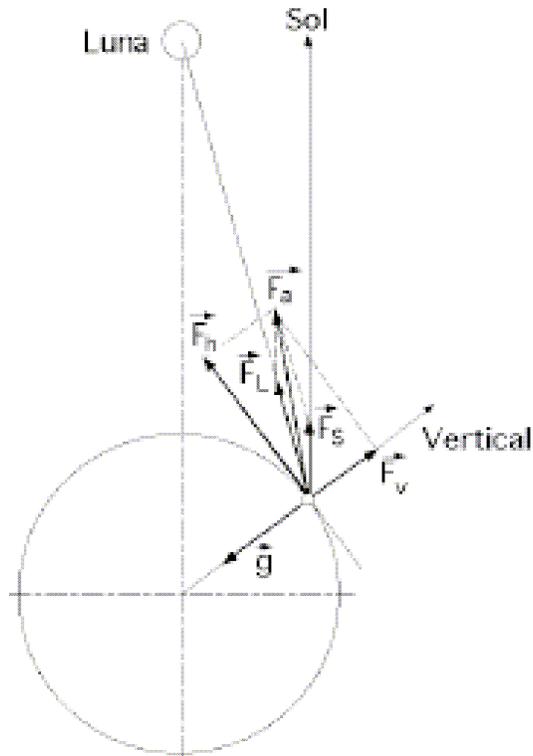


Figura 4.4: Fuerza generadora de la marea. [94]

La causa de las mareas deriva de la aplicación de las dos fuerzas, atractiva y centrífuga, que en el centro de gravedad 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 (Figura 4.5a), ya que de no ser así, la atracción provocaría un acercamiento progresivo entre ellas.

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 (Figura 4.5b). 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*.

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

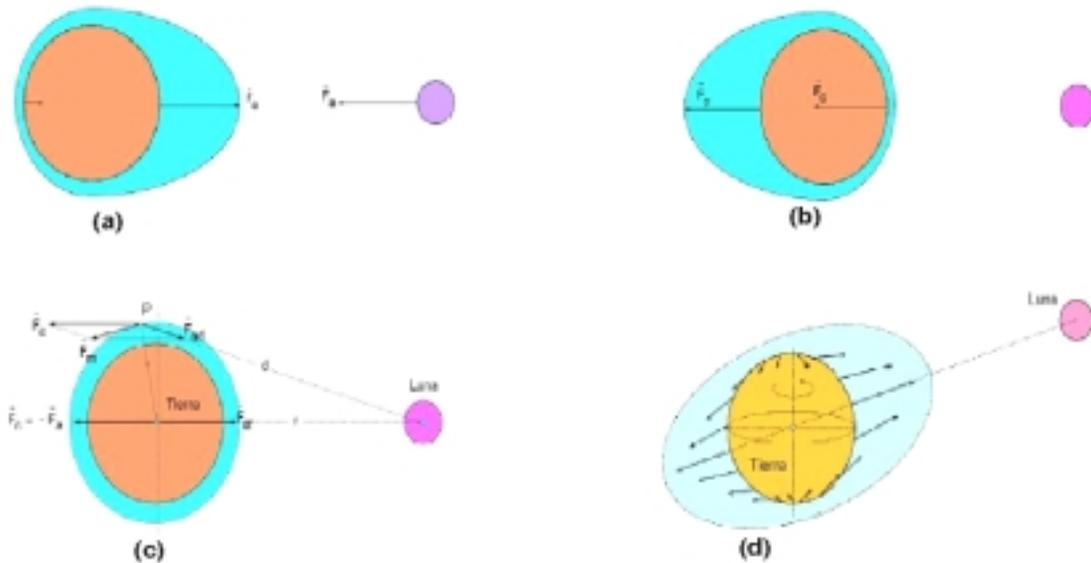


Figura 4.5: (a)Efecto de la fuerza atractiva sobre las masas de agua;
 (b) efecto de la fuerza centrífuga sobre las masas de agua;
 (c) y (d),efecto combinado de las fuerza centrífuga y atractiva sobre las masas de agua. [94]

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 quedarse 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 (*marea de sizigias*); si estos astros forman un ángulo de 90° las mareas son más reducidas y se conocen como mareas muertas, como se muestra en la figura 4.6.

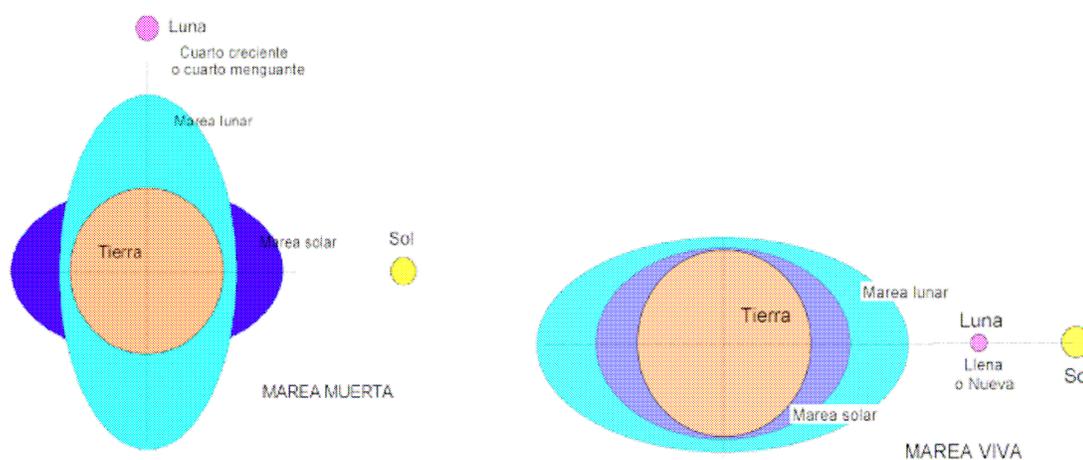


Figura 4.6: Mareas vivas y mareas muertas. [94]

El periodo 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 periodo de 12.42 horas y la solar de 12 horas, por lo que entre ambas existe una diferencia de periodo 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 semiperiodo 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 esto 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 [28]. A esto 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 periodo de 25.82 horas, la solar diurna (24.07 horas) y la onda de declinación mixta Luna-Sol (23.93 horas), que se interfieren entre sí formando la evolución característica del grupo de estas ondas[28]. 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 periodo de 14.8 días aproximadamente; sin embargo existen lugares en los que las mareas varían en forma diferente, con periodos de hasta 24 horas, o con periodos de 5 horas [28].

En las *mareas mixtas*, la onda semidiurna puede predominar en las sizigias, 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 (sizigias), y la mínima poco después de los cuartos creciente y menguante (cuadraturas).

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). 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 sinusoidales simples del tipo:

$$h = a \cos(\omega t + \varphi)$$

donde:

ω depende de las condiciones astronómicas, siendo constante en todo momento y lugar, a es la amplitud de la marea y la fase de cada onda, que no dependen de las condiciones astronómicas y que son variables de un lugar a otro.

Cuando se conocen se puede establecer la evolución de la marea para cada lugar y tiempo.

Cuando se miden los niveles de las mareas, se toma en cuenta que el océano está sometido a diversas fuerzas, como las influencias gravitatorias de los astros, los vientos predominantes, la densidad variable de las masas de agua, etc. Además se tiene que considerar que el nivel del mar es diferente en los distintos océanos, es más alto en la costa del Océano Pacífico que en la del Atlántico, diferencia que puede deberse a la menor densidad del agua del Pacífico, e influye en la intensidad de las mareas.

4.2.2. ESTADÍSTICA DE MAREAS.

El realizar mediciones y tener un gran número de datos referentes a los niveles de mareas, no surge del interés por medir la energía encerrada en los océanos. Por el contrario, la energía mareomotriz es una consecuencia del análisis de datos ya existentes. El interés de los hidrógrafos en las fluctuaciones de los niveles de agua está en función de su responsabilidad de proporcionar información veraz de profundidad en las cartas de navegación. Asimismo, el interés de los navegantes en las mareas, está en función de la seguridad que les representa en la navegación costera, al tener información confiable en los pronósticos de marea, sobre todo en aguas restringidas, canales, bahías, fondeaderos, etc.

En la actualidad, las mediciones se realizan en los puntos de interés con instrumentos específicos para estos fines: ADCP's (Acoustic Doppler Current Profiler), que sirve para medir la velocidad de las corrientes; correntímetros, los cuales sirven para medir la velocidad y la dirección de las corrientes; CTD's (Conductivity, Temperature, Depth), para medir temperatura y conductividad con la presión, lo que permite calcular la salinidad y la densidad; salinómetros para medir la salinidad por medio de conductividad eléctrica; y, mareógrafos [56]. Todos estos instrumentos suelen ser colocados en el interior de una caseta que recibe el nombre de *estación mareográfica*. Dicha estación también puede contar con transmisores que envíen la señal a algún punto de captura y análisis de datos.

Para nuestro caso, el instrumento de medición que nos brinda los datos de mayor interés es el mareógrafo. Aunque la manera más simple para efectuar mediciones de las mareas consiste en introducir una regla de madera graduada en un lugar poco profundo de la costa. Pero para poder registrar lo más exacto posible el lento cambio de la marea, se tienen que evitar las variaciones de nivel del mar en el periodo corto durante el que se mide, ya que el mar nunca está quieto; aun en la más completa calma se agita y se levanta formando olas. Por lo cual se utilizan mareógrafos menos sencillos, en realidad, son instrumentos de medición que registran la variación de baja frecuencia del nivel del mar con la finalidad de medir el ascenso y descenso provocado por la marea. Este registro puede obtenerse de manera analógica en una gráfica o en forma digital, ya sea en papel o en archivo magnético.

En nuestro país, hay tres tipos de estaciones mareográficas: mecánicas, con telemetría y sin telemetría. En la figura 4.7, se muestra la red mareográfica nacional. [47]

Cada país que cuente con costas tiene la tarea de recolectar y analizar todos los datos adquiridos por las estaciones mareográficas en su territorio. En nuestro país contamos con la Secretaría de Marina Armada de México que, a través de la Dirección General de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología, publica anualmente las "Tablas numéricas de

predicción de mareas” y el “Calendario gráfico de mareas”. También tenemos al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) el cual, a través de su Departamento de Oceanografía Física, difunden mensualmente tablas numéricas y calendarios gráficos de mareas, así como tablas de predicciones de mareas. Por otro lado, el Instituto de Geofísica y la Red Mareográfica de la UNAM y el Centro Interdisciplinario de Ciencias del Mar (CICIMAR) del IPN también se encargan de estudiar estos datos. Además de distintos Institutos y Administraciones de Puertos en los correspondientes estados costeros.

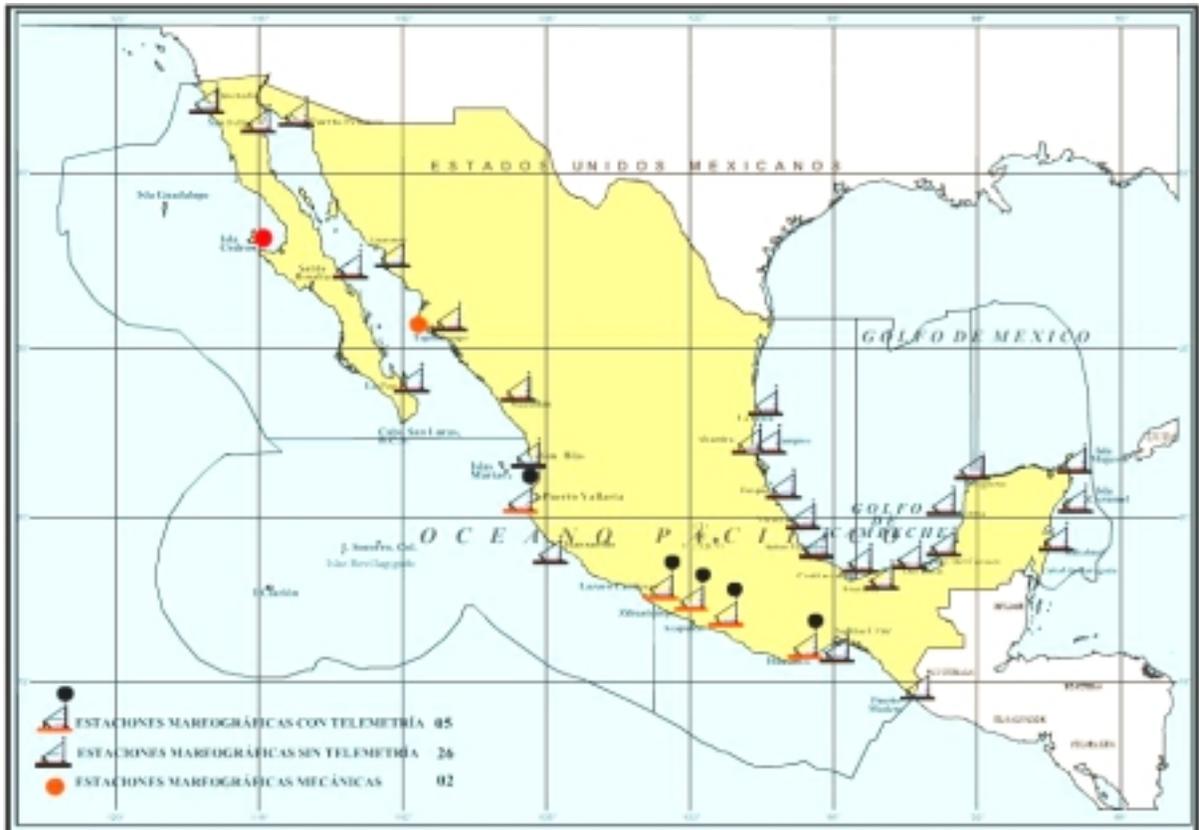


Figura 4.7: Red Mareográfica Nacional. [79]

4.2.3. PREDICCIÓN DE MAREAS.

La marea es un componente mayor de los movimientos del océano y afecta a escala global el conjunto de las aguas contenidas en las cuencas oceánicas. A diferencia de otros mecanismos que generan las diferentes corrientes marinas y modifican la forma de la superficie libre de los océanos, ligadas a las fuerzas termodinámicas debidas a las interacciones con la atmósfera, el mecanismo de generación de las mareas es determinista.

Está ligada primordialmente a la atracción de la Luna y del Sol y depende, por lo tanto, de sus movimientos relativos con respecto a la Tierra, resultante de la rotación sobre ella misma en 24 horas, de la Luna alrededor de la Tierra en 29.53 días (mes sinódico) y de la Tierra alrededor del Sol en 365.25 días, de donde, el ritmo cotidiano de las mareas, sus

modulaciones quincenales y mensuales, entre aguas vivas y muertas y sus variaciones semestrales y anuales, corresponden a las mareas de equinoccios.

La altura de la marea en cualquier lugar no se puede predecir en forma precisa tan sólo por conocer las posiciones del Sol y de la Luna en relación con el lugar, sino que también depende de otros factores que producen variaciones particulares en lugares específicos, factores como la profundidad del océano en un lugar en específico, el tamaño de la cuenca y su configuración [15]; además de la necesidad de contar con registros actuales de por lo menos un año. Existen ahora programas de cómputo para predecir la marea, lo que antes se hacía con base en los constituyentes armónicos (altura y mareas parciales sinusoidales que incluyen amplitudes de fases) introducidos a la *máquina predictora de marea*.

Todavía hoy, contrario a lo que pudiera pensarse, los problemas planteados por las mareas oceánicas no han sido resueltos totalmente. Sin embargo, el carácter determinista de las mareas y el conocimiento preciso de su periodicidad asociada a los movimientos del sistema Tierra-Luna-Sol, permite su previsión con una gran seguridad en aquellas zonas donde pueden ser observadas por un tiempo suficiente (del orden de un año).

Para realizar una predicción de mareas hay que determinar la región de interés y tipo de marea que se presenta en esa región. La figura 4.8 indica las diferentes regiones mareográficas en el Océano Pacífico, así como los tipos de marea en cada puerto.



Figura 4.8: Tipos de marea y regiones mareográficas en la República Mexicana. [47]

Dichas regiones mareográficas fueron determinadas de acuerdo con la amplitud de la marea y la interrelación de sus componentes armónicas, por ello, los gráficos para cada estación corresponden a promedios mensuales del periodo de observación.

Es así que son producidas las *Tablas de Predicción de Mareas*, siguiendo un método de análisis y predicción denominado “armónico”, inspirados en los trabajos de Laplace y desarrollados por Lord Kelvin (1868), Darwin (1883) y Doodson (1921).

Los pronósticos de mareas realizados por la Secretaría de Marina, figura 4.9 y figura 4.10, se han obtenido a partir de cálculos basados en las observaciones registradas por una red de sensores. Se emplearon series de 366 días de alturas horarias, a partir de las alturas horarias se calcularon desde 37 hasta 107 constantes armónicas por el método de mínimos cuadrados para cada puerto. Es de gran importancia señalar que el cálculo de estas series implica la consideración no sólo de las constantes armónicas, sino que también se consideran las características determinadas según el año y la fecha, factores dependientes del paralaje lunar horizontal, el ángulo dependiente del instante de tránsito de la Luna por el meridiano de Greenwich, la escala de tiempo, la frecuencia de las distintas ondas componentes, el nivel medio del mar, la altura de la marea a una hora dada, la corrección por estación del nivel medio del mar, correcciones por aguas bajas y otras componentes que dependen de las condiciones locales y astronómicas [47].

Todas las horas utilizadas en estas tablas son Horas Estándar basadas en el sistema de 24 horas.

Las zonas de tiempo utilizadas en estas tablas corresponden a la Hora para los meridianos 90°, 105° y 120°.

De manera similar, el CICESE difunde sus correspondientes tablas y calendarios de mareas. Elementos que se muestran en las figuras 4.11 y 4.12.



ESTACIÓN				SAN FELIPE, B.C.				JUNIO 2005			
DÍA	HORA	PIES	METROS	DÍA	HORA	PIES	METROS	DÍA	HORA	PIES	METROS
Miércoles				Sábado				Martes	Luna Llena		
1	0341	0.87	0.26	11	0308	10.05	3.06	21	0007	13.90	4.24
	0958	13.03	3.97		0918	1.58	0.48		0620	-2.95	-0.90
	1559	2.21	0.67		1615	12.81	3.90		1302	17.94	5.47
	2159	13.58	4.14		2221	4.97	1.52		1912	1.54	0.47
Jueves				Domingo				Miércoles			
2	0425	-0.21	-0.06	12	0348	9.35	2.85	22	0052	14.30	4.36
	1049	14.36	4.38		0956	2.74	0.84		0705	-3.47	-1.06
	1651	1.90	0.58		1700	12.01	3.66		1346	18.35	5.59
	2243	13.57	4.14		2314	5.29	1.61		1958	1.38	0.42
Viernes				Lunes				Jueves			
3	0504	-1.01	-0.31	13	0444	8.68	2.65	23	0138	14.41	4.39
	1132	15.35	4.68		1044	3.99	1.22		0751	-3.47	-1.06
	1735	1.78	0.54		1754	11.32	3.45		1433	18.26	5.57
	2323	13.44	4.10						2047	1.42	0.43
Sábado				Martes	Cuarto Creciente			Viernes			
4	0539	-1.48	-0.45	14	0025	5.31	1.62	24	0228	14.19	4.32
	1211	15.92	4.85		0620	8.38	2.55		0840	-2.89	-0.88
	1816	1.87	0.57		1157	5.13	1.56		1523	17.73	5.40
	2359	13.17	4.01		1857	10.89	3.32		2139	1.60	0.49
Domingo				Miércoles				Sábado			
5	0612	-1.64	-0.50	15	0148	4.80	1.46	25	0322	13.66	4.16
	1247	16.09	4.90		0805	8.98	2.74		0932	-1.76	-0.54
	1853	2.18	0.66		1347	5.62	1.71		1615	16.85	5.13
					2002	10.85	3.31		2234	1.86	0.57
Lunes	Luna Nueva			Jueves				Domingo			
6	0034	12.78	3.89	16	0251	3.75	1.14	26	0422	12.95	3.95
	0643	-1.52	-0.46		0922	10.38	3.16		1027	-0.18	-0.06
	1321	15.93	4.85		1515	5.21	1.59		1710	15.71	4.79
	1928	2.63	0.80		2101	11.19	3.41		2333	2.13	0.65
Martes				Viernes				Lunes			
7	0106	12.31	3.75	17	0338	2.38	0.72	27	0531	12.27	3.74
	0712	-1.21	-0.37		1014	12.15	3.70		1130	1.62	0.49
	1354	15.53	4.73		1613	4.37	1.33		1808	14.45	4.40
	2000	3.14	0.96		2152	11.81	3.60				
Miércoles				Sábado				Martes	Cuarto Menguante		
8	0136	11.79	3.59	18	0418	0.85	0.26	28	0038	2.32	0.71
	0741	-0.76	-0.23		1057	13.98	4.26		0648	11.87	3.62
	1427	14.98	4.56		1700	3.44	1.05		1246	3.28	1.00
	2032	3.65	1.11		2238	12.55	3.82		1909	13.25	4.04
Jueves				Domingo				Miércoles			
9	0205	11.26	3.43	19	0458	-0.65	-0.20	29	0146	2.30	0.70
	0811	-0.16	-0.05		1138	15.67	4.78		0810	11.98	3.65
	1501	14.33	4.37		1744	2.59	0.79		1414	4.35	1.32
	2104	4.12	1.26		2323	13.28	4.05		2014	12.29	3.75
Viernes				Lunes				Jueves			
10	0235	10.69	3.26	20	0538	-1.97	-0.60	30	0255	2.00	0.61
	0843	0.61	0.19		1219	17.04	5.19		0931	12.62	3.85
	1536	13.60	4.14		1827	1.94	0.59		1538	4.62	1.41
	2139	4.56	1.39						2121	11.74	3.58

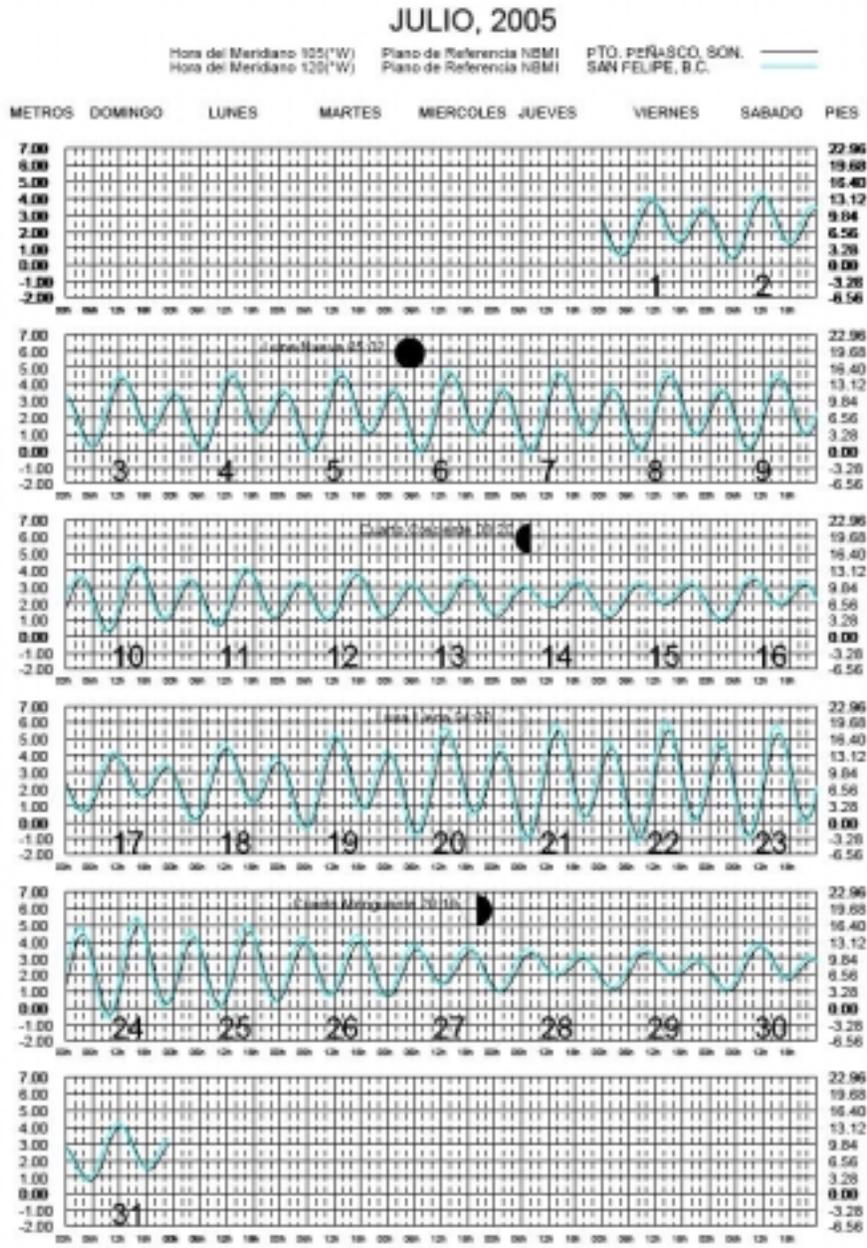
HORA DEL MERIDIANO LOCAL 120° W.



Figura 4.9: Tabla de predicción de mareas realizada por la Secretaría de Marina Armada de México. [79]



CALENDARIO GRÁFICO DE MAREAS



SECRETARÍA DE MARINA-ARMADA DE MÉXICO

Figura 4.10: Calendario gráfico de mareas realizada por la Secretaría de Marina Armada de México. [79]

FEBRERO 2005				CICESE Depto. Oc. Física				San Felipe, B.C. (31 01 N, 114 49 W)			
DIA	HORA	PIES	METROS	DIA	HORA	PIES	METROS	DIA	HORA	PIES	METROS
1	5:39	10.4	3.18	11	3:59	16.4	5.01	21	1:43	13.6	4.14
	12:12	1.6	0.48		10:14	-2.1	-0.65		7:53	1.2	0.37
	19:10	9.2	2.79		16:09	14.4	4.40		13:26	10.6	3.23
2	0:38	5.0	1.52	22:18	-2.1	-0.63	19:27	-1.0	-0.31		
	6:34	9.1	2.76	4:33	14.7	4.48	1:58	14.2	4.31		
	13:12	2.1	0.64	10:44	-1.3	-0.38	8:09	0.5	0.16		
3	21:11	9.3	2.83	16:51	13.2	4.02	13:47	11.7	3.55		
	3:34	5.9	1.79	22:50	0.0	0.01	19:52	-1.6	-0.50		
	8:28	8.0	2.45	5:03	12.6	3.85	2:15	14.6	4.44		
4	15:11	2.1	0.65	11:12	-0.1	-0.03	8:25	-0.1	-0.04		
	22:57	10.7	3.25	17:36	11.5	3.52	14:09	12.6	3.83		
	5:26	4.7	1.42	23:21	2.4	0.73	20:17	-2.0	-0.60		
5	10:25	8.5	2.58	5:30	10.5	3.20	2:33	14.8	4.52		
	17:00	0.9	0.26	11:41	1.3	0.38	8:44	-0.7	-0.20		
	0:00	12.6	3.85	18:29	9.8	2.97	14:33	13.2	4.02		
6	6:23	2.9	0.89	23:55	4.7	1.45	20:41	-2.0	-0.60		
	11:38	9.8	3.00	5:52	8.5	2.59	2:51	14.9	4.54		
	18:00	-0.8	-0.23	12:14	2.7	0.82	9:04	-1.0	-0.31		
7	0:46	14.6	4.44	19:53	8.3	2.52	14:58	13.5	4.12		
	7:08	1.1	0.33	1:00	6.9	2.09	21:06	-1.6	-0.50		
	12:35	11.5	3.52	2:39	6.9	2.11	3:11	14.7	4.49		
8	18:51	-2.3	-0.70	13:15	4.0	1.22	9:25	-1.2	-0.36		
	1:28	16.2	4.95	14:42	4.1	1.24	15:24	13.5	4.12		
	7:49	-0.5	-0.16	15:26	4.1	1.24	21:32	-0.9	-0.29		
9	13:23	13.2	4.02	17:07	6.5	1.97	3:32	14.2	4.33		
	19:39	-3.5	-1.08	17:04	6.0	1.83	9:48	-1.1	-0.35		
	2:08	17.4	5.30	17:17	3.1	0.96	15:54	13.1	4.00		
10	8:27	-1.7	-0.53	0:36	10.5	3.19	22:00	0.1	0.04		
	14:06	14.4	4.40	7:13	3.9	1.19	3:55	13.4	4.07		
	20:23	-4.3	-1.31	12:17	7.1	2.17	10:15	-0.8	-0.26		
11	2:47	17.9	5.45	18:03	2.0	0.61	16:31	12.4	3.77		
	9:05	-2.4	-0.75	1:03	11.8	3.58	22:31	1.6	0.48		
	14:48	15.1	4.61	7:26	2.9	0.87					
12	21:04	-4.3	-1.32	12:48	8.3	2.53					
	3:24	17.5	5.35	18:35	0.9	0.27					
	9:41	-2.6	-0.78	1:25	12.8	3.90					
13	15:28	15.1	4.61	7:39	2.0	0.61					
	21:43	-3.6	-1.09	13:08	9.5	2.88					
				19:02	-0.1	-0.04					



Hora del Meridiano: 100 W.G.
Nivel de Referencia: MBI

revisado por el CICESE el 10 de febrero de 2005 a las 10:00 AM

Figura 4.11: Tabla de predicción de mareas realizada por el CICESE. [56]

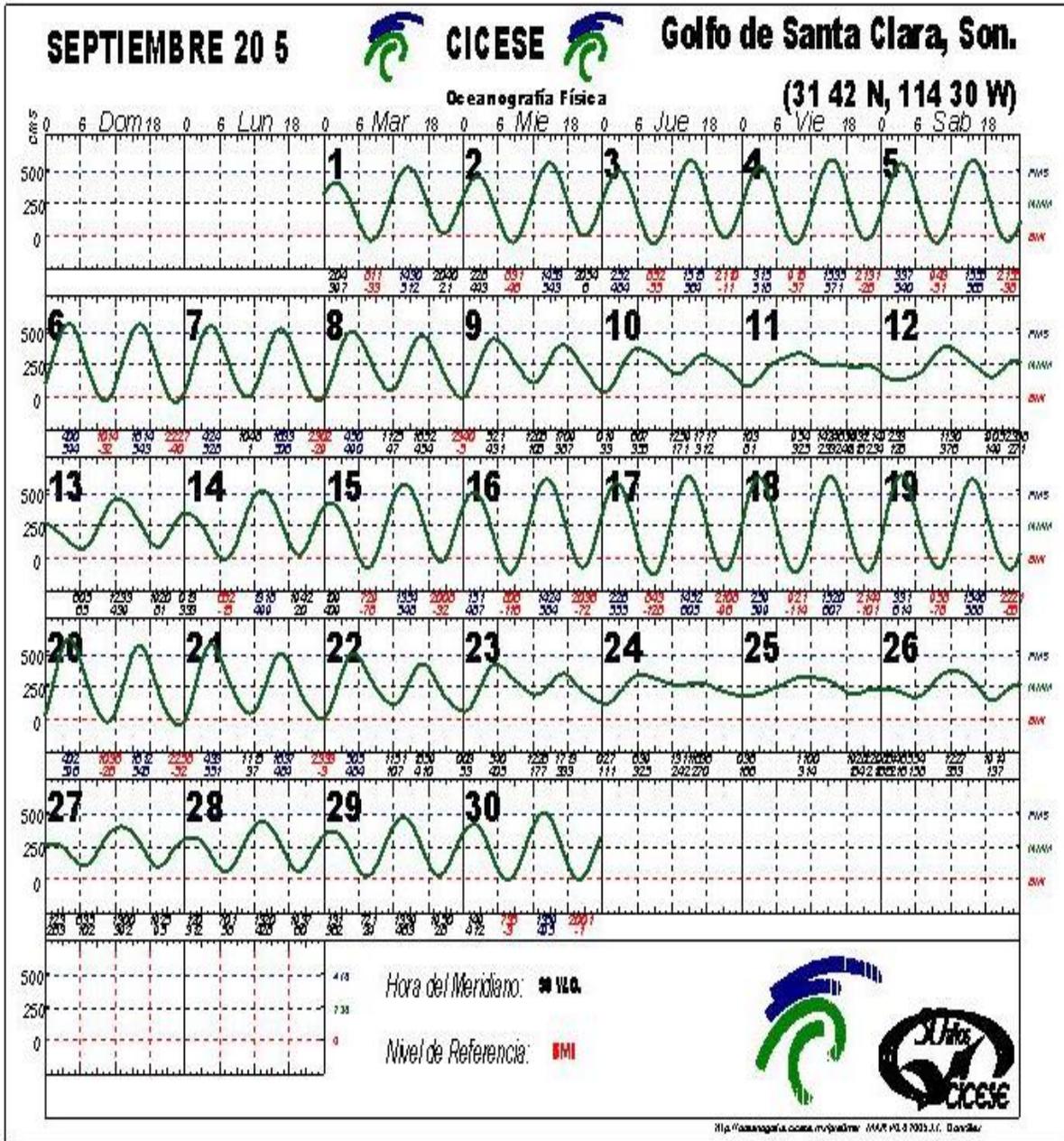


Figura 4.12: Calendario gráfico de mareas realizada por el CICESE. [56]

Además, el Departamento de Oceanografía Física distribuye gratuitamente el programa para predicción de mareas llamado *MAR V0.6* (figura 4.13 y 4.14); el cual, además de lo anterior, proporciona predicciones de niveles de mareas a un mayor lapso de tiempo que el del año en curso (figura 4.15).



Figura 4.13: Programa de predicción de mareas proporcionado por el CICESE. [56]



Figura 4.14: Programa de predicción de mareas proporcionado por el CICESE. [56]

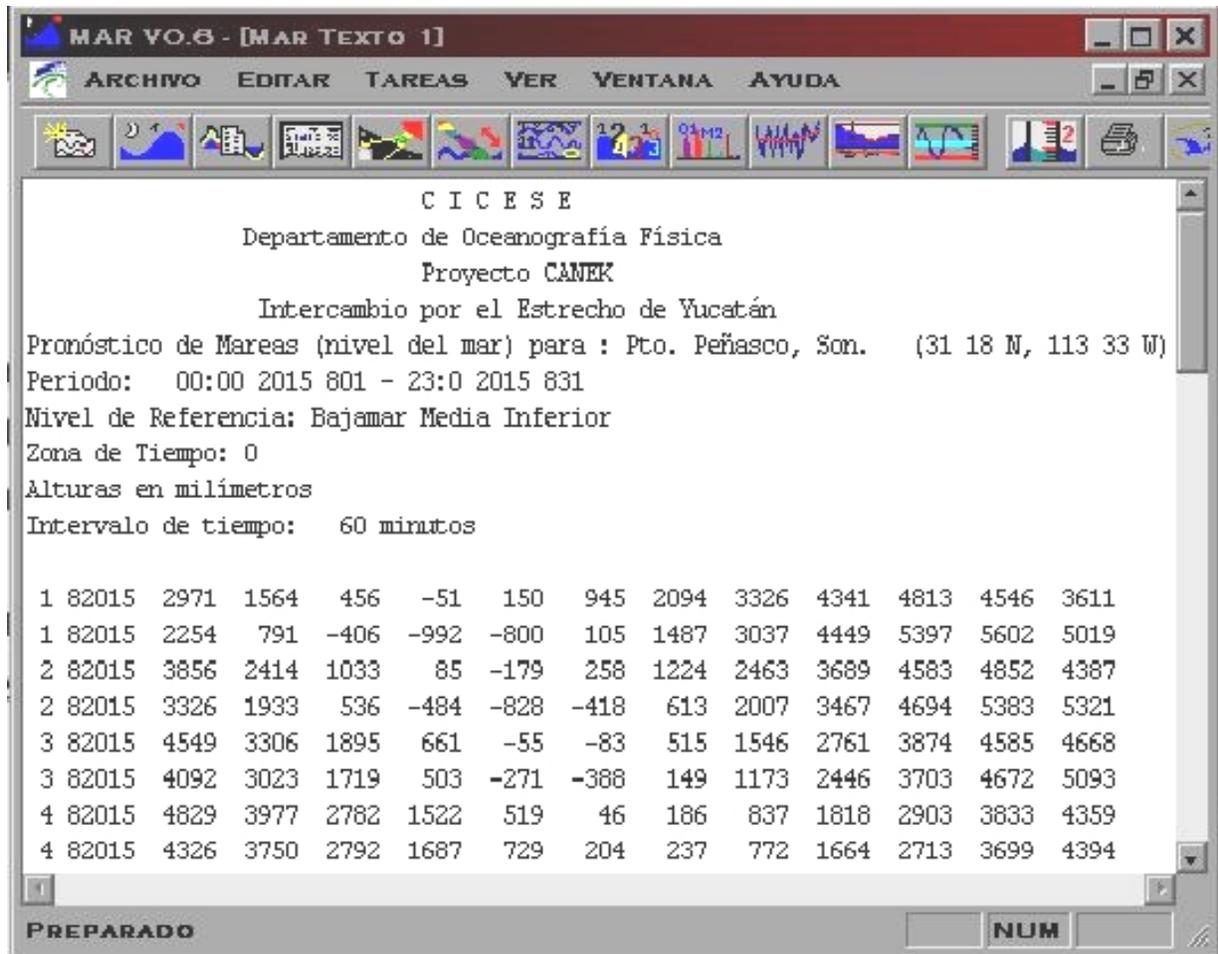


Figura 4.15: Programa de predicción de mareas proporcionado por el CICESE, mostrando una predicción para el mes de agosto de 2015. [56]

4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA CON LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ.

Sin importar el tipo de generación que se utilice para conseguir energía eléctrica, los factores que influyen en el costo final de la generación son varios, por lo que cada tipo de energía tiene un costo distinto a las demás. Debemos considerar que todo elemento de un sistema causa dos tipos de gastos:

1. Por el solo hecho de existir (como propiedad).
 - a. Gastos de capital.
 - b. Gastos de inversión.
 - c. Gastos de capital invertido.
2. Por el solo hecho de operar:
 - a. Gatos de operación:
 - i. Combustible (consumo).
 - ii. Agua (consumo).

- iii. Lubricante.
- iv. Mantenimiento (refacciones).
- v. Pérdidas (energía disipada).
- vi. Salarios (operación).
- vii. Impuestos sobre operación.
- b. Gastos de explotación.
- c. Gastos de producción.

Otros factores que intervienen son: vida útil, salarios de construcción, seguros, impuestos sobre inversión, etc.

Incluso, en las centrales del mismo tipo de energía primaria se detectan variaciones en los costos finales. Esto es debido a que influye el lugar de construcción y su accesibilidad, la cantidad y tipo de equipo a utilizar, etc. Un ejemplo claro es la planta mareomotriz del Rance. Cuando dicha planta aún estaba en la etapa de proyecto demostró que ante inversiones casi iguales de una planta hidroeléctrica convencional, el costo por kW de capacidad instalado era 5 veces más barata la mareomotriz; y, el costo de generación de kWh era 2.5 veces menor.[28]

Pero, de manera general, una de las principales barreras en la expansión de la energía mareomotriz es el alto costo de la construcción de las centrales. Lo que en gran parte determina la elevación del costo de la energía mareomotriz es el tamaño que requiere el dique (longitud y altura) y la amplitud de marea. Además de que el tiempo de construcción es considerable, del orden de 10 años. Aunque el costo de mantenimiento y de operación son verdaderamente bajos.

Este tipo de energía utiliza turbinas específicas, pero ya desarrolladas. Por lo demás, usa equipos de generación comunes, técnicas convencionales de construcción marítima, y métodos comunes de transmisión de energía.

4.3.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA MAREOMOTRIZ CON ENERGÍA ELÉCTRICA CONVENCIONAL.

En principio, podría parecer innecesario realizar una comparación de índole económico entre una fuente renovable y las no renovables, ya que al representar por definición una alternativa de generación no contaminante y no agotable o de renovación casi constante, podría darse por hecho su bajo costo. Pero no es así de simple. Ante cada tipo de generación, existen puntos a favor y en contra.

Como ya se ha explicado, la fuente primaria de energía es gratuita, con lo que supera enormemente al petróleo, el gas, el carbón y la energía nuclear. Cada uno de estos tipos de energía tienen costos elevados y en ocasiones, depende de la época del año, la situación económica y política mundial.

En el caso del petróleo y el gas, su transportación es complicada y costosa a menos que se cuente con oleoductos o gasoductos que puedan surtir directamente a las plantas. Método

que en un principio requiere una gran inversión, pero sólo en un inicio. Además, en el caso del gas natural, México cuenta con muchas reservas naturales, el problema es que no puede ser utilizado directamente, debido a que tiene que ser procesado para quitarle los altos índices de azufre con el que se extrae. Proceso que se realiza en otras naciones.

El carbón es el único que se encuentra en fase sólida, aunque las técnicas más modernas proponen una precombustión a alta temperatura para utilizarlo como gas y aprovechar las peculiaridades de éste. Además, tiene la ventaja de su enorme difusión y la mejor facilidad de acceso, sobretodo para los países que cuentan con este recurso natural. El problema es que se cuenta con una cantidad limitada. Es difícil su búsqueda y extracción, transporte y almacenamiento, que además requiere medidas de seguridad especiales.

En lo referente a la energía nuclear, sabemos que hay países, como el caso de México, que en su territorio cuenta con una gran cantidad de Uranio, pero no es utilizable para la producción de energía sin antes procesarlo para ello. Proceso que no es barato y que no se realiza en cualquier parte, por lo que el combustible para la energía nuclear no es barato. Claro que su relación del costo del combustible con la cantidad de energía generada no es despreciable, pues el uranio tiene mucha capacidad de producción de energía. La fisión de 1 kg de uranio 235 libera 18.7×10^6 kWh en forma de calor.

Los expertos calculan que las mareas podría aportar unos 635,000 GWh anuales, equivalentes a unos 1,045,000,000 de barriles de petróleo ó 392,000,000 toneladas de carbón al año [82, 129].

Otro tipo de energía convencional es la hidroeléctrica, la cual tiene la misma problemática que la mareomotriz en cuanto a los costos y tiempos de construcción, pero es dependiente de las temporadas de lluvias o de sequías en el año.

Además, mientras la energía mareomotriz y la hidráulica tienen una vida útil estimada en 50 años en sus equipos y hasta 100 años en sus construcciones; los otros tipos de energía apenas cuentan con 15 años para algunos tipos de plantas turbogeneradoras, 30 para otras. Las plantas nucleares se encuentran cercanas a los 40 años.

En la tabla 4.1, obtenida a partir de distintas fuentes de información, se muestra un comparativo con los costos totales de generación nivelados al total de la vida útil de la planta en cada una de las tecnologías convencionales mencionadas en este trabajo.

Tipo de energía	Costo de generación [USD/kWh]
Petróleo	3 - 5.39
Gas	8 - 12
Carbón	4 - 6
Hidráulica convencional	0.5 - 14
Nuclear	1.68 - 8
Mareomotriz	2 - 22

Tabla 4.1: Costos de generación de energías convencionales y la mareomotriz.

[10, 16, 17, 21], 41, 44, 54, 68, 80, 82, 83, 105]

4.3.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA MAREOMOTRIZ CON ENERGÍA ELÉCTRICA NO CONVENCIONAL.

Entre las energías no convencionales se encuentran las fuentes energéticas renovables (también denominadas “energías alternativas” o “no contaminantes”); que, por contraposición a las anteriores, son aquéllas cuyo suministro es más o menos regular en el tiempo y tienen su característica principal en la renovación casi constante. De manera directa o indirecta las energías renovables tienen su origen en el Sol (a excepción de la geotérmica), es decir, en la radiación que procede el Sol y que es captada, de manera que esto hace suponer que tendremos acceso a las fuentes energéticas renovables en tanto sigamos recibiendo radiación solar. Por lo que hace suponer una gran fuente de energía y por lo tanto de recursos económicos.

Como en todos los casos, existen ventajas y desventajas a considerar en cada tipo de energía. Así, en el caso de la energía eólica, la limitación principal que impone este aprovechamiento es la necesidad de contar con un determinado número de horas anuales de viento. Es más importante que se cuente con un viento constante, que la gran intensidad de éste. Adicionalmente la concentración de parques eólicos en zonas concretas está limitado a las posibilidades de evacuación de la electricidad a través de la red eléctrica colindante e infraestructura asociada, que a menudo demuestra ser insuficiente. Además, en ocasiones, es necesario contar con grandes extensiones de terreno en los lugares propicios. Aunque hay que destacar que este tipo de energía es muy versátil en cuanto a los sitios donde se puede implementar, pues se han instalado en zonas montañosas, planicies, costas e incluso mar adentro. Y tiene la ventaja de no requerir agua.

Otro aprovechamiento posible de la energía solar, ampliamente asumido, es la de la transformación de la misma en energía eléctrica. Ello se realiza a través de los denominados paneles fotovoltaicos. La cantidad de ellos que se deben disponer depende de la potencia eléctrica que se demande. Al igual que con los usos térmicos, los paneles fotovoltaicos requieren para su disposición un espacio exterior libre de sombras, junto a una orientación adecuada lo más perpendicular posible a los rayos solares. Por lo que los costos de inicio son muy altos, pues los paneles son aún muy costosos y necesita grandes extensiones de tierra. Afortunadamente, una vez realizada la instalación, el costo de operación y mantenimiento puede ser muy bajo en grandes proyectos.

La energía geotérmica tiene el inconveniente de tener localizaciones muy puntuales, no se pueden construir en cualquier sitio; es decir, tienen un problema similar a la energía mareomotriz. Pero, aún así, tiene más opciones que ésta última, debido a que por lo menos ya hay 25 países que aprovechan la energía geotérmica, cada país con más de una opción en su territorio[135]. El costo de la energía es bajo. Su único problema es el localizar lugares propicios para este tipo de plantas y saber qué tanto durará el energético.

En el caso de la biomasa, aunque se trata de una combustión, y por tanto de la liberación de CO₂ en el proceso, al tratarse de residuos vegetales (leña, ramas, fruta, aserrines, cortezas, algodón, bagazo, orujo de uva, hueso de aceituna, orujillo del aceituna, cáscara de almendra, cáscara de piñón, paja de cereales, etc.) absorben CO₂ de la atmósfera, el ciclo de

dicho gas tiene unas emisiones netas al ambiente que se consideran contrarrestadas a diferencia de las de los combustibles fósiles.

De manera general, las energías no convencionales no producen emisiones contaminantes o las producen en cantidades muy bajas, lo que puede traer consecuencias económicas agradables, pues existen los llamados “bonos verdes”, los cuales son muy valiosos económicamente hablando.

En cuanto a fuentes de financiamiento, para el año 2004, México ya había obtenido fondos por poco más de 81 millones de dólares provenientes del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), del Banco Mundial y del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), para incentivar el desarrollo tecnológico, así como el fortalecimiento institucional y de capacidades.[44]

En la siguiente tabla, obtenida a partir de distintas fuentes de información, se muestra un comparativo con los costos totales de generación nivelados al total de la vida útil de la planta en cada una de estas tecnologías.

Tipo de energía	Costo de generación [USD/kWh]
Eólica	2 - 11
Solar	2.48 - 172
Geotérmica	3 - 12
Biomasa	5 - 9
Olas	4 - 15
Corrientes marinas	10 - 14
Mareomotriz	2 - 22

Tabla 4.2: Costos de generación de energías no convencionales y la mareomotriz.
[10, 16, 17, 21], 41, 44, 54, 68, 80, 82, 83, 105]

Está claro que el costo de generación de energía por medio de las mareas no es el más barato sólo por ser una energía renovable. Si bien los costos de los combustibles ayudan a optar por razones más económicas y ecológicas, es importante considerar los efectos que tienen los altos niveles de inversión inicial en el costo final. Sobre todo, cuando un proyecto tiene complicaciones técnicas o geográficas que, finalmente, elevan los factores económicos.

5. PROPUESTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CENTRAL MAREOMOTRIZ EN MÉXICO.

Como se indicó en el capítulo anterior, para las condiciones necesarias que deben de reunirse en los lugares a considerar, proponemos un lugar muy particular en la desembocadura del *Río Colorado*, el cual es conocido como el *Delta del Río Colorado*.

Para justificar nuestra propuesta, a continuación daremos algunos datos específicos del lugar y aquellos datos que nos han permitido realizar esta propuesta.

5.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

La Desembocadura del Río Colorado se encuentra ubicada a $114^{\circ} 45'O$ y $31^{\circ} 45'N$ al noroeste de la República Mexicana entre el estado de Baja California Norte y el estado de Sonora. Específicamente en los municipios de Mexicali, en el estado de Baja California Norte; y los municipios de San Luis Río Colorado y Puerto Peñasco, en el estado de Sonora.

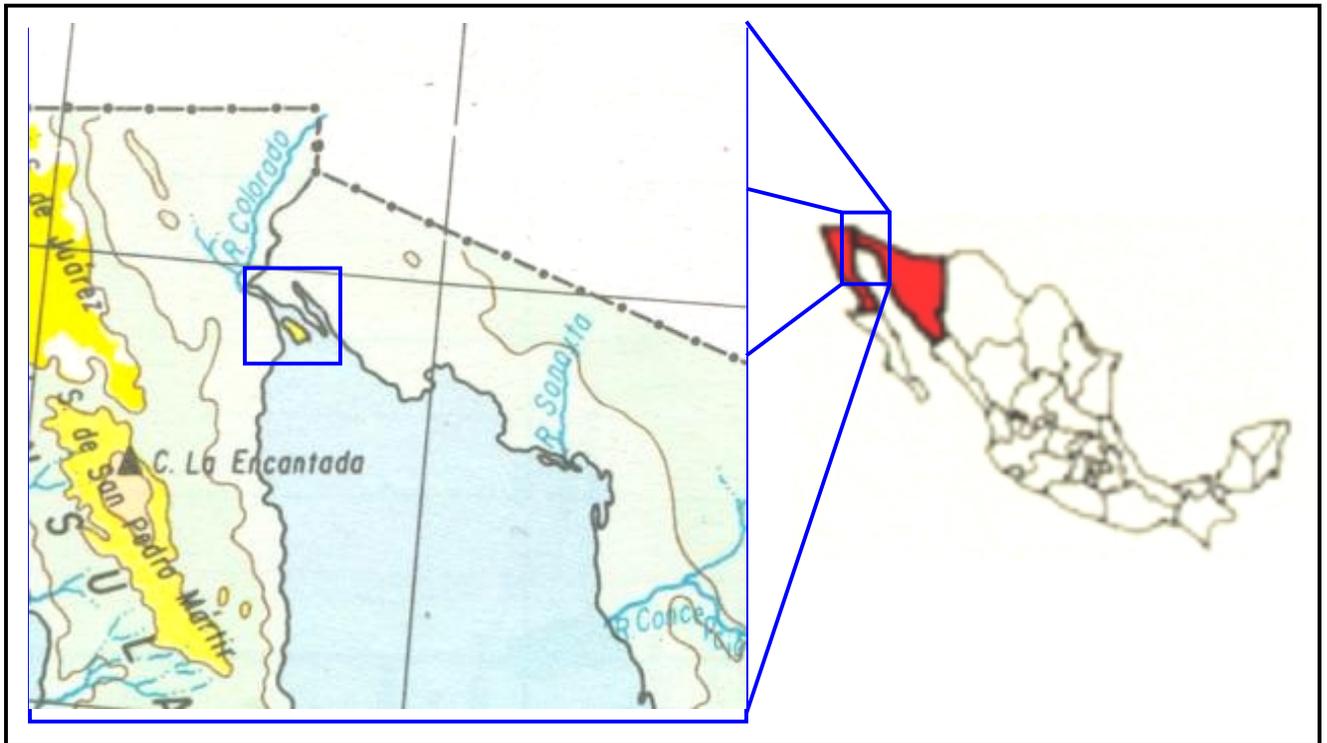


Figura 5.1: Ubicación de la desembocadura del Río Colorado. [22]

El lugar propuesto puede observarse en la figura 5.2 que es una imagen satelital obtenida de la NASA [77]. En esta fotografía se observa la particularidad de la zona.

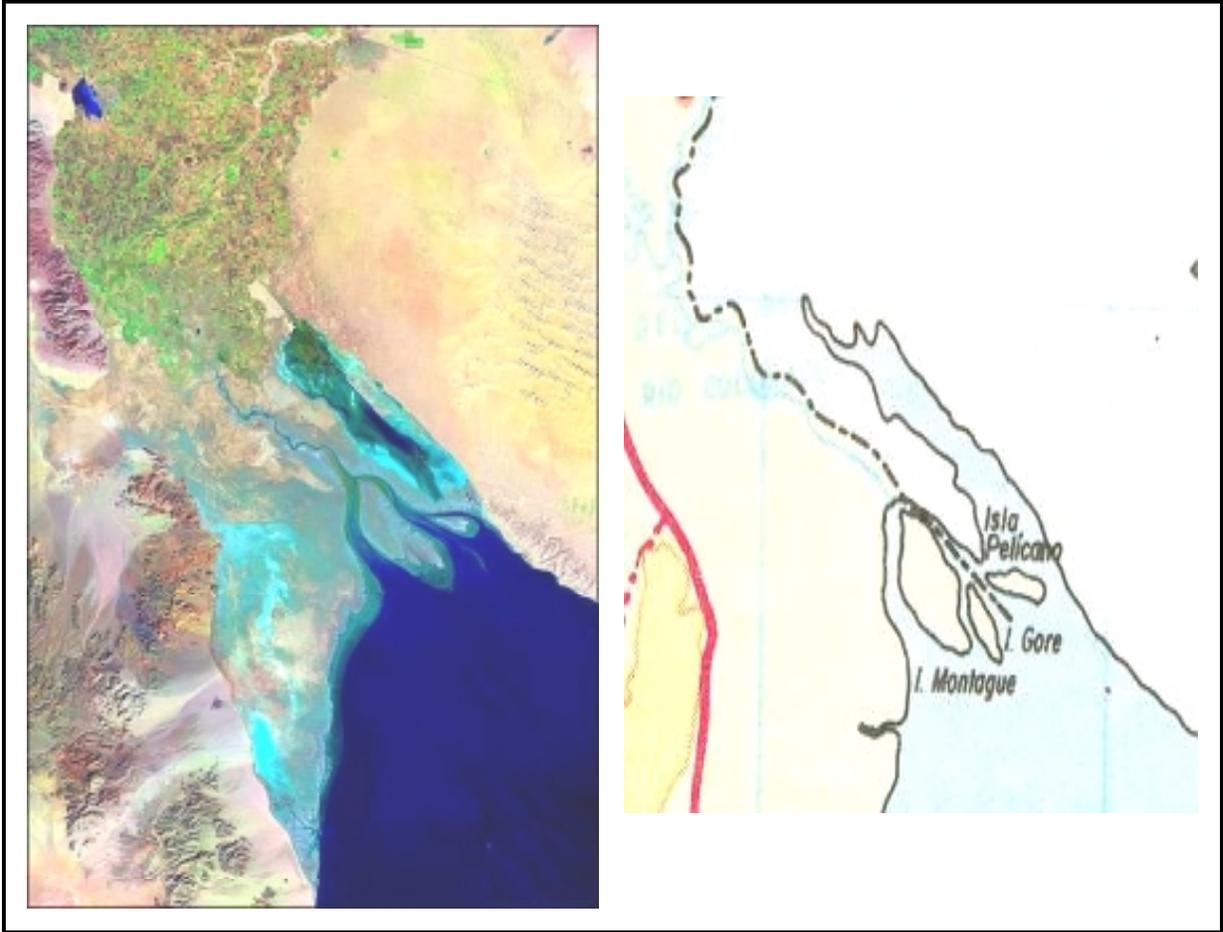


Figura 5.2: Desembocadura del Río Colorado. [77, 22]

5.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR.

A continuación, enlistamos las distintas características de la desembocadura del Río Colorado, las cuales las hemos agrupado en los siguientes grupos: topografía y geología, clima, ecosistema, y por último el potencial de mareas en la zona seleccionada.

5.1.1.1. HIDROGRAFÍA, TOPOGRAFÍA Y GEOLOGÍA.

Hidrografía.

Como se puede observar con claridad en la figura 5.2, el *Delta del Río Colorado* consiste en la desembocadura del mismo río en la parte Norte más extrema del Golfo de Baja California; siendo el Río Colorado el único que desemboca en esta zona.

Esta condición, en la que se encuentra agua dulce, por parte del río; y, agua salada, por parte del golfo, nos produce un ecosistema particular al que se le denomina estuario, y al cual nos referiremos más adelante.

Es importante mencionar que la cuenca del Río Colorado comienza en los Estados Unidos de América, tiene 2,334 km de largo y es el río de mayor longitud al oeste de las montañas Rocosas. El Colorado nace justo al oeste de la cordillera Norteamericana, al norte de Colorado, y en los primeros 1,600 km de su curso pasa por una serie de gargantas y cañones originados por la erosión de su corriente. El río fluye en dirección suroeste a través de Colorado y el sureste de Utah, donde se une con su afluente el río Green. Después de cruzar la parte norte de Arizona, el Colorado fluye hacia el oeste unos 436 km por el Gran Cañón. Luego continúa en dirección sur y establece el límite entre los estados de Nevada y California. Cerca de Yuma, en Arizona, el río cruza la frontera internacional con México y continúa por unos 145 km hasta su desembocadura en el golfo de California, un entrante del océano Pacífico [78].

La importancia de lo anterior, reside en que debido a su longitud, la cual en su mayoría pasa por territorio fuera de nuestras fronteras, y por razones obvias, se han realizado obras para distintos fines: riego, protección contra inundaciones, servicios municipales y generación de energía eléctrica, formación de zonas de recreo, etc. Éstas, son obras que se han realizado desde comienzos del siglo pasado y que han modificado totalmente el régimen de escurrimiento del río.

Seguramente debido al enorme volumen e intensas crecientes que antes descargaba el Río Colorado, se formó una desembocadura de grandes dimensiones. Después de la construcción de presas el caudal y volumen que actualmente descarga al mar es insignificante, pero la forma y dimensiones de la desembocadura han permanecido sensiblemente iguales, aunque las corrientes de las mareas, que son de gran amplitud, llenan y penetran en el cauce muchos kilómetros río arriba, dos veces al día, no parece que hayan provocado ni erosiones ni depósitos recientes.

La figura 5.3 servirá para esquematizar lo siguiente:

Aguas arriba del punto *A*, el cauce escasamente tiene una anchura de 100 m mientras que inmediatamente aguas abajo, se ensancha formando entre los puntos *A* y *B* la zona denominada "La Bolsa" de unos 10 km de longitud y 6 km de anchura media aproximadamente. Sigue la zona conocida como "Paraje Cadenas" entre los puntos *B* y *C* con 14 km de longitud y un ancho medio de unos 4 km [73].

Al sur del punto *C* existe la isla de Montague (figura 5.4) de unos 18 km de longitud y 5 km de ancho medio, y al sureste de ella se encuentra la isla de Gore (figura 5.5) de 7 km de longitud y un ancho medio de 2 km [73].

Debido a estas islas, el cauce se divide en su desembocadura en 3 canales, a saber: el denominado "Canal de Baja California" (figura 5.6) que corre entre el estado de ese nombre y la isla de Montague, termina al sur de la isla, punto *G*, desembocando en el Mar de Cortés, el que a unos 20 km al sur tiene unos 75 km de anchura. El canal llamado "Del Este", corre en su primera parte en unos 13 km entre el Estado de Sonora y la isla de Montague, y después corre en unos 7 km entre dicho estado y la isla de Gore tomando el nombre de "Canal de Sonora" en el punto *E* y finalmente, el "Canal de en Medio" formado entre las islas de Montague y de Gore, correspondiente entre los puntos *C* y *D* [73].

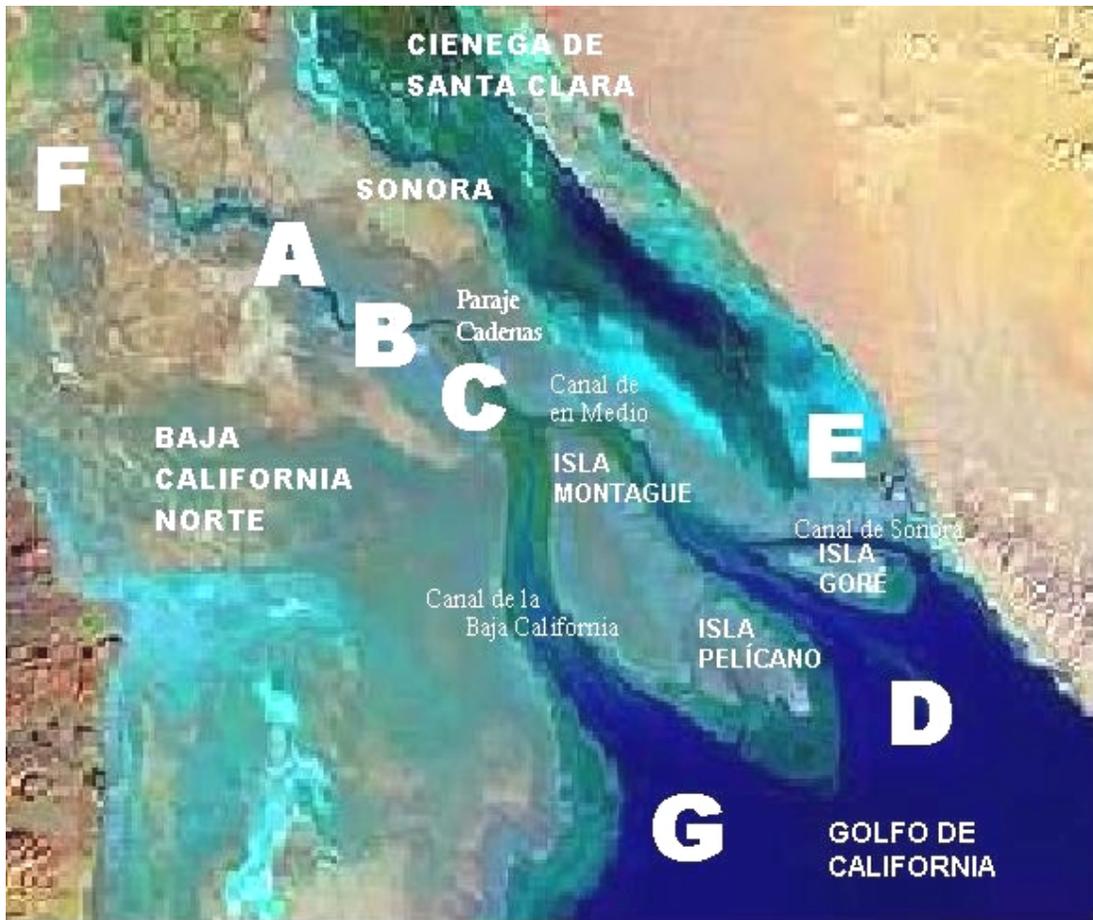


Figura 5.3: Descripción de la desembocadura del Río Colorado.



Figura 5.4: Vista aérea de la Isla Montague y del Paraje Cadenas. [57]



Figura 5.5: Vista aérea de la Isla de Gore y del Canal de Sonora en su desembocadura. [57]



Figura 5.6: Vista aérea del Canal de Baja California. [75]

Topografía.

La Comisión Internacional de Límites y otras instituciones, desde mediados del siglo pasado, han levantado muy buenos planos topográficos del valle de Mexicali, a elevaciones superiores al nivel máximo de marea; los cuales demuestran que la zona seleccionada tiene alturas que van de los 0 m a los 200 m como máximo (figura 5.7).

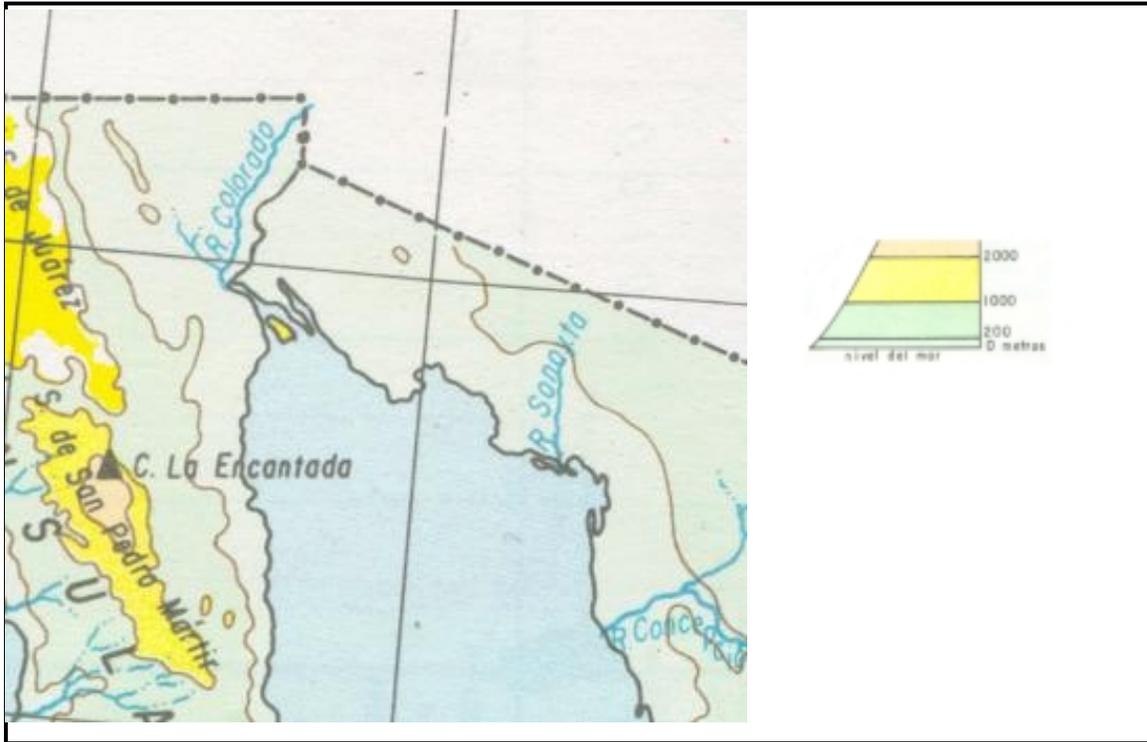


Figura 5.7: Carta altimétrica. [22]

Lamentablemente, es debajo de ese nivel donde se requiere la información topográfica, aunque, de acuerdo a observaciones realizadas por Lavin et al. en 1997, y por datos obtenidos del Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), se sabe que en el área de las islas Montague y Gore hay una profundidad máxima que oscila alrededor de los 10 m.

La topografía de la zona es muy regular, se caracteriza por amplias planicies de pendientes suaves que se extienden del mar hacia el continente y puntos como la mesa Arenosa, Cerro Prieto, Cerro el Chinero y Cerro Punta El Machorro, con elevaciones de más de 200 m. El fondo marino de la zona es mucho más plano y somero (200 m de profundidad en promedio) en comparación con la parte terrestre y está influenciado por los depósitos del río Colorado. La topografía es irregular, con una serie de canales y bajos con dirección noroeste-sureste (Álvarez Borrego et al., 1977). También, de acuerdo con Moser et al. (1973), los depósitos aluviales generados por los arrastres del río Colorado ocasionan suaves concavidades en el fondo marino.

Geología.

Se sabe por las cartas geológicas, que en esta zona se presenta la llamada roca sedimentaria de era reciente o cuaternaria, pero en lo referente al tipo de suelo, tenemos que es predominante el denominado solonchack (figura 5.8), el cual se caracteriza por ser un suelo aluvial salino y alcalino; aunque también se pueden observar en las cercanías los denominados regosol y litosol, que son suelos pocos desarrollados y parecidos a la roca.

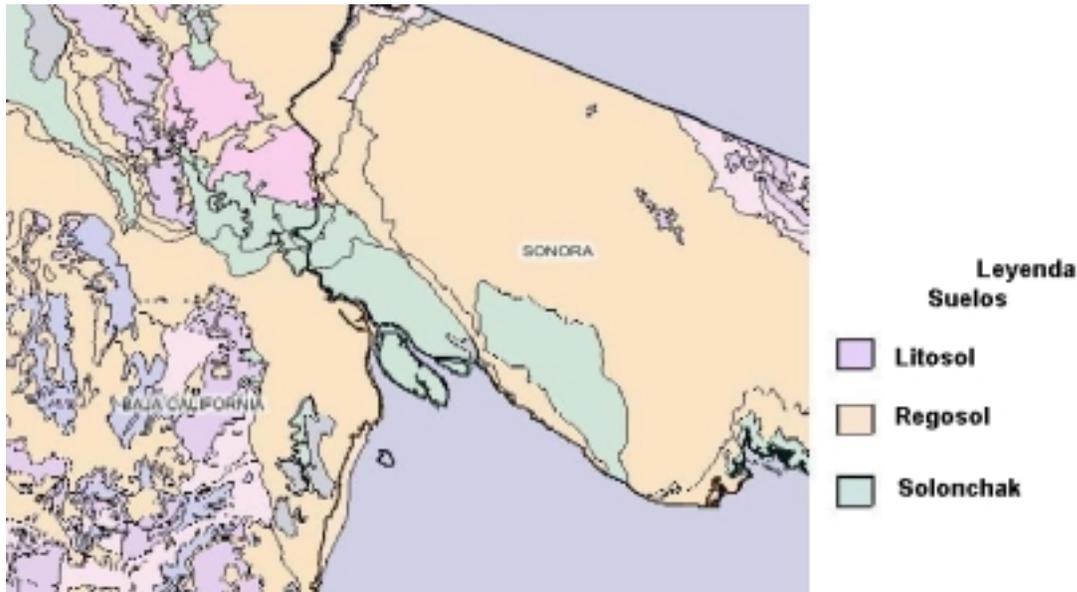


Figura 5.8: Tipos de suelo. [74]

De manera adicional, se puede observar en la figura 5.9 la humedad del suelo en la región.

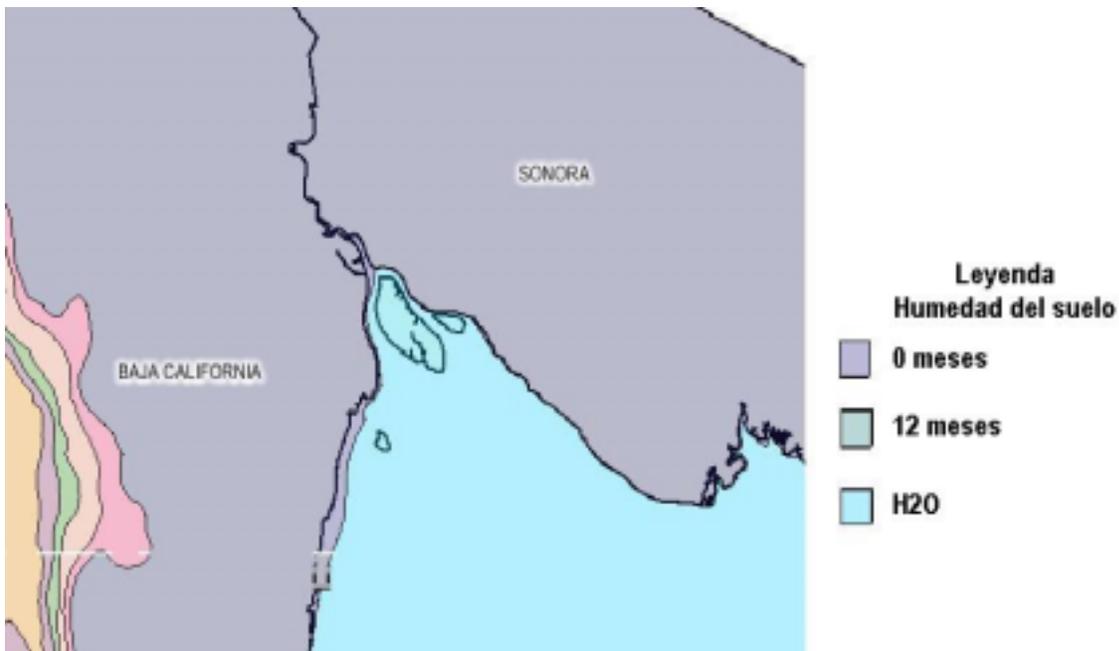


Figura 5.9: Humedad del suelo. [74]

En lo referente a los riesgos de ocurrencia de sismos, existe, como lo muestra la figura 5.10, pero de acuerdo a Protección Civil, tanto federal como del estado de Baja California y lo referido por el Dr. Carlos Valdés, Director del Sismológico Nacional, en la zona existen fallas y sismos de mediana frecuencia y severos para construcciones pequeñas y de mala edificación o planificación. Además, aclaran que no es más que un mito el que pueda ocurrir la separación de la península de Baja California debido a la afamada falla de San Andrés.

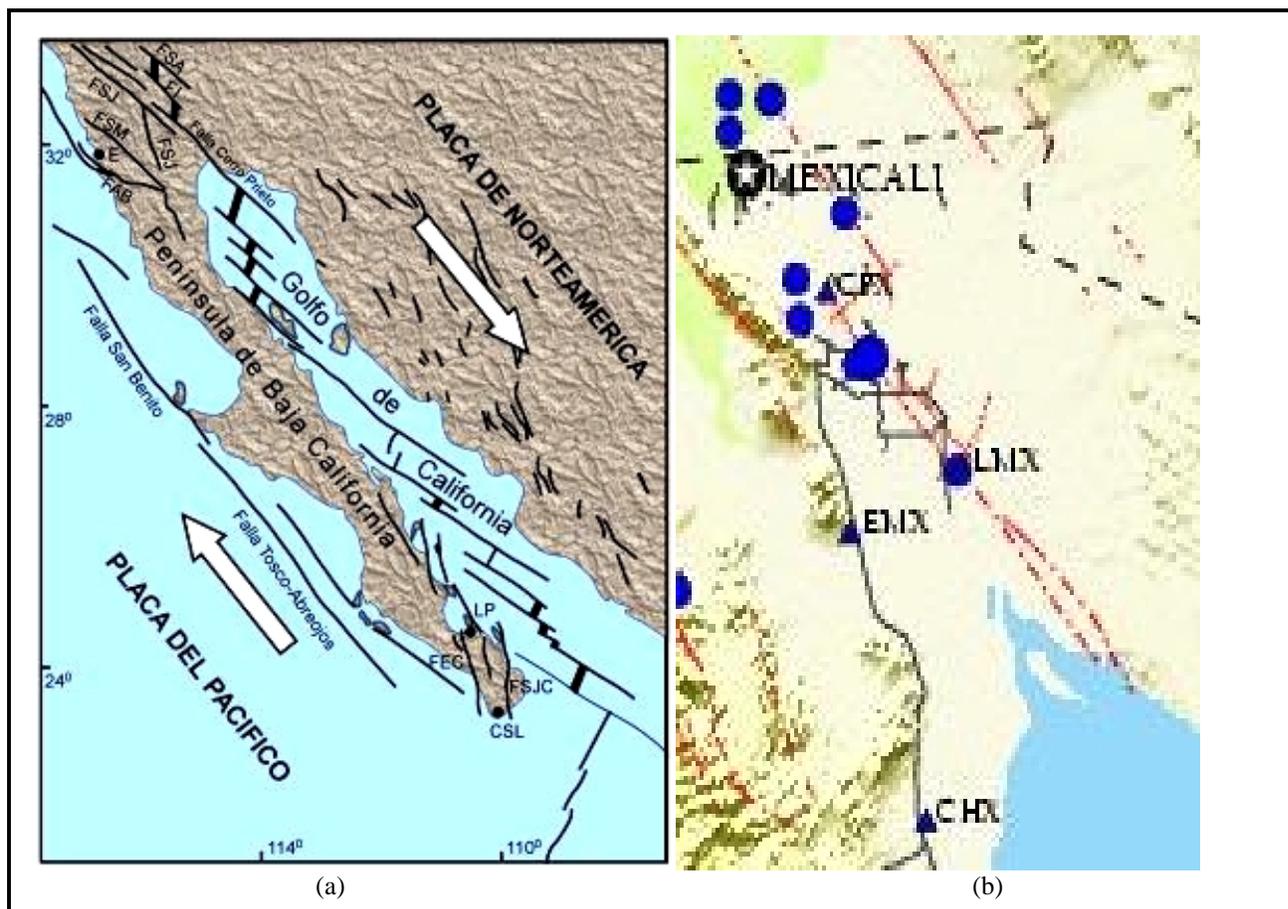


Figura 5.10: a) Placas tectónicas [72], b) fallas y puntos que han presentado sismos [69].

5.1.1.2. CLIMA.

El clima es del tipo muy seco (bw) con temperaturas medias de 18 a 20°C y precipitaciones medias anuales de 100 mm con lluvias muy escasas en verano e invierno, y oscilaciones anuales de temperatura mayores de 14°C. Se presentan dos subtipos, según el sistema Köppen. El subtipo BW hw (x)(e), muy seco semicálido con escasas lluvias en cualquier época del año, muy extremo, cubre la costa de Sonora, mientras que el subtipo BW(h)hw(x)(e) similar al anterior, pero cálido ocurre en la mayor parte del Delta del Río Colorado y las costas de Baja California [59]. La parte marina de la zona presenta un clima más continental que oceánico; se presentan dos estaciones, la fría en los meses de noviembre a mayo y la cálida en los meses junio a octubre [15], ambas con periodos de lluvia [29]. La temperatura mensual promedio del mar es de 22.7°C, con temperaturas bajas

en enero y temperaturas altas en julio, de manera que las temperaturas superficiales varían alrededor de 10°C en invierno a cerca de 32°C en verano [4].

Es importante señalar que en lo referente a las aguas oceánicas en el Golfo de California se presenta una termoclina temporal; en la parte norte se registra a menos de 50 m durante verano y cerca de los 100 m en invierno; en verano, la termoclina en el Canal de Ballenas y Cuenca del Tiburón está bien desarrollada; durante el invierno, al norte de la Isla Ángel de la Guarda, la columna de agua es isotermal, debido a la fuerte mezcla que se genera en esta época [15].

Dadas las características morfológicas (mar marginal), es una cuenca de gran evaporación que incrementa la salinidad, calculándose una evaporación de 3 g/cm³/año [15]; el clima es más continental que oceánico. Los huracanes pueden entrar en la época de lluvias (de agosto a octubre) y en esta misma época el nivel del mar aumenta no sólo por los meteoros sino también por el incremento del volumen específico del agua, consecuencia del aumento considerable de la temperatura en el verano.

En el Golfo de California la información sobre el registro de *El Niño* (EN) es heterogénea y contradictoria, y depende de la intensidad del fenómeno; por ejemplo, para la región del alto golfo la amplia variabilidad climática puede tener efectos en la mezcla vertical, pudiendo ocurrir tanto en periodos de *El Niño Oscilación Sur* (ENSO) o en ausencia de ENSO [15].

También se relaciona el aumento del nivel del mar durante los ENSO con el incremento del volumen del Agua Ecuatorial Superficial (que entra al golfo), especialmente registrada al norte de la Cuenca del Guaymas.

Es importante señalar que la respuesta del marco ambiental ante la presencia del EN es local, especialmente en un golfo como el de California, ya que no es lo mismo un mar marginal con rasgos morfológicos complejos que un Pacífico abierto.

5.1.1.3. ECOSISTEMA.

La fauna del Golfo de California es representativa de tres regiones zoogeográficas: la región del Pacífico este, la región caribeña y la provincia californiana. Se presenta un número significativo de especies cosmopolitas, pantropicales y de especies que se restringen únicamente al Golfo de California.

En el área es posible encontrar especies raras, amenazadas, en peligro de extinción y endémicas que utilizan hábitats como lugares de reproducción o crianza. Entre las que encontramos a la vaquita marina, la totoaba, el palmoteador de yuma y el pez perrito del desierto [59]. Son lugares que reúnen características especiales no encontradas en otro lugar, como son los hábitats remanentes del antiguo delta del río Colorado, las ciénagas y los afloramientos de agua dulce en la franja costera. Incluye zonas de hibernación y descanso de aves migratorias (Figura 5.11), zonas marinas de alta producción primaria,

zonas de ciénagas y afloramientos de agua dulce en la franja costera; además de que incluye tipos de vegetación de gran valor por su biodiversidad.

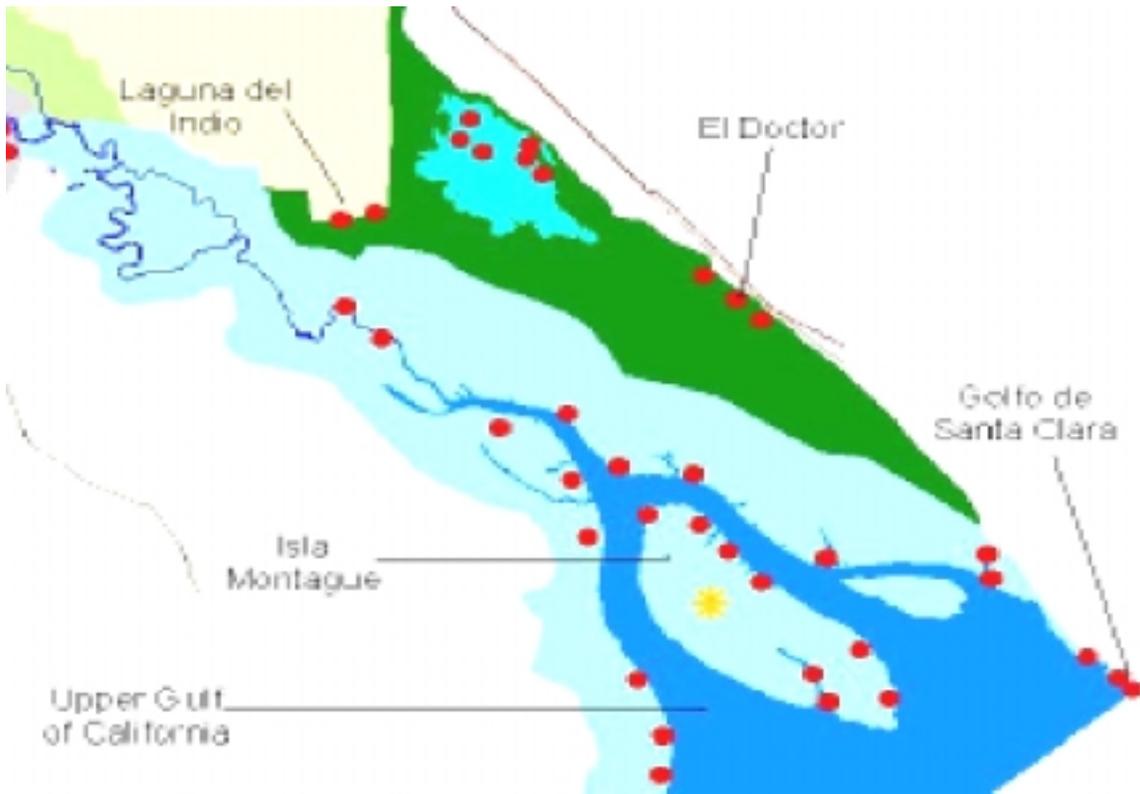


Figura 5.11: Zonas de hibernación y descanso de aves migratorias. [59]

Existen algunos hábitats de especial interés tales como:

- a) **La ciénega de Santa Clara**, que constituyó un brazo de terrenos inundables del río Colorado hasta que fue dramáticamente afectada, hasta casi desaparecer, por la construcción de la presa Hoover. A partir de 1977, los aportes de agua ligeramente salobre del canal Wellton Mohawk permitieron recuperar los últimos cenagales remanentes del río Colorado [25]. Junto con la ciénega del Doctor, representan hábitats importantes para el pez perrito del desierto [59, 11], el chichicuilete o palmoteador de Yuma [25] y un gran número de aves residentes y migratorias.
- b) **El delta del río Colorado** representa una zona de alta productividad y hábitat de gran importancia como zona de reproducción, desove y crianza de especies marinas, entre las que destaca la totoaba. Las islas que conforman el delta (Montague, Gore y Pelicano) son sitios de reproducción de *Nycticorax nycticorax*, *Ardea herodias*, *Larus sp.* y *Sterna elegans* [59].
- c) **Los pozos de Bahía Aldair** contienen una vegetación de humedales con afinidades a climas templados que proveen de agua dulce a un gran número de aves, algunos mamíferos y mantienen alrededor de 26 especies de plantas vasculares [11], además, en sus alrededores se han registrado especies en reproducción como *Ardea herodias*, *Charadrius sp.*, *Charadrius vociferus* y *Sterna antillarum* [25].

La *región litoral* es un acuario, ya que la riqueza y variedad de los animales y plantas costeros compiten en diversidad con los que pueden vivir en otros parajes del mar.

La región litoral es la zona marítima determinada por el nivel extremo de la marea alta o pleamar y el nivel de la bajamar, por lo que también se le conoce como zona intermareal; en ella se inicia la plataforma continental, quedando su piso dividido en las regiones: supralitoral, mediolitoral o infralitoral. Pueden encontrarse en esta zona rocas enteras en que la vida se representa por los mil armónicos movimientos de tentáculos policromos de anémonas, pomposos penachos de bellísimos anélidos que viven fijos dentro de tubos, brazos viscosos de pulpos que se esconden en las oquedades de las rocas, espinas aguzadas de erizos y estrellas de mar rojas, amarillas, anaranjadas y azules que se encuentran incrustadas en las grietas y hendiduras de estas rocas.

En las zonas altas de las costas rocosas viven los balanus o bellotas de mar, que están en el límite superior de la marea y por eso permanecen casi constantemente por encima del nivel de las aguas, lo que obliga a estos organismos a adaptarse a un nuevo género de vida, pudiendo vivir en lugares donde las aguas no llegan durante varios días.

La provincia nerítica presenta abundante flora y fauna, ya que sus aguas tienden a ser más ricas, por contar con los nutrientes y porque la luz solar penetra en toda ella.

En esta zona, por la acción del oleaje y las corrientes, se acumula gran cantidad de nutrientes, lo que permite un rico crecimiento de algas, zosteras y otros vegetales, que se refleja en un aumento de la vida animal. Muchas de las especies encontradas aquí no se localizan generalmente en otros lugares del mar o en aguas profundas.

Los animales acuáticos pueden ser marinos o de agua dulce; sin embargo, esta distinción no es clara en muchos casos, pues ciertos organismos pueden pasar de unas aguas a otras durante su ciclo vital o frecuentan aquellos lugares donde existen aguas mezcladas, llamadas salobres. Un ejemplo de estos organismos es la anguila común.

En general son dos factores fisicoquímicos del medio oceánico, temperatura y salinidad, a los que corresponden los cambios de estructura, funcionamiento y comportamiento de los seres que habitan los mares, y que determinan su distribución en las aguas oceánicas del planeta.

5.1.1.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS.

Estas son características a considerar debido a la importancia que tienen en el desempeño y durabilidad del equipo utilizado y de las estructuras de la planta que se encontrarán expuestas a los elementos. Ya que son factores que modifican a tal grado las obras y los equipos que debido a esto evolucionaron para satisfacer necesidades específicas.

A continuación se enlistan las características físico-químicas de la zona de interés.

Salinidad:

La salinidad en los diferentes océanos varía en un intervalo de 36 a 27ups, resultado especialmente del clima en cada latitud; en los golfos de México y California es de 37ups. [15]

La distribución de la salinidad a 10 m de profundidad elimina efectos diurnos y se caracteriza en el norte por presentar un intervalo entre 35 y 35.8ups, es decir, de 1 a 2ups más alta que aquellas en la misma latitud, pero fuera del golfo. Salinidades mayores a 36ups son sólo locales, se encuentran en áreas someras y semicerradas de la costa este, como en bahías Concepción, Aldair y San Jorge. [15]

Antes de la construcción de la Presa Hoover (1935), las salinidades eran menores en esta sección del golfo, por la descarga del Río Colorado. En la actualidad, al disminuir el aporte fluvial (prácticamente reducido) la marea se introduce, se evapora y se forman costras de sal, que en la siguiente marea se redisuelven y regresan al mar en el reflujó, incrementándose en el delta, cerca de la isla Montague, y que alcanzan hasta poco más de 40ups durante invierno y verano. [15, 30]

En el perfil vertical, la salinidad disminuye escasamente en todo el golfo, manifestando la presencia de diferentes masas de agua. [15]

Oxígeno:

El Golfo de California es considerado como el más productivo de los mares semicerrados, presenta a nivel general superficial contenidos de oxígeno altos. A nivel local, el *alto golfo* es el de mayor concentración aún en aguas profundas, comparado con el resto del mismo. En el perfil vertical se observa esta gran diferencia; la capa franja de anaerobiosis (0.15 ml/l) se registra en el *golfo inferior y la entrada*, mientras que en el *alto golfo* esta capa no se registra y el mínimo es cercano a 1.0 ml/l; esto es consecuencia del umbral batimétrico existente a la altura de las grandes islas, que separa en cierta forma a esta región del resto del golfo, no detectándose esa concentración típica del Pacífico tropical. A nivel costero las lagunas pueden alcanzar sobresaturaciones temporales, a consecuencia de las altas producciones primarias típicas de cuerpos de agua costeros. [15]

Dióxido de carbono:

Existe una concentración superficial entre 2.07 y 2.15 $\mu\text{M}/\text{kg}$. El contenido de CO_2 respecto a la profundidad aumenta monotónicamente con niveles máximos de 2.40 $\mu\text{M}/\text{kg}$ a más de 1000 m de profundidad (en las cercanías de la Cuenca de Guaymas). [15]

Compuestos nitrogenados:

La distribución general de los compuestos nitrogenados muestra un patrón de incremento hacia aguas profundas. El intervalo estacional de NO_3 fluctúa de 0.5 en otoño a 5.0 μM en primavera en aguas superficiales, con pequeñas variaciones en el perfil vertical,

alcanzando a los 600 m de profundidad 3.5 μM . En el *alto golfo*, como en toda la fisicoquímica de éste, se mantienen diferencias, pero no son significativas frente al resto de este mar semicerrado. Existen, como en todas las vertientes de México, investigaciones puntuales en áreas costeras (lagunas y estuarios) con contenidos extremos (de indetectables a 20 μM) con variaciones estacionales sujetas a la época de lluvias. [15]

Fósforo:

Los ortofosfatos muestran contenidos superficiales distintos según el área y la época, a las distintas masas de agua y a su dinámica de circulación, así como a la frecuencia de consumo por el fitoplancton; es importante mencionar que la producción primaria es elevada en el *alto golfo* y, por consiguiente, elevado consumo.

A nivel costero, con diversidad de condiciones ambientales, los contenidos de ortofosfatos varían según las características locales fluviales, geomorfológicas, de circulación, de producción primaria, de estacionalidad climática y de intervención antropogénica. Para las lagunas y estuarios del Golfo de California se pueden mencionar algunas concentraciones de ortofosfatos en el Estero Sargento con 5.9 μM , que es un contenido alto, posible consecuencia de las actividades agrícolas del área circundante o en el sistema lagunar Ensenada del Pabellón-Altata que puede alcanzar puntualmente hasta 13 μM , resultado también de los escurrimientos agrícolas. [15]

Silicio:

Esta zona, como todas las vertientes, muestra una variación temporal y espacial ostentable; pero su contenido superficial es mayor. A nivel global se presenta un incremento del silicio con la profundidad, de 10 μM en superficie, a 70 μM a 600 m. En las cuatro regiones en que ha sido dividido el golfo se registran variaciones marcadas. [15]

Destaca que en el *alto golfo* la concentración superficial de silicatos es mayor y esto puede ser consecuencia de los aportes del río Colorado.

El Golfo de California pierde grandes cantidades de silicatos a través de la sedimentación de los frústulos de diatomeas y espículas de radiolarios, que son compensadas por aguas del Pacífico. [15]

Materia orgánica:

Esta zona es considerada como de alta producción, especialmente en el *alto golfo* y su carbono orgánico disuelto (COD) puede alcanzar, a la altura de las grandes islas, hasta 138 mg/l y su carbono orgánico particulado (COP), 58 mg/l [15]; además de que el carbono o materia orgánica tengan un origen biológico (planctónico), la fracción disuelta en el golfo puede provenir en gran medida de los aportes fluviales continentales, especialmente en forma de ácidos húmicos.[30]

Estudios más específicos relacionados con cadenas tróficas y composición proximal de materia orgánica particulada biogénica (nano, micro y mesoplancton) y no biogénica (detritos) han mostrado la riqueza del Golfo de California en sus diferentes zonas; la fracción nano y microplañctónica domina en el sur y frente a Guaymas (que corresponde al *golfo inferior*), resultado de la presencia de surgencias que llevan nutrientes a la superficie, así como de escurrimientos continentales (que incluyen también nutrientes de fertilizantes agrícolas) y que promueven el aumento fitopláñctico. La alta biomasa alcanza de 10 a 70 mg de clorofila “a” en el nanofitoplancton con 1.3 a 2.5g de proteínas/m². Sin embargo, las nanopartículas no fotosintéticas (nanodetritos) han sido mayores en el área de las grandes islas con 7.8g de proteínas/m² asociada a aguas someras, turbias y bien mezcladas. La producción primaria varía de mayor a menor de norte a sur del golfo, y de esa manera debe variar la materia orgánica particulada (MOP). [15]

Clorofila “a” y producción primaria:

Se le ha calificado también como altamente productivo en clorofila “a”, incluso algunas áreas rebasan los máximos registrados con otros litorales mexicanos; esto es consecuencia de su dinámica de circulación, su morfología (mar marginal) y la influencia de un considerable número de sistemas laguneros costeros. Por ejemplo, en el *alto golfo* se alcanzan de 30 mg/m³, en bahía Aldair hasta 40 mg/m³, en San Felipe, a nivel superficie en primavera, que son debidos a un proceso de mezcla por los vientos invernales del noroeste, los cuales enriquecen de nutrientes para la siguiente producción primaria en primavera; asimismo, se presenta una disminución respecto a la profundidad y de norte a sur (hacia las grandes islas). En la zona de las grandes islas donde se registra una fuerte mezcla debida al marcado enfriamiento superficial, se han cuantificado de 0.2 a 1.1 mg/m³ en verano-otoño. [15]

5.1.1.5. POTENCIAL DE MAREAS.

La zona de interés seleccionada tiene las siguientes características que, en particular la hacen muy poco común a nivel mundial.

En cuanto a las corrientes de mareas, éstas no significan un transporte de agua sobre grandes distancias, pues se trata de una oscilación rítmica cada 6 ó 12 horas generada por la atracción gravitacional del Sol y de la Luna y que en canales estrechos y a lo largo de las costas invierten su dirección; sus velocidades son del orden de 2.5 m/s [29]. En el hemisferio norte giran a la derecha y en el hemisferio sur a la izquierda.

Distribución de la circulación y las corrientes:

Tradicionalmente se suponía que la circulación era causada principalmente por procesos locales, pero recientemente se ha evidenciado la mayor influencia de acción del Océano Pacífico que la del forzamiento local y de vientos; además, por sus características morfométricas y batimétricas, la circulación se modifica a nivel local. El Golfo de California tiene una circulación fuertemente estacional con flujo entrante en verano y saliente en invierno. Para magnificar la influencia de los generadores de circulación en

el golfo se señala que la variabilidad estacional del nivel del mar en un transecto transversal está integrada de la siguiente forma: por el Océano Pacífico (6.6 cm), por viento (2.9 cm) y por flujo de calor a través de la superficie (0.9 cm) [29].

La masa de agua del Océano Pacífico entra al golfo como onda interna de Kelvin por el lado continental y regresa modificada y atenuada por el lado peninsular. Se genera una circulación anticiclónica en invierno con su mayor flujo en el lado continental; esta circulación modelada con el esfuerzo del viento presenta la misma situación que la anterior, señalando velocidades y elevaciones superficiales prácticamente nulas en la región sur del golfo, aumentando hasta 25 cm/s en la parte norte [29]. Las corrientes más fuertes (geostróficas) siguen los contornos del nivel del mar, y cuando son cerradas forman un giro ciclónico en la superficie convexa y elevaciones máximas del nivel del mar; la condición contraria se encuentra en los giros anticiclónicos. [31]

Los vientos locales tienen una influencia en el patrón de circulación del golfo; en invierno son de norte a sur, cambiando de sur a norte en el verano con la mayor entrada de agua proveniente del Pacífico.

En general, se registran las siguientes corrientes: la Corriente de California, que penetra al golfo en forma incipiente en diciembre y enero mezclándose con el propio golfo, y sale con más fuerza hasta llegar al Golfo de Tehuantepec en marzo; en mayo se registra un flujo procedente del sur del Pacífico, que corresponde a la Corriente Costera de Costa Rica, la cual alcanza su máximo en julio, justo cuando cambian de dirección los vientos locales, y desaparece en agosto; a esta la sustituye la Corriente Norecuatorial que penetra al Golfo de California de agosto a septiembre, y en octubre se presenta un estado de calma en el patrón superficial. En noviembre se intensifica la Corriente del Golfo que fluye hacia el Pacífico hasta diciembre, para nuevamente detectarse indicios de la Corriente de California. El patrón de circulación corresponde a un modelo general; sin embargo, existe una circulación en cada una de las regiones del Golfo de California, es decir, tanto hay las corrientes geostróficas en el *golfo superior* (desembocadura del río Colorado hasta las grandes islas Tiburón y Ángel de la Guarda), como en el *golfo centro* o *inferior* (que parte del límite anterior hasta Cabo San Lucas-El Dorado, Sinaloa y Cabo San Lucas-Cabo Corrientes), siendo esta última región donde se registran frentes de todas las masas de agua y corrientes del Golfo de California. Se considera que en el *alto golfo* (hasta las grandes islas) la circulación es local y no posee alguna influencia de corrientes oceánicas que se introducen al golfo, las cuales sólo llegan hasta el paralelo 29°N donde se encuentra el umbral de las grandes islas, y su velocidad varía espacial y temporalmente entre 30 y 50 cm/s. [15]

Distribución de mareas:

El régimen de mareas es del tipo mixto semidiurno, aunque en la región central es diurno, principalmente. La marea del golfo es generalmente en forma primordial por cooscilación con la marea del Pacífico; es decir, las variaciones dentro del mar de Cortés se deben básicamente a las fluctuaciones del nivel del mar en la entrada del golfo y no a la atracción gravitatoria del Sol y de la Luna. [29]

El Golfo de California presenta las siguientes características mareales: *a*) el nivel del mar sube y baja una (diurnas) o dos veces al día (semidiurnas); *b*) el rango (amplitud) de marea cambia mensualmente; y, *c*) el rango de marea se incrementa de la *boca* (Cabo San Lucas) hacia la cabeza o *alto golfo* (San Felipe). El incremento hacia el norte es resultado del estrechamiento del golfo y la presencia de las grandes islas, que producen un encajonamiento de la onda mareal pasando de 13 cm en Guaymas hasta 80 cm en el *alto golfo*, en donde se han reportado niveles de marea superiores a los 10 m, como lo indican las observaciones hechas por Ruiz Mijares en 1965 [43] y por Lavin en 1966 [28] quienes coinciden en niveles de 12.30 m; Muñoz [15] declara 10.7 m; y Marinone y Lavin [31] señalan que los niveles de marea incrementan considerablemente desde Guaymas, Sonora hasta la desembocadura del Río Colorado, que son las mareas vivas o de sizigia, en la desembocadura del río Colorado. [29, 15]

Los procesos no son solamente de origen astronómico, sino también debidos a factores climáticos estacionales como presión atmosférica, dirección y fuerza del viento, densidad del agua, precipitaciones y escurrimientos (básicamente áreas cerradas), así como a cambios en la circulación en la *entrada del golfo*.

Actualmente, no se cuenta con mareógrafos en la Desembocadura del Delta del Río Colorado. Afortunadamente, como ya se mencionó, se sabe que desde Guaymas, Sonora hasta el punto referido, el comportamiento de las mareas es tal que sus amplitudes van en aumento hacia el Norte del golfo.

Además, el Delta se encuentra en la región mareográfica conocida como “Alto Golfo de California” (figura 4.8), y en toda esa región las mareas tienen el mismo comportamiento [47]. Además, en esta misma región mareográfica se encuentran las siguientes estaciones mareográficas: San Felipe, en Baja California; y Golfo de Santa Clara y Puerto Peñasco, en Sonora. Los cuales, se encuentran ubicados de la siguiente forma [47]:

- San Felipe, Baja California: 114°49’37’’W , 30°59’31’’N
- Puerto Peñasco, Sonora: 113°32’37’’W , 31°18’16’’N
- Golfo de Santa Clara, Sonora: 114°30’W , 31°42’N

Mientras que la Desembocadura del Delta del Río Colorado:

- Delta del Río Colorado: 114°45’W , 31°45’N



Figura 5.12: Mareógrafos cercanos al Delta del Río Colorado. [22]

Como se puede observar, el mareógrafo del Golfo de Santa Clara es el más cercano a nuestro punto de interés. Además los niveles medios de marea reportados en estos puntos confirman el comportamiento del Golfo de California, pues éstos niveles son mayores en este punto (tabla 5.1).

Estación mareográfica	Amplitud media de marea [m]
San Felipe, B.C.	2.032
Puerto Peñasco, Son.	2.227
Golfo de Santa Clara, Son.	2.398

Tabla 5.1: Amplitudes de mareas registradas en los mareógrafos de la zona. [47]

Estos valores son importantes, debido a que es necesario que los niveles se encuentren entre 1.5 y 4 m para el buen funcionamiento de las turbinas y que garanticen un mínimo de producción. [24, 94]

Debido a que no hay datos suficientes para la zona de la Desembocadura del Delta del Río Colorado, utilizaremos los datos del mareógrafo más cercano, ya que sabemos que la marea se comporta de la misma manera y que en el peor de los casos tendría el mismo rango que en el Golfo de Santa Clara (figura 5.13).

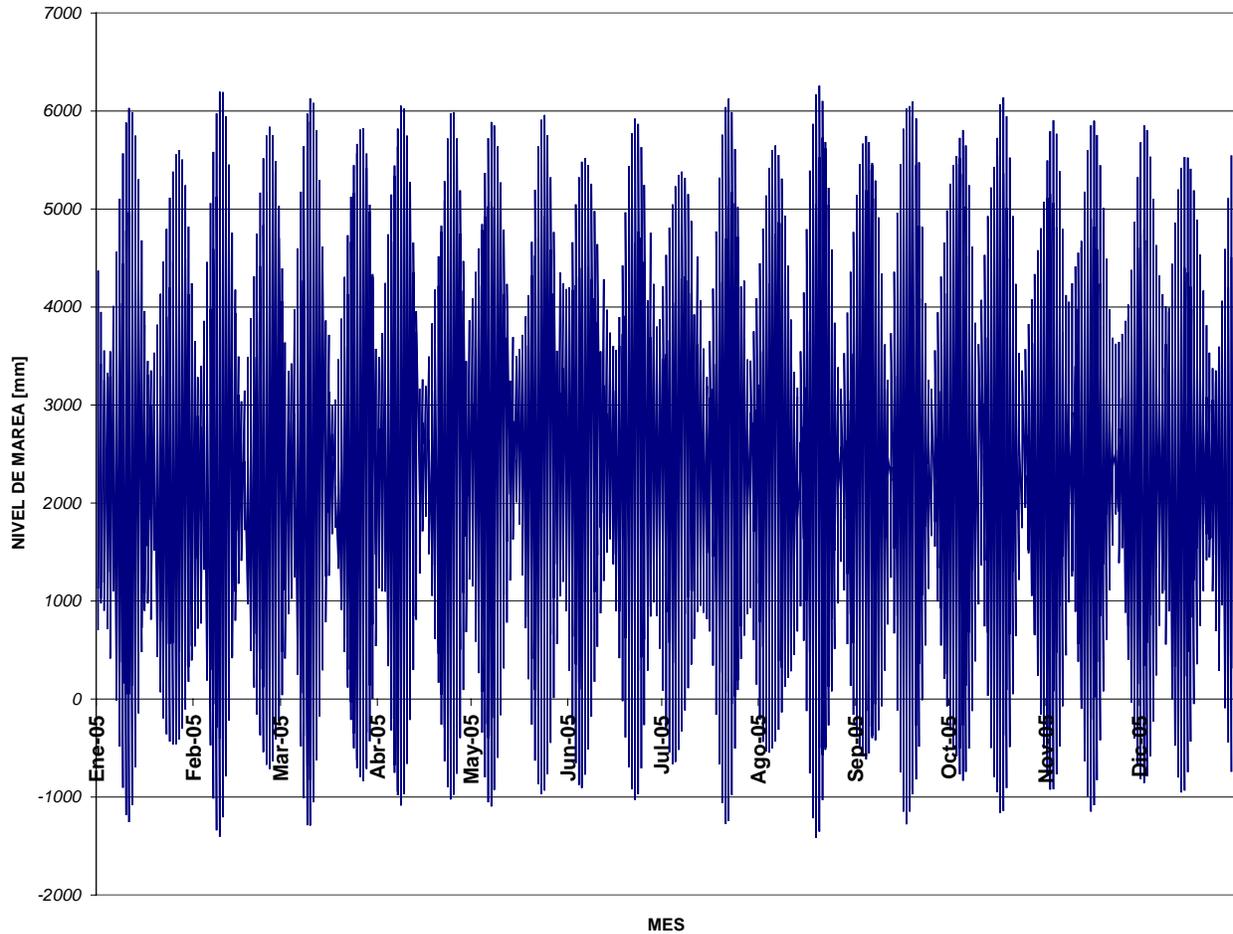


Figura 5.13: Mareas del año 2005 en el Golfo de Santa Clara, Son. [56]

En la figura 5.13 se muestra el comportamiento esperado de las mareas en el Golfo de Santa Clara durante el año 2005. En dicha figura se pueden observar con claridad los pleamares y los bajamares, pero lo más importante, se puede apreciar los rangos de mareas.

En la tabla 5.2 se muestra el comportamiento de las mareas en el Golfo de Santa Clara. Puede observarse que, por ejemplificar una época, para marzo de 2010, los rangos de marea más altos se presentan entre los días 1 y 16, días en los que la fase de la Luna estará en Luna llena y Luna nueva, respectivamente; y, los días en que estará en cuadratura (7 y 23) es prácticamente cero la diferencia entre pleamar y bajamar.

Esta tabla también sirve para ejemplificar como los rangos de mareas pueden alcanzar valores máximos.

FECHA	HORA	INTERVALO	PLEAMAR Y BAJAMARES [mm]	RANGO DE MAREA [m]
01/03/2010	03:27		-1236	7.148
01/03/2010	09:24	05:57	6278	7.514
01/03/2010	15:50	06:26	-892	7.17
01/03/2010	21:34	05:44	6079	6.971
02/03/2010	04:06	06:32	-893	6.972
02/03/2010	09:53	05:47	6117	7.01
02/03/2010	16:28	06:35	-783	6.9
02/03/2010	22:07	05:39	5911	6.694
03/03/2010	04:47	06:40	-382	6.293
03/03/2010	10:22	05:35	5696	6.078
03/03/2010	17:09	06:47	-501	6.197
03/03/2010	22:40	05:31	5436	5.937
04/03/2010	05:26	06:46	247	5.189
04/03/2010	10:50	05:24	5049	4.802
04/03/2010	17:48	06:58	-79	5.128
04/03/2010	23:15	05:27	4739	4.818
05/03/2010	06:08	06:53	936	3.803
05/03/2010	11:16	05:08	4249	3.313
05/03/2010	18:23	07:07	430	3.819
05/03/2010	23:57	05:34	3911	3.481
06/03/2010	06:52	06:55	1630	2.281
06/03/2010	11:40	04:48	3393	1.763
06/03/2010	18:57	07:17	975	2.418
07/03/2010	01:27	06:30	3126	2.151
07/03/2010	07:58	06:31	2250	0.876
07/03/2010	11:47	03:49	2590	0.34
07/03/2010	19:54	08:07	1495	1.095
08/03/2010	05:13	09:19	3171	1.676
08/03/2010	12:52	07:39	1864	1.307
08/03/2010	16:30	03:38	2342	0.478
08/03/2010	23:52	07:22	1273	1.069
09/03/2010	06:30	06:38	3564	2.291
09/03/2010	13:06	06:36	1281	2.283

Tabla 5.2: Predicción de pleamares y bajamares para el mes de marzo de 2010 en el Golfo de Santa Clara, Sonora.

Nota: Datos obtenidos con el programa de predicción de mareas MARV0.6

FECHA	HORA	INTERVALO	PLEAMAR Y BAJAMARES [mm]	RANGO DE MAREA [m]
09/03/2010	17:51	04:45	2687	1.406
10/03/2010	00:40	06:49	731	1.956
10/03/2010	07:08	06:28	3970	3.239
10/03/2010	13:26	06:18	824	3.146
10/03/2010	18:53	05:27	3175	2.351
11/03/2010	01:10	06:17	320	2.855
11/03/2010	07:33	06:23	4357	4.037
11/03/2010	13:46	06:13	473	3.884
11/03/2010	19:25	05:39	3704	3.231
12/03/2010	01:33	06:08	37	3.667
12/03/2010	07:54	06:21	4720	4.683
12/03/2010	14:03	06:09	218	4.502
12/03/2010	19:51	05:48	4229	4.011
13/03/2010	01:53	06:02	-152	4.381
13/03/2010	08:14	06:21	5044	5.196
13/03/2010	14:20	06:06	13	5.031
13/03/2010	20:15	05:55	4711	4.698
14/03/2010	02:11	05:56	-293	5.004
14/03/2010	08:34	06:23	5307	5.6
14/03/2010	14:34	06:00	-164	5.471
14/03/2010	20:37	06:03	5134	5.298
15/03/2010	02:32	05:55	-393	5.527
15/03/2010	08:54	06:22	5478	5.871
15/03/2010	14:51	05:57	-331	5.809
15/03/2010	20:59	06:08	5458	5.789
16/03/2010	02:56	05:57	-430	5.888
16/03/2010	09:13	06:17	5543	5.973
16/03/2010	15:12	05:59	-472	6.015
16/03/2010	21:22	06:10	5645	6.117
17/03/2010	03:24	06:02	-369	6.014
17/03/2010	09:31	06:07	5494	5.863
17/03/2010	15:39	06:08	-542	6.036
17/03/2010	21:46	06:07	5644	6.186
18/03/2010	03:57	06:11	-181	5.825
18/03/2010	09:51	05:54	5317	5.498

Tabla 5.2 (continuación): Predicción de pleamares y bajamares para el mes de marzo de 2010 en el Golfo de Santa Clara, Sonora.

FECHA	HORA	INTERVALO	PLEAMAR Y BAJAMARES [mm]	RANGO DE MAREA [m]
18/03/2010	16:13	06:22	-504	5.821
18/03/2010	22:10	05:57	5421	5.925
19/03/2010	04:33	06:23	146	5.275
19/03/2010	10:11	05:38	4988	4.842
19/03/2010	16:51	06:40	-330	5.318
19/03/2010	22:38	05:47	4985	5.315
20/03/2010	05:15	06:37	605	4.38
20/03/2010	10:32	05:17	4489	3.884
20/03/2010	17:30	06:58	-17	4.506
20/03/2010	23:11	05:41	4353	4.37
21/03/2010	05:59	06:48	1165	3.188
21/03/2010	10:52	04:53	3845	2.68
21/03/2010	18:13	07:21	416	3.429
22/03/2010	00:07	05:54	3616	3.2
22/03/2010	06:56	06:49	1774	1.842
22/03/2010	11:08	04:12	3093	1.319
22/03/2010	19:05	07:57	925	2.168
23/03/2010	03:46	08:41	3436	2.511
23/03/2010	08:33	04:47	2254	1.182
23/03/2010	10:37	02:04	2347	0.093
23/03/2010	13:02	02:25	2232	0.115
23/03/2010	15:50	02:48	2481	0.249
23/03/2010	21:41	05:51	1250	1.231
24/03/2010	05:08	07:27	3888	2.638
24/03/2010	12:32	07:24	1507	2.381
24/03/2010	17:05	04:33	2952	1.445
24/03/2010	23:41	06:36	629	2.323
25/03/2010	06:07	06:26	4409	3.78
25/03/2010	12:51	06:44	797	3.612
25/03/2010	18:09	05:18	3613	2.816
26/03/2010	00:31	06:22	-68	3.681
26/03/2010	06:52	06:21	4899	4.967
26/03/2010	13:16	06:24	144	4.755

Tabla 5.2 (continuación): Predicción de pleamares y bajamares para el mes de marzo de 2010 en el Golfo de Santa Clara, Sonora.

FECHA	HORA	INTERVALO	PLEAMAR Y BAJAMARES [mm]	RANGO DE MAREA [m]
26/03/2010	19:00	05:44	4379	4.235
27/03/2010	01:13	06:13	-601	4.98
27/03/2010	07:28	06:15	5308	5.909
27/03/2010	13:43	06:15	-409	5.717
27/03/2010	19:40	05:57	5130	5.539
28/03/2010	01:52	06:12	-916	6.046
28/03/2010	07:59	06:07	5620	6.536
28/03/2010	14:14	06:15	-837	6.457
28/03/2010	20:14	06:00	5744	6.581
29/03/2010	02:31	06:17	-1000	6.744
29/03/2010	08:29	05:58	5813	6.813
29/03/2010	14:48	06:19	-1085	6.898
29/03/2010	20:46	05:58	6120	7.205
30/03/2010	03:13	06:27	-867	6.987
30/03/2010	08:58	05:45	5853	6.72
30/03/2010	15:25	06:27	-1122	6.975
30/03/2010	21:17	05:52	6203	7.325
31/03/2010	03:53	06:36	-557	6.76
31/03/2010	09:27	05:34	5692	6.249
31/03/2010	16:05	06:38	-947	6.639
31/03/2010	21:48	05:43	5984	6.931

Tabla 5.2 (continuación): Predicción de pleamares y bajamares para el mes de marzo de 2010 en el Golfo de Santa Clara, Sonora.

Utilizando el programa de predicciones “MAR V0.6”, creado y proporcionado gratuitamente por el Centro de Investigación Científica y de Enseñanza Superior de Ensenada (CICESE), pudimos obtener la tabla 5.2. Con esa misma estructura, pudimos también obtener predicciones a 10 ó 15 años para poder mostrar la regularidad y la fiabilidad de las mareas en el Golfo de California. Y en este caso, en el lugar más cercano a nuestro punto de interés. Estos resultados se muestran en la tabla 5.3.

Mes	Número de ocasiones en que se rebasó un rango de mareas de 4.5 m.			
	2005	2010	2015	2020
Enero	44	51	49	47
Febrero	53	55	53	55
Marzo	55	68	58	61
Abril	53	59	59	60
Mayo	51	49	56	50
Junio	37	40	49	45
Julio	42	47	57	49
Agosto	50	57	64	59
Septiembre	57	58	64	60
Octubre	65	53	65	65
Noviembre	51	44	52	51
Diciembre	43	45	49	46
Total	601	626	675	648

Tabla 5.3: Predicción de amplitudes de mareas superiores a 4.5 m en el Golfo de Santa Clara, Son.

Cada evento de los representados en la tabla 5.3, tiene la característica de tomar entre 5 y 7 horas para llegar a la pleamar y un tiempo similar para llegar a la bajamar. Además, como se puede observar en las gráficas y tablas mostradas cada mes presenta estas condiciones aproximadamente durante 17 días. Presentándose, a su vez, de una a cuatro ocasiones en el día, siendo en el plenilunio cuando se presenta más veces y pudiéndose apreciar las mareas de sizigia.

En la figura 5.14 se pueden observar las amplitudes de marea presentadas en el Golfo de Santa Clara. Se muestran en la zona sombreada las amplitudes menores a 4.5 m.

También, en la Figura 5.15 se muestra los posibles ciclos de trabajo de una central mareomotriz: con bombeo para rangos menores a 4.5 m y, sin bombeo, para rangos mayores.

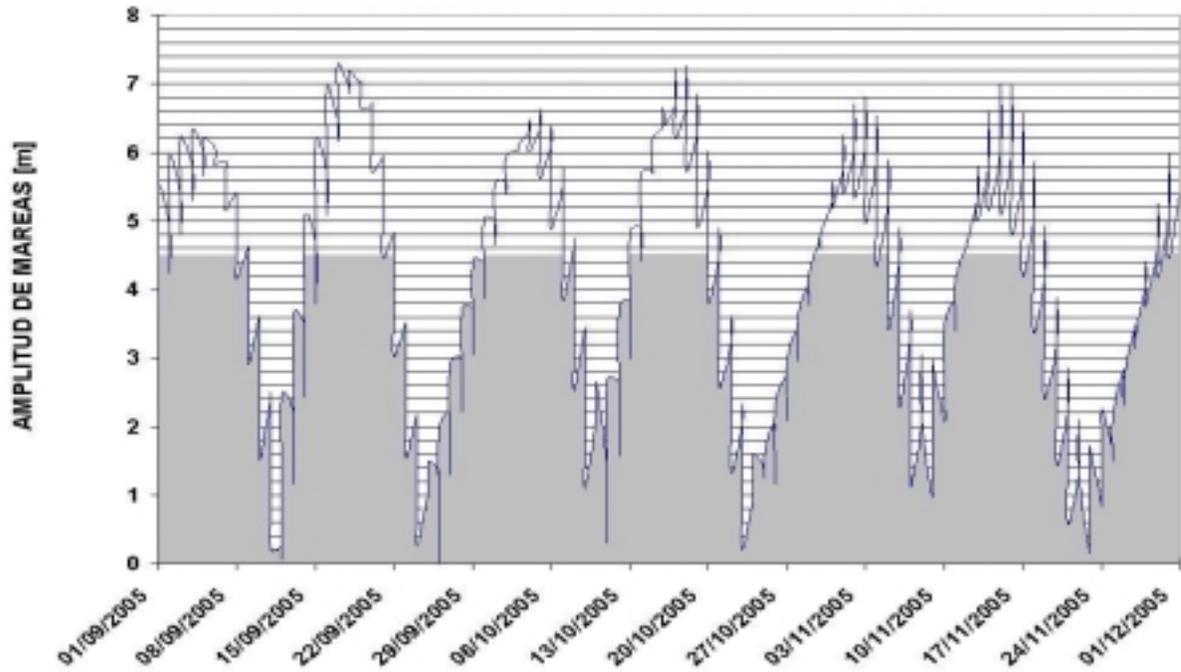


Figura 5.14: Amplitud de mareas en el Golfo de Santa Clara, Sonora.

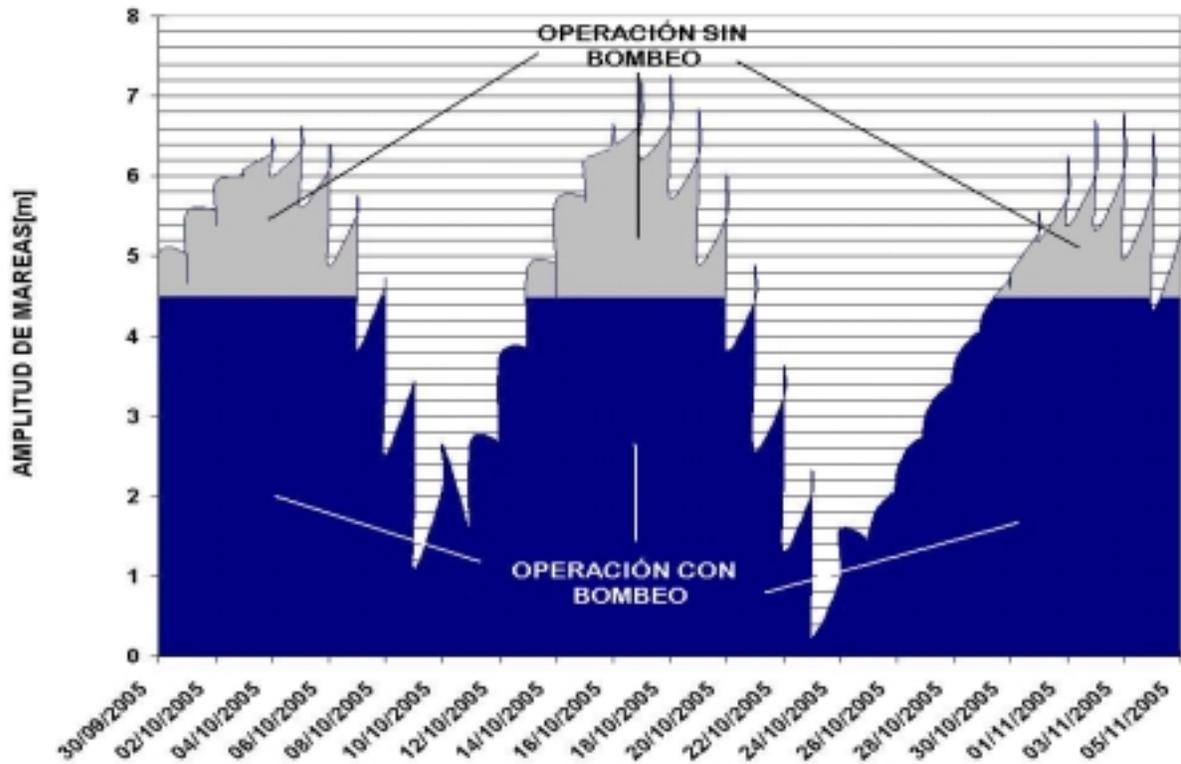


Figura 5.15: Operación de la planta considerando el comportamiento de las mareas en el Golfo de Santa Clara, Sonora.

5.2. TIPO DE TURBINA.

Para poder hacer la selección de la turbina se deben de considerar, entre otras cosas, las dimensiones del dique (altura y longitud), la superficie del embalse, el mínimo nivel del agua y, sobretodo, el rango de la marea. Este último factor es el más importante porque justifica la instalación de la central y nos da las dimensiones y capacidades posibles de la turbina.

En lo referente a las dimensiones del dique, por las condiciones físicas del lugar (donde influyen el suelo, la zona de inundación y las islas Montague, Gore y Pelicano) se estima que la longitud del dique sería de 50 km y, de acuerdo a los rangos de marea considerados, tendría 7.5 m de altura sobre el nivel cero del mar.

De acuerdo al historial del lugar, en el Delta del Río Colorado, se formaba un lago conjunto a la Laguna Salada de unos 2,050 km² [58] y, considerando niveles de marea de 4.2 m, obtendríamos un embalse de 8,600,000,000 m³ de capacidad. Valores que podrían ser recuperados con la construcción de la central mareomotriz.

El mínimo nivel del agua se logra con un dique o presa primaria que se encarga de mantener un nivel mínimo del agua en el embalse. Nivel que por falta de datos inexistentes o poco concretos es difícil de estimar.

En cuanto a la amplitud de marea, se espera un mínimo de 4.5 m. Dato que nos permite pensar en turbinas con un diámetro de rodete de 3.55 m, de acuerdo a experiencias en otros proyectos con saltos similares.

En forma general, por cada grupo de 4 unidades turbogeneradoras reversibles de 10 MW cada una se generarían 144×10^6 kWh al año, trabajando un 42% del tiempo (sin bombeo) [53, 94]. Por la gran capacidad del embalse-marisma, existiría mayor versatilidad de operación en la central mareomotriz, al evitar estar sujeta al régimen horario de las mareas - implicaría almacenar energía y tener mejor flexibilidad de funcionamiento-. De acuerdo con estas condiciones, podría instalarse una potencia de 800 MW, con 20 grupos, para producir $3,520 \times 10^6$ kWh al año.

5.3. VENTAJAS.

La energía mareomotriz tiene muchas ventajas. Las más obvias son las relacionadas con el hecho de ser una energía renovable. Pero ahora, expondremos como se verían reflejadas dichas ventajas en el Delta del Río Colorado.

5.3.1. ENERGÉTICAS.

Desde el punto de vista energético, la característica que resalta es la abundancia de la energía primaria, pues resulta ser una energía inagotable y totalmente renovable. Por si fuera poco, está disponible en cualquier clima y época del año, pues las mareas no se dan por temporadas; en la zona de estudio no habría problemas de hielos y se conoce el

comportamiento cíclico de las mareas. Se puede decir que es una fuente de electricidad confiable, pues no existe tal cosa como “años húmedos” o “años secos”, como es el caso de las centrales hidroeléctricas convencionales, por lo que tiene una disponibilidad del 95% [24].

Si también consideramos la operatividad, encontramos que se podría hacer sustentable la zona; y, además podría realizarse la tan esperada interconexión de la península de Baja California con el resto del Sistema Interconectado Nacional. Facilitaría la conexión de la zona norte de la península de California con el sistema interconectado nacional, a través de la central termoeléctrica Puerto Libertad, Sonora (350 km en línea de transmisión). De interconectarse con la red eléctrica del sur de California y Arizona, podría complementar parte del consumo de esos estados y obtenerse ingresos adicionales para desarrollar nuevas obras de infraestructura que apoyen y amplíen las oportunidades de progreso; o bien para recibir en otras ciudades fronterizas, una cantidad equivalente, aprovechando los convenios de intercambio de energía.

5.3.2. ECONÓMICAS.

Desde el punto de vista económico, una ventaja muy importante y atractiva es el hecho de que debido a los costos de operación y de mantenimiento prácticamente nulos, contamos con una fuente de energía eléctrica que nos arroja costos de generación verdaderamente mínimos; ésto claro, una vez que se ha amortizado la inversión inicial en su larga vida útil. Pues una vez construida la central, la energía primaria es gratis e inagotable. Ventaja clara sobre las centrales que necesitan de combustibles como el petróleo, gas o carbón. Combustibles que pueden variar en sus precios de manera desmedida debido al acontecer económico y político mundial.

Al restablecerse la intercomunicación de la Laguna Salada con el embalse del proyecto, surgiría nuevamente el lago conjunto, con la gran ventaja que será permanente. Así, lo que hoy día es una zona desértica e inhóspita y en constante deterioro se transformaría en un destino preferencial de inversión y desarrollo en el noroeste, donde al contar con agua y energía suficientes podrían instalarse en sus riberas parques industriales y comerciales, centros de población, turísticos y piscícolas, que ofrecerían atractivas fuentes de trabajo a los habitantes locales y evitar así, emigren en busca de mejores condiciones de vida.

Además, se convertiría en una nueva vía terrestre para autopista y/o ferrocarril, que uniría las dos carreteras limítrofes del embalse: Mexicali-San Felipe y Mexicali-Golfo de Santa Clara, y acortaría el trayecto hacia Ensenada en más de 300 km, al sur de la península y al famoso observatorio astronómico San Pedro Mártir.

Por la gran capacidad del embalse-marisma, existiría mayor versatilidad de operación en la central mareomotriz, al evitar estar sujeta al régimen horario de las mareas, lo que implicaría almacenar energía y tener mejor flexibilidad de funcionamiento.

Además, desde los años 70's, se han hecho investigaciones para ver la factibilidad de adecuar hidrovías en esa zona, ideas que podrían resurgir y crear medios para impulsar y promover la acuicultura, la piscicultura, el turismo y la navegación fluvial-marítima.

Convirtiendo la zona en un versátil y estratégico puerto interior que ampliaría el intercambio comercial, turístico y la navegación en la frontera, ofrecería a los inversionistas abundante agua y electricidad para la instalación de centros industriales, comerciales e inmobiliarios y crearía múltiples empleos.

5.3.3. ECOLÓGICAS.

La más noble de las ventajas que presenta la energía mareomotriz se encuentra en el ámbito ecológico. Ésto se debe a que esta energía renovable es limpia y no arroja los contaminantes que si arrojan las plantas que utilizan combustibles fósiles como los llamados gases de Efecto Invernadero (CO₂, CH₄, SO_x, etc.); en consecuencia, no produce calentamiento global ni lluvia ácida, además de ahorrar hidrocarburos. Tampoco genera otro tipo de contaminación que en ocasiones no se considera: ruido.

De manera particular, al evitar la erosión del delta y la salinización de las tierras de cultivo podría rescatarse el potencial agrícola de la zona.

También contribuiría a controlar los sedimentos-azolves, la erosión marina y variaría la salinización al distrito de riego de la zona. Destaca el hecho, que el valioso lago natural del proyecto contribuiría a recargar los sobreexplotados acuíferos de Cerro Prieto, y la evaporación ayudaría a hacer menos tórrido el clima regional.

De esta forma, México en la parte respectiva de su cuenca, eliminaría los efectos erosivos de las mareas y la creación de bancos de arena en la marisma restablecería el equilibrio natural de la Laguna Salada, propiciaría el renacimiento de un inmenso lago en medio de una zona árida que mejoraría el clima y recargaría el acuífero regional.

En consecuencia, el uso integral de los escurrimientos del río Colorado en las presas Boulder-Hoover, Davis, Parker, Imperial y La Laguna con sus respectivas centrales hidroeléctricas, derivaciones y distritos de riego de los valles Imperial, Gila y Yuma, no seguirían dañando y alterando el ecosistema regional en detrimento de las actividades y trabajos productivos en la parte mexicana, debido a que las obras e instalaciones anularían las afectaciones existentes y futuras, donde su dique carretero tendría una función relevante para recuperar el equilibrio natural; y, su central, generaría energía con la fuerza de las mareas.

5.3.4. SOCIALES.

Las ventajas sociales son consecuencia directa de las ventajas energéticas, económicas y ecológicas. Así, el contar con energía confiable, silenciosa y no contaminante crean un sentimiento de seguridad e incluso de orgullo de la región al haber fomentado el desarrollo de la región de una manera amable con su entorno.

La creación de vías de comunicación trae como consecuencia industria, turismo y desarrollo para la región, pero sobretodo trae empleos para los lugareños, desde el momento en que se comienza la construcción, con empleos temporales, hasta tiempo más

tarde con empleos en las nuevas industrias. Además si se crean proyectos simultáneos, como los canales internos, se crean aún más fuentes de empleo.

5.4. DESVENTAJAS.

Las desventajas también están presentes, como en todo proyecto, y aún más con particularidades como las que tiene este tipo de energía. Pero lo importante es informar tanto de ventajas como de desventajas para así sopesar ambas y tomar una decisión informada.

5.4.1. ENERGÉTICAS.

Las desventajas energéticas no tienen nada que ver con la abundancia del energético, sino en su localización puntual en el mundo. Como se explicó, el que se necesiten amplitudes de marea tan grandes limita los lugares viables para su construcción, en ocasiones lugares muy lejanos y aislados. Por lo que, como en este caso, se necesitan muchos kilómetros de líneas de transmisión, lo que se traduce en pérdidas, a menos que se considere realizar la transmisión en corriente continua (poco explorada en el país).

Es decir, si no se consideran la interconexión y la venta de energía a Estados Unidos, el traslado de la energía resultaría muy costoso y poco eficiente.

Además, este tipo de plantas se caracteriza por ser dependientes de otras plantas para regular su frecuencia eléctrica, por lo que es necesario realizar la interconexión y asumir los problemas que esto conlleva.

Por otro lado, si bien es cierto que se puede considerar confiable por su fácil predicción de mareas y tiempos de operación, también se puede predecir que sin bombeo sólo producirá 10 horas al día. Por lo que no se puede activar y desactivar la generación a capricho nuestro. De hecho si, durante la operación normal, el sistema de energía mareomotriz comienza a generar grandes cantidades de energía, los sistemas convencionales deben de detenerse, o por lo menos disminuir su generación.

5.4.2. ECONÓMICAS.

La energía mareomotriz se parece mucho a la hidroeléctrica convencional desde el punto de vista económico: los prolongados tiempos de construcción (entre 10 y 15 años en el mejor de los casos) y la magnitud de las obras provocan una enorme inversión inicial, usualmente el dique consume la mitad de la inversión. Ese sería el caso de esta planta; además de los gastos de las líneas de transmisión para poder incorporarla al Sistema Interconectado Nacional.

5.4.3. ECOLÓGICAS.

Los efectos ecológicos negativos que se han presentado a nivel mundial, o que simplemente argumentan algunos grupos ecologistas son varios:

- Efectos ambientales:
 - Cambian los niveles del agua
 - Modifican las corrientes
 - Transportan y acumula sedimentos
 - Mata peces
 - Destruye hábitats de aves, peces y fauna y vegetación costera
 - Puede cambiar el tipo de especies de la zona
- Impacto visual y estructural sobre el paisaje costero

Todos posibles en este proyecto, pero a ciencia cierta, no son predecibles ni prevenibles sin antes realizar los estudios pertinentes.

De la experiencia en otras plantas, tenemos que el dique de las distintas centrales, normalmente, retrasa la marea alrededor de tres horas, lo que trae consigo 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 situaciones mencionadas. Eso se puede dar por hecho, pero saber cuales efectos negativos se presentarán o a qué grado aún no es posible para este caso.

Podemos mencionar casos específicos para alertar y provocar que se hagan estudios sobre esos asuntos antes de que se presenten las consecuencias desagradables y nos tomen desprevenidos. Por ejemplo, sabemos que en ocasiones impiden la migración de los peces y algunos mueren al tratar de cruzar a través de las turbinas; la vida que se presenta en la zona intermareal se ve afectada, la acumulación de sedimentos es muy distinta al construir el dique, etc.

5.4.4. SOCIALES.

Las desventajas sociales, puede que no sean muchas, pero siempre han sido lo suficientemente fuertes para retrasar o detener los proyectos. Esto no es solamente en lo referente a la energía mareomotriz.

Por lo general, los problemas sociales causados son debidos a los cambios que sufrirá el entorno. Así, antes de iniciar la construcción se deben hacer estudios preliminares, caminos, viviendas y clínicas provisionales. Obras que causan incomodidad a la gente debido el cambio drástico que se genera. Hay un impacto visual y estructural sobre el paisaje costero.

También, existen manifestaciones de inconformidad que pueden realizar algunos grupos ecologistas o grupos sociales que, por razones válidas o no, desinformación u otros intereses, detienen o impiden el buen desarrollo de las obras.

Además, los largos tiempos de construcción se traducen en largos tiempos de ruido, convivencia con gente extraña y, si la zona lo propicia, un largo tiempo de desabasto de agua potable, víveres, etc.

6. CONCLUSIONES.

En la investigación realizada en este trabajo encontramos que el desarrollo tecnológico ha llevado al hombre a analizar y experimentar con distintas fuentes de energía para mejorar su calidad de vida. El acelerado avance de la tecnología asociada al aprovechamiento de las energías renovables, su consiguiente abaratamiento y la necesidad de cuidar el ambiente han ubicado a las fuentes renovables de energía como alternativas energéticas al ser consideradas en los planes energético-ambientales, presentes y futuros, de varios países desarrollados en el mundo. Esto es debido a que las reservas de combustibles fósiles eran grandes, pero la creciente población y el crecimiento de la industria demandan cada vez más cantidad de energía. En el futuro cercano seguramente seguiremos dependiendo de los combustibles fósiles o nucleares por un largo tiempo, pero es necesario ir desarrollando tecnologías alternativas, no sólo porque a la larga reemplazarán a los recursos no renovables, sino por la necesidad de no seguir dañando el medio ambiente.

México es una nación que cuenta con un territorio privilegiado y tiende a ser de los países en el mundo que cuenta con algunas de las fuentes de energía renovables que se conocen hasta ahora. Por lo tanto, si el país cuenta con un potencial muy importante en cuestión de recursos energéticos renovables, cuyo desarrollo le permitirá contar con una mayor diversificación de fuentes de energía, ampliar la base industrial en un área que es de valor estratégico para el futuro, y al mismo tiempo atenuar los impactos ambientales ocasionados por la producción, distribución y uso final de las formas de energía convencionales, debería darse un replanteamiento de la importancia que pueden tener el uso de las fuentes de energía renovables.

Por ello se propone que en México se debe dar un mayor impulso a la diversificación energética basada en el uso de las fuentes renovables de energía, aprovechando al máximo los recursos, para lo cual se requiere una evaluación más precisa de los recursos, contar con personal capacitado en esta área, investigación y desarrollo tecnológico para su uso en forma segura, confiable y con impactos ecológicos reducidos integrándolos directamente en los sectores público e industrial, integrando los esfuerzos del gobierno, instituciones educativas y, de ser necesario y posible, a la industria privada para el financiamiento de proyectos. Además de realizar acciones de divulgación y promoción de los beneficios que implicaría el empezar a cambiar la estrategia energética.

Es por lo anterior que México debe considerar seriamente el hacer uso de todos los recursos naturales con los que cuenta: enormes áreas donde se puede recolectar la energía solar, zonas específicas con gran potencial eólico y el potencial de las mareas.

Éste último, la energía mareomotriz, es una forma de generar electricidad de manera eficiente. Pero lo más destacable es que son muy pocos los lugares en el mundo que cuentan con las características para aprovecharla. México es uno de esos pocos países y, por si fuera poco, tiene muy buenas condiciones, por lo que no se puede pasar por alto esta oportunidad casi única, ya que traería importantes consecuencias.

Por ejemplo, el asunto de la interdependencia energética entre México, Estados Unidos y Canadá es un tema de primer orden ya que los mercados energéticos de las tres naciones ya

están, de hecho, entrelazados. Este mercado energético interdependiente de América del Norte continuará evolucionando por lo que México debe implementar mejores políticas de eficiencia energética, impulsar la investigación y desarrollo de nuevas fuentes de energía limpias y eficientes para asegurar su competencia global.

Por si fuera poco, el sector energético es un sector estratégico y considerado un asunto de seguridad nacional, por lo que México no debería fundar su estrategia energética en los combustibles fósiles pues estos al ser recursos no renovables tarde o temprano se agotarán, debilitando así su fortaleza nacional. El país puede tener una gran cantidad de energía con el empleo de las fuentes renovables de energía –incluida la mareomotriz-, y responder así a la creciente demanda energética debido a dos principales razones: el continuo incremento poblacional, y la creciente demanda de la energía que obedece a mejoras paulatinas en la calidad de vida. Asegurar el abasto energético a partir de fuentes virtualmente inagotables de energía permitirá a nuestro país, en el futuro, ser independiente energéticamente de otros países. Esto es un punto muy importante a considerar debido a que, algún día, los combustibles fósiles se agotarán. Las fuentes renovables de energía, como la que exponemos en este trabajo, son inagotables. Eso podría resolver los problemas de abastecimiento de energía hoy, además de que asegurarían el abasto de energía de nuestra nación mañana sin poner en riesgo los intereses de futuras generaciones.

Además de lo anterior, al evitar el uso de los combustibles fósiles, se evitarían los daños ambientales causados por éstos y sus productos de combustión. Las tecnologías de extracción, transporte, procesamiento y particularmente su uso final, tienen impactos negativos en el medio ambiente, los cuales causan directa o indirectamente efectos en la economía y, lo que es peor, en la salud de la población.

Así, el significado del uso de energías renovables tiene además fuertes implicaciones económicas y políticas favorables. Una de las razones por las cuales muchos países se han comprometido a impulsar proyectos relacionados con su uso es como respuesta a su escasez de recursos petroleros. Por lo que podría pensarse que el uso de estas fuentes de energía liberarían a nuestro país en el futuro de ataduras permitiéndole, en consecuencia, un desarrollo más libre.

En nuestros tiempos, la idea de bienestar está basada en el crecimiento de las actividades económicas, dentro de un esquema de libre competencia, como un medio para lograr el bienestar general. Sin embargo todo crecimiento tiene un límite y tanto nuestro país como para el resto del mundo ese límite es el planeta mismo. El desarrollo del país, el crecimiento poblacional y la globalización de la economía, nos indican que estamos por alcanzar ese límite, por lo que junto con la obtención de fuentes de energía limpias, abundantes, baratas y accesibles, México puede asegurar su desarrollo económico a largo plazo. El país no sólo requiere de mayor y más eficiente generación de energía proveniente de las mismas fuentes hasta ahora aprovechables, sino que es indispensable su diversificación para no poner en riesgo la sustentabilidad energética del país, los intereses de las futuras generaciones y así extender la vida de las reservas de petróleo. Además de utilizar en menor proporción y como margen de reserva las centrales convencionales con altos costos de generación.

La propia Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha considerado conveniente analizar escenarios diversificados de expansión de la generación. Las ventajas más importantes de una estrategia de diversificación son: una mayor protección contra la volatilidad de los precios de los energéticos primarios, eliminación del riesgo ante un proveedor único del combustible de importación y disminución de la contaminación atmosférica, en su caso mediante el uso de fuentes renovables.

En esta investigación nos dimos cuenta de que el desarrollo de energías renovables es posible, se puede notar que en las naciones que cuentan con el particular recurso de grandes amplitudes de mareas ya han hecho por lo menos la consideración de explotarlo. En el caso de las naciones desarrolladas ya están haciéndolo con los resultados que se mostraron en el capítulo 3: generación de electricidad sin efectos de gases contaminantes.

Lo que se puede notar es que, desde el punto de vista realista, todo tipo de energía tiene ventajas y desventajas propias. No por el hecho de ser una energía renovable será una energía sin problemas. Como se hizo notar en los capítulos 3 y 4, esta forma de generación de electricidad ha presentado una serie de problemas de toda índole que en algunos casos se han resuelto satisfactoriamente y en otros no tanto. Es claro, para nosotros, que tal vez el principal problema es el económico, pero no el relacionado al costo final de la energía, sino el de la inversión inicial. Problema que en países en desarrollo, como el nuestro, no es fácil de subsanar.

Este trabajo no tiene la finalidad de calificar a la energía mareomotriz como la energía más limpia, barata, eficiente o, mucho menos, perfecta. Lo primero que consideramos, es que hay que fomentar el uso de la energía mareomotriz, como así también contar con el uso de todas las energías limpias o alternativas, como la solar y la eólica, entre otras. La intención es mostrar que es una opción que tenemos en el país. Opción que nos hace privilegiados y que nos obliga, si no a explotarla sin miramientos, si a considerarla como una opción. Hay que estudiarla, realizar investigación y luego, si es conveniente, explotarla y sacarle el mayor provecho posible.

Nos hubiese gustado profundizar más en cada uno de los temas para poder hacer una evaluación más precisa de la propuesta planteada en el capítulo 5. Consideramos que con los elementos que logramos obtener, es una propuesta suficientemente buena para considerarse. Lamentablemente, hay muchos estudios que no se han realizado y que necesitamos saber para hacer una propuesta más realista.

Esperamos que esta tesis sirva para despertar el interés de investigadores o instituciones con recursos económicos, técnicos, físicos e intelectuales suficientes para realizar los estudios necesarios. Es necesario, a futuro, contar con un equipo interdisciplinario y multidisciplinario para enfrentar este tipo de proyectos.

Harán falta mediciones puntuales y precisas de las mareas en el lugar de estudio, por lo que se necesitará la ayuda de oceanógrafos para la evaluación de los recursos mareomotrices con los que dispone el Delta. Se necesitan estudios topográficos de la zona exacta, por lo que harán falta trabajos y opiniones de ingenieros civiles, topógrafos, especialistas de construcciones portuarias o marítimas. Como se puede apreciar en el capítulo 5, la riqueza

ecológica del lugar es muy clara, pero los impactos ecológicos no se pueden saber solamente basándonos en experiencias ajenas. En esta zona hay especies que merecen un especial interés y cuidado. Se necesitan especialistas de las áreas de medio ambiente, biología, etc. Sabemos que la zona se afectará, tal vez el dique ayude a reestablecer de alguna manera la humedad presentada hace medio siglo en el Delta del Río Colorado, pero no de manera exacta.

También consideramos que este tipo de tecnología, al igual que las de las demás energías renovables, merecen ser difundidas. El gobierno mexicano, al igual que lo han hecho los de otras naciones, debe tomar la responsabilidad de crear políticas de diversificación energética; debe promover la investigación de estas tecnologías y los resultados de esta investigación. Es importante cambiar la cultura energética y social al dar a conocer claramente las ventajas y desventajas de todas las opciones energéticas de que disponemos.

CONCLUSIÓN GENERAL.

El presente trabajo cubrió los objetivos planteados al inicio de la tesis. Se dieron a conocer la evolución y situación actual de la generación de energía eléctrica con el empleo de la energía mareomotriz de los países a nivel mundial que cuentan con esta energía. Otro objetivo fue el de realizar una evaluación del potencial de mareas tanto a nivel mundial como nacional. Así, difundimos el conocimiento de proyectos y tecnología que actualmente están en operación en el ámbito internacional con el fin de aprovechar este tipo de energía para generación de electricidad. Aquí podemos apreciar como los países preponderantemente desarrollados que cuentan con el recurso natural ya comenzaron a replantear sus estrategias y han desarrollado e impulsado el empleo de esta fuente.

También, se explicaron las características que se necesitan para poder aprovechar este tipo de energía y los lugares en México que pueden considerarse. Se han hecho notar las ventajas y desventajas energéticas y con ellas las económicas, políticas, sociales y ambientales que se tendrían como consecuencia de implementar una central mareomotriz en México, demostrando que ayudaría a impulsar la diversificación energética en la generación de electricidad. Además de proponer una posible solución a la falta de interconexión con la península de Baja California.

GLOSARIO

Alga: planta acuática que realiza su respiración utilizando oxígeno.

Altura de marea: es la distancia vertical entre la superficie del mar y el Datum de carta. La profundidad total del agua se encuentra sumando la altura de la marea a la profundidad de la carta.

Altura mínima registrada: es un sinónimo de la bajamar mínima registrada, sin embargo no deben confundirse ya que esta última se presenta solo por efecto de algún tsunami, fenómeno que igualmente puede generar una Altura máxima registrada.

Amplitud: es igual a la mitad de la distancia entre la cresta y el valle de una onda, o sea el mayor desplazamiento de un punto de la onda medido desde el centro. Se aplica tanto para olas como para mareas y por analogía, a las corrientes que estos fenómenos producen.

Análisis armónico: proceso numérico para analizar series de tiempo separando sus diferentes componentes armónicos. El análisis armónico es utilizado en el estudio de la marea o de las corrientes de marea para separarlas en sus constituyentes armónicos básicos

Autótrofo: organismo que transforma la sustancia inorgánica en alimentación orgánica.

Bahía: pequeña ensenada formada en una porción de agua de mayor tamaño. Las bahías pueden encontrarse en océanos, lagos y golfos, pero normalmente no se asocian a ríos excepto cuando la desembocadura de éste ha crecido por inundación.

Bajamar (reflujo): descenso de la marea. Nivel mínimo de una marea descendente; salida de una marea entrante en cuerpos de agua costeros.

Bajamar inferior: la bajamar inferior que alcanza un mayor descenso de las dos que se pueden presentar durante el día cuando existan mareas mixtas.

Bajamar superior: la bajamar más alta de las dos que se pueden presentar durante el día de marea cuando existan mareas mixtas.

Batimetría: se refiere a mediciones de la profundidad, a la configuración del suelo marino o a un mapa en donde esté delineado el perfil del fondo de un cuerpo de agua, por medio de contornos de igual profundidad (isóbatas).

Bentónico: que vive sobre el bentos (fondo marino) o que se refiere a esa zona. Describe tanto el medio ambiente como los organismos que viven en o sobre el fondo.

Bentos: es la zona marina formada básicamente por el lecho marino y la zona inmediata sobre él o sea la parte más profunda de una columna de agua.

Biosfera: conjunto de organismos tanto vegetales como animales que viven en el planeta.

Biota: relativo o perteneciente a los seres vivos.

Borde continental: franja del margen continental que se encuentra entre el talud continental y la plataforma continental.

Cadena trófica: cadena de seres vivos en que cada eslabón se alimenta y obtiene energía del eslabón precedente y a su vez sirve de alimento y proporciona energía al siguiente.

Carta batimétrica: mapa en el cual se dibuja el fondo marino de algún cuerpo de agua, generalmente por medio de contornos de igual profundidad o isóbatas.

Cavitación: la formación de vacío a lo largo de las secciones de las palas del propulsor o turbina, que conlleva un desplazamiento excesivo, pérdida de eficiencia y deterioro del material. También provoca un ruido excesivo bajo el agua.

Clorofila: pigmento verde que presentan la mayoría de los vegetales y que les permite realizar la fotosíntesis.

- Clorofila "a":** pigmento primario de todos los organismos foto sintetizadores ($C_{55}H_{72}MgN_4O_5$) que desprenden oxígeno. Porfirinas con un magnesio central y una ramificación fitil lipofílica. Sus máximas absorancias son 430 y 663 nanómetros.
- Comunidad biótica:** conjunto de especies que interactúan en un medio ambiente estable o ecosistema.
- Coriolis (Fuerza de Coriolis):** fuerza aparente que actúa sobre las partículas en movimiento y que resulta de la rotación terrestre. Hace que las partículas sean desviadas hacia la derecha de la dirección de movimiento en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur, la fuerza es proporcional a la velocidad y a la latitud en la que se mueve la partícula.
- Corriente (corriente marina):** movimiento del agua del océano, horizontal o vertical el cual se caracteriza por una cierta regularidad, que puede ser o tener una componente cíclica o más comúnmente formar un flujo continuo a lo largo de una trayectoria definida, por ejemplo, la corriente del Golfo o la corriente de California.
- Corriente de flujo:** el movimiento de la corriente de marea que fluye hacia la costa o que entra en un estuario, laguna costera o desembocadura de un río.
- Corriente de refluo:** el movimiento de la corriente de marea que fluye, alejándose de la costa o se desplaza río abajo en una desembocadura o que sale de una laguna costera o estuario.
- Corrientes de marea:** movimientos horizontales alternantes del agua asociados con la elevación y descenso del nivel del mar, causados por la marea astronómica. En mar abierto, la dirección de las corrientes de marea cambia continuamente los 360 grados en forma diurna o semidiurna. En cambio en regiones costeras la alternancia de las corrientes de marea está dominada por la topografía, pudiendo presentarse en una sola dirección, solo cambiando el sentido.
- Cuenca oceánica:** lugar plano del océano rodeado por elevaciones.
- Datum (Datum de la carta o DC):** es el dato al cual están referidas las profundidades en una carta, todas las predicciones de marea y la mayoría de los niveles de superficie del mar. El datum de la carta debe ser: un plano lo suficientemente bajo para que la marea esté raramente por debajo de él, no tan bajo que provoque que las profundidades de la carta sean irrealmente bajas, y deberán variar solo gradualmente de un área a otra de una carta a la siguiente, para evitar significativas faltas de continuidad.
- Desarrollo sustentable:** engloba la capacidad de satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de satisfacer las propias necesidades de las generaciones futuras. Así, dos de los principios fundamentales del desarrollo sustentable son el no agotamiento de los recursos y el no deterioro del medio ambiente y la salud de los seres vivos.
- Determinista:** relativo al determinismo, el cual afirma que cualquier fenómeno responde a una causa, y así, una vez dada la causa, el fenómeno ha de seguirse sin posible variación.
- Detrito:** todo tipo de material biogénico en diferentes grados de descomposición microbiana, que representa una fuente de energía potencial para los consumidores, en donde se incluyen organismos muertos, productos de descomposición y productos extracelulares de organismos vivos, incluso materia orgánica disuelta.
- Diatomeas:** vegetal microscópico (de 20-200 micras) con sus células cubiertas por una pared dividida en dos tapas o valvas formadas por sílice; integran el fitoplancton. Las

diatomeas son uno de los grupos de organismos más abundantes en el mar y fuente de alimento primario para los animales.

Dique: barrera que se utiliza para controlar o contener agua.

Ecosistema: conjunto de organismos de diferentes especies que interactúan entre sí y con el medio en el que viven.

Efecto invernadero: en el balance de calor entre la Tierra y el espacio, se refiere a la retención o bloqueo de los rayos electromagnéticos de onda larga que emite la Tierra y la atmósfera baja. Esta situación es provocada por la presencia excesiva de bióxido de carbono acumulado en la atmósfera, como producto de la quema de combustibles fósiles por la vida moderna. Este hecho ocasiona un desbalance entre el calor que entra a la Tierra en forma de rayos electromagnéticos de onda corta y el calor que sale en forma de onda larga. El resultado, a largo plazo, según muchos científicos es el calentamiento global de la superficie del planeta, incluyendo obviamente la atmósfera baja.

El Niño (EN): incremento de la corriente cálida ecuatorial proveniente del Pacífico Occidental (Contracorriente Ecuatorial) que fluye hacia el sur a lo largo de la costa de Ecuador y Perú, desplazando hacia fuera las aguas normalmente frías. Generalmente se desarrolla a partir de julio y se hace evidente al final de diciembre, coincidiendo con un cambio hacia el sur del cinturón de lluvias tropicales (amainamiento de Vientos Alisios).

Embalse: depósito artificial de agua que se forma mediante un dique o una presa en el curso de un río o arroyo, con el fin de almacenar sus aguas para distintos usos. El agua de los embalses se utiliza en el abastecimiento de las poblaciones, para regar los terrenos y para la producción de energía eléctrica

Epipelágico: es la región dentro de la división pelágica que ocupa la parte superior, desde la superficie hasta la profundidad de 200 metros.

Estación mareográfica: lugar donde se obtienen mediciones mareográficas. La estación puede ser primaria, si su finalidad es realizar las observaciones por el tiempo suficiente para determinar las características de la marea de la localidad. La estación es secundaria si realiza observaciones por un periodo corto de tiempo, obteniendo datos para una finalidad específica.

Estero: área pantanosa situada cerca de la desembocadura de los ríos, en donde el agua corre libremente en multitud de pequeños cursos, resultando de ello una amplia zona impracticable, sobre todo si el río experimenta crecidas importantes. Este término presenta inconvenientes para su uso científico, ya que no existe una opinión unánime sobre qué constituye un estero, en oposición a un estuario, una ría o, sobre todo, un delta. Se viene aceptando que en los esteros se produce una inclinación o cuesta muy suave del lecho del río a bastantes kilómetros de la desembocadura, para sufrir una abrupta caída de la plataforma litoral, que hace que los sedimentos del río no se puedan depositar y que las mareas ejerzan potente influencia aguas arriba del curso fluvial. Si se acepta esta descripción, deltas de gran tamaño.

Estuario: cuerpo de agua costero o parte final de un río, abierto al mar y en el que se presentan variaciones de salinidad como resultado de la mezcla de agua marina con la proveniente de la cuenca fluvial. Son áreas de transición o ecotonos variables. Pueden clasificarse por su geomorfología, fisiografía, sedimentación, energía, entre otras.

Eutrófico: perteneciente o característico de los cuerpos de agua que contienen abundante materia nutritiva disuelta.

- Eutrofización:** enriquecimiento de lagos, embalses, ríos y mares litorales por nutrientes vegetales, antes escasos, con el consiguiente aumento de la masa de vida vegetal acuática que este enriquecimiento permite mantener.
- Fiordo:** entrante de mar o bahía estrecha, que se introduce tierra adentro entre paredes rocosas abruptas. Generalmente tienen brazos laterales que salen del cauce principal. Las paredes de un fiordo continúan por debajo de la superficie del agua. Normalmente son menos profundos cerca de la desembocadura, y más en el interior.
- Fitoplancton (productores primarios, fotosíntesis):** porción vegetal del plancton. Formas vegetales microscópicas del plancton de la división pelágica. Foto sintetizadores básicos de la materia orgánica. Los fitopláctones más abundantes son las diatomeas.
- Flujo de pleamar (flood):** es el movimiento horizontal del agua asociado con la pleamar, en dirección de la costa.
- Flujo menguante (ebb):** es el movimiento horizontal del agua asociado con una bajamar, en dirección opuesta a la costa.
- Flujo:** en fluidos se refiere a la cantidad de material (agua, sales, nutrientes) que pasan por un área en la unidad de tiempo. Como término usado en mareas se refiere a la corriente o al lapso de tiempo cuando se presentan la corriente provocada por la elevación de la marea.
- Fotosíntesis:** elaboración de sustancias orgánicas (alimento) a partir de bióxido de carbono y del agua, en presencia de clorofila y utilizando la energía solar; durante el proceso se libera oxígeno.
- Fuerza centrífuga:** la fuerza que hace que todo cuerpo que gira alrededor de un centro tenga la tendencia a escaparse por la tangente.
- Fuerza centrípeta:** fuerza que hace que los cuerpos sean atraídos hacia el centro.
- Giro o flujo lento:** es el intervalo cuando la velocidad de la corriente es muy pequeña o de valor cero; usualmente se refiere al período de regresión entre el flujo menguante y el flujo de pleamar.
- Hábitat:** lugar con un tipo particular de ambiente en donde se encuentran conjuntos de organismos; por ejemplo, el litoral marino.
- Hidrografía:** disciplina que se ocupa de las mediciones y la descripción de las características físicas de los océanos, mares, lagos, ríos y las zonas costeras adyacentes a ellos.
- Homotecia:** Transformación de una figura en la que los ángulos permanecen iguales y las longitudes proporcionales, mientras que los puntos que se corresponden están alineados dos a dos con respecto a otro punto fijo.
- Homotético:** que presenta homotecia
- Infralitoral o sublitoral:** se refiere al medio ambiente bentónico que se encuentra entre el nivel de mareas bajas y el borde del talud continental.
- Insolación:** Radiación solar recibida por la superficie de la Tierra. Cantidad de energía radiante que se recibe por unidad de área horizontal en cualquier punto de la Tierra.
- Intermareal:** zona en donde cambian las mareas.
- Isobaras:** la línea o superficie que une todos los puntos de igual presión o de presión constante sobre una gráfica en el espacio o el tiempo.
- Isoterma:** una línea o superficie que conecta en una gráfica todos los puntos de igual valor de la temperatura, ya sea en el tiempo o en el espacio.
- Isotropo:** dicese de los cuerpos o medios cuyas propiedades físicas se manifiestan de igual modo en todas direcciones.

Laguna costera: cuerpo de agua protegido que tiene acceso limitado al mar. Depresión somera por debajo del nivel medio de marea alta conectada con el mar por uno o varios canales. Cubren del 10 al 15% de las costas del mundo. Son comunes en planicies costeras de poca pendiente.

Limnología: es el estudio de los sistemas de agua dulce, como ríos y lagos. La limnología incluye el estudio de la física y la química del agua así como de los organismos y la ecología de estos sistemas.

Línea cotidal: la línea que une a todos los puntos en los cuales ocurre al mismo tiempo la marea alta debida a una componente de marea. Las líneas cotidales están espaciadas en horas, o en horas lunares tomando como referencia el meridiano de Greenwich o un meridiano cercano a la zona de estudio. También se pueden referir en grados de desfase.

Línea de costa: la intersección entre la superficie del agua y la tierra. En zonas donde no existe influencia notable por las fluctuaciones de la marea, la línea de costa está definida por el nivel medio del mar. En zonas con influencia de la marea, la línea de costa está definida por el nivel medio de las mareas altas.

Litoral (zona): en ingeniería costera, se define como la zona entre la línea de costa y la línea justo detrás de la rompiente. En oceanografía biológica es la parte del bentos que va desde la marea alta hasta una profundidad de 200 metros.

Manglar: área de la zona tropical inundada por las grandes mareas en donde se forman esteros, islas bajas y en donde la vegetación predominante son los manglares.

Mar: una subdivisión de un océano. Cuerpo de agua grande cerrado o semicerrado pero de menor extensión que un océano. Región de un océano que se distingue del resto por diferencias en la circulación, o en el régimen de vientos. Ejemplos el mar Caribe, el mar Mediterráneo, el mar de Cortés.

Mar marginal: cuerpo de agua grande, abierto o semicerrado a un océano o mar de mayores dimensiones. Este mar está comunicado ampliamente por la superficie, pero con límites en el fondo, ya que se encuentra en una cuenca diferente.

Mar territorial: mar considerado como una ampliación del continente, en el que los países tienen el derecho sobre la navegación y explotación de los recursos.

Marea: ascenso y descenso periódicos de todas las aguas oceánicas, incluyendo las del mar abierto, los golfos y las bahías, resultado de la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol sobre el agua y la propia Tierra. Esta variación del nivel del mar se propaga como una onda a través de las cuencas oceánicas.

Marea astronómica: marea provocada por la atracción del Sol y la Luna diferenciándola de los movimientos del nivel del mar que tienen otros orígenes, por ejemplo, la marea atmosférica que es producida por el acarreo del esfuerzo del viento o las variaciones de la presión atmosférica.

Marea diurna (D): una oscilación completa de marea diariamente. Es decir, una pleamar y una bajamar en veinticuatro horas.

Marea lunar: parte de la marea producida exclusivamente por la acción de la fuerza gravitacional de la Luna.

Marea mixta: se dice que existe una marea mixta en una región, cuando coexisten alternándose, los periodos diurno y semidiurno con amplitudes del mismo orden de magnitud. Una forma de clasificar las mareas es calcular la "razón de forma" usando las diurnas y las semidiurnas más importantes, $F=(K_1+O_1)/(M_2+S_2)$. Si $0 \leq F \leq 0.25$ la marea

es semidiurna. Si $0.25 < F \leq 1.5$ mixta con predominancia semidiurna. Si $1.5 < F \leq 3.0$ mixta con predominancia diurna. Si $F > 3.0$ la marea es diurna.

Marea mixta, diurna (MD): usualmente, cuando la Luna tiene baja declinación, hay dos oscilaciones completas de marea diariamente. Las desigualdades en altura de pleamares o bajamares sucesivas y sus correspondencias intervalos de tiempo son muy marcadas.

Marea mixta, semi-diurna (MSD): dos oscilaciones completas de marea diariamente, con desigualdades en altura y tiempo alcanzando los más grandes valores cuando la declinación de la Luna ha pasado su máximo.

Marea semi-diurna (SD): dos oscilaciones completas de marea diariamente, teniendo ambas pleamares y ambas bajamares, alturas similares. Las dos pleamares del día siguen a los tránsitos superior e inferior de la Luna, casi al mismo intervalo.

Marea solar: (1) parte de la marea producida exclusivamente por la acción de la fuerza gravitacional del Sol. (2) Marea observada en regiones donde la marea solar es dominante (una bajamar y una pleamar por día).

Mareas Muertas o de cuadratura (aguas muertas): mareas de rango mínimo que se producen cada dos semanas cuando la Luna está en cuarto creciente o en cuarto menguante. En estas fases, la Luna y el Sol se encuentran en ángulo recto entre sí con respecto a la Tierra (la Luna está en cuadratura), y el efecto de sus fuerzas de atracción se contrarrestan.

Mareas vivas o de sizigia (aguas vivas): mareas de rango máximo que se producen cada dos semanas cuando hay Luna llena o Luna nueva. En estas fases, la Luna y el Sol, se encuentran alineados con respecto a la Tierra (la Luna está en sizigia), y el efecto de sus fuerzas de atracción se suman.

Maremoto: onda de gran longitud producida por actividad sísmica del fondo marino, la cual se propaga a gran velocidad; pero un maremoto puede viajar desapercibido por miles de kilómetros ya que su amplitud es de sólo unos centímetros; sin embargo debido a su gran longitud, en cuanto llega a aguas someras, su amplitud aumenta abruptamente generando una ola de gran tamaño. (También tsunami).

Mareógrafo: instrumento que registra la variación de baja frecuencia del nivel del mar con la finalidad de medir el ascenso y descenso provocado por la marea. El registro se puede obtener en forma analógica en una gráfica o en forma digital, ya sea en papel o en memoria magnética.

Mareograma: representación gráfica de la elevación y descenso del nivel del mar provocado por la marea. La gráfica tiene el tiempo (horas o días, etc.) en el eje de las abscisas y la altura en el eje de las ordenadas. La altura es referida a un nivel medio del mar.

Marisma: área de tierras bajas, mal drenadas y sujetas a un proceso de colmatación que se encuentra cerca de la costa, generalmente en torno a la desembocadura de un río. Por su situación, se ve inundada parcialmente por el agua salobre de las mareas, que cuando se extiende por un estuario confluye con el agua dulce de los cursos fluviales. Éstos, así como las mareas, depositan sedimentos, fundamentalmente de limo, arcilla y arena, que se mezclan con la turba.

Masa de agua: volumen de agua usualmente identificado por niveles típicos de temperatura y salinidad que le son característicos y permiten distinguirlo de las aguas circundantes.

Mesopelágico: porción de la provincia oceánica que se extiende entre los 200 y los 1 000 metros de profundidad.

Migración: desplazamiento de los organismos para ocupar nuevas zonas.

Momento cinético o angular (para un punto material que se mueve a lo largo de una curva): es el producto vectorial del vector de posición del punto por la cantidad de movimiento de dicho punto.

Nérica: relativo a los moluscos de bajo vientre.

Nivel de bajamar media (NBM o MLW): promedio de todas las bajamares durante un período de 19 años. Si el tipo de marea es diurno este plano se obtiene tomando el promedio de la bajamar más baja diaria, lo cual equivale a que la bajamar media es lo mismo que la bajamar media inferior.

Nivel de bajamar media inferior (NBMI o LLWMT): promedio de la más baja de las dos bajamares diarias (bajamares inferiores) durante un período de 19 años de predicción.

Nivel de bajamar mínima registrada (NBMR o LLWLT): la mínima bajamar, una por cada 19 años de predicción, es ocasionada por las fuerzas de marea periódica pudiendo verse influida por los efectos de las condiciones meteorológicas.

Nivel de media marea: es el plano equidistante entre la pleamar media y la bajamar media, se obtiene promediando estos dos valores.

Nivel de pleamar media (NPM o MHW): promedio de todas las pleamares durante un período considerado. Si el tipo de marea es diurna, este plano se calcula tomando el promedio de la pleamar más alta diaria, lo cual equivale a que la pleamar media en este caso es la misma que la pleamar media superior.

Nivel de pleamar media superior (NPMS o HHWMT): promedio de la más alta de dos pleamares diarias (pleamares superiores) durante un período considerado a partir de 19 años de predicción.

Nivel medio del agua: es la altura sobre el Datum de la Carta de la media de todas las observaciones horarias usadas para el análisis de marea en el lugar en particular.

Nivel medio del mar (NMM o MWL): promedio de todos los niveles de marea determinados con lecturas horarias medidas con respecto a un plano de referencia y basadas en los registros de un período disponible de 19 años.

Nortes: vientos huracanados del Golfo de México que soplan del Norte, tienen un carácter continental y suelen presentarse cuando hay un mínimo de presión bien marcado al sur o al oeste o al noroeste de los Estados Unidos de Norteamérica. Invasión de una masa de aire polar modificada a su paso por el territorio de Estados Unidos, dentro del Golfo de México. La orografía tiene un efecto sobre la distribución de las formaciones nubosas que acompañan a los nortes, que pone de manifiesto el carácter somero de la mayoría de las invasiones en la Sierra Madre Occidental del territorio mexicano.

Novilunio: posición planetaria en que se encuentran alineados la Luna, la Tierra y el Sol. En esta posición se generan las máximas mareas.

Océano: es el cuerpo de agua salada que ocupa las depresiones de la Tierra y se encuentra completamente intercomunicado. Hay tres océanos: Atlántico, Pacífico e Índico.

Oceanografía: la ciencia que se encarga del estudio de los océanos, su geografía, física, química, geológica y las interacciones biológicas.

Ola: alteración energética que se desplaza a través o sobre la superficie del medio, en este caso el océano, resultando en movimiento oscilatorio con amplitud y velocidad que dependen de las propiedades del medio. En la superficie del océano las olas propiamente dichas son las generadas por la acción del viento.

Oleaje: término que se aplica al movimiento de las olas de viento y de marea.

- Onda:** movimiento oscilatorio en el tiempo y el espacio; perturbación que se repite de manera regular en el espacio y el tiempo y que se transmite progresivamente de una región de un medio a otro sin transporte de materia.
- Pelágico:** zona oceánica que comprende la altamar de una cuenca oceánica, subdividida en zona nerítica y zona oceánica. Excluye la capa más cercana al fondo marino, la zona costera y las superficies oceánicas.
- Piscicultura:** técnica para manejar e incrementar la reproducción de los peces. Procedimiento para la repoblación con peces de los ríos, lagos y estanques.
- Plancton:** organismos pequeños que se encuentran flotando en la región superficial de las aguas dulces y marinas. Pueden presentar movimientos de desplazamiento.
- Planctónico:** referente o proveniente del plancton.
- Plataforma continental:** es la región amplia, poco profunda y de suave declive que se extiende desde la línea de mareas bajas hasta el borde del talud continental, aproximadamente hasta 200 metros de profundidad. El promedio de ancho de plataforma continental es de 65km, pero se puede extender por cientos de kilómetros, como en la Sonda de Campeche en el Golfo de México, o solo unos cuantos kilómetros como en las costas de Jalisco y Guerrero en el Pacífico mexicano.
- Pleamar (flujo entrante):** ascenso máximo de la marea creciente.
- Pleamar máxima registrada (NPMR o HHWLT):** el nivel más alto registrado debido a las fuerzas de la marea periódica, los cuales pueden verse influidos por efectos de condiciones meteorológicas. Uno por cada 19 años de predicción.
- Plenilunio:** posición planetaria en que se encuentran alineados la Tierra, la Luna y el Sol. En esta posición se generan máximas mareas.
- Población:** conjunto de individuos de la misma especie que se encuentran en una región en particular.
- Potencia específica:** Es el valor máximo de P , sin descenso sensible del rendimiento, en condiciones de altura constante, pudiendo variar los valores de gasto y velocidad específica.
- Prisma de marea:** el volumen de agua dentro de un estuario entre la marea baja y la marea alta.
- Producción primaria:** conversión por organismos autótrofos, del dióxido de carbono en materia orgánica, bajo la presencia de luz por unidad de área y por tiempo. Proceso mediante el cual las plantas que contienen clorofila son capaces de cambiar sustancias simples inorgánicas ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) en orgánicas complejas utilizando la energía lumínica. Los productos de síntesis más importantes son los principios inmediatos de los alimentos, es decir, carbohidratos, proteínas y grasas.
- Rada:** fondeadero existente en un estuario o bahía que permite el anclaje de aquellas embarcaciones que no puedan llegar a puerto, ya que ofrece una cierta protección en caso de tormentas, fuertes vientos y oleaje.
- Rango de la marea media:** es la diferencia entre las alturas de las mayores pleamares y las menores bajamares en mareas medias.
- Rango de marea grande:** es la diferencia entre las alturas de las mayores pleamares y las menores bajamares en las mareas grandes, es decir, en mareas de gran amplitud.
- Rango de marea:** diferencia de altura entre una marea alta y una baja consecutivas.
- Salinidad:** es la medida de la cantidad de sales disueltas en el agua de mar. Las unidades por mucho tiempo usadas eran partes por mil (ppm). Actualmente se calcula directamente midiendo la conductividad eléctrica y comparándola con la muestra

estándar. Las nuevas unidades, numéricamente iguales que las anteriores se denominan unidades prácticas de salinidad (ups).

Salobre: agua de mar mezclada con distintas proporciones de agua dulce, de tal manera que se conservan sus proporciones iónicas. Este tipo de agua se encuentran en lagunas costeras con aporte de agua de mar y agua dulce, en estuarios o en desembocaduras de ríos o arroyos hacia el mar. Existen tres categorías de agua salobre, dependiendo de la concentración de sales: Oligohalina, con salinidad de 0.3 a 3.6UPS, Mesohalina, con salinidad entre 3.6 y 18UPS y Polihalina de 18 a 35UPS.

Silicosis: enfermedad pulmonar crónica que se debe a la inhalación prolongada de polvo de sílice. Afecta a trabajadores de minas, canteras, fundiciones e industrias similares. Se caracteriza por el desarrollo de una fibrosis progresiva alrededor de las diminutas partículas de sílice que se depositan en los pulmones. Tras algunos años de exposición prolongada, la manifestación clínica de la enfermedad es la disnea. La enfermedad, que al principio es leve, progresa con lentitud pero de manera implacable, incluso después de haber cesado la exposición al agente desencadenante.

Sizigia (zizigia): posición en la cual el Sol y la Luna están alineados, tanto en conjunción como en oposición, respecto a la Tierra.

Supralitoral: la parte de la playa que se encuentra después del nivel de la marea alta. Es una zona que puede mantener algo de humedad debida al oleaje o al rocío por viento y olas.

Surgencia: a) fenómeno que determina que aguas profundas costeras, ricas en nutrientes, asciendan a niveles superficiales por efectos del viento; b) salida del agua a la superficie.

Sustancias húmicas: material amorfo café oscuro. Sustancia de origen orgánico depositada en el suelo sometida a un constante proceso de descomposición, transformación y estructuración, que sirve de fertilizante para el cultivo agrícola. La mayor parte procede del estiércol. Fracción orgánica del suelo. Existen denominaciones específicas como humus de agua o humus marino.

Talud continental: es la zona o región del fondo marino que se caracteriza por un fuerte declive y que empieza inmediatamente después de la plataforma continental hacia mar adentro. El talud continental termina en la zona donde comienza la elevación continental o hasta el punto donde hay una disminución de la pendiente.

Termoclina: intervalo de profundidad en la cual se presenta una tasa máxima de disminución de temperatura, con 1°C/10m de profundidad.

ups: abreviación de unidades prácticas de salinidad.

Veda: medida reglamentaria durante la cual no se puede explotar un recurso natural renovable. Se aplica en caza y pesca.

Velocidad específica: es la velocidad de turbinas homólogas, de dimensiones reducidas para producir la unidad de potencia con la unidad de desnivel. En la operación actual las *lentas* giran más aprisa que las *rápidas*, porque están sometidas a presiones totales mucho mayores. Es así que, cualquiera que sea la potencia P , en caballos de fuerza, el desnivel H , en metros, y la velocidad de trabajo n , en revoluciones por minuto, de una turbina, ésta pertenece a una familia de características semejantes, cuya velocidad específica n_s , vale:

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^4\sqrt{H}} = \frac{nP^{0.5}}{H^{1.25}} = \frac{nP^{1/2}}{H^{5/4}}$$

Zooide: cada uno de los animales que forman una colonia.

ÍNDICE DE FIGURAS.

	Página
1.1. Áreas de control del Sistema Eléctrico Nacional (SEN).	5
1.2. Sistema Interconectado Nacional (SIN).	6
2.1. Central hidroeléctrica.	13
2.2. Central Nuclear.	14
2.3. Conjunto aerogenerador.	17
2.4. Partes constitutivas del chasis de un aerogenerador.	18
2.5. Panel solar.	20
2.6. Central geotermoeléctrica.	22
2.7. Esquema de aprovechamiento de biomasa.	23
3.1. Disposición de obras mediante un solo vaso.	30
3.2. Funcionamiento del ciclo al simple efecto de vaciado.	31
3.3. Funcionamiento y operación del ciclo al doble efecto.	33
3.4. Disposición de obras mediante vasos asociados.	34
3.5. Funcionamiento y operación mediante vasos asociados.	35
3.6. Disposición de obras mediante vasos conjugados.	37
3.7. Funcionamiento y operación mediante vasos conjugados.	38
3.8. Disposición de obras mediante vasos múltiples.	39
3.9. Funcionamiento y operación mediante vasos múltiples.	40
3.10. Operaciones con bombeo.	41
3.11. Ciclos de bombeo.	44
3.12. Ciclos de bombeo de segundo orden.	45
3.13. Grupo Bulbo de Röstin, 1936.	49
3.14. Turbina Bulbo y tubo de aspiración.	49
3.15. Turbina bulbo instalada en el dique.	50
3.16. Grupo con alternador periférico (Harza).	51

	Página
3.17. Grupo con alternador periférico de Steinbach (Baviera).	52
3.18. El primer proyecto de grupo Bulbo para el Rance, 1943.	52
3.19. Grupos bulbo para saltos pequeños.	53
3.20. Sistema de Grupo Bulbo instalado en cámara de agua (Castet), 1954.	54
3.21. Sistema de Bulbo en conducción.	54
3.22. Conductos hidráulicos requeridos por una turbina Kaplan y un grupo Bulbo.	56
3.23. Diagrama de velocidad de una turbina axial.	57
3.24. Pérdida de carga en algunos tipos de tubo de aspiración de turbinas Bulbo y Kaplan.	58
3.25. Grupo Bulbo de Beaumont-Montoux.	61
3.26. Península de Valdés, Argentina.	65
3.27. Bahía de Fundy, Canadá.	67
3.28. Obras de la bahía de Fundy.	67
3.29. Golfo de Alaska.	68
3.30. Dique en el estuario del Rance, Francia.	69
3.31. Estuario de Severn, Reino Unido.	70
3.32. Costa noroeste de Australia.	73
4.1. Movimiento de rotación terrestre.	81
4.2. Movimiento de traslación terrestre.	81
4.3. Fases de la Luna.	82
4.4. Fuerza generadora de la marea.	83
4.5. Efecto de fuerzas atractiva y centrífuga sobre la marea.	84
4.6. Mareas vivas y mareas muertas.	85
4.7. Red Mareográfica Nacional.	88
4.8. Tipos de marea y regiones mareográficas en la República Mexicana.	89

	Página
4.9. Tabla de predicción de mareas realizada por la Secretaría de Marina Armada de México.	91
4.10. Calendario gráfico de mareas realizada por la Secretaría de Marina Armada de México.	92
4.11. Tabla de predicción de mareas realizada por el CICESE.	93
4.12. Calendario Gráfico de mareas realizada por el CICESE.	94
4.13. Programa de predicción de mareas proporcionado por el CICESE.	95
4.14. Programa de predicción de mareas proporcionado por el CICESE.	95
4.15. Programa de predicción de mareas proporcionado por el CICESE, mostrando una predicción para agosto de 2015.	96
5.1. Ubicación de la Desembocadura del Río Colorado.	101
5.2. Desembocadura del Río Colorado.	102
5.3. Descripción de la Desembocadura del Río Colorado.	104
5.4. Vista aérea de la Isla Montague y el Pasaje Cadenas.	104
5.5. Vista aérea de la Isla Gore y del Canal de Sonora en su desembocadura.	105
5.6. Vista aérea del Canal de Baja California.	105
5.7. Carta altimétrica.	106
5.8. Tipos de suelo.	107
5.9. Humedad del suelo.	107
5.10 Placas tectónicas, fallas y puntos que han presentado sismos.	108
5.11. Zonas de hibernación y descanso de aves migratorias.	110
5.12. Mareógrafos cercanos al Delta del Río Colorado.	117
5.13. Mareas del año 2005 en el Golfo de Santa Clara, Son.	118
5.14. Amplitudes de mareas en el Golfo de Santa Clara, Son.	124
5.15. Operación de la planta considerando el comportamiento de las mareas en el Golfo de Santa Clara, Son.	124

ÍNDICE DE TABLAS.

	Página
1.1. Capacidad instalada en México.	4
3.1. Ciclos posibles considerando una sola marea.	43
3.2. Ciclos positivos.	43
3.3. Número de ciclos originados por cada tipo de movimiento.	46
3.4. Ciclos positivos.	47
3.5. Ciclos negativos.	47
3.6. Serie tipo mostrando la sucesión de movimientos en un ciclo positivo de Segundo Orden.	48
3.7. Relación en peso entre los grupos Bulbo y Kaplan.	60
3.8. Algunas realizaciones.	61
3.9. Posibles lugares para la generación de electricidad utilizando energía mareomotriz.	63
3.10. Operaciones en las turbinas tipo Bulbo del Rance.	69
4.1. Costos de generación de energías convencionales y la mareomotriz.	98
4.2. Costos de generación de energías no convencionales y la mareomotriz.	100
5.1. Amplitudes de mareas registradas en los mareógrafos de la zona.	117
5.2. Predicción de pleamares y bajamares para el mes de marzo de 2010 en el Golfo de Santa Clara, Son.	119
5.3. Predicción de amplitudes de mareas superiores a 4.5m en el Golfo de Santa Clara, Son.	123

BIBLIOGRAFÍA

1. “*Energy alternatives: opposing viewpoints*”, Ed. Greenheaven, EE.UU., 2002.
2. “*Energy development II*”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, EE.UU., 1976.
3. “*Energy technology handbook*”, Ed. McGraw-Hill, EE.UU., 1977.
4. Álvarez B., S. y L. A. Galindo, “*Hidrología del alto Golfo de California I. Condiciones durante otoño*”, en *Ciencias Marinas* 1(1): 46-62, México, 1974.
5. Brusca, C. R., “*Common Intertidal Invertebrates of the Gulf of California*”, 2a. edición, EE.UU., 1980.
6. Cannon, R., “*The Sea of Cortez*”, Ed. Lane Magazine and Book Co., EE.UU., 1966.
7. Carless, J., “*Energía renovable: guía de alternativas ecológicas*”, Editores Asociados Mexicanos, México, 1995.
8. Centro Nacional de Prevención de Desastres, “*Los tsunamis en México*”, Secretaría de Gobernación, Coordinación de Programas y Normas, México, 1994.
9. Centro Nacional de Prevención de Desastres, *Fascículo No. 12: “Tsunamis”*, Secretaría de Gobernación, Subsecretaría de Protección Civil y de Prevención y Readaptación Social, México, 1996.
10. Comisión Federal de Electricidad, “*Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico: Generación,(COPAR)*” Elaborado por Subdirección de Programación, Gerencia de Evaluación y Programación de Inversiones, Subgerencia de Programación de Inversiones, México, 2003.
11. Contreras, F., “*Ecosistemas costeros mexicanos*”, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/UAM-Unidad Iztapalapa, México, 1993.
12. Crabbe, D. y R. McBride, “*The World energy Book*”, Ed. Kogan Page, Gran Bretaña; 1978.
13. Cruz W., L., “*Olas, mareas y corrientes*”, Ed. CNCA-ADN, México, 1997.
14. De la Lanza E., G., C. Cáceres, S. Adame y S. Hernández (eds.), “*Diccionario de Hidrología y Ciencias Afines*”, UABCS-UNAM-Plaza y Valdés, México, 1999.
15. De la Lanza E., G., “*Características Físico-Químicas de los Mares de México I. Textos monográficos: 9.Las costas y los mares de México*”. Ed. UNAM-Plaza y Valdés, México, 2001.
16. Elizondo B., F., “*Presentación a la Comunidad de Empresas y Asociaciones Socias de COPARMEX*”, Secretaría de Energía, México, 2004.
17. Elizondo B., F., “*Una Perspectiva General de la Energía en México*”, Secretaría de Energía, México, 2005.
18. El-Wakil, M., “*Power plant technology*”, Ed. McGraw-Hill, EE.UU., 1984.
19. Elliot, T. C., “*Standard handbook of power plant engineering*”, Ed. McGraw-Hill, EE.UU., 1989.
20. Filloux, J. H., “*Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California*”. *Nature* 243(5404):217-221, EE.UU., 1973.
21. Frisch, J. R., “*World energy horizons 2000-2020*”, publicado por *The World Energy Conference*, Editions Techno, Francia, 1989.
22. García de Miranda, E. (ed.), “*Nuevo Atlas Porrúa de la República Mexicana*”, Ed. Porrúa, S.A., México, 1989.

23. Gardea V., H., “Aprovechamientos hidroeléctricos y de bombeo”, Ed. Trillas, México, 1992.
24. Gibrat, R., “La energía de las mareas”, Ed. Labor, España, 1973.
25. Glenn, E. P., R. G. Felger y J. A. Búrquez-Montijo, “Oasis en el delta del río Colorado, Ciénaga de Santa Clara: vestigios de un oasis de humedal”. 4(1):14-32, México, 1992.
26. Gross, G. M., “Oceanography, a view of the Earth”, 2a edición, Ed. Prentice Hall, EE.UU, 1977.
27. Halacy, D., “Tierra, agua, viento y sol: nuestras alternativas energéticas”, Ediciones Nuevomar, México, 1978.
28. Lavin H., V. “Estudio de la planta mareomotriz el Rance”, tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1966.
29. Lavin, M. F., E. Beier y A. Badan, “Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: escalas estacional e inter-anual”, en Lavin, M. F. (ed.), *Contribuciones a la oceanografía física en México, Monografía No. 3*, Unión Geofísica Mexicana, México, 1997.
30. Luecke, D. F., C. Congdon, E. Glenn, C. Valdés-Casillas & M. Briggs, “El Delta una vez más: Restaurando el hábitat ribereño y los humedales del Delta del Río Colorado”, Ed, Environmental Defense, EE.UU., 1999.
31. Marinone, S. G. y M. F. Lavin, “Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California”, en Lavin, M. F. (ed.), *Contribuciones a la oceanografía física en México, Monografía No. 3*, Unión Geofísica Mexicana, México, 1997.
32. Matthews, J.B., “Ties in the gulf of California”. En: D. A. Thomson, A. R. Mead, J. R. Schreiber, J. A. Hunter, W.F. Savage y W. W. Rinne (eds.). “*Environmental impact of brine effluents on Gulf of California*”, U.S. Dep. Int. Res. Dev. Prog. Rep. num. 387: 41-50, EE.UU., 1969.
33. Miller, R., “Power system operation”, Ed. McGraw-Hill, EE.UU, 1983.
34. Mitchell, J., “Principales islas del Golfo de California y el Archipiélago de las Revillagigedo”, Ed. Cultura, México, 1933.
35. Morse, F. “Centrales eléctricas: teoría y práctica”, Compañía Editorial Continental, México, 1976.
36. Muñoz, M. A., “Potencial energético de las mareas en el Golfo de California”, *Memorias de la Reunión Internacional Académica de Investigadores del Mar de Cortés*, Ed. CICTUS-CONACYT, México, 1986.
37. Ortiz F., R., “Pequeñas centrales hidroeléctricas”, Ed. McGraw-Hill, Colombia, 2001.
38. Panzarini, R. N., “Introducción a la oceanografía general”, Ed. Universitaria de Buenos Aires, Argentina, 1970.
39. Ripa, P. M., “La increíble historia de la malentendida fuerza de Coriolis”, Fondo de Cultura Económica, México, 1996.
40. Ripa, P. M. y G. Velásquez, “Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California”, *Geofísica Internacional*, núm. 32:41-56, México, 1993.
41. Rocha M., R., “Utilización de fuentes alternativas de energía en la generación eléctrica”, tesis de licenciatura; FES-Cuautitlán, UNAM, México, 1998.

42. Rosenberg, P., *"The alternative energy handbook"*, Ed. Fairmont, EE.UU, 1993.
43. Ruiz M., J. L., *"Las nuevas fuentes de energía y posibilidades de su utilización en México"*, tesis de licenciatura, UNAM, México, 1965.
44. Secretaría de Energía, *"Energías Renovables: Para el Desarrollo Sustentable en México"*, México, 2004.
45. Secretaría de Energía, *"Prospectiva del Sector Eléctrico 2004-2013"*, Dirección General de Planeación Energética, México, 2003.
46. Secretaría de Marina, *"Derrotero de las costas sobre el Océano Pacífico de México, América Central y Colombia"*, Dirección General de Faros e Hidrografía, México, 1963.
47. Secretaría de Marina, *"Tablas numéricas de predicción de mareas: Océano Pacífico"*. Dirección General de Investigación y Desarrollo, Dirección General Adjunta de Oceanografía, hidrografía y Meteorología. México, 2004.
48. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, *"La calidad del agua en los sistemas costeros de México"*, Instituto Nacional de Ecología, México, 1999.
49. Shaw, T. L. (ed.), *"An environmental appraisal of tidal power stations: with particular reference to the Severn barrage"*, Ed. Fearon Pitman Publishers Inc., Canadá, 1980.
50. Solaun, O., J. Bald y A. Borja, *"Protocolo para la realización de los estudios de impacto ambiental en el medio marino"*, Ed. Instituto Tecnológico Pesquero y Alimentario, España, 2003.
51. Taylor, R. H., *"Alternative energy sources for the centralized generation of electricity"*, Ed. Modern Energy Studies, EE.UU, 1983.
52. Thompson, R. W., *"Tidal currents and general circulation. En: Environmental impact of brine effluents on Gulf of California"*. U.S. Report Ins. and Dev. Prog. Rep., num. 387, EE.UU., 1969.
53. Viejo Z., M., *"Energía hidroeléctrica"*, Ed. Limusa, México, 1977.
54. Viñas R., E., *"Propuesta de diversificación energética en la generación de electricidad empleando fuentes renovables de energía como estrategia para el desarrollo sostenido de México a largo plazo"*, tesis de licenciatura, FES-Zaragoza, UNAM, México, 2002.

Atlas Nacional Interactivo de México:

55. <http://www.atlasdemexico.gob.mx>

Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada (CICESE):

56. <http://www.cicese.mx>

Centro de Estudios de Almejas Muertas:

57. <http://www.geo.arizona.edu/ceam/images/images.html>

Comisión Federal de Electricidad (CFE):

58. <http://www.cfe.gob.mx>

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas:

59. <http://conanp.gob.mx>

Comisión Nacional del Agua, Sistema de Información Geográfica del Agua:

60. <http://sgp.cna.gob.mx/Publico/Mapoteca/Mapas.htm#indice>

Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE):

61. <http://www.conae.gob.mx>

62. [http://www.conae.gob.mx/work/secciones/1477/imagenes/b1iie.pdf#search='costos %20de%20generaci%C3%B3n%20de%20kwh](http://www.conae.gob.mx/work/secciones/1477/imagenes/b1iie.pdf#search='costos%20de%20generaci%C3%B3n%20de%20kwh)

Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad:

63. <http://www.conabio.gob.mx/>

Electric Energy on Line:

64. <http://www.electricenergyonline.com/>

65. <http://www.electricenergyonline.com/IndustryNews.asp?m=1&id=31914>

Energy Efficiency and Renewable Energy:

66. <http://www.eere.energy.gov/>

67. http://www.eere.energy.gov/RE/ocean_tidal.html

68. <http://www.eere.energy.gov/consumerinfo/factsheets/nb1.html>

Gobierno de Baja California, Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado:

69. <http://www.copladebc.gob.mx/>

Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa (ILCE):

70. <http://www.ilce.edu.mx>

71. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/067/htm/oceano8.htm>

72. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI):

73. <http://www.inegi.gob.mx>

INEGI: Mapa Digital de México:

74. <http://galileo.inegi.gob.mx/website/mexico/Run.htm?sistema=1&c=423&s=geo&md=d&pagant=1>

INEGI: Sistemas de Información de Índices de Vuelo:

75. http://mapserver.inegi.gob.mx/siiv/siiv_in/siiv.cfm?c=500

National Aeronautics and Space Administration, NASA:

76. <http://www.nasa.gov>

77. <http://photojournal.jpl.nasa.gov/index.html>

National Oceanic & Atmospheric Administration:

78. <http://www.noaa.gov>

Secretaría de Marina Armada de México:

79. <http://www.semar.gob.mx>

Secretaría de Energía:

80. <http://www.sener.gob.mx>

81. http://www.energia.gob.mx/work/resources/LocalContent/1750/1/images/mod2_6_jdavila.pdf

Tidal Electric:

82. <http://www.tidalelectric.com>

World Energy Council:

83. <http://www.worldenergy.org/wec-geis/>

OTRAS:

Información técnica y científica:

84. <http://armorance.free.fr/barrage.htm>

85. <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Departamentos/DFyQ/energia/e-3/energias.htm>

86. <http://collections.ic.gc.ca/western/home.html>

87. <http://easytide.ukho.gov.uk/EasyTide/EasyTide/index.aspx>

88. http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/html/tidalpot.html

89. <http://frias-group.com/>

90. http://luigidanycompany.iespana.es/energia_mareomotriz_y_geotermica.htm

91. http://membres.lycos.fr/chezalex/projets/rance/sommaire_rance.htm

92. http://nti.educa.rcanaria.es/blas_cabrera/TER/MARIN/MARIN11.htm

93. <http://perso.wanadoo.fr/npiriou/maree/usine.htm>

94. <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/mar/index.html>

95. <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8240/8240energy.html>

96. <http://wolf.readinglitho.co.uk/subpages/renewables.html>

97. <http://www.awea.org/pubs/factsheets/Cost2001.PDF>

98. <http://www.brillodesol.com.ar/>

99. http://www.ceaccu.org/docspdf/energias_renovables_2.pdf

100. http://www.ceaccu.org/energias_renovables.htm

101. <http://www.cosmovisions.com/CTmarees.htm>

102. <http://www.cwr.uwa.edu.au/cwr/outreach/envirowa/coastal/derbytidal/derbtide.html>

103. <http://www.darvill.clara.net/altenerg/tidal.htm>

104. <http://www.dsostenible.com.ar/situacion-inter/energy/energias-renov.html>

105. <http://www.energybulletin.net/3881.html>

106. <http://www.energyinfonz.com/index.asp>

107. http://www.findarticles.com/p/articles/mi_qa3695/is_199910/ai_n8853026

108. <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier415-1.php>

109. http://www.geda.org.in/other_sources/other_re_sources.htm
110. http://www.ingenieros.cl/archivos_show.cfm?id=391
111. <http://www.keelerocean.com/>
112. <http://www.marineturbines.com/home.htm>
113. http://www.mindef.gov.ar/edna/biblioteca/coleccion/85_2003.htm
114. <http://www.nationmaster.com/>
115. <http://www.newenergy.org.cn/english/>
116. <http://www.nspower.ca/AboutUs/>
117. <http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi98/Energia-Vs-Ambiente/arestud.htm>
118. http://www.patagon.8m.com/ENER_ALT.html
119. http://www.pollutionengineering.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP__Features__Item/0,6649,107271,00.html
120. <http://www.powertubeinc.com>
121. http://www.powertubeinc.com/about_us/marketplace.shtml
122. <http://www.senatoralaneggleston.com/pages/speeches/Derbytidalpowerproject.htm>
123. <http://www.soloenergia.com.ar/news.php>
124. <http://www.waterpowermagazine.com/story.asp?sectionCode=130&storyCode=2026699>
125. <http://www.windpower.org>
126. http://www1.sedo.energy.wa.gov.au/uploads/Derby%20Tidal%20Energy%20Study%20-%20Full%20Report_22.pdf

Organizaciones e institutos ambientalistas:

127. <http://conservacion.org.mx>
128. <http://maya.ucr.edu/pril/reservas/altogolfo/altogolfo2.html>
129. http://www.ambiente-ecologico.com/ediciones/2002/083_03.2002/083_Columnistas_LuisReinaldoFernandez.php3
130. <http://www.domsweb.org/ecolo/energie-eau.php>
131. http://www.ecoworld.com/water/ecoworld_water_home.cfm
132. http://www.larazon.com.ar/diario_lr/2004/06/01/5-769650.htm
133. http://www.meteored.com/ram/numero29/planeta_tierra_calentamiento.asp
134. <http://www.opsd.nos.noaa.gov/tides>
135. <http://iga.igg.cnr.it/geoworld/geoworld.php>