



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

ALTERNATIVAS DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA MECÁNICA DE LAS OLAS MARINAS

Julio Roberto Aguilar Chávez

Asesorado por el Ing. José Ismael Véliz Padilla

Guatemala, mayo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALTERNATIVAS DEL APROVECHAMIENTO DE LA
ENERGÍA MECÁNICA DE LAS OLAS MARINAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JULIO ROBERTO AGUILAR CHÁVEZ

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, MAYO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ALTERNATIVAS DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA MECÁNICA DE LAS OLAS MARINAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha enero de 2011.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long vertical stroke at the end, positioned above the printed name.

Julio Roberto Aguilar Chávez

Guatemala, 05 de Julio del 2011

**Ingeniero
Julio Cesar Campos Paíz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente**

Señor Director:

Por este medio me dirijo a usted, para informarle que he aceptado llevar acabo la revisión del trabajo de graduación del estudiante Julio Roberto Aguilar Chávez, quien se identifica con número de carné 2005-15865, el cual se titula **ALTERNATIVAS DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA MECÁNICA DE LAS OLAS MARINAS.**

No esta demás indicarle que este trabajo esta aprobado y será de utilidad para el curso de Máquinas Hidráulicas y para todos aquellos que se desenvuelven en el ambiente de la hidráulica.

Agradeciendo su atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente.



Ing. JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA

CATEDRÁTICO DEL CURSO DE MAQUINAS HIDRÁULICAS

José Ismael Véliz Padilla
**INGENIERO MECÁNICO
COL. 3648**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ref.E.I.Mecanica.57.2014

El Coordinador del Área de Complementaria, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **ALTERNATIVAS DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA MECÁNICA DE LAS OLAS MARINAS**, del estudiante **Julio Roberto Aguilar Chávez**, recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Carlos Humberto Pérez Rodríguez'.



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador del Área de Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, marzo de 2014.



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.101.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Complementaria, del trabajo de graduación **ALTERNATIVAS DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA MECÁNICA DE LAS OLAS MARINAS**, del estudiante **Julio Roberto Aguilar Chávez**, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Julio César Campos Paiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

MA Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR
Esc. Ingeniería Mecánica

Guatemala, mayo de 2014.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

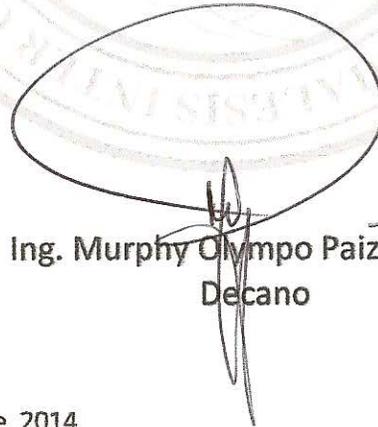


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 200.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ALTERNATIVAS DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA MECÁNICA DE LAS OLAS MARINAS**, presentado por el estudiante universitario **Julio Roberto Aguilar Chávez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 5 de mayo de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por estar a mi lado.
Mis padres	Julio Aguilar y Silvia Chávez de Aguilar. Su apoyo y amor que me acompañó durante toda mi carrera.
Mi esposa	Emilia Mayte Guzmán de Aguilar. Por ser mi angelito que me impulsa a lograr todas mis metas.
Mi hijo	Julio Adrian. Por ser la principal inspiración en mi vida y mi mejor amigo.
Mi hermana	Silvia Irene. Por alegrar mi vida y para quien quiero ser un gran ejemplo como hermano.
Mis abuelos	José Luis Aguilar y Andrea Samayoa. Por darme fuerzas en todo momento.
Mis tías y tíos	Rosa Linda, Sonia, Luis Eduardo, Patricia y Mario Orellana. Por guiar mis estudios desde sus inicios, su apoyo incondicional y ayudarme a culminar mi carrera.

Mis primos

Erick y Dalay Aguilar. Por ser la ayuda más valiosa en mi vida y mis estudios.

Mis suegros

Carlos Guzmán y Miriam Flores. Por apoyarme en mis estudios y en mi vida.

Mis cuñados

Carlos Alberto y Gerber Guzmán. Por darme su confianza y ayuda en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de sobresalir en el mundo profesional.
Facultad de Ingeniería	Por darme las herramientas para superarme académicamente y lograr mis metas estudiantiles.
Mis amigos de la Facultad	A todos aquellos con los que compartí muy buenos momentos en la universidad.
Ing. José Ismael Véliz Padilla	Por ayudarme a realizar mi proyecto de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ENERGÍA MAREOMOTRIZ.....	1
1.1. Estudio de viabilidad.....	1
1.2. Aspectos económicos.....	1
1.3. Características de la energía mareomotriz	2
1.3.1. Ventajas.....	5
1.3.2. Desventajas	6
1.4. Futuro de la energía mareomotriz.....	6
1.5. Proyectos en el mundo	7
1.5.1. Francia.....	8
1.5.2. Rusia.....	9
1.5.3. Canadá	10
1.5.4. Noruega	11
2. EFECTOS AL MEDIO AMBIENTE	15
2.1. Visual.....	15
2.2. Ambiental.....	16
3. TÉCNICAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS OLAS.....	21
3.1. Maneras de transformar la energía de las olas.....	21

3.1.1.	Conversión primaria	21
3.1.2.	Conversión secundaria	22
3.2.	Clasificación de las distintas columnas de agua oscilante (OWC)	22
3.3.	Técnicas para aprovechar la energía de las olas	23
3.3.1.	Empuje de la ola	24
3.3.2.	Variación de la altura de la superficie de la ola	24
3.3.3.	Absorbedores puntuales	26
3.3.4.	Equipos para variación de la presión bajo la superficie de la ola	27
4.	CENTRALES MAREOMOTRICES	29
4.1.	Totalizadores o terminadores	29
4.1.1.	Rectificador de Russell	29
4.1.2.	Péndulo	30
4.2.	Sistemas de bombeo	32
4.2.1.	Bomba de manguera	32
4.2.2.	Bomba de pistón	34
4.3.	Sistemas hidráulicos	36
4.3.1.	El pato de Salter	37
4.3.2.	Cilindro Bristol	41
4.3.3.	Balsa cockerell	42
4.3.4.	Serpiente marina Pelamis	45
4.4.	Sistemas neumáticos	48
4.4.1.	Boya de Masuda	48
4.4.2.	Barco flotante	49
4.4.3.	NEL	52
4.5.	Proyectos de transformación avanzados	56
4.5.1.	Proyecto Hydrolienne	56

4.5.2.	Turbina para el proyecto GulfStream	57
4.5.3.	Stingray.....	58
4.5.4.	Proyecto Sea Snail	61
4.5.5.	Dragón	62
5.	EQUIPOS MAREOMOTRICES	65
5.1.	Turbinas hidráulicas.....	65
5.1.1.	Turbinas de acción total.....	65
5.1.1.1.	Turbinas radiales	65
5.1.1.2.	Turbinas axiales.....	66
5.1.1.3.	Turbinas de flujo mixto o diagonal	66
5.1.2.	Turbinas de acción parcial	67
5.1.2.1.	Turbinas de flujo tangencial	68
5.1.3.	Turbina de doble efecto	68
5.1.3.1.	Principio de funcionamiento.....	68
5.1.4.	Pelton.....	70
5.1.4.1.	Funcionamiento	70
5.1.4.2.	Cazoletas.....	71
5.1.4.3.	Inyector	72
5.1.5.	Francis	75
5.1.5.1.	Funcionamiento	76
5.1.5.2.	Rodetes lentos	77
5.1.5.3.	Rodetes normales.....	77
5.1.5.4.	Rodetes rápidos.....	78
5.1.5.5.	Cámara espiral.....	80
5.1.5.6.	El distribuidor	80
5.1.5.7.	El tubo de aspiración	81
5.1.6.	Bulbo.....	82
5.1.6.1.	Funcionamiento	84

5.1.6.2.	Hélices.....	85
5.1.6.3.	Trazado de los conductos hidráulicos de los grupos bulbo	86
5.1.6.4.	El tubo de aspiración	87
5.1.6.5.	Ventajas de utilizar turbina tipo bulbo en centrales mareomotrices.....	88
5.1.6.6.	Los grupo bulbo como proyecto	89
5.1.7.	Turbina Wells.....	90
5.1.7.1.	Funcionamiento.....	91
5.1.7.2.	Aspas	92
5.1.7.3.	Construcción del direccionador de flujo.....	93
5.2.	Turbinas del futuro para corrientes de marea.....	94
CONCLUSIONES		97
RECOMENDACIONES.....		99
BIBLIOGRAFÍA.....		101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de cómo utilizar las mareas.....	3
2.	Dique de la central de Rance	9
3.	Instalación Chapman.....	12
4.	Equipamiento de la central de Noruega	13
5.	Generador en acantilado.....	13
6.	Daño al medio ambiente.....	16
7.	Ejemplo de la utilización de la fuerza de empuje de una ola.....	24
8.	Esquema del aprovechamiento del cambio de altura	25
9.	Partes un transformador de energía por medio de cambio de altura	25
10.	Aplicación del concepto absorbedores puntuales	26
11.	Distintos movimientos provocados por las olas.....	27
12.	Rectificador Russell.....	30
13.	Esquema de un equipo de péndulo.....	31
14.	Funcionamiento de un péndulo	31
15.	Equipo de una bomba de manguera	33
16.	Sistema Lilypad	34
17.	Esquema de bomba de pistón utilizada en Hanstholm.....	35
18.	Diseño de bomba de pistón montada sobre boya	36
19.	Sistema <i>Frog</i>	37
20.	Central de tipo pato Salter.....	38
21.	Vista interna de un tipo pato.....	39
22.	Movimiento de las palas generada por las olas.....	40
23.	Otra forma de pato Salter	41

24.	Cilindro Bristol	42
25.	Partes de una balsa cockerell	43
26.	Equipo de una central tipo balsa cockerell	44
27.	Pelamis.....	45
28.	Partes de una Pelamis	47
29.	Partes de una boya Masuda	49
30.	Barco con distintas turbinas instaladas	50
31.	Esquema del funcionamiento a) Inicio b) Funcionamiento c) Final	51
32.	Esquema de NEL	53
33.	Interior de NEL	54
34.	Funcionamiento en dos pasos de NEL	55
35.	Prototipo de conjunto de turbinas.....	56
36.	Instalación de las turbinas.....	57
37.	Proyecto de turbina de FHPL	58
38.	Prototipo Stingray.....	59
39.	Parque de Stingray	60
40.	Prototipo del futuro de Stingray.....	60
41.	Prototipo Sea Snail	61
42.	Diseño del dragón	62
43.	Funcionamiento del dragón.....	63
44.	Proyecto a) Seaflow b) Seagen.....	66
45.	Turbina de flujo mixto	67
46.	Turbina de doble efecto.....	69
47.	Turbina Pelton y sus inyectores	71
48.	Cazoleta vista de varias formas	72
49.	Inyector.....	72
50.	Turbina Pelton de dos inyectores.....	74
51.	Turbina Pelton de varios inyectores, en este caso 6.....	74
52.	Diagrama de las partes de una turbina Francis.....	75

53.	Montaje de dos turbinas Francis	76
54.	Perfil de rodete lento	77
55.	Perfil de rodete normal	78
56.	Perfil de rodete rápido	79
57.	Rodetes Francis de flujo diagonal	79
58.	Rodetes Francis de flujo radial	79
59.	Esquema de la cámara espiral de la turbina	80
60.	Detalle del distribuidor de una turbina Francis	81
61.	Turbina bulbo	83
62.	Turbina bulbo instalada en un dique	85
63.	Turbina Kaplan (para efecto de comparación)	87
64.	Primer proyecto de grupo bulbo para Rance.....	90
65.	Diagrama de una turbina Wells	91
66.	Aspas de una turbina Wells.....	92
67.	Posible utilización de una turbina Wells	93
68.	Prototipo de turbinas para el futuro.	95

GLOSARIO

Antrópica	Causado por el hombre.
Apogeo	Es el punto máximo de alguna situación o acción.
Capa límite	Se define como la distancia desde la pared del sólido hasta el punto donde la velocidad del fluido difiere en un 1 por ciento del valor de la velocidad lejos del sólido.
Desalinización	Es el proceso de eliminar la sal del agua de mar o salobre, obteniendo agua dulce.
Dique	Es un terraplén natural o artificial, por lo general de tierra, paralelo al curso de un río o al borde del mar.
Elastómeros	Son aquellos polímeros que muestran un comportamiento elástico. El término, que proviene de polímero elástico, es a veces intercambiable con el término goma, que es más adecuado para referirse a vulcanizados.
Embalse	Se denomina embalse a la acumulación de agua producida por una obstrucción en el lecho de un río o arroyo que cierra parcial o totalmente su

cauce. La obstrucción del cauce puede ocurrir por causas naturales.

Encauzar

Canalizar el agua por un cauce para luego utilizarla.

Energía mecánica

La energía mecánica es la energía que se debe a la posición y al movimiento de un cuerpo, por lo tanto, es la suma de las energías potencial, cinética y la elástica de un cuerpo en movimiento. Expresa la capacidad que poseen los cuerpos con masa de efectuar un trabajo.

Estanqueidad

Sistema de protección para evitar el paso del agua a través de una construcción o de los elementos constructivos exteriores por medio de la posibilidad de crear una superficie por donde no acceda el agua al interior del material en casos de lluvia; es una exigencia a cumplir muy importante cuando se construye un edificio.

Estuario

Los estuarios son cuerpos de agua donde la desembocadura de un río se abre a un ecosistema marino, con una salinidad entre dulce y salada, o donde el agua de mar se diluye significativamente con el agua dulce que proviene del drenaje terrestre.

Intertidales

Es decir la que esta bajo la acción de las mareas.

Mareas litorales	Litoral son las grietas y fisuras que crea el oleaje del mar al golpear un acantilado. Lo que hace que las mareas tengan más fricción en su movimiento.
Noria	Es una máquina hidráulica que sirve para extraer agua siguiendo el principio del rosario hidráulico. Consiste en una gran rueda con aletas transversales que se coloca parcialmente sumergida en un curso de agua, el cual, gracias a las aletas, imprime a la rueda un movimiento continuo.
Oscilogramas	Este instrumento nos dará una idea cabal de qué está sucediendo dentro de los circuitos. El hecho de poder seguir la evolución de la señal a través de las distintas etapas que posee un equipo.
Rarefacción	Disminución de la densidad de un cuerpo gaseoso.
Ría	Una ría es un accidente geomorfológico que designa una de las formas que puede adoptar la desembocadura de un río, cuando un valle costero queda sumergido bajo el mar por una elevación de su nivel y que está sometido a la acción de las mareas.
Servomotor	Es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición.

Sotavento

Un término marino que indica el sentido señalado por los vientos dominantes y que es contrario a barlovento. Es un término ampliamente empleado en Climatología.

**Válvulas
rectificadoras**

Es convertir la señal alterna del secundario del transformador de poder en una señal continua, necesaria para que el circuito funcione, esta misma función la cumplen los diodos rectificadores.

RESUMEN

El estudio de la transformación de la energía de las olas por medio de sistemas mecánicos es una medida de prevención para el futuro, ya que los recursos naturales son amigables para el medio y para el ser humano. Es por eso que es necesario impulsar estas nuevas tecnologías en Guatemala para poder liberarse de la necesidad de consumir combustibles fósiles, los cuales se han vuelto muy escasos en el mundo.

La obtención de energía a través de las fuerzas de la naturaleza no es una idea reciente, lo nuevo es el ingenio con el cual el ser humano la ha explotado. La energía mareomotriz por sí sola no es gran cosa, ya que se necesita de sistemas mecánicos bien diseñados y un estudio de viabilidad preciso para hacer de esto una gran idea. El mar y sus componentes hacen de este ambiente uno de los más inhóspitos y más difíciles para trabajar equipos mecánicos, pero gracias a la ingeniería se han logrado grandes avances en prevención de corrosión y desgastes, haciendo cada vez más eficientes estos sistemas.

Se prevé que para el futuro se hayan desarrollado tanto estos equipos, que será más viable el uso de la energía de las mareas, por ser un recurso natural tan grande y constante. Pero para lograr el éxito es necesario tomar en cuenta cual es la mejor manera de aprovechar este potente recurso, ya que no hay una sola manera de transformar su energía mecánica y de eso dependerá la eficiencia con la cual contara el sistema.

Las grandes y pequeñas centrales mareomotrices cuentan de varias partes, pero el corazón de estos equipos son sus turbinas de gran eficiencia y enorme tamaño, las cuales hacen el trabajo pesado en la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica. Hay una gran variedad de turbinas, pero no todas están capacitadas o son aptas para trabajos tan duros o no llenan los requisitos para suplir las necesidades de los sistemas.

OBJETIVOS

General

Hacer un análisis exhaustivo de los sistemas de transformación del movimiento de las olas del mar en energía eléctrica limpia y renovable por medio de distintos sistemas mecánicos.

Específicos

1. Demostrar la participación de la ingeniería mecánica en el diseño de equipos de transformación de la energía mareomotriz.
2. Realizar estudios de los distintos sistemas mecánicos productores de energías renovables y económicas más constantes que los ya existentes.
3. Realizar una investigación del impacto ecológico debido al empleo de los sistemas propuestos.
4. Dar a conocer uno de los recursos naturales que se puede brindar al país como lo es el mar.
5. Promover los equipos mecánicos de la energía mareomotriz como sistemas confiables para la transformación de la energía.

INTRODUCCIÓN

Los mares y océanos cubren las tres cuartas partes de la superficie del planeta y constituyen un enorme depósito de energía siempre en movimiento. Al actuar los océanos como captadores y acumuladores de energía se pueden aprovechar varias formas de la misma, que van desde los gradientes térmicos y salinos hasta las corrientes marinas, a las cuáles hay que añadir el fenómeno de las mareas. Por su parte, los vientos en el mar transportan grandes cantidades de energía, mientras que algunas zonas marítimas pueden ser idóneas para la producción de biomasa.

Dentro del desarrollo tecnológico actual y la demanda de una sociedad cada vez más exigente a un consumo energético tan grande y una latente necesidad de expansión, es inevitable pensar en una solución ecológica para esta situación. A lo largo del tiempo se han utilizado varias formas de transformar energía proveniente de la naturaleza pero es muy raro utilizar el mar para este fin, no por eso quiere decir que sea menos importante. Las necesidades energéticas son crecientes y los recursos muy limitados, esta combinación da un alto costo por el servicio eléctrico. La sociedad camina entonces hacia un colapso energético y las energías alternativas renovables, tales como la eólica, la hidráulica, la solar, la de la biomasa o la mareomotriz, son las opciones más ecológicas y razonables.

Por razones extrañas, la energía mareomotriz es una de las fuentes de energía menos conocida y menos utilizadas en Guatemala, a pesar de estar rodeada de océanos y siendo una fuente inagotable y ecológica, ya que solo depende de los movimientos de las olas.

1. ENERGÍA MAREOMOTRIZ

1.1. Estudio de viabilidad

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

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

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

1.2. Aspectos económicos

Entre los aspectos económicos destaca el elevado coste del kilowatt instalado. Los factores que inciden negativamente en el coste de la central son la propia obra civil de construcción del dique, que supone más de la mitad del

coste de la planta, con lo que la elección de un lugar adecuado que permita un ahorro en infraestructura, compatible con una buena amplitud de marea, es fundamental.

A esto hay que añadir la larga duración del proceso constructivo de la central, entre 5 y 15 años en el caso más favorable y el bajo factor de carga estacional, entre el 22 por ciento y el 35 por ciento, debido a las variaciones de la amplitud de la marea (mareas vivas y muertas). Entre los factores que inciden positivamente hay que citar el bajo coste de operación y mantenimiento, inferior al 0,5 por ciento y la alta disponibilidad, superior al 95 por ciento, que está relacionada con el elevado número de grupos. Es importante el tener presentes otros efectos distintos de los energéticos, que pueden mejorar el entorno y la viabilidad de un proyecto de esta naturaleza.

1.3. Características de la energía mareomotriz

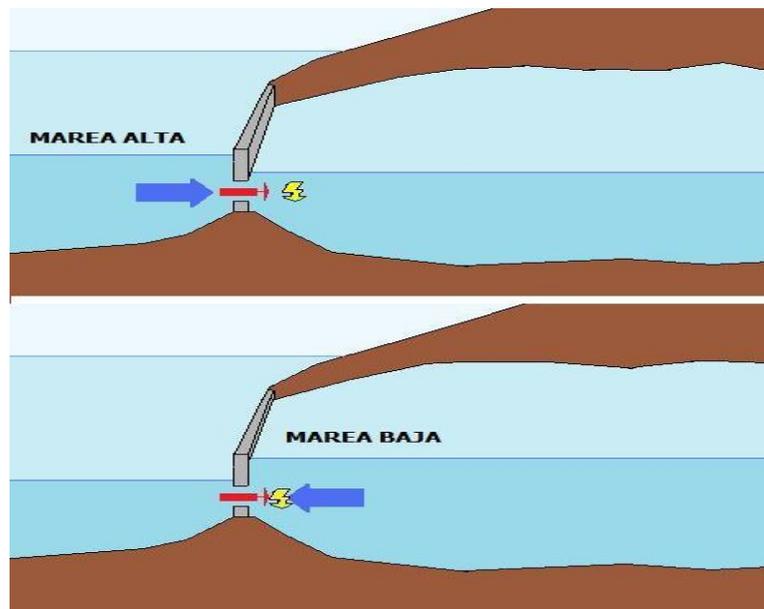
Este tipo de energía acumulada en las olas se llama energía mecánica y como toda energía puede transformarse mas no crearse, es por eso que gracias a este concepto en la actualidad se puede generar electricidad a partir de los movimientos de las olas, por medio de equipos mecánicos. La explotación de la energía comienza desde un concepto básico de física llamado energía potencial, el cual se produce en el agua a medida que las olas cambian su altura por velocidad conforme se aproximan a tierra firme, lo cual se lleva a la parte en la que la sobre elevación del nivel del mar juega parte importante de los proyectos y maquinaria mareomotrices.

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 mar-estuario. El sistema consiste en

aprisionar el agua en el momento de la alta marea y liberarla, obligándola a pasar por las turbinas durante la bajamar.

Cuando la marea sube, el nivel del mar es superior al del agua del interior de la ría. Abriendo las compuertas, el agua pasa de un lado a otro del dique y sus movimientos hacen que también se muevan las turbinas de unos generadores de corrientes situados junto a los conductos por los que circula el agua. Cuando por el contrario, la marea baja, el nivel de la mar es inferior al de la ría, porque el movimiento del agua es en sentido contrario que el anterior, pero también se aprovecha para producir electricidad.

Figura 1. **Esquema de cómo utilizar las mareas**



Fuente: <http://www.sitiosolar.com>. Consulta: 21 marzo de 2011.

Esto en teoría parece muy simple, se construye un dique cerrando una bahía aislándolo del mar exterior, se colocan en él los equipos adecuados

(turbinas, generadores, esclusas) y luego, aprovechando el desnivel que se producirá como consecuencia de la marea, se genera energía entre el embalse así formado y el mar exterior.

En la utilización de un salto de agua de un río, la energía aprovechada, se sustrae de la energía que se desaprovechaba antes de la creación del embalse en forma de remolinos, torbellinos, rozamientos de diverso tipo, la energía transformable tiene evidentemente como límite el total de estas pérdidas.

Desgraciadamente este tipo de energía como todas las demás fuentes energéticas, produce pérdidas. Esta muy limitada a la potencia disipada por las mareas del globo terrestre, llegando a un estimado del orden de 3 terawatt, de los cuales solo un tercio se pierde en mareas litorales. Además, para efectividad la explotación, la amplitud de marea debe ser superior a los 4 metros, y el sitio geográfico adecuado, lo que elimina prácticamente el 80 por ciento de la energía teóricamente disponible, dejando aprovechables unos 350 terawatt por hora por año.

Uno de los mayores inconvenientes en la utilización aparece precisamente debido a las características inherentes al fenómeno de las mareas. En efecto, como el nivel del mar varía, con un período del orden de 12 horas 30 minutos en las zonas apuntadas, a menos que se tomen las precauciones necesarias, la caída disponible y la potencia asociada varían de la misma forma y por lo tanto se anulan dos veces por día. Además, la marea sigue el ritmo de la luna y no del sol, de manera que hay un retardo diario de 30 minutos, en las horas en que dicha energía está disponible.

Si la tierra estuviera completamente rodeada de una masa oceánica uniforme el fenómeno de las mareas sería completamente regular. Pero la ola de marea es retardada en su avance por las variaciones de la profundidad, por el obstáculo que la oponen los continentes y por la irregularidad de las costas. La altura de la marea nunca pasa de un metro en las islas situadas en medio de los océanos abiertos, pero en los estrechos o entradas alcanza alturas muy grandes.

La otra particularidad de este tipo de energía mecánica es que no solo se aprovecha la fuerza del movimiento de las olas, también se puede extraer la energía de otras maneras, al atrapar las mareas se aprovecha su fuerza tanto de ida como de regreso, además se puede utilizar la forma de las olas para mover equipos mecánicos e incluso podría utilizarse para producir vientos en equipos herméticos, actuando como pistón hidráulico.

1.3.1. Ventajas

Siendo una generación auto sostenible con pocos inconvenientes que se logran superar fácilmente con una buena planificación. Este tipo de energía será la energía del futuro, la cual ya se utiliza pero tendrá un crecimiento con forme se mejore la tecnología.

- Auto renovable
- No produce gases invernadero
- No contaminante
- Silenciosa
- Bajo costo de materia prima
- No concentra población
- Disponible en cualquier clima y época del año

1.3.2. Desventajas

Como toda energía verde tiene sus limitantes y una de estas es la capacidad de producción energética, debido a que es muy difícil de aprovechar y lograr obtener toda la energía mecánica que pueden dar las olas marinas.

- Impacto visual y estructural sobre el paisaje costero
- Localización puntual
- Dependiente de la amplitud de mareas
- Traslado de energía muy costoso
- Efecto negativo sobre la flora y la fauna

1.4. Futuro de la energía mareomotriz

El futuro se mira muy prometedor para este tipo de generación, gracias a que es un recurso natural ilimitado y con ningún tipo de emisión dañina para el medio ambiente, contribuyendo así a la innovación de nuevas máquinas de transformación de energía. Además su casi sencillo planteamiento lo hace muy llamativo para países con regulaciones muy estrictas con el tema de la contaminación ambiental y para países que ya tienen alto nivel de contaminación produciendo un efecto invernadero, lo cual los alerta para cambiar sus procesos y una forma de ayudarse son las centrales mareomotrices.

Conforme la tecnología se vaya mejorando alrededor del mundo, las técnicas también se irán mejorando, haciendo máquinas más eficientes, piezas más resistentes. El acelerado crecimiento de la demanda energética mundial y el siempre latente incremento en el precio de los combustibles son factores

primordiales que disminuyen cada vez más la brecha entre los costos de generación mareomotriz y los de las fuentes convencionales de energía.

Algunos países tienden a tomarlo así, ya que este tipo de energía tiene mucha ventaja sobre las otras fuentes naturales, ya que es casi constante a diferencia de las otras fuentes. Canadá e Inglaterra son algunos países que se incorporaron a un plan energético como solución a plazo medio en su proceso por sustituir sus plantas termales.

Respecto a la forma de funcionamiento y construcción de las plantas, actualmente se aceptan ciertas premisas básicas como por ejemplo:

- Se asume el sistema de embalse único y efecto simple como el más apropiado desde el punto de vista económico.
- En lo que respecta al diseño constructivo, se adopta, en la mayor parte de la obra, el uso de cajones prefabricados, incluso en reemplazo de los diques complementarios de relleno (éstos se reservan solamente para las zonas intertidales).

1.5. Proyectos en el mundo

En la actualidad son muchos los proyectos que funcionan alrededor del mundo debido no solo a que tienen la capacidad de montar un equipo de esa magnitud sino que también se han visto en la necesidad de generar más energía y también debe ser un tipo de energía amigable con el medio ambiente, debido a que el mundo atraviesa por un momento de crisis ecológico y es necesario tener una generación eléctrica limpia para tener un mundo mejor en el futuro.

1.5.1. Francia

La planta de energía de La Rance contiene las 24 unidades del tipo bulbo. Además cuando la marea baja, puede utilizarse la diferencia de altura existente al estar cargado el río. Con lo que, con el fin de lograr una mayor efectividad en los costos, la planta mareomotriz de La Rance es capaz de turbinar ambos momentos cuando el estuario está lleno y cuando este está vacío. También las hojas de la turbina pueden cambiar la dirección de acuerdo a la dirección de la corriente. Los 24 bulbos en La Rance facilitan tener grandiosos resultados técnicos, con 470 toneladas de peso y una capacidad por unidad de 10 megawatt.

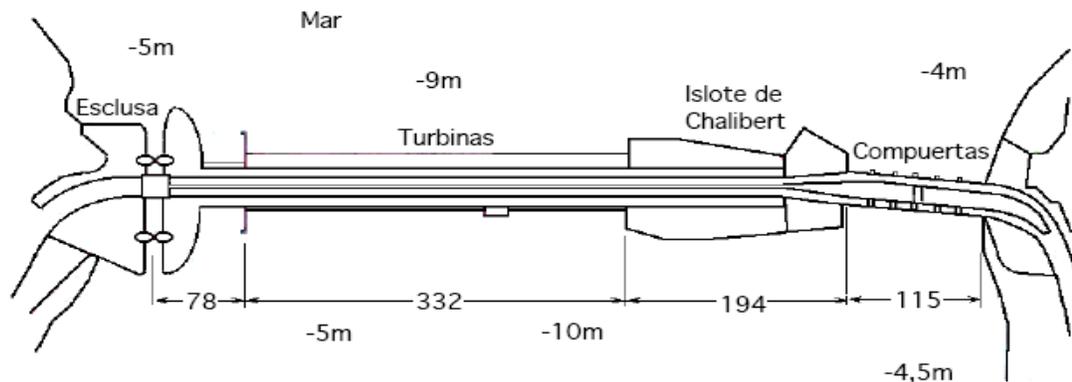
Para incrementar el tiempo en la planta de energía, los bulbos fueron designados para usarse como bombas, de este modo cuando el mar casi alcanza el nivel del reservorio, la fase de llenado es acelerada con el bombeado. Este suplemento sirve para incrementar el volumen de agua en el reservorio y por lo tanto, durante la próxima corriente, las turbinas serán actuadas con anticipación y por un largo tiempo.

Entonces, Electricité de France desarrolló un nuevo tipo de turbina, *bulb sets* (también conocidas como turbinas axiales) capaces de operar en ambas direcciones.

Uno de los problemas que hubo de solucionar en este proyecto fue el del tipo de turbina a utilizar, ya que las convencionales del tipo Kaplan, no eran las más adecuadas para condiciones de funcionamiento con caudales elevados y saltos reducidos y muy variables, además no son reversibles, por lo que su operatividad en un ciclo de doble efecto, con turbinaje y bombeo del embalse al mar y del mar al embalse, solo serían posible mediante conducciones

conmutadas que requieren obras muy voluminosas y costosas, y aún así, no permitirían el bombeo si no fuese mediante bombas independientes, lo que aumentaría el coste y crearía problemas de espacio.

Figura 2. **Dique de la central de Rance**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía mareomotriz*, 2011. p 14.

1.5.2. Rusia

Un proyecto ya realizado es el Proyecto Kislogubskaya, de Rusia. Esta central experimental, ubicada en el mar de Barentz, dispone de turbinas bulbo con una capacidad de 400 kilowatt, fue la segunda de esta clase en el mundo. Se empleó un método empleado en Rance, cada módulo de la casa de máquinas, incluidos los turbogeneradores, se fabricaron en tierra y se llevaron flotando hasta el lugar elegido y se hundieron en el lecho previamente elegido y preparado. Se puso en marcha en 1968 y envió electricidad a la red nacional.

El único problema es el elevado costo inicial por kilowatt de capacidad instalada, pero se deberá tener en cuenta que no requiere combustible, no contamina la atmósfera y se estima su vida útil en un siglo. Por todo esto, sería

interesante tomar el estudio de estas y otras energías renovables no convencionales para asegurar un futuro impredecible en Guatemala, donde aún no se toma en cuenta la energía mareomotriz.

1.5.3. Canadá

Blue Energy Canadá, desarrolló una propuesta para una defensa de 4 kilómetros de largo entre las islas de Samar y Dalupiri en el estrecho de San Berdino en las Filipinas. Pendiente de la aprobación del Gobierno, la planta de energía oceánica utilizará 274 turbinas clase Davids, cada una generando desde 7 megawatt a 14 megawatt con un total estimado de 2 200 megawatt de energía utilizando la cúspide de la marea y una potencia base de 1 100 megawatt. Usado para generar a grandes escalas energía renovable, el paso de San Berdino pudo ayudar a hacer de las Filipinas un exportador de energía eléctrica.

La planta de energía comenzará sobre el lado de Samar y cruza el canal al sur de la isla Dalupiri, las corrientes de mareas están por encima de los 8 nudos y las profundidades son del rango de los 47 metros. El fondo es relativamente plano a lo largo del canal, el área es propensa a tifones y la represa de marea es designada para resistir tifones, vientos de 240 kilómetros por hora y olas de 7 metros.

La otra está ubicada en el río Annápolis, el aprovechamiento se consigue con una turbina Straflo, con un consumo de 400 metros cúbicos por segundo, esta turbina es axial, de 4 palas, funcionando como turbina solo en un sentido, tiene mayor rendimiento que la Bulbo y no está todavía desarrollada para funcionar como bomba, por problemas inherentes a la estanqueidad del alternador.

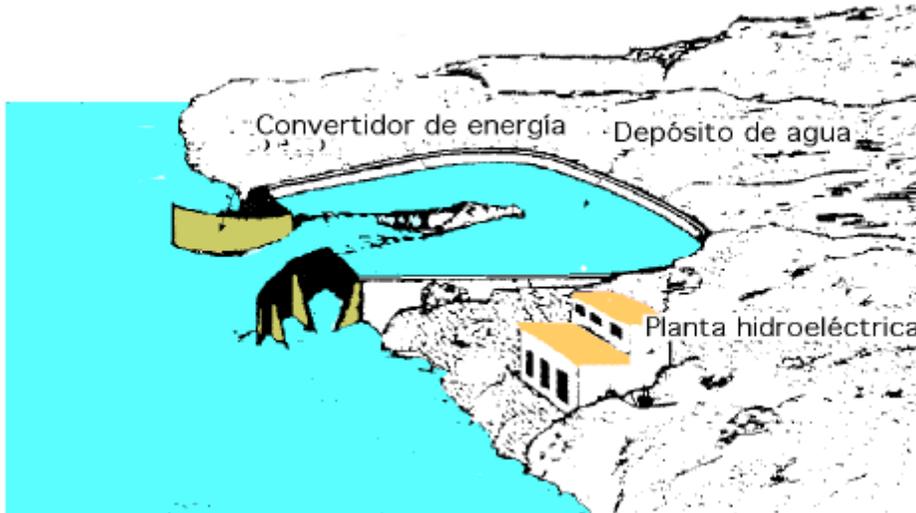
La innovación que introduce esta turbina axial con rodete Kaplan consiste en que los polos magnéticos inductores del alternador no van instalados en la prolongación del eje de la turbina, sino fijos a la periferia de los álabes, en la periferia del canal de flujo, es decir, el rotor y el estator están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

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

1.5.4. Noruega

Consiste en un colector formado por un canal horizontal convergente que concentra el oleaje y eleva el agua del mar a un embalse situado a unos metros por encima del nivel mar, convirtiendo la mayor parte de la energía de las olas en energía potencial, para su posterior restitución al mar a través de una turbina de hélice convencional. El prototipo de 400 kilowatt con un desnivel de 4 metros por encima del nivel medio del mar; está instalado en Toftestallen, Noruega, funcionando satisfactoriamente. La capacidad del embalse es de 8 500 metros cúbicos y alimenta una turbina hélice de 0,35 megawatt.

Figura 3. **Instalación Chapman**

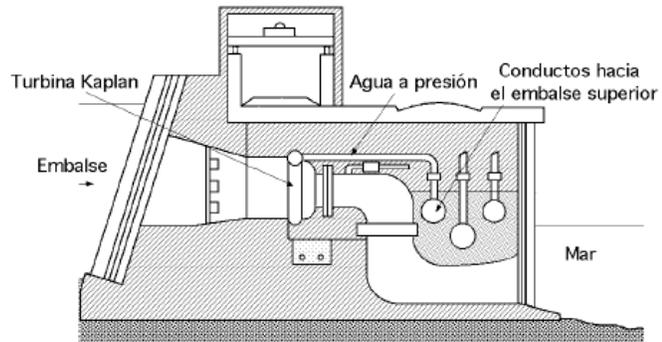


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 28.

La longitud total del canal es de 170 metros. La forma de la embocadura se ha conseguido mediante voladura de la roca existente y la parte estrecha, que corresponde a la mitad de la longitud total, se ha construido de hormigón. Ha funcionado durante 6 años, habiendo sido sometida a posteriores reparaciones.

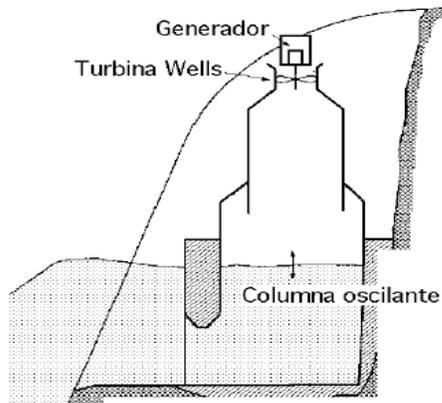
También se utilizó otro tipo de instalación, el dispositivo operó durante tres años satisfactoriamente, antes que fuera destruido por un fuerte temporal. Fue construido en un acantilado vertical de 30 metros y consistía en una base de hormigón y un tubo metálico de 10 metros de diámetro. Las olas penetraban por la parte inferior del cilindro y desplazaban hacia arriba la columna de aire, que impulsaba una turbina Wells auto rectificador de 0,5 megawatt instalada en el extremo superior del tubo.

Figura 4. **Equipamiento de la central de Noruega**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 28.

Figura 5. **Generador en acantilado**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 41.

2. EFECTOS AL MEDIO AMBIENTE

2.1. Visual

Al parecer este tipo de generación podría llegar a ocasionar daños al medio ambiente, no porque genere desechos peligrosos sino porque en algunos casos podría llegar a ocasionar daños a la vida marina al momento de modificar su medio ambiente que le rodea, esto podría ser al momento de instalar la maquinaria generadora de forma muy evidente en el paisaje, rompiendo así la armonía del lugar. No es un daño relativamente fuerte si se le compara con otros tipos de plantas generadoras ya existentes, como las plantas geotérmicas que secan arboles por los gases a altas temperaturas que expulsan, sequias en los ríos debido a las represas de las centrales hidroeléctricas.

El otro elemento relevante que puede ser afectado es el paisaje. La construcción de este tipo de estructuras en zonas bien conservadas y sin degradación antrópica resulta irreversible y deteriora en muchos casos los valores paisajísticos de las zonas de costa. A la hora de elegir un emplazamiento óptimo debe de tenerse en cuenta este aspecto como primordial para evitar degradar espacios naturales de gran valor.

Otros impactos ambientales pueden ser fácilmente corregidos tomando las necesarias precauciones, especialmente durante la fase de construcción de toda la infraestructura necesaria.

Figura 6. **Daño al medio ambiente**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011.
p 26.

2.2. Ambiental

Interesado sobre el cuidado del ecosistema del Río Rance, Electricité de Francia opera la planta de energía con cuidado para limitar su impacto sobre el medio ambiente. Sin tener en cuenta el consumo de la red de energía, Electricité de Francia siempre se esfuerza para ajustar el alto y bajo nivel de marea de la reserva acordado con el momento de la marea con lo que no se interrumpe el balance biológico del medio acuático.

Además la construcción de equipos generadores mareomotrices puede llegar a modificar las corrientes en el lugar y consecuentemente, la distribución geográfica de los sedimentos, dañando seriamente una forma de evolución

natural. Para este tipo de problemas es necesario hacer un estudio previo de impacto ambiental sobre la navegabilidad, fauna marina, la calidad de agua.

El efecto más destacado sobre los diferentes factores ambientales es el causado sobre las poblaciones de seres vivos que ven transformado su hábitat natural. La modificación de los ecosistemas se produce principalmente por la alteración del lecho marino motivado por la barrera creada. Este tipo de barreras provoca alteraciones en la dinámica litoral que pueden afectar a especies muy sensibles a variaciones del medio, alterando todo el equilibrio ecológico.

Un estudio previo del medio permite diagnosticar la composición exacta del ecosistema y los posibles efectos que puede tener sobre su ecología la construcción de diques. Un efecto indirecto y no desdeñable es la merma económica provocada en las poblaciones que tienen en los recursos naturales del mar una fuente importante de ingresos.

Para el establecimiento de los diques es preciso elaborar estudios biológicos exhaustivos para evitar perjuicios irreversibles derivados de la presencia de endemismos, especies protegidas o especies que pueden resultar vitales a los asentamientos humanos costeros.

La alteración del régimen hidrodinámico implica una menor dispersión de efluentes, lo que influye en el transporte de sedimentos. La amplitud de la marea en el estuario influye en el medio ambiente, una central mareomotriz puede reducir la máxima marea viva en un 50 por ciento y tiene un efecto menor sobre la marea muerta. La prevención de cambios en el ecosistema no está bien definida, ya que éstos dependen de cada emplazamiento.

Para hacer una previsión de los cambios físicos inducidos en el estuario, es necesario conocer las distribuciones de la salinidad, turbidez, corrientes contaminantes y nutrientes. Las partículas en suspensión reducen la penetración de la luz solar, lo que afecta negativamente a la vida natural del estuario.

El aprovechamiento en altamar, lejos de la costa, no implica ningún problema estético, habría que estudiar cómo afecta al oleaje en la vida marina, por cuanto éste asegura la circulación del oxígeno y de nutrientes en las aguas superficiales. El problema depende del sistema que se emplee. Las centrales que utilizan equipos patos por ejemplo pueden absorber casi la totalidad del oleaje, en una banda muy ancha de frecuencias, de forma que colocados en largas cadenas, como terminadores, pueden dejar el mar en calma. Menos efectos tienen los resonadores que absorben las olas de frecuencias determinadas, dejando pasar olas con otras frecuencias. Desde el punto de vista ecológico, también serían preferibles absorbedores puntuales, que no modifican demasiado el oleaje a sotavento.

Cuando el medio de transmisión de la energía es el aceite, como en el caso de los Patos, las pérdidas de éste pueden perjudicar el medio ambiente. El anclaje de los equipos transformadores en el fondo marino, sobre todo en el caso de los terminadores, puede actuar como una barrera para los flujos de sedimentos, que puede resultar en una alteración del fondo marino. También hay que tener en cuenta la posible presencia de grandes animales, que pueden dañar a las instalaciones, o ser dañados por éstas.

Resumiendo, los efectos sobre el medio ambiente dependerán estrechamente del tipo de dispositivo utilizado, pudiéndose citar en principio

algunos aspectos que deberían ser tenidos en cuenta en un proyecto de esta naturaleza.

- El clima marítimo se altera (sedimentos; ecosistema)
- Emisión de ruido; intrusión visual
- Efectos sobre la reproducción de algunas especies y sobre la sedimentación en costas y playas
- Riesgos para la navegación

3. TÉCNICAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS OLAS

3.1. Maneras de transformar la energía de las olas

Pocas son las instalaciones que se han ensayado en el mar a escala natural en el mundo, por lo que falta mucha experiencia operativa con prototipos para poder traer esta tecnología a Guatemala. En general, a medida que aumenta la distancia a la costa la densidad de energía es mayor, pero la supervivencia del equipo y las máquinas está más comprometida y existe una mayor complicación para el transporte de la energía generada debido a lo rústico del ambiente, por lo que hay que encontrar un balance entre la supervivencia de los elementos mecánicos y la densidad de energía. Son muchas las modalidades de transformar energía que permiten obtener energía del oleaje, aunque no está todavía claro cuáles son las opciones más favorables, realizándose el aprovechamiento de la energía de las olas en base a algunas de las siguientes metodologías.

3.1.1. Conversión primaria

Consiste en la extracción de la energía de las olas mediante sistemas mecánicos o neumáticos, convirtiendo el movimiento de las olas, en el movimiento de un cuerpo o en un flujo de aire. La energía del oleaje se puede aprovechar para mover flotadores en sentido vertical y en rotación. En aguas poco profundas se pueden aprovechar los movimientos horizontales del oleaje mediante flotadores o estructuras fijas. La energía de la ondulación del movimiento de las partículas del agua de una ola, se puede extraer mediante dispositivos tipo noria.

La oscilación del agua a causa del oleaje, dentro de una estructura semisumergida, se puede aprovechar por medios mecánicos o neumáticos, así como la variación de la presión causada por el oleaje, por debajo de la superficie del agua. En resonadores flotantes, como las boyas de navegación, se pueden combinar los efectos de resonancia en el tubo, con el movimiento vertical del flotador, dando como resultado un rendimiento energético mucho más favorable.

En dispositivos fijos, que tienen una abertura inferior en el tubo, orientada en la dirección de propagación de la ola, la energía que se aprovecha, utilizando la presión total de la ola, es aproximadamente el doble que en el caso anterior, en el que sólo se aprovechaba la presión estática.

3.1.2. Conversión secundaria

Consiste en la conversión de movimientos mecánicos o neumáticos en energía utilizable, generalmente electricidad. Los medios utilizados para ello son turbinas neumáticas e hidráulicas, dispositivos de transmisión mecánica, y de inducción magnética, a veces, el sistema se diseña exclusivamente para la desalinización del agua.

3.2. Clasificación de las distintas columnas de agua oscilante (OWC)

Esta rama de la energía mareomotriz es muy parecida a tener una turbina de aire conectada a un generador eléctrico, preferiblemente ubicada cerca de la costa. Su parte superior contiene aire en su cámara y la parte inferior está sumergida, al momento de que el aire es desplazado por la columna de agua produce movimiento a la turbina ubicada en la parte superior, creando energía mecánica por medio de la neumática.

- Por su posición relativa a la costa: OWCs en la costa, cerca del litoral o en altamar.
- Por su capacidad de producción energética, relacionada con el punto anterior; pueden ser grandes, medianos o pequeños aprovechamientos.
- Por su posición relativa a la dirección del oleaje, destacando:
 - Totalizadores o terminadores: OWCs largos con eje paralelo al frente del oleaje.
 - Atenuadores: OWCs largos con eje perpendicular al frente del oleaje.
 - Absorbedores puntuales: OWCs aislados de dimensiones reducidas, que aprovechan el efecto antena (concentración y convergencia del oleaje).
- Por su posición relativa al agua: OWCs fijos o flotantes, semisumergida o sumergidos.
- Según otros criterios, teniendo en cuenta la simetría del OWC, la capacidad de almacenamiento de energía, la capacidad de control, la supervivencia en tormentas, el impacto medio ambiental, la complejidad de la tecnología, materiales, eficiencia, mantenimiento, posibilidad de construcción modular.

La investigación actual de los OWCs está basada en los siguientes sistemas: columna oscilante, péndulo, tapchan, boyas mecánicas, *duck*, *sea clam*, cilindro bristol, *raft*, rompeolas sumergido.

3.3. Técnicas para aprovechar la energía de las olas

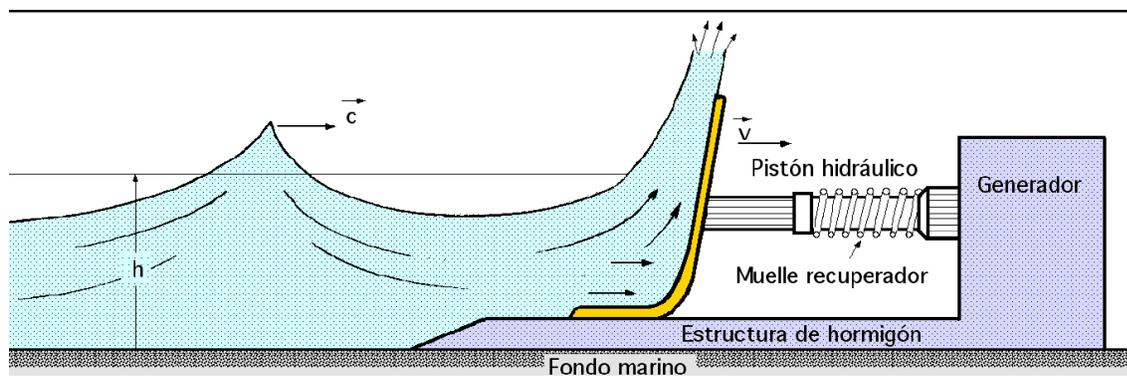
Hay muchas maneras de aprovechar la energía mecánica de las olas marinas, estas técnicas deben de decidirse según la ubicación del equipo

generador ya que dependen totalmente de ello para aumentar la eficiencia de la producción energética.

3.3.1. Empuje de la ola

En aguas poco profundas la velocidad horizontal de las olas no varía con la profundidad, la energía de las olas se puede absorber mediante un obstáculo que transmite la energía a un pistón, es un sistema poco usado.

Figura 7. Ejemplo de la utilización de la fuerza de empuje de una ola



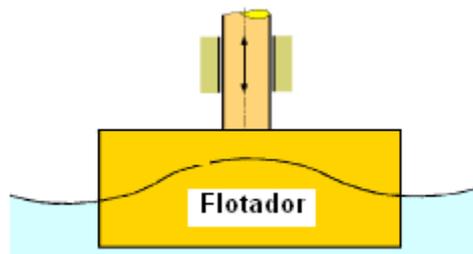
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía mareomotriz*, 2011. p 14.

3.3.2. Variación de la altura de la superficie de la ola

Situando estructuras flotantes que se mueven con las olas, sintonizadas de manera que puedan captar su energía. Se dispone de un gran número de los mismos para capturar la energía, de forma similar a la de un receptor de ondas de radio, ya que se basan en que cualquier proceso que pueda generar olas, también sirve para extraer su energía. Su pequeño tamaño resulta ventajoso y permite su fabricación en serie. La mayoría de estos aparatos

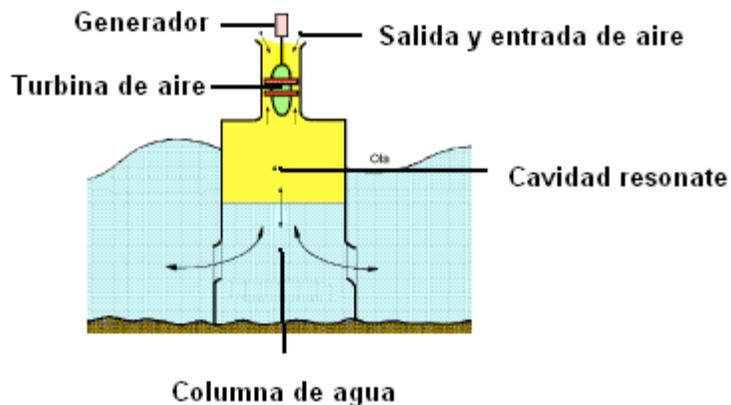
utilizan el efecto de bombeo que proporciona un flotador. Sus inconvenientes derivan principalmente de la fiabilidad de los caudales y de la interconexión eléctrica. Se les puede considerar aparatos de segunda generación.

Figura 8. **Esquema del aprovechamiento del cambio de altura**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 25.

Figura 9. **Partes un transformador de energía por medio de cambio de altura**



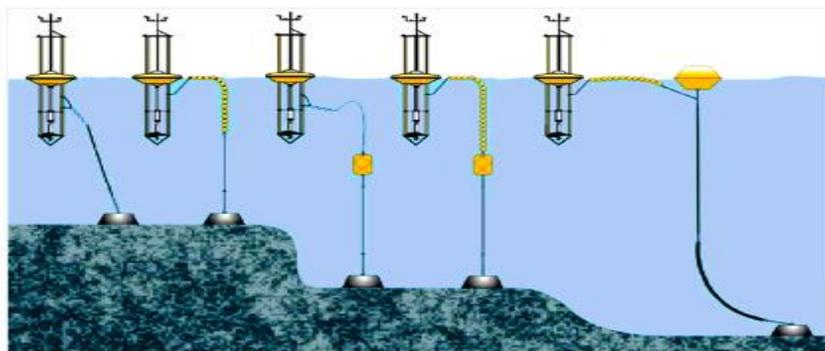
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 26.

3.3.3. Absorbedores puntuales

Son estructuras pequeñas en comparación con la ola incidente, suelen ser cilíndricas y, por lo tanto, indiferentes a la dirección de la ola, generalmente se colocan varias agrupadas formando una línea. Los atenuadores y los absorbedores puntuales pueden captar energía de un frente mayor que el propio frente que ellos oponen, mediante un efecto antena. Las válvulas de la cámara de alta presión permiten la entrada de agua en la misma, siendo la presión exterior más alta que la presión interna de la cámara. Si la presión exterior fuese menor que la interior las válvulas permanecerían cerradas y no habría flujo.

De igual forma, las válvulas en la cámara de baja presión solo permiten que el agua fluya si la presión interior es más alta que la exterior; si la presión interior es menor que la exterior las válvulas siguen estando cerradas y no hay flujo. Como las cámaras están a diferente presión, el agua fluye de la de mayor presión a la de menor presión, a través de las turbinas.

Figura 10. **Aplicación del concepto absorbedores puntuales**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (II)*, 2011.
p 50.

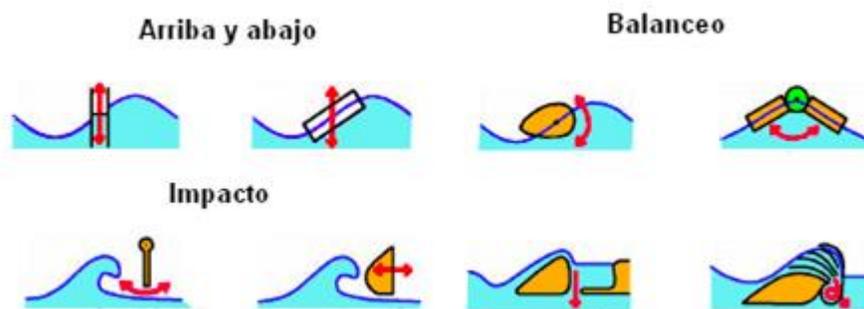
3.3.4. Equipos para variación de la presión bajo la superficie de la ola

Son los sistemas de columna de agua oscilante que consisten en una cámara abierta al mar, que encierra un volumen de aire que se comprime y expande por la oscilación del agua inducida por el oleaje, el aire circula través de una turbina que puede ser bidireccional. Se les puede considerar aparatos de primera generación.

Los sistemas activos son aquellos en los que los elementos del dispositivo, al moverse a impulsos del oleaje, generan energía aprovechando el movimiento relativo entre sus partes fijas y móviles.

Los sistemas pasivos son aquellos en los que la estructura permanece inmóvil, generándose energía directamente, a partir del propio movimiento de las partículas de agua.

Figura 11. Distintos movimientos provocados por las olas



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 26.

4. CENTRALES MAREOMOTRICES

4.1. Totalizadores o terminadores

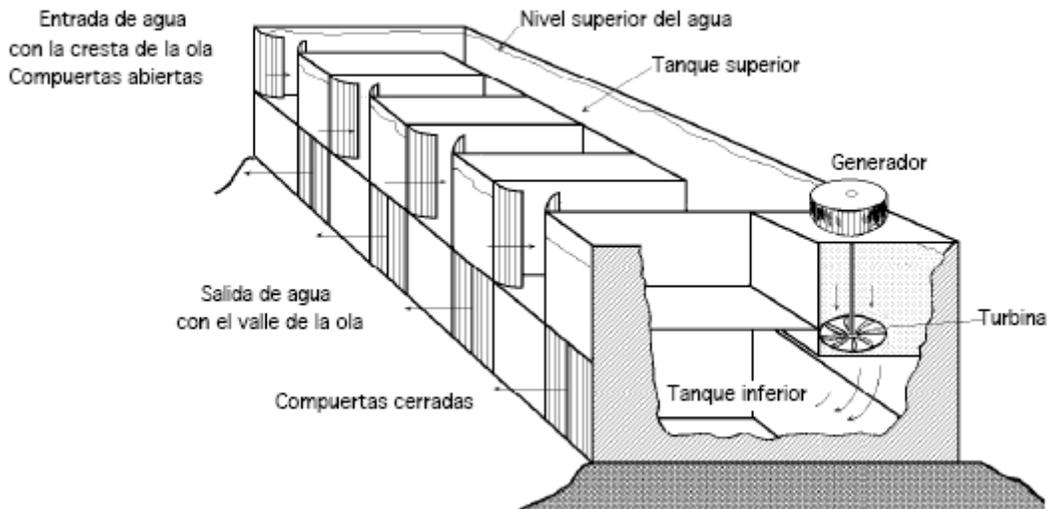
Están situados perpendicularmente a la dirección del avance de la ola (paralelos al frente de onda) y pretenden captar la energía de una sola vez, son los más estudiados. Se puede considerar algunos.

4.1.1. 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. Es un totalizador pasivo, consiste en una gran estructura tipo depósito construida sobre el lecho marino, que consta de dos cuerpos o tanques, uno superior y otro inferior, separados del mar por unas compuertas.

Las compuertas superiores se abren con la cresta de la ola, penetrando grandes cantidades de agua en el tanque superior, mientras que las compuertas inferiores permiten la salida del agua del tanque inferior con el valle de la ola, ambos tanques están comunicados por una turbina la cual funciona al hacerse el trasvase de agua del tanque superior al inferior, de acuerdo con el movimiento de las olas.

Figura 12. **Rectificador Russell**



Fuente: <http://fjarabo.webs.ull.es/TER/MARIN/FIGUR707.HTM>. Consulta: 25 marzo de 2011.

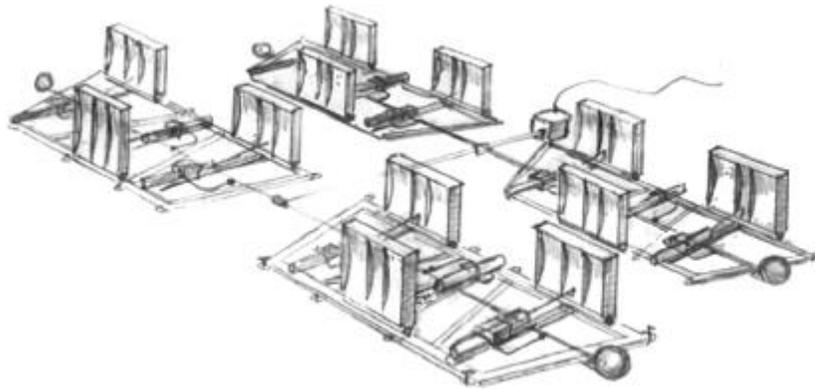
4.1.2. **Péndulo**

El péndulo es un dispositivo apto para ser instalado en un rompeolas. Consiste en una cámara fabricada de hormigón de forma que el frente hacia el mar está provisto de una placa rígida de acero, articulada en su parte superior, que puede oscilar ligeramente.

En el interior de la cámara, de una profundidad del orden de un cuarto de longitud de ola, se produce una ondulación estacionaria que mueve la placa, cuyas oscilaciones se transmiten y absorben por un dispositivo oleo hidráulico, estimándose la eficiencia primaria de éste dispositivo que son olas-aceite, en un promedio del 35 por ciento y la eficiencia total en un 20 por ciento para olas regulares de período igual al período natural del péndulo la eficiencia puede

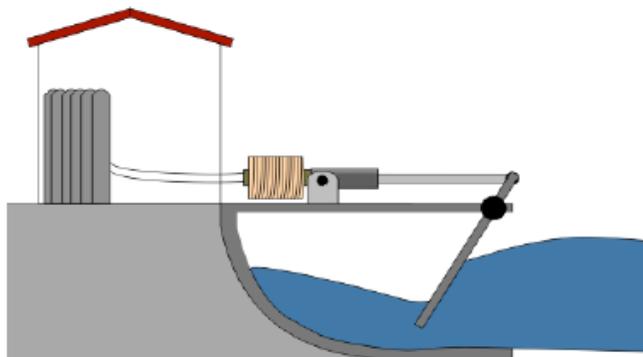
llegar al 100 por ciento. En la planta piloto de Muroran, Hokkaido, Japón se han observado eficiencias del orden del 50 por ciento.

Figura 13. **Esquema de un equipo de péndulo**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 27.

Figura 14. **Funcionamiento de un péndulo**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 28.

Otra variante del péndulo consiste en un cajón y una placa vertical, articulada en su extremo superior que proporciona un pequeño giro. El eje de la articulación está unido a un motor hidráulico que acciona un generador.

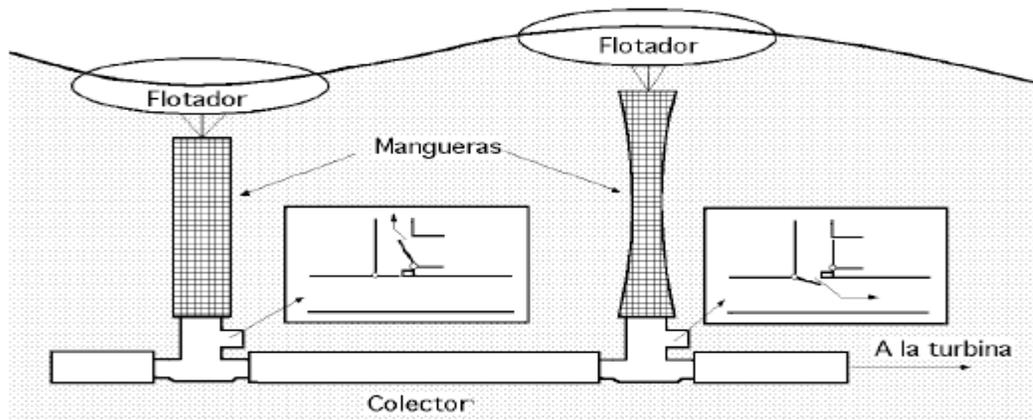
4.2. Sistemas de bombeo

Por la baja generación, en general son utilizadas en pequeña escala, esto se debe a la simplicidad de algunos diseños. El poder aumentar el tamaño del equipo generaría un costo aun mayor con un plazo mas largo para recuperarse la inversión.

4.2.1. Bomba de manguera

La bomba de manguera, desarrollada en Suecia en los años 80, aprovecha las características elásticas de una manguera de elastómeros. Cuando la manguera, provista de válvulas rectificadoras, se estira, su volumen interior disminuye sise ata uno de sus extremos al fondo del mar, y el otro a un cuerpo flotante, se dispone de una bomba accionada por el desplazamiento vertical del flotador.

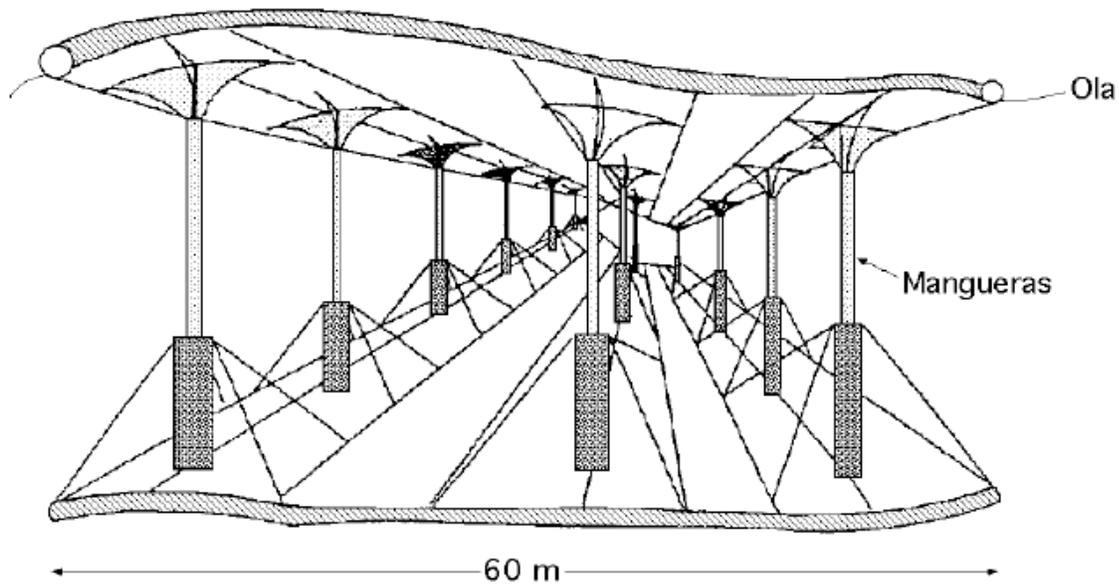
Figura 15. **Equipo de una bomba de manguera**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 29.

El diseño actual consiste en varias unidades conectadas en serie, que suministran agua de mar a una turbina Pelton, a presiones entre 1 megapascal y 4 megapascales, el dispositivo suministra electricidad a boyas de navegación. Recientemente se ha ensayado un sistema de 110 kilowatt que incorpora un tanque para almacenamiento de agua, con el fin de su posterior utilización en una turbina hidráulica. El sistema Lilypad es un dispositivo flotante de grandes dimensiones, que utiliza un sistema de mangueras en serie, conectadas en sus extremos a membranas deformables, unas flotantes o ligeramente sumergidas, y otras sumergidas fuera de la influencia del oleaje.

Figura 16. **Sistema Lilypad**

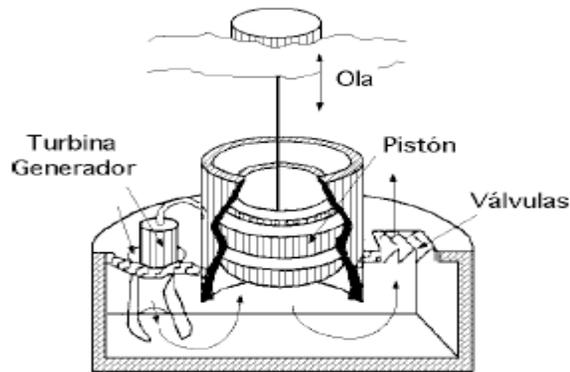


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 29.

4.2.2. **Bomba de pistón**

Este sistema consta de un cilindro con pistón en una estructura de hormigón ubicada en el fondo del mar, un flotador y un cable que une el pistón y el flotador. El pistón asciende por la acción del oleaje y desciende por gravedad, y está provisto de válvulas rectificadoras a la entrada del agua generando un flujo de agua que se aprovecha en una turbina hidráulica. Se construyó un prototipo de 3 kilómetros de la costa de Hanstholm, Dinamarca, que fue destruido por un temporal, tenía una base cilíndrica de hormigón armado de 9 metros de diámetro, y estaba anclado a 30 metros de profundidad.

Figura 17. Esquema de bomba de pistón utilizada en Hanstholm

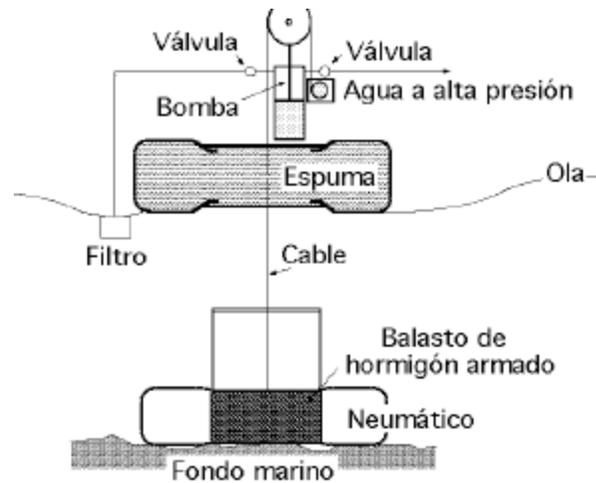


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 30.

El cuerpo flotante, también de hormigón, de 6 metros de diámetro, estaba conectado con el cilindro, en el fondo, a través de un cable. La electricidad, que se generaba en una turbina sumergida y un generador estándar, se enviaba a la costa a través de un cable. Una central ficticia de bombas de pistón, constituida por 2 640 flotadores de 10 metros de diámetro, 100 toneladas métricas de peso, con un pistón de 55 toneladas métricas, y una estructura de hormigón en el fondo de 3 000 toneladas métricas, generaría 350 megawatt.

Para la desalación del agua del mar existen prototipos con bombas de pistones, en fase de experimentación. El de Delbuoy consta de seis bombas de 2,1 metro de diámetro, que producen 5,7 metros cúbicos de agua dulce por día, con olas de 1 metro y período entre 3 y 6 segundos.

Figura 18. **Diseño de bomba de pistón montada sobre boya**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 30.

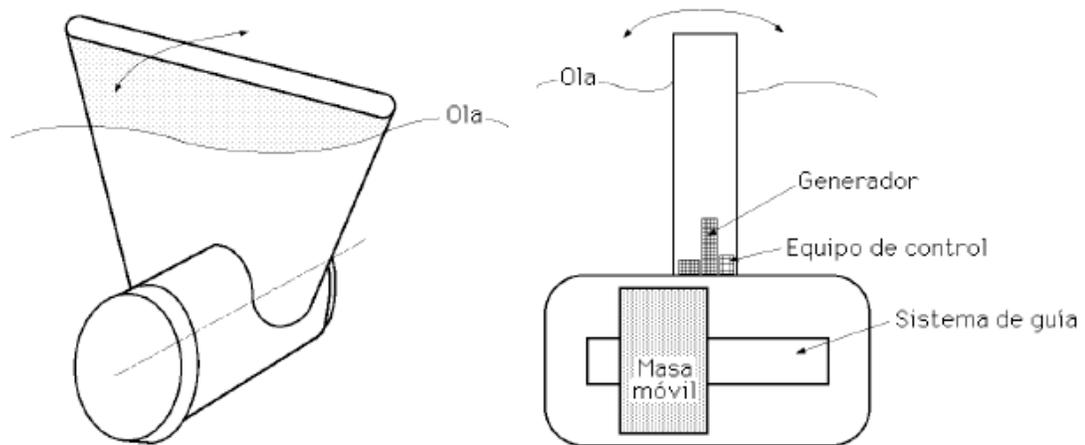
En otros sistemas, la bomba de pistón estaba montada sobre la boya, tanto la boya como la plataforma de anclaje, están construidas con neumáticos usados.

4.3. **Sistemas hidráulicos**

Este sistema consta de un flotador en forma de remo en posición vertical, conectado rígidamente a un casco sumergido y anclado al fondo del mar, como una boya. El casco contiene una masa, que actúa como pistón dentro de un cilindro, que puede moverse sobre un eje en la dirección de las olas, produciéndose un flujo de aceite a alta presión, para su utilización como fluido en una turbina hidráulica. El casco metálico, tiene 23 metro de altura y pesa 1 625 toneladas métricas, de las que 1 250 toneladas métricas corresponden a la masa de reacción. El Frog, actualmente poco desarrollado,

se caracteriza por una alta eficiencia en conversión primaria, hecho comprobado en pruebas con olas regulares.

Figura 19. **Sistema Frog**

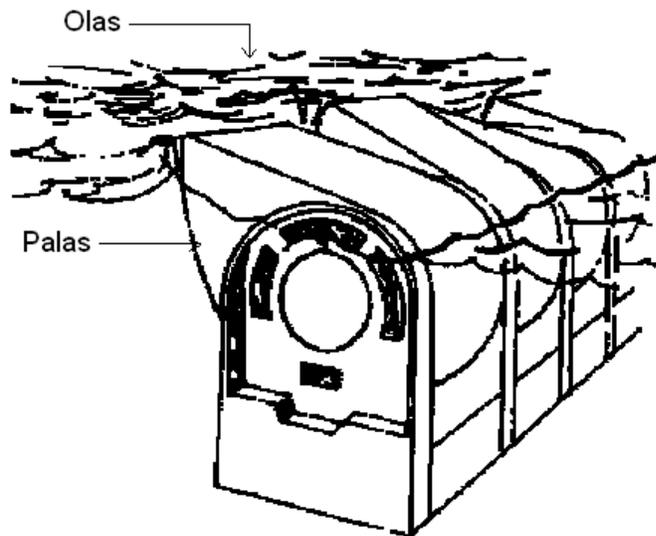


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 31.

4.3.1. **El pato de Salter**

Se puede considerar como un totalizador activo para el aprovechamiento de las olas a gran escala en altamar, desarrollado en la década de los 70, en Edimburgo, consiste en un flotador alargado cuya sección más estrecha se enfrenta a la ola con el fin de absorber su movimiento lo mejor posible, mientras que su parte posterior es cilíndrica, para evitar pérdidas de energía por rozamiento. Los flotadores giran bajo la acción de las olas, lentamente, alrededor de un eje cuyo movimiento de rotación acciona una bomba de aceite que se encarga de mover una turbina.

Figura 20. **Central de tipo pato Salter**



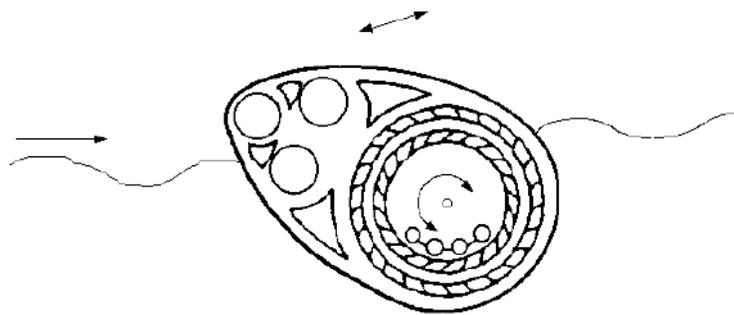
Fuente: <http://fjarabo.webs.ull.es/TER/MARN/FIGUR708.HTM>. Consulta: 25 de marzo de 2011.

El sistema consiste en péndulos invertidos, articulados en su parte inferior y montados sobre un eje que permite movimientos en dirección del oleaje, en la que una parte actúa como flotador de balanceo manteniendo una cierta rigidez, es decir, no se ve influenciada por las olas permaneciendo fija, mientras que la parte activa consiste en unos flotadores en forma de leva que se mueven accionados por el ritmo de las olas, creándose en los mismos un movimiento oscilatorio, que acciona unos sistemas oleo hidráulicos que es como un movimiento alternativo, conectados a una turbina, originando el giro del eje de la misma y, por lo tanto, la generación de energía.

El módulo de una supuesta central podría estar formado por 54 cilindros flotantes de hormigón, de 14 metros de diámetro y 90 metros de longitud, de 11 000 toneladas de peso cada uno, anclados a 100 metros de profundidad. Sobre cada uno de los cilindros irían montados dos cascos, los patos, que

podrían rotar alrededor de los cilindros en respuesta a las olas. Cada pato estaría provisto, en su interior, del equipo mecánico y eléctrico propio para la generación de electricidad. La conversión secundaria se realizaría por un sistema hidráulico de aceite.

Figura 21. **Vista interna de un tipo pato**



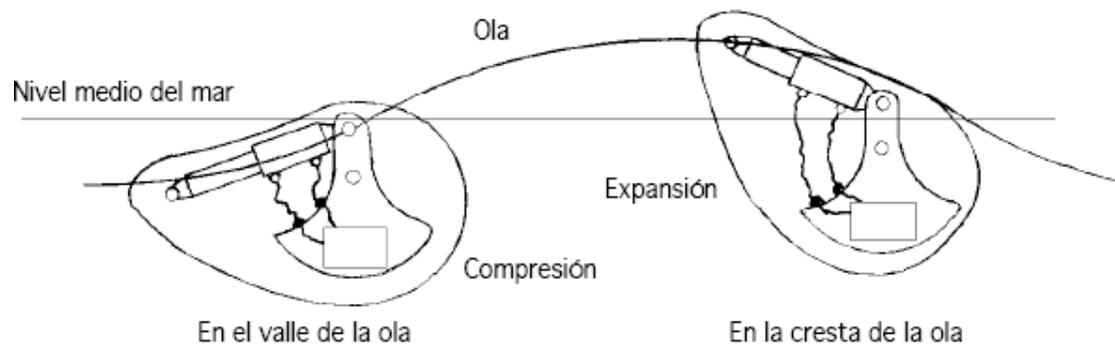
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011.
p 32.

Una de las características del tipo pato sería una alta eficiencia en la conversión primaria, alcanzando casi el 100 por ciento en condiciones óptimas. Gran parte de la tecnología de conversión es nueva y necesita investigarse aún mucho más, su aplicación real queda para un futuro lejano.

Este dispositivo aprovecha la energía de una forma muy simple debido a que las olas golpean contra las palas colectoras, de esta forma la misma realizan un medio giro. El nombre se debe a que las palas tienen forma de cuerpo pato, lo que esta forma tan hidrodinámica produce es actuar de manera que el agua las pueda hacer girar de manera fácil y así oponer la menor resistencia posible en el movimiento. El movimiento realizado permite generar aire a presión el cual será almacenado en reservas para luego conectarse a una turbina neumática y generar energía.

En el siguiente gráfico se observa las palas colectoras se encuentran en reposo, en cambio en el segundo plano han absorbido la energía de las olas.

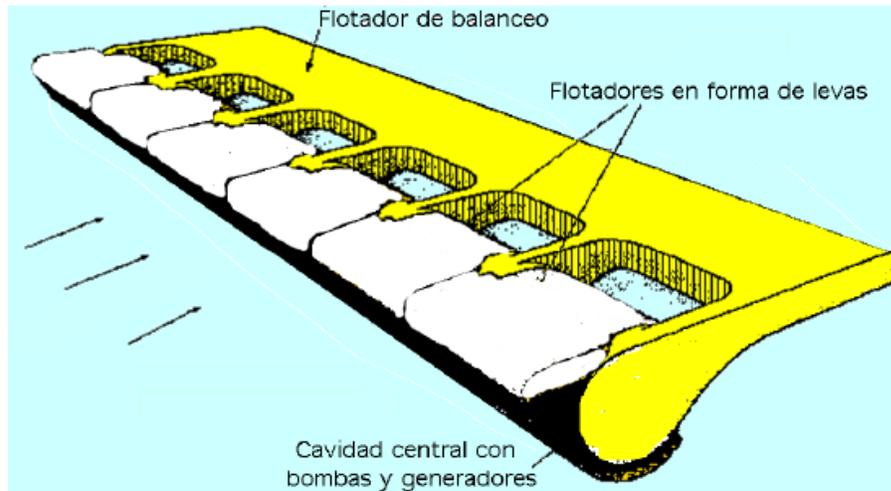
Figura 22. **Movimiento de las palas generada por las olas**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 32.

Lastimosamente este tipo tiene su inconveniente y recae en que depende de la velocidad y fuerza de las olas, además la otra dificultad que presenta este sistema es la generación de electricidad con los lentos movimientos que se producen.

Figura 23. Otra forma de pato Salter



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011.
p 32.

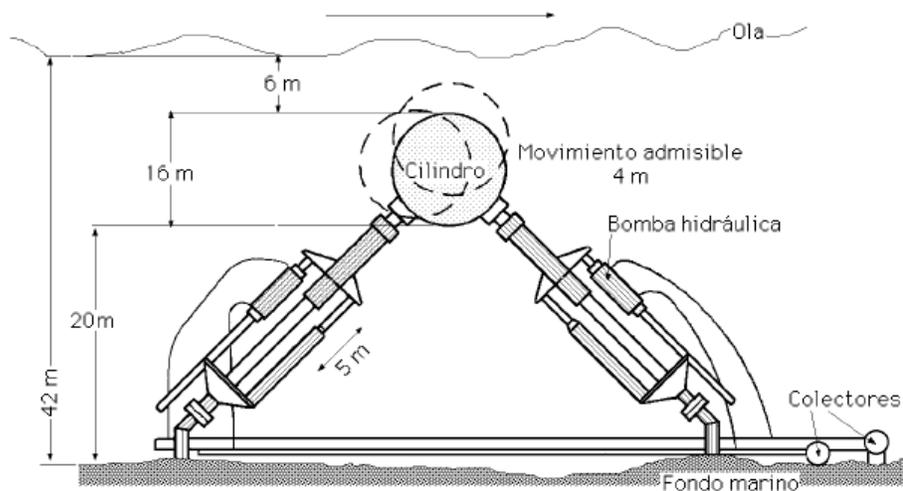
4.3.2. Cilindro Bristol

El cilindro, desarrollado por la universidad de Bristol, es otro concepto para grandes aprovechamientos. Una planta que funcionase con este sistema constaría de 276 módulos o cilindros, cada cilindro mediría 100 metros de longitud y 16 metros de diámetro, su parte superior estaría situada a 6 metros de la superficie del agua, y anclada a 40 metros de profundidad, por lo que el cilindro totalmente sumergido, no tiene su estructura sometida a fuerzas excesivas durante las tormentas. En la estructura de anclaje están incorporadas las bombas hidráulicas, que permiten un desplazamiento vertical.

Expuesto al oleaje, el cilindro describe un movimiento circular, en respuesta al movimiento orbital de las partículas de agua dentro de la ola. El medio de bombeo, agua del mar, sería transportado por tuberías de 1,2 metros

a seis plataformas por encima del nivel del mar, cada una equipada con 3 turbinas Pelton de 120 megawatt. La potencia nominal de la instalación sería 2 gigawatt, habiéndose demostrado que la extracción podría alcanzar el 100 por ciento con una adecuada combinación de movimientos.

Figura 24. **Cilindro Bristol**



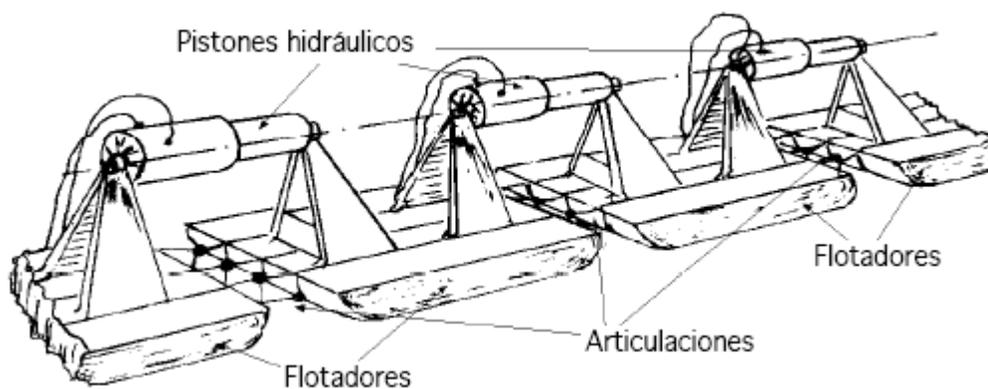
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 32.

4.3.3. **Balsa cockerell**

Son gigantescas plataformas flotantes, articuladas entre sí, (dos o más), unidas mediante mecanismos hidráulicos (cilindro-émbolo), que reciben el impacto de las crestas de las olas, de forma que los movimientos de giro parcial de los flotadores accionados por ellas, se aprovechan para mover un fluido mediante el sistema (cilindro-émbolo) citado, colocado en las articulaciones que unen los flotadores (movimiento alternativo), accionando el fluido a presión una turbina.

La cual 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.

Figura 25. **Partes de una balsa cockerell**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011.
p 33

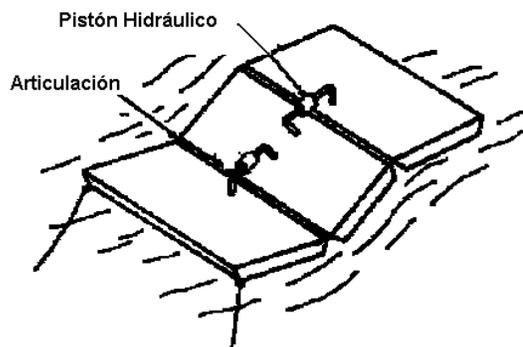
Este tipo de balsa funciona como una máquina hidráulica se podría decir ya que esta en gran parte de su función es una transformación de energía a través de movimientos hidráulicos. El movimiento de balanceo producido por las balsas es utilizado para comprimir fluido hidráulico, el mismo será enviado a una turbina hidráulica la cual generará energía eléctrica.

En la unión de las balsas se ubican los pistones hidráulicos, cuando se produce una diferencia de altura entre las mismas, dada por el paso de la ola, se produce una compresión de fluido. Los pistones son de doble efecto, es decir comprimen el fluido en ambos sentidos logrando así un aprovechamiento muy significativo ya que aprovecha la ida y el regreso del pistón para ambos

movimientos en una ola. El número óptimo de flotadores es de 3 y el tamaño óptimo del sistema es de 100 metros por 50 metros, para conseguir potencias de 1 a 2,5 megawatt. Su eficiencia teórica puede alcanzar el 90 por ciento. En ensayos con prototipos se han encontrado eficiencias del orden del 40 por ciento al 50 por ciento. Dadas sus gigantescas dimensiones y las inmensas fuerzas que actúan sobre el anclaje, hacen que este sistema no resulte competitivo.

Además de ser muy sencillas y prácticas este tipo de máquinas las centrales las usan en gran medida en áreas marítimas y son muy fáciles de instalar ya que no usan una base fija para su montaje, haciendo de esta ventaja un gran ahorro al momento de su instalación ya que no hay que tomar en cuenta muchos estudios como lo sería una con cimentación en el mar. Su principal virtud es que solo es necesario colocarla en el agua y automáticamente se orientara en el sentido de las olas. Por su facilidad para hermetizarlo del agua marina hace muy fácil su trabajo de generación eléctrica.

Figura 26. **Equipo de una central tipo balsa cockerell**

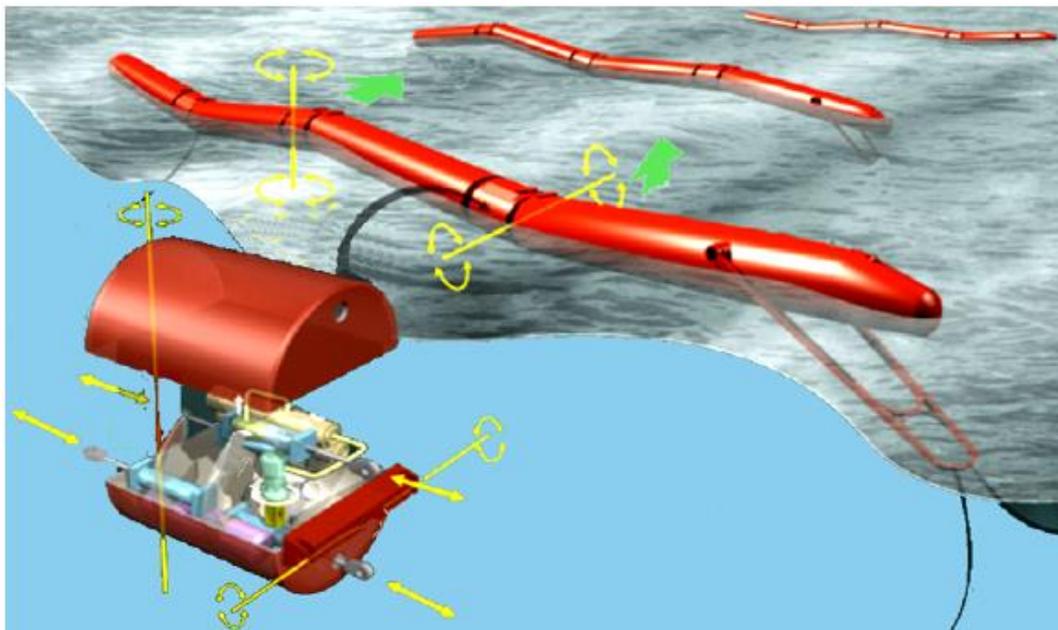


Fuente: <http://energia-mareomotriz.html>. Consulta: 25 marzo de 2011.

4.3.4. Serpiente marina Pelamis

Es una estructura semisumergida articulada, compuesta por módulos cilíndricos unidos de tal forma que el movimiento inducido por la ola en estas uniones se transmite a unos émbolos hidráulicos que bombean aceite a alta presión a unos sistemas electrohidráulicos que generan electricidad. Se pueden conectar juntos varios dispositivos estando unidos por la orilla y al fondo del mar mediante cables. La máquina se mantiene en posición mediante un sistema de amarre que combina flotadores y lastre, de forma que la cabeza haga frente a las olas. El prototipo genera 750 kilowatt, tiene 120 metros de longitud y 3,5 metros de diámetro, consta de tres módulos de conversión de energía, cada uno de 250 kilowatt.

Figura 27. **Pelamis**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011.

p 34.

Cada módulo contiene un sistema electrohidráulico completo y un generador de energía. El pelamis ha concluido y cumplido por completo con todos los aspectos del programa que se le plantearon, es técnicamente correcto y, una vez que el desarrollo y las fases de demostración han sido completados satisfactoriamente, puede afirmarse sin duda, que es económicamente factible.

Una de las máquinas más ingeniosas para transformar la energía mecánica del movimiento ondulatorio de las olas del mar, única en su estilo. Se trata sin duda de la iniciativa más seria llevada a cabo para obtener energía eléctrica de esta importante fuente de energía renovable que son las olas.

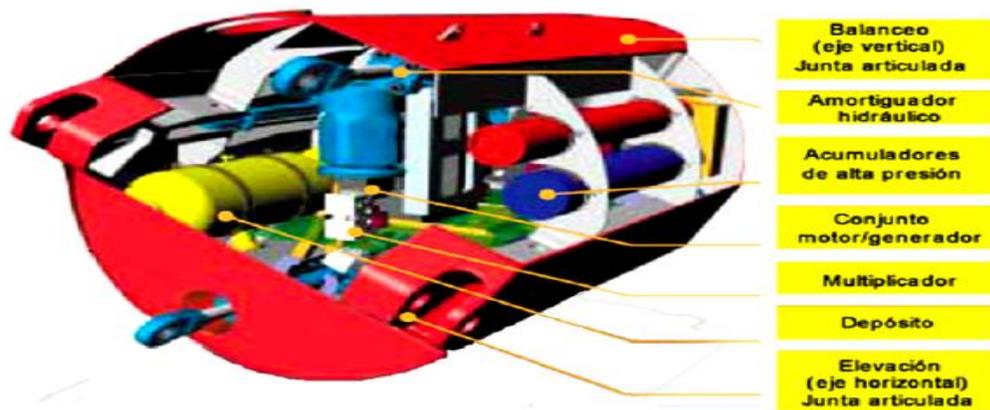
La primera central de aprovechamiento de la energía de las olas en el mundo se esta llevando a cabo en Aguçadoura norte de Portugal instalada a unos 8 Kilómetros de la costa. La nueva central tendrá una potencia de 2,25 megawatt y será capaz de suministrar electricidad a hasta 1 500 familias.

Diseñada por la empresa escocesa Ocean Power Delivery líder mundial en esta tecnología. La central esta formada por una serie de grandes tubos de acero denominados Pelamis en honor a una serpiente marina. Estos componentes quedan semisumergidos en el mar y son los encargados de transformar el movimiento de las olas en energía eléctrica.

Los Pelamis están formados por cuatro cuerpos articulados por tres bisagras en las cuales están alojadas unas bombas hidráulicas. Cuando una ola pasa por el pelamis el vaivén al que queda sometido provoca que las bisagras se doblen y que las bombas hidráulicas entren en acción enviando un fluido a alta presión hasta el generador hidráulico que produce energía eléctrica. Cada pelamis es capaz de generar una energía de 750 kilowatt que

se hace llegar a tierra a través de unos cables submarinos, siendo esta su mayor debilidad debido a las pérdidas.

Figura 28. Partes de una Pelamis



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 34.

Por tanto en resumen, toda la estructura esta amarrada y anclada al lecho marino mediante cableados especiales unidos a pesadas anclas. Cada bloque esta unido por un sector bisagra encargado de generar electricidad. Los sectores bisagras, además de flexionarse en sentido vertical, también lo hacen horizontalmente.

- Inconvenientes
 - Impacto visual sobre el paisaje costero
 - Localización puntual
 - Dependiente de la amplitud de las olas
 - Traslado de energía muy costoso
 - Efecto negativo sobre la flora y la fauna.

- Ventajas
 - Renovable
 - No contamina
 - Silenciosa
 - Bajo costo de materia prima
 - No concentra población

4.4. Sistemas neumáticos

Las ondas marinas poseen la capacidad de almacenar su energía y trasladarse grandes distancias sin perder prácticamente su potencia, por lo que los sistemas neumáticos se convierten en los de producción más constante.

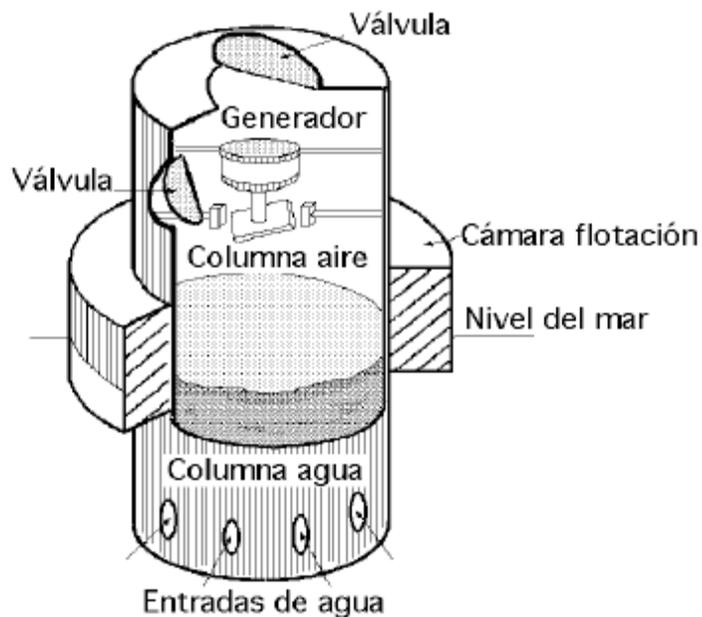
4.4.1. Boya de Masuda

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. En la actualidad, en el mundo existen cerca de 700 boyas de navegación, cuyas necesidades en energía se satisfacen por medio de convertidores neumáticos de pequeña potencia. Fueron estos los primeros dispositivos con los que empezaron a utilizar la energía de las olas en alta mar con el objeto de garantizar la seguridad de navegación.

El extremo superior del tubo está abierto y se encuentra debajo del agua, el superior, también abierto, da a la cámara del turbogenerador neumático. Cuando la boya sube y baja junto con las olas, las oscilaciones del nivel de agua dentro del tubo crean un tiro o corriente de aire. En este momento, antes

de que cambie el nivel de agua dentro del tubo, en él se produce rarefacción, debido a la cual el aire de la atmósfera penetrará en el tubo por las válvulas de la cámara. Cuando a la boya se acerca la depresión de la ola, ella baja por su propio peso y en este semiperíodo, el agua expulsa aire del tubo central a través de las válvulas de salida de la cámara del turbogenerador.

Figura 29. Partes de una boya Masuda



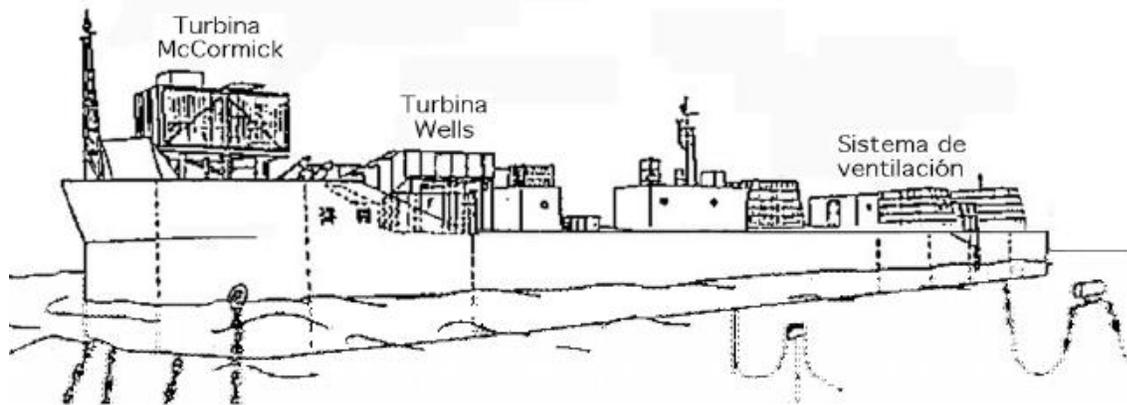
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 42.

4.4.2. Barco flotante

La instalación está montada en una barcaza de unos 8 metros de longitud y 12 metros de anchura, donde cada grupo está formado de dos cámaras de aire para captar la energía de las olas, una turbina y generador eléctrico montado en un mismo árbol con la turbina. Sus características es que

tiene 1,4 metros de diámetro y cuenta con 60 paletas, el fondo de la barcaza tiene 22 orificios para la entrada de las olas a las cámaras de aire.

Figura 30. **Barco con distintas turbinas instaladas**



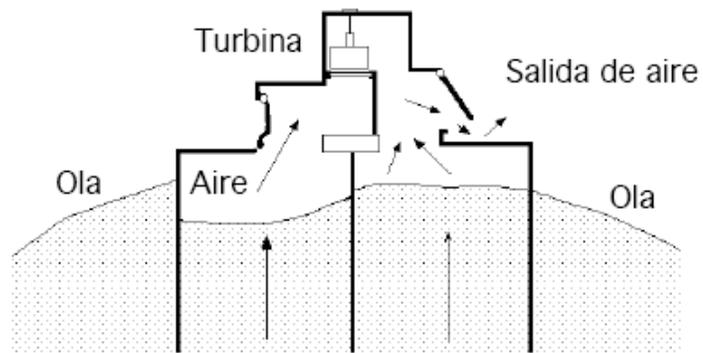
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 42.

Su forma de funcionamiento es un poco mas sofisticado se podría decir con respecto a las anteriores mencionadas, se explicará paso a paso a continuación. Al pasar las crestas de las olas superficiales, asciende el nivel del agua en las cámaras de aire y gracias a lo cual se produce la compresión del aire. Por esta razón, la válvula se cierra y se abre. Las flechas indican la dirección del flujo de aire en la figura 31 b. Se ve que el flujo de aire pasa de la cámara a través de la turbina transmitiendo a esta la energía obtenida de la cresta de la ola. Luego de realizar el trabajo en la turbina, el aire sale por la válvula a la atmósfera.

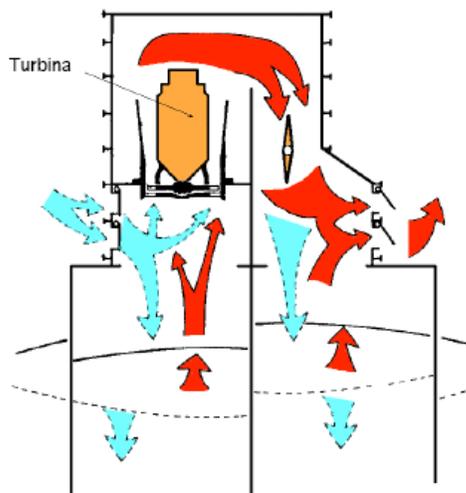
La velocidad máxima del flujo de aire al aproximarse a la turbina alcanza 100 metros por segundo o un poco más, según lo han demostrado algunos de los oscilogramas. Cuando pasa la depresión de la ola, es decir, cuando

desciende el nivel del agua, en las cámaras y se produce rarefacción de aire. Por eso el aire de la atmósfera entra a las cámaras a través de la válvula, permaneciendo cerrada en este semiperíodo.

Figura 31. **Esquema del funcionamiento a) Inicio b) Funcionamiento c) Final**

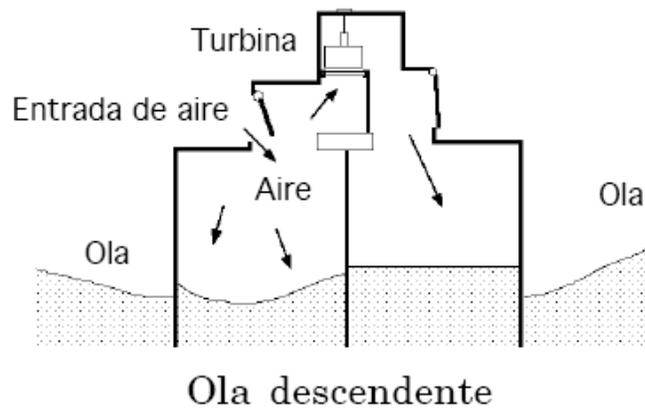


a)



b)

Continuación de la figura 31.



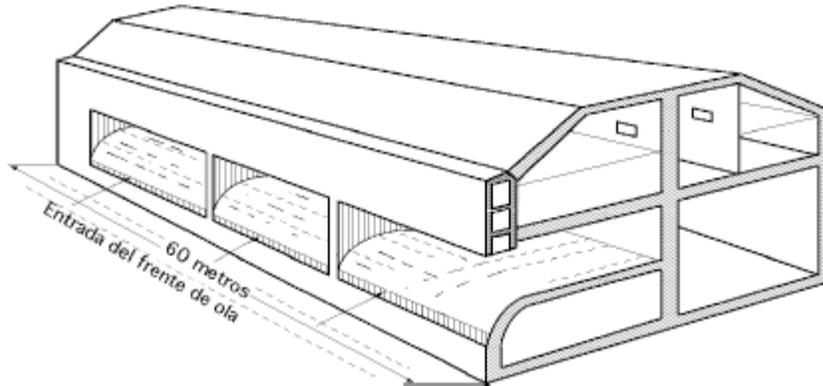
c)

Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011.
p 42.

4.4.3. NEL

El National Engineering Laboratory, NEL por sus siglas en inglés, se proyectó utilizando tecnología y equipos convencionales, se pretendía ubicarlo en aguas poco profundas para evitar el impacto de temporales fuertes, a costa de reducir la disponibilidad del oleaje. Funciona según el principio de la cavidad resonante de forma que mediante un sistema de válvulas se consigue que el aire que atraviesa la turbina circule siempre en el mismo sentido.

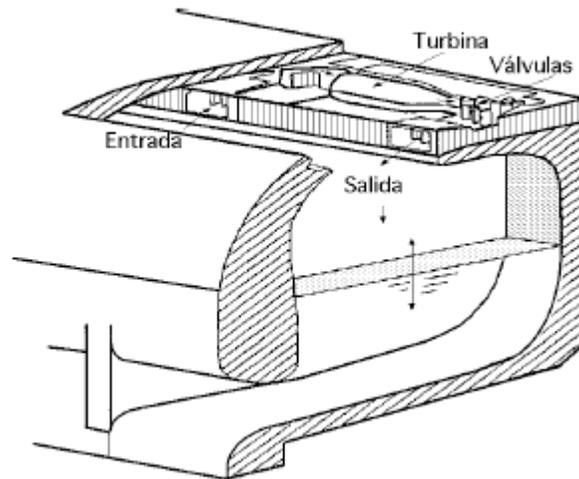
Figura 32. **Esquema de NEL**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 39.

Se presentan vistas de detalle, general e interno del convertidor NEL, consiste en una estructura de hormigón prefabricado, parcialmente sumergido, abierto al mar por debajo de la superficie del agua, el aire encerrado y comprimido en la estructura acciona una serie de turbinas que tendrán una potencia de 2 gigawatt y consta de 606 módulos de 64 metros de longitud cada uno, formando líneas continuas de barreras orientadas en la dirección principal del oleaje.

Figura 33. Interior de NEL

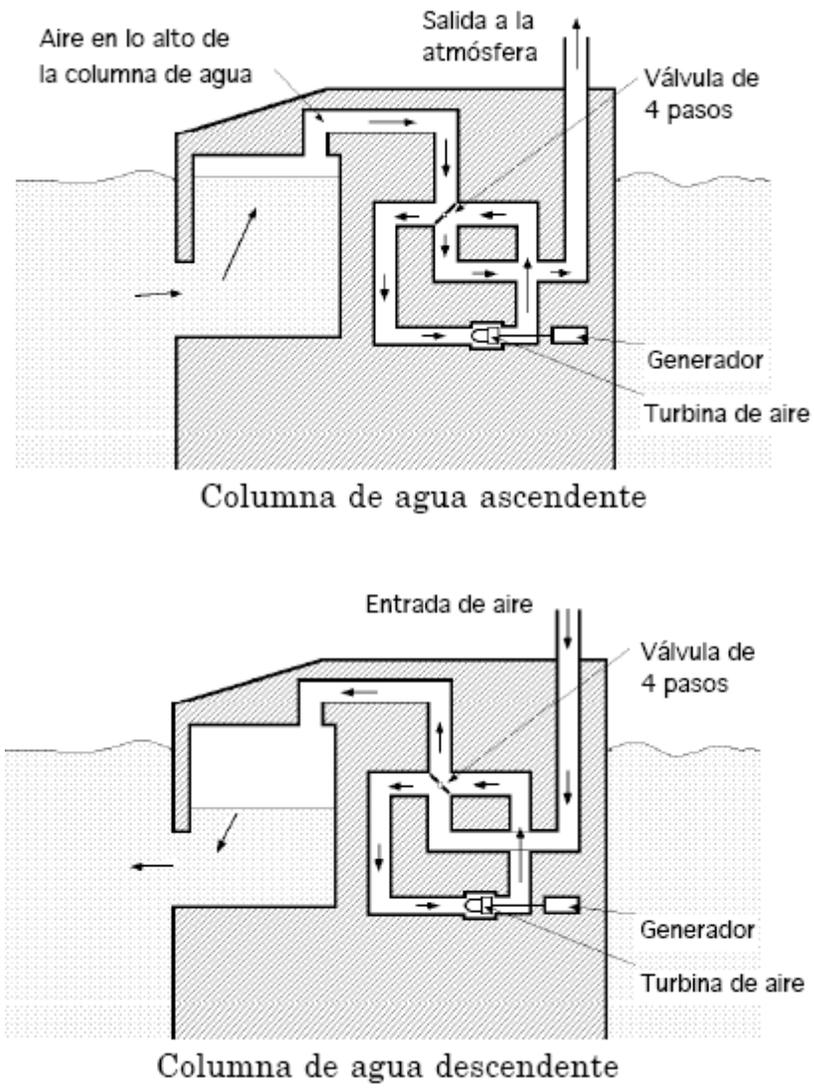


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 39.

La estructura va fijada en el fondo, a 21 metros por debajo del nivel del mar, mediante un sistema de barras de anclaje. Cada módulo, de 22 500 toneladas, contiene tres transformadores de energía de 15 metros cuadrados cada uno. La longitud total de la instalación sería 38,8 kilómetros. En el diseño original, el flujo de agua desde cada uno se rectificaba mediante válvulas antes de pasar por una turbina axial.

Luego de varios estudios la antigua turbina fue sustituida por una turbina Reflair, diseñada por Sulzer, que es una turbina auto rectificadora, como la Wells, que no necesita válvulas (o una Francis). Cada turbina accionaría un generador de 1,65 megawatt y los generadores irían interconectados después de rectificar la corriente continua, en alterna, que se transformaría a 11 kilovoltios, la corriente de un grupo de módulos se transformaría a 132 kilovoltios para su transmisión a la costa.

Figura 34. **Funcionamiento en dos pasos de NEL**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Técnicas que aprovechan la energía de las olas (I)*, 2011. p 39.

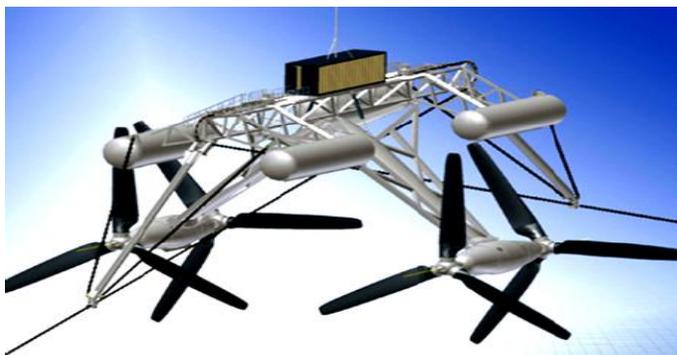
4.5. Proyectos de transformación avanzados

Estos proyectos son más complejos que la mayoría utilizados actualmente, en estos prototipos ya se utilizan materiales más avanzados tecnológicamente y que son más resistentes y duraderos que los utilizados convencionalmente.

4.5.1. Proyecto Hydrolienne

Hydrohelix Energías ha previsto tres lugares para posibles parques, dos a lo largo de la costa de Bretaña y un tercero sobre el Raz Blanchard frente a la costa de Cotentin en el que 1 500 turbinas de 16 metros de diámetro podrían generar tomando en cuenta de la existencia de corrientes excepcionalmente violentas que pueden alcanzar 5 metros por segundo, una potencia en punta de 3 gigawatt, en total 6 gigawatt. La producción anual de estos tres parques, constituidos por 5 000 turbinas de 16 metros de diámetro, podría alcanzar los 25 000 gigawatt por hora, lo que representaría el 5 por ciento de la producción eléctrica francesa o el equivalente a 3 centrales nucleares.

Figura 35. **Prototipo de conjunto de turbinas**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 52.

Las turbinas, instaladas en serie, tendrían 6 palas, y estarían posadas y fijadas en el fondo, respetando en todo momento el ecosistema y no tendrían ningún tipo de incidencia sobre la navegación, por lo cual irían situadas entre 20 metros y 40 metros de profundidad, en una zona de corrientes de 2 metros por segundo. Cada parque generaría 1 megawatt y estaría constituido por 5 turbinas de entre 15 metros y 20 metros de diámetro, funcionando 3 000 horas al año.

Figura 36. **Instalación de las turbinas**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 52.

4.5.2. Turbina para el proyecto GulfStream

La sociedad FHPL (Florida Hydraulic Power and Luz) ha desarrollado una turbina especialmente concebida para ser colocada en corrientes oceánicas como la Corriente del Golfo. La turbina que consiste en dos rotores de fibra de vidrio, de un diámetro de 30 metros, debe proporcionar 3 megawatt. La máquina se afianza sobre el fondo marino, por medio de cables. El coste de

fabricación para una serie de 400 turbinas sería de 400 euros por kilowatt, lo que haría al sistema competitivo ante una central eléctrica moderna. El sistema se podría utilizar para producir hidrógeno por electrólisis del agua.

Figura 37. **Proyecto de turbina de FHPL**

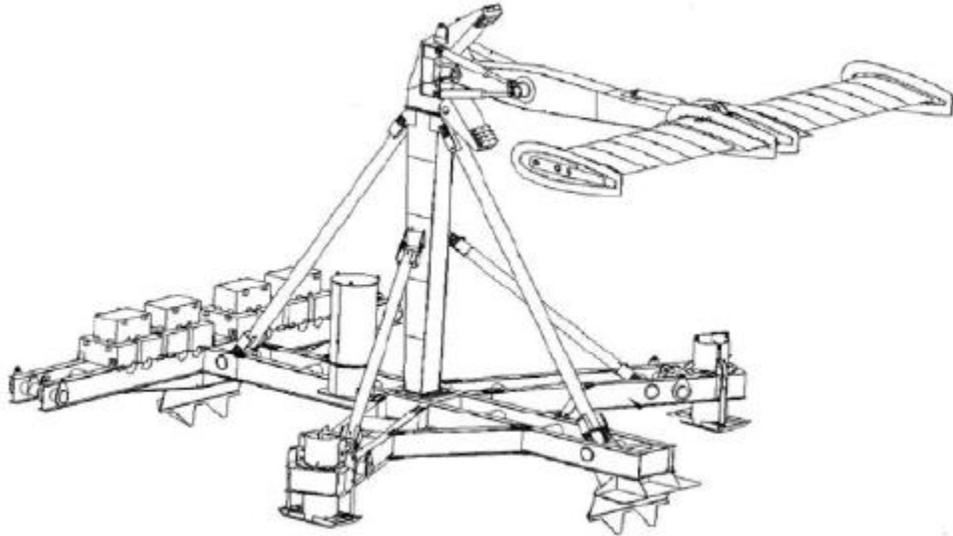


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 53.

4.5.3. Stingray

En el Reino Unido se instala en 2002 por parte de Engineering Bussines Ltd., el prototipo denominado Stingray, de 150 kilowatt con corrientes de 2 metros por segundo, en Yell Sound, cerca de las islas Shetland (Escocia). El potencial aprovechable que existe en las Islas Shetland a 2 metros por segundo es de 140 megawatt. Se trata de una especie de ala de avión submarina horizontal que oscilando con las corrientes marinas varía su ángulo de inclinación para obtener un movimiento ascendente y descendente para generar electricidad, tiene aproximadamente 20 metros de ancho y 24 metros de alto y va montado sobre un brazo horizontal.

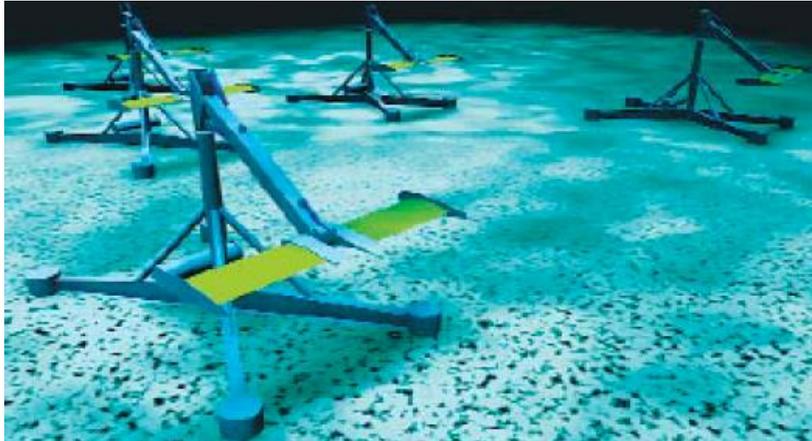
Figura 38. **Prototipo Stingray**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 53.

Las corrientes mueven el ala montada sobre el brazo de arriba abajo, accionando unos cilindros hidráulicos de aceite a presión que le dirigen a un motor hidráulico conectado a un generador eléctrico, la salida de este generador pasa a un sistema de control industrial dando lugar a corriente continua, que viaja por un cable submarino hasta una planta en la costa donde se obtiene corriente alterna. El prototipo fue ensayado durante dos semanas promediando 90 kilowatt con corrientes de 1,5 metros por segundo. Actualmente se esta desarrollando la idea de instalar una planta de 5 megawatt, con este tipo de dispositivo.

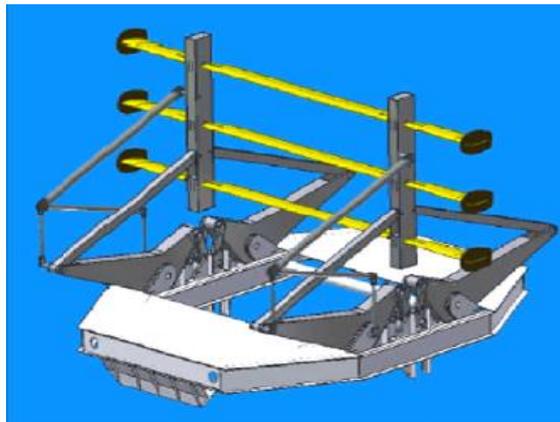
Figura 39. **Parque de Stingray**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 54.

A partir de los resultados obtenidos por el Stingray, la empresa está diseñando una segunda generación capaz de proporcionar 500 kilowatt. La forma de este nuevo prototipo se puede ver a continuación.

Figura 40. **Prototipo del futuro de Stingray**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 54.

4.5.4. Proyecto Sea Snail

Es un prototipo de 22 toneladas métricas capaz de generar 150 kilowatt de energía eléctrica, desarrollado por la Universidad Robert Gordon en Aberdeen e instalado en las Islas Orkney, lleva una pequeña turbina que genera electricidad sobre el fondo del mar. Su armazón tubular, de acero, se clava sobre el fondo del océano. En el prototipo Sea Snail la turbina situada en el centro se encuentra rodeada por una serie de lóbulos en forma de ala que crean una fuerza descendente conforme la corriente pasa encima de ellos. Contra más rápido sea el flujo de corriente, más fuertemente son empujados hacia el lecho marino. Las alas tienen un movimiento oscilatorio de acuerdo con la marea, en este prototipo están fabricadas con fibra de vidrio, pero en el futuro se rediseñarán empleando una cubierta inoxidable.

Figura 41. Prototipo Sea Snail



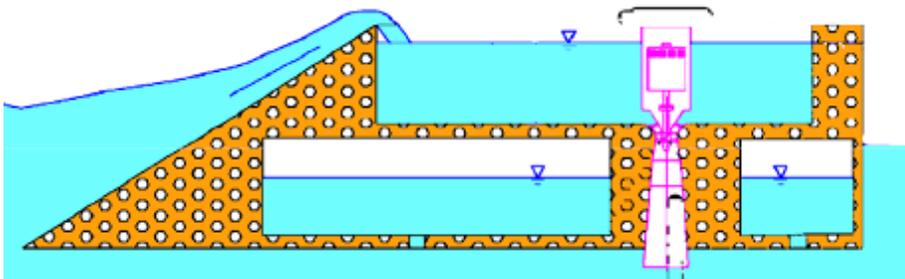
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 54.

Para su mantenimiento, el sea snail está diseñado para ser izado a la superficie, ya que como se instala para aprovechar la marea donde las corrientes son más fuertes, resultaría muy peligroso enviar buzos para su reparación. Como la estructura está sumergida, no alteran el paisaje, ni contaminan o provocan cualquier daño ambiental significativo.

4.5.5. Dragón

El dragón es un dispositivo que eleva las olas del océano a un depósito sobre el nivel del mar, para posteriormente hacerla pasar a través de un cierto número de turbinas y de esta forma transformar la energía de las olas en electricidad, es una construcción muy simple, siendo las turbinas los únicos órganos móviles, se amarra en aguas profundas para aprovechar las olas antes de que pierdan energía cuando alcanzan el área costera. El dispositivo se diseña para permanecer tan inmóvil como sea posible, simplemente utilizando la inercia originada por el peso del agua que ha cargado.

Figura 42. **Diseño del dragón**

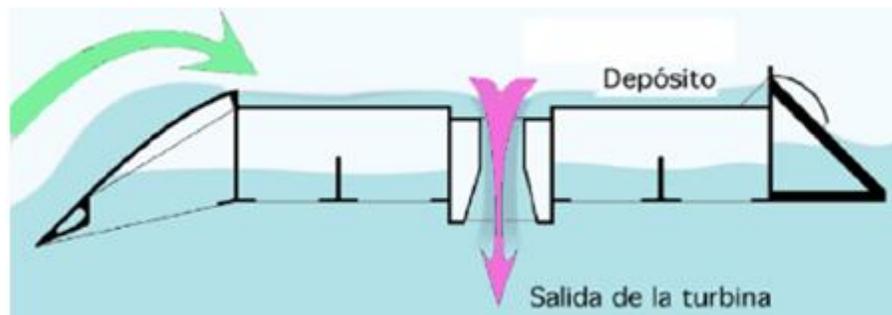


Fuente: <http://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>.

Consulta: 2 de abril de 2011.

El modelo final del dragón se diseñará para estar localizado, aguas afuera, en profundidades de más de 20 metros a 30 metros, generando entre 4 a 11 megawatt, dependiendo de la actividad de las olas. El agua se almacena temporalmente en un gran depósito que crea una carga, que es la diferencia entre los niveles de la superficie del océano y la superficie del agua en el depósito.

Figura 43. **Funcionamiento del dragón**



Fuente: <http://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>.

Consulta: 2 de abril 2011.

La rampa del dragón se puede comparar a una playa, es corta y relativamente escarpada para minimizar la pérdida de energía, ya que los frentes de olas se comportan igual que cuando se acercan a una playa modificando su geometría, la forma elíptica especial de la rampa optimiza este efecto, hecho que se ha comprobado en el prototipo, habiéndose demostrado que el rendimiento aumenta perceptiblemente.

5. EQUIPOS MAREOMOTRICES

5.1. Turbinas hidráulicas

Transfiere torque a un motor, primero se convierte la energía potencial de presión (ligada a la altura H) en energía cinética en la parte fija de la turbina (estator). En seguida esa energía cinética se transforma en torque (trabajo mecánico) en el elemento móvil de la turbina (rotor).

Las turbinas hidráulicas pueden ser:

- Acción o impulsión (Pelton)
- Reacción (Francis, Kaplan, Hélice, Bulbo)

5.1.1. Turbinas de acción total

Son todas aquellas turbinas en las cuales no hay ningún cambio de presión por su paso del fluido por el rodete de la turbina, donde todo el tiempo su flujo es tangencial y además carece de tubería de aspiración.

5.1.1.1. Turbinas radiales

En las turbinas de flujo radial la trayectoria de la partícula de fluido en su acción sobre el receptor o rotor se mantiene aproximadamente en un plano normal al eje de la turbina. Pueden ser centrífugas o exteriores como las turbinas tipo Ginard o Founeyron, ya obsoletas Centrípetas o interiores como las turbinas Francis que son relativamente lentas.

5.1.1.2. Turbinas axiales

El funcionamiento es similar al de un aerogenerador eólico, de forma que el flujo de la corriente marina hace girar el rotor; el buje del rotor puede orientarse 360 grados alrededor del poste en que está sujeto para estar siempre frontal a la corriente. La trayectoria de la partícula de fluido recorre líneas contenidas en superficies cilíndricas de revolución en torno al eje de la turbina. Son de este tipo las turbinas tipo Kaplan, Hélice, Tubulares, Bulbo y Straflo.

Figura 44. Proyecto a) Seaflow b) Seagen



a)



b)

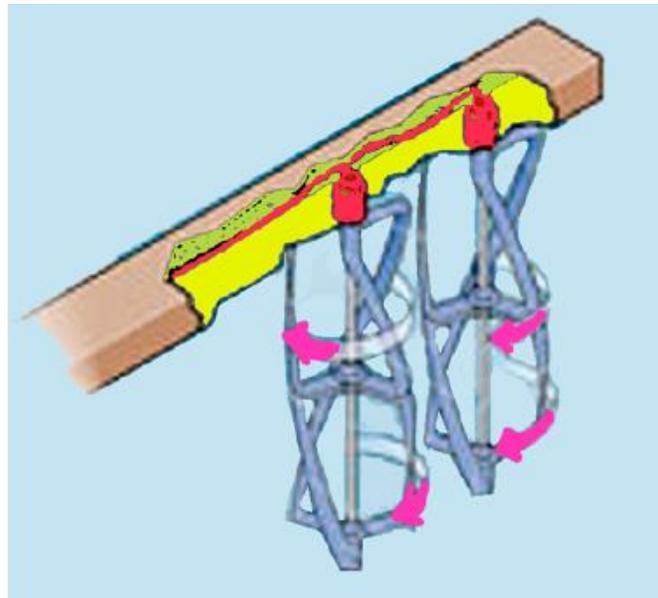
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 46.

5.1.1.3. Turbinas de flujo mixto o diagonal

El fluido recorre trayectorias sobre el receptor que pasan gradualmente de la dirección radial a la dirección axial, las trayectorias son líneas de doble

curvatura. Pertenecen a este tipo las turbinas tipo Francis normales, rápidas y extrarápidas así como las turbinas tipo Deriaz.

Figura 45. **Turbina de flujo mixto**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 47.

5.1.2. Turbinas de acción parcial

Debido a su número específico de revoluciones se cuenta entre las turbinas de régimen lento. Evolucionaron de los molinos de viento y existen algunos diseños complejos que son capaces de variar el ángulo de sus álabes durante su funcionamiento.

5.1.2.1. Turbinas de flujo tangencial

En este tipo de turbinas el fluido es lanzado en forma de chorro sobre un número limitado de alabes del receptor. Pertenecen a este tipo las turbinas Pelton, Banki, Michell.

5.1.3. Turbina de doble efecto

La turbina de flujo transversal es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Sus ventajas principales están en su sencillo diseño y su fácil construcción lo que la hace atractiva en el balance económico de un aprovechamiento a pequeña escala. No obstante esto no impide que la turbina se utilice en grandes instalaciones. Aunque la turbina de flujo transversal se conoce como una máquina de pequeña escala, existen actualmente máquinas de este tipo de hasta 6 megawatt.

Las principales características de esta máquina son:

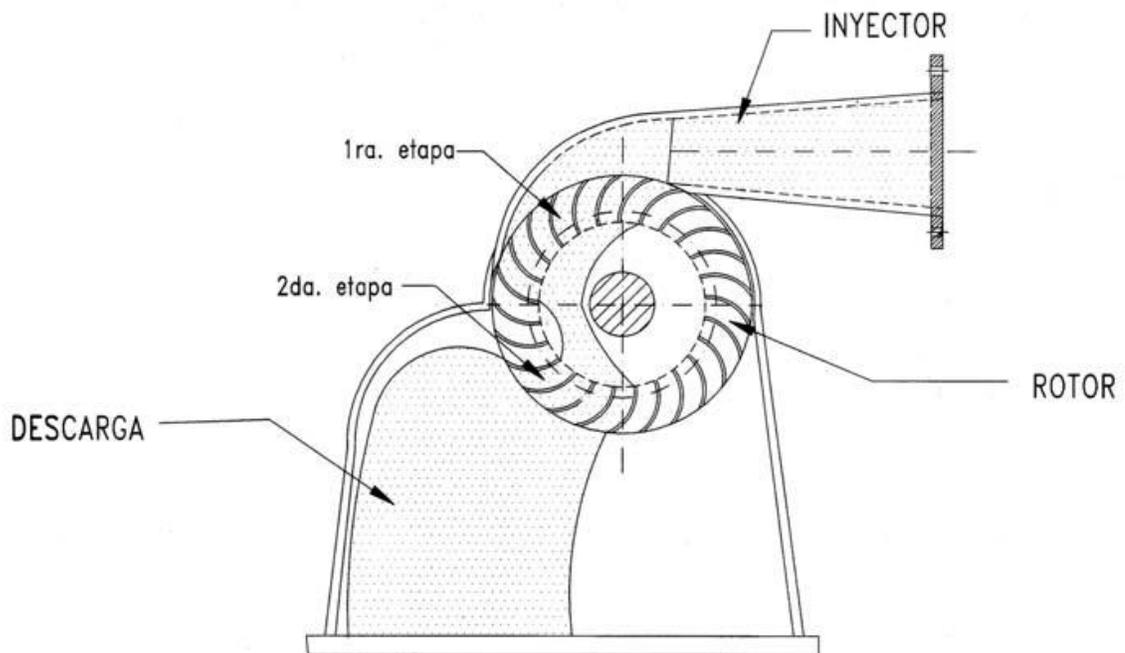
- La velocidad de giro puede ser seleccionada en un amplio rango
- El diámetro de la turbina no depende necesariamente del caudal
- Se alcanza un aceptable nivel de rendimiento con pequeñas turbinas
- Se puede regular el caudal y la potencia por medio de un álabe ajustable

5.1.3.1. Principio de funcionamiento

La turbina consta de dos elementos principales, un inyector y un rotor. El agua es restituida mediante una descarga a presión atmosférica. El rotor esta compuesto por dos discos paralelos a los cuales van unidos los álabes curvados en forma de sector circular.

El inyector posee una sección transversal rectangular que va unida a la tubería por una transición rectangular - circular. Este inyector es el que dirige el agua hacia el rotor a través de una sección que toma una determinada cantidad de álabes del mismo y que guía el agua para que entre al rotor con un ángulo determinado obteniendo el mayor aprovechamiento de la energía. La energía del agua es transferida al rotor en dos etapas, lo que también da a esta máquina el nombre de turbina de doble efecto, y de las cuales la primera etapa entrega un promedio del 70 por ciento de la energía total transferida al rotor y la segunda alrededor del 30 por ciento restante.

Figura 46. **Turbina de doble efecto**



Fuente: Centro de documentación Soluciones Prácticas, ITDG. Ficha técnica turbina *Michell-Banki*. p 2.

Una característica atractiva de esta máquina es la forma aplanada de su curva de rendimiento. Esto se logra con un diseño de la turbina con admisión parcial.

5.1.4. Pelton

Haciendo un poco de referencia al creador de este tipo de turbina. La turbina debe su nombre a Lester Allan Pelton (1829-1908) quien buscando oro en California. La clasificación más general que puede hacerse de las turbinas Pelton es un tipo de eje horizontal y tipos de eje vertical. Existen otras variedades que toman en cuenta el número de inyectores por rueda o el número de rotores montados en un mismo eje.

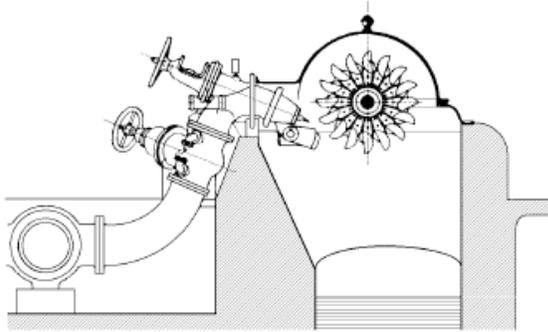
5.1.4.1. Funcionamiento

En si una turbina Pelton consta de un disco circular que tiene montados en su periferia unas paletas en forma de doble cuchara y de un inyector que dirige y regula el chorro de agua que inciden sobre las cucharas, provocando el movimiento de giro de la turbina.

Las turbinas Pelton son turbinas de chorro libre que se acomodan a la utilización de saltos de agua con mucho desnivel y caudales relativamente pequeños, consiguiéndose rendimientos máximos del orden del 90 por ciento. En la turbina Pelton, el punto de máximo rendimiento no se corresponde con la apertura completa del inyector, si la velocidad es grande, el rendimiento disminuye debido a que parte del agua pasa por la turbina, escapándose del rodete sin producir ningún trabajo, haciendo que el rendimiento volumétrico disminuya rápidamente. Esta disminución se hace mucho más ostensible a

partir de un cierto valor de la velocidad, por cuanto el chorro podría llegar a incidir sobre el dorso de la pala, frenándola.

Figura 47. **Turbina Pelton y sus inyectores**

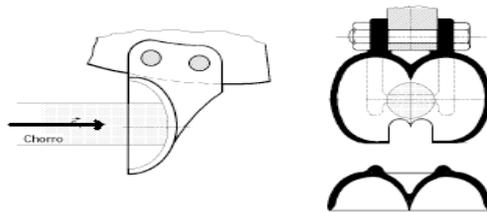


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Pelton*, 2011. p 34.

5.1.4.2. Cazoletas

En una rueda Pelton la dirección del chorro no es ni axial ni radial, sino tangencial, el elemento constructivo más importante es la cazoleta en forma de doble cuchara, que recibe el chorro exactamente en su arista media donde se divide en dos, circulando por su cavidad y recorriendo hasta la salida casi un ángulo de 180 grados, contrarrestándose así los empujes axiales por cambio de dirección de los dos chorros. El agua una vez sale de la cazoleta, cae libremente una cierta altura, pasando al cauce inferior.

Figura 48. **Cazoleta vista de varias formas**

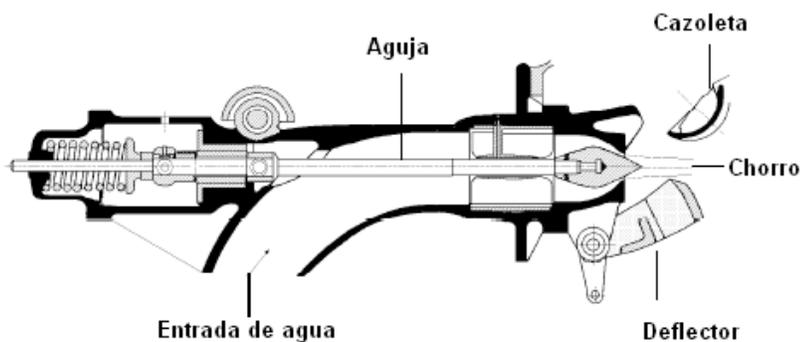


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Pelton*, 2011. p 34.

5.1.4.3. **Inyector**

El inyector es el órgano regulador del caudal del chorro, consta de una válvula de aguja cuya carrera determina el grado de apertura del mismo, para poder asegurar el cierre, el diámetro máximo de la aguja tiene que ser superior al de salida del chorro cuyo diámetro se mide en la sección contraída, situada aguas abajo de la salida del inyector y en donde se puede considerar que la presión exterior es igual a la atmosférica.

Figura 49. **Inyector**



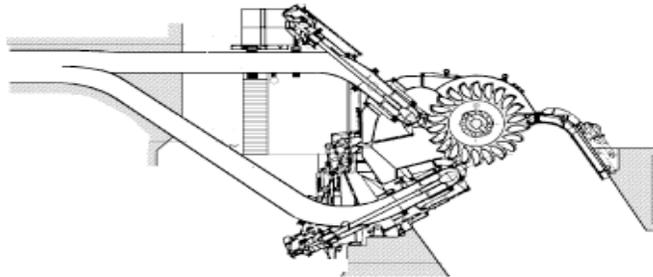
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Pelton*, 2011. p 34.

El chorro está constituido por un núcleo central convergente de agua y una sección anular creciente que contiene una emulsión de agua y aire. Con el fin de asegurar una buena regulación, conviene diseñar el inyector de forma que exista una proporcionalidad entre la potencia de la turbina y la carrera de la aguja, por cuanto la potencia es proporcional al caudal y este, a su vez, a la sección de paso normal al flujo.

La variación del caudal del chorro para regular la potencia se consigue mediante una aguja de forma especial, con cuyo accionamiento se puede estrangular la sección de salida de la boquilla, su regulación puede ser manual o automática mediante un servomotor. Tiene además otro sistema de regulación por desviación del chorro, que consiste en una superficie metálica llamada deflector, que se introduce en medio del chorro, dividiéndolo y desviando una parte del mismo, de forma que en vez de dirigirse contra las cazoletas, sale lateralmente sin producir ningún efecto útil.

De esta forma se evitan sobrepresiones en la tubería, por cuanto el caudal que circula por esta continua siendo el mismo. Cuando se dispone de un solo inyector, el rodete tiene el eje de giro horizontal y el eje de salida del chorro es tangente horizontal, inferior a la circunferencia del rodete, cuyo diámetro se denomina diámetro Pelton, cayendo el agua a la salida de las cucharas al fondo de la turbina, sin interferir el giro del rodete. Cuando el número de inyectores es dos, la turbina puede ser también de eje horizontal, disponiéndose los chorros según dos tangentes inferiores a la circunferencia Pelton, inclinadas un mismo ángulo, saliendo el agua de las cucharas sin interferir al rodete.

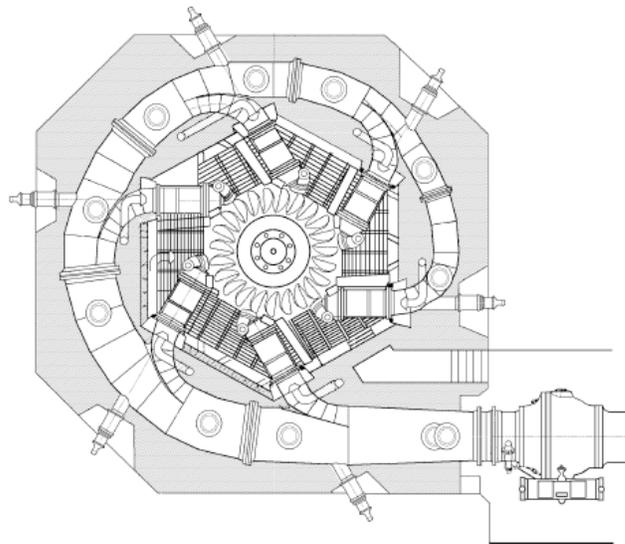
Figura 50. **Turbina Pelton de dos inyectores**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Pelton*, 2011. p 37.

Para un número superior de inyectores, la rueda Pelton es de eje vertical ya que de ser horizontal, sería imposible evitar que el agua cayera sobre la rueda a la salida de las cucharas.

Figura 51. **Turbina Pelton de varios inyectores, en este caso 6**

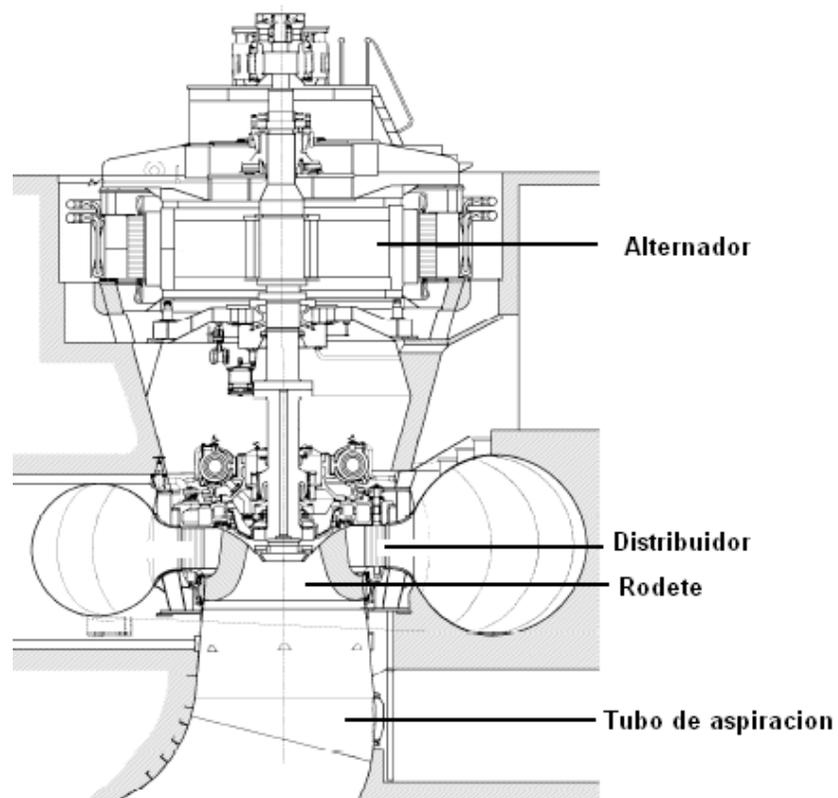


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Pelton*, 2011. p 36.

5.1.5. Francis

Al igual que la Pelton este tipo de turbina también lleva este nombre en honor al ingeniero James Bichano Francis (1815-1892). Caracterizada por que recibe el flujo de agua en dirección radial, orientándolo hacia la salida en dirección axial. En la actualidad es la turbina hidráulica típica. Las turbinas Francis, son de tipo radial, admisión centrípeta y tubo de aspiración siempre se construyen en condiciones de rendimiento máximo, dando lugar a tres tipos fundamentales, lentas, normales y rápidas, diferenciándose unas de otras en la forma del rodete.

Figura 52. Diagrama de las partes de una turbina Francis



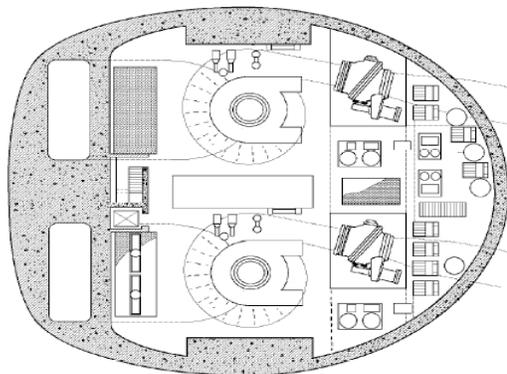
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Francis*, 2011. p 11.

5.1.5.1. Funcionamiento

En este tipo de turbinas el receptor o rotor queda internamente al distribuidor, de modo que el agua al atravesar el rotor de la turbina se aproxima constantemente al eje. Son rigurosamente centrípetas, permite el uso de un tubo para conducir el agua a la salida del receptor. También cuenta con un distribuidor que consiste en conjunto de alabes dispuestas alrededor del receptor y que pueden ser orientadas por medio de comandos a fin de reducir al mínimo las pérdidas hidráulicas.

Con un distribuidor que contiene una serie de álabes fijos o móviles que orientan el agua hacia el rodete. Además con un rodete formado por una corona de paletas fijas, torsionadas de forma que reciben el agua en dirección radial y lo orientan axialmente. Una cámara de entrada, que puede ser abierta o cerrada de forma espiral, para dar una componente radial al flujo de agua. Un tubo de aspiración o de salida de agua, que puede ser recto o acodado y se encarga de mantener la diferencia de presiones necesaria para el buen funcionamiento de la turbina.

Figura 53. **Montaje de dos turbinas Francis**

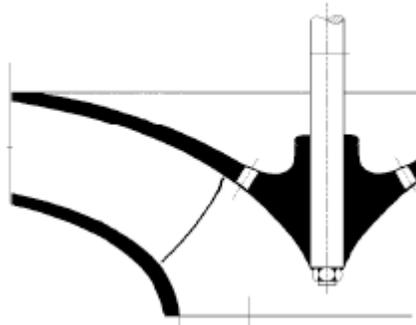


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Francis*, 2011. p 82.

5.1.5.2. Rodetes lentos

Se utilizan en los grandes saltos, con ellos se tiende a reducir el número de revoluciones, lo cual supone un aumento del diámetro del rodete respecto al del tubo de aspiración. El ángulo a la entrada menor a 90 grados y su número de revoluciones específico está comprendido entre 50 y 100. En estas turbinas se obtienen velocidades tangenciales reducidas. Los álabes tienen forma especial, aumentando su espesor a fin de que su cara posterior guíe mejor el chorro que atraviesa el rodete deslizándose en contacto con las paredes de los álabes, ya que de no ser así el chorro se despegaría de la cara posterior de los mismos, originando remolinos.

Figura 54. Perfil de rodete lento



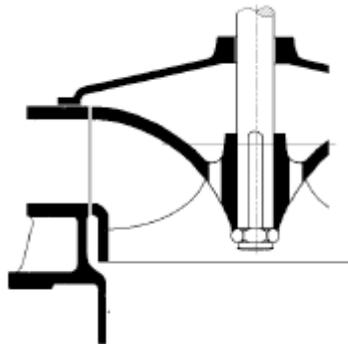
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Francis*, 2011. p 53.

5.1.5.3. Rodetes normales

Se caracterizan porque el diámetro es ligeramente superior al del tubo de aspiración. El agua entra en el rodete radialmente y sale de él axialmente, entrando así en el tubo de aspiración. El valor del ángulo de entrada es del

orden de 90 grados y se alcanza un número de revoluciones comprendido entre 125 y 200 revoluciones por minuto. No existen apenas huelgos entre el distribuidor y la rueda.

Figura 55. **Perfil de rodete normal**

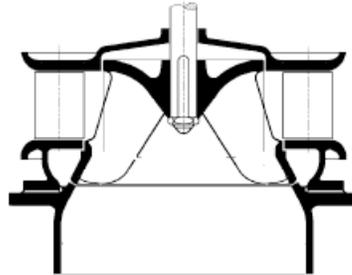


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Francis*, 2011. p 53.

5.1.5.4. Rodetes rápidos

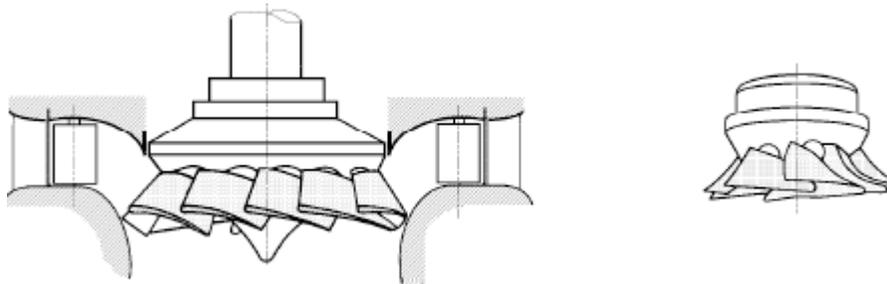
Permiten obtener elevadas velocidades de rotación para valores de revoluciones comprendidos entre 225 y 500. El diámetro del rodete es menor que el del tubo de aspiración y el cambio de dirección del agua se efectúa más bruscamente que en las turbinas normales.

Figura 56. **Perfil de rodete rápido**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Francis*, 2011. p 54.

Figura 57. **Rodetes Francis de flujo diagonal**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Francis*, 2011. p 54.

Figura 58. **Rodetes Francis de flujo radial**

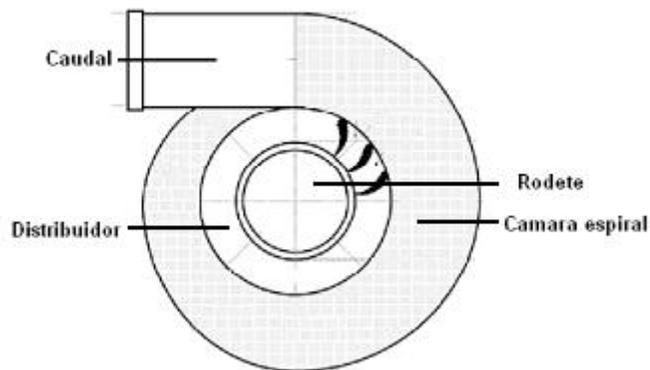


Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Francis*, 2011. p 53.

5.1.5.5. Cámara espiral

La cámara espiral tiene como misión el dirigir convenientemente el agua en el distribuidor, se supone que de sección circular, aunque también puede ser rectangular, su forma es tal que la velocidad media tiene que ser la misma en cualquier punto del caracol, evitándose así las pérdidas ocasionadas por los cambios bruscos de velocidad. A su vez, el agua no debe penetrar en la cámara espiral con una velocidad demasiado grande, ya que las pérdidas podrían ser excesivas.

Figura 59. **Esquema de la cámara espiral de la turbina**



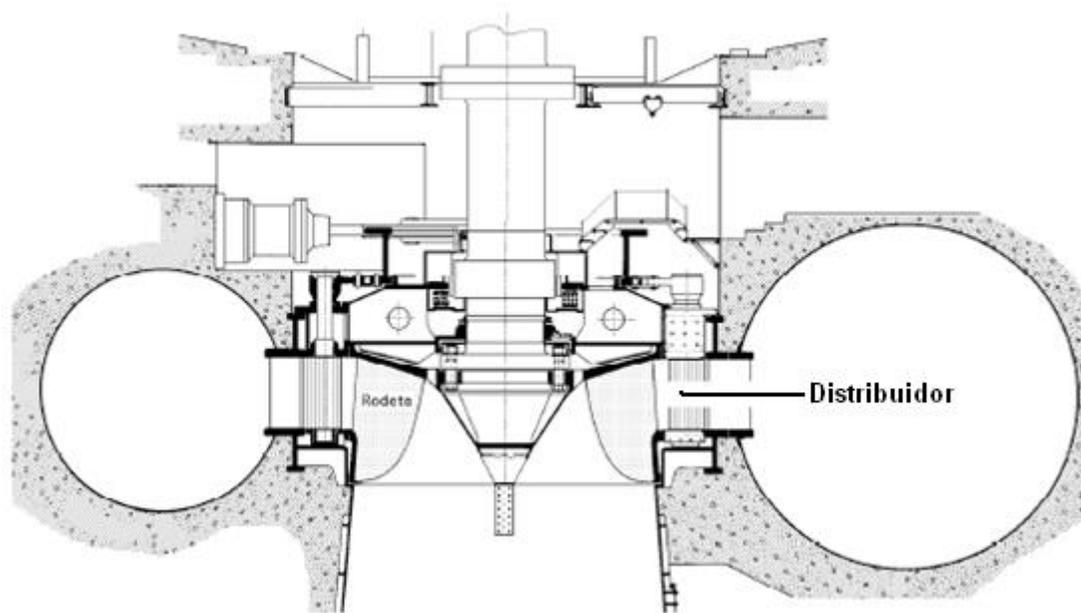
Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Francis*, 2011. p 53.

5.1.5.6. El distribuidor

El distribuidor tiene como misión dirigir convenientemente el agua hacia los álabes del rodete, regulando el caudal admitido, y modificando de esta forma la potencia de la turbina, ajustándose en lo posible a las variaciones de carga de la red. No genera energía como órgano estático que es, pero sí transforma energía de presión en energía cinética. La regulación se realiza

teóricamente, sin variación de la velocidad absoluta de entrada del agua en el rodete, ya que lo único que se modifica es el ángulo dentro del plano perpendicular al eje de rotación de la turbina, lo que implica que no tenga componente axial. La componente tangencial no da lugar a gasto alguno, ya que este viene determinado por el módulo de la componente radial en el distribuidor.

Figura 60. **Detalle del distribuidor de una turbina Francis**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbina Francis*, 2011. p 53.

5.1.5.7. El tubo de aspiración

El tubo de aspiración es un auténtico transformador de energía, ya que al originar a la salida del rodete una depresión, recupera no sólo la mayor parte de la energía cinética que lleva el agua a la salida, sino que también amplía la altura geométrica del salto en una distancia igual a la existente entre la salida

del rodete y el nivel del canal de desagüe aguas abajo, este órgano se conoce también como aspirador-difusor. Se puede concebir también un aspirador no difusor, que recupere la altura pero no la energía cinética residual, que estaría constituido simplemente por un tubo cilíndrico sumergido en el canal aguas abajo.

En las turbinas Francis lentas, el papel principal del tubo de aspiración es crear la depresión estática (vacío) correspondiente a la altura de aspiración, por lo que, fundamentalmente, actúa como aspirador. En las turbinas Francis rápidas y en las turbinas hélice y Kaplan, esta misión del aspirador disminuye, siendo su principal papel el de actuar como difusor.

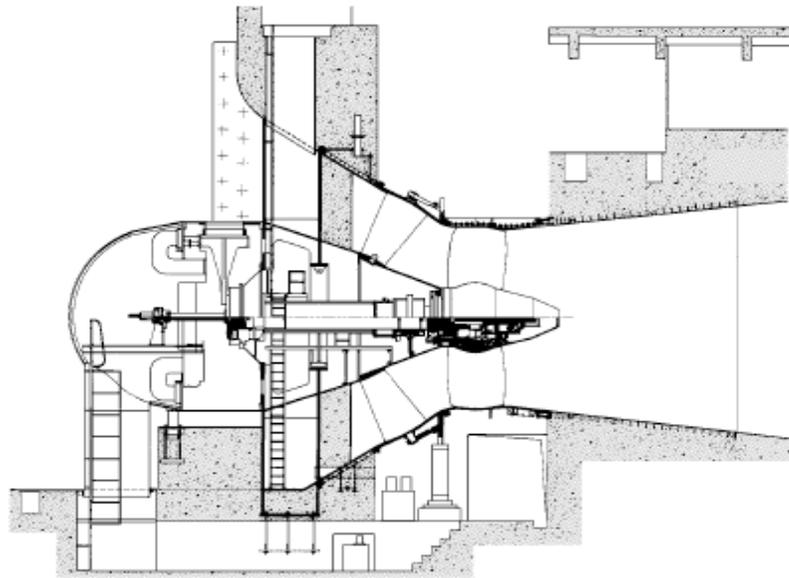
5.1.6. Bulbo

Esta turbina debe su nombre al ingeniero Víctor Kaplan (1876-1934). La evolución de ideas hasta llegar al concepto de los grupos bulbo de las centrales mareomotrices, parte del hecho de que fueron concebidos para ser utilizados en cuencas fluviales de grandes caudales, el nacimiento oficial de los 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 flujo axial de Rostin, en el río Persante.

Lo que se trata de conseguir con los grupos Bulbo es aumentar la potencia específica, mediante un aumento de la velocidad específica. Los ensayos sobre la distribución de velocidades muestran que las pérdidas de carga más importantes se producen, para potencias específicas elevadas, a la entrada y a la salida. 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 61. **Turbina bulbo**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbinas Kaplan y Bulbo*, 2011. p 109.

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. 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

5.1.6.1. Funcionamiento

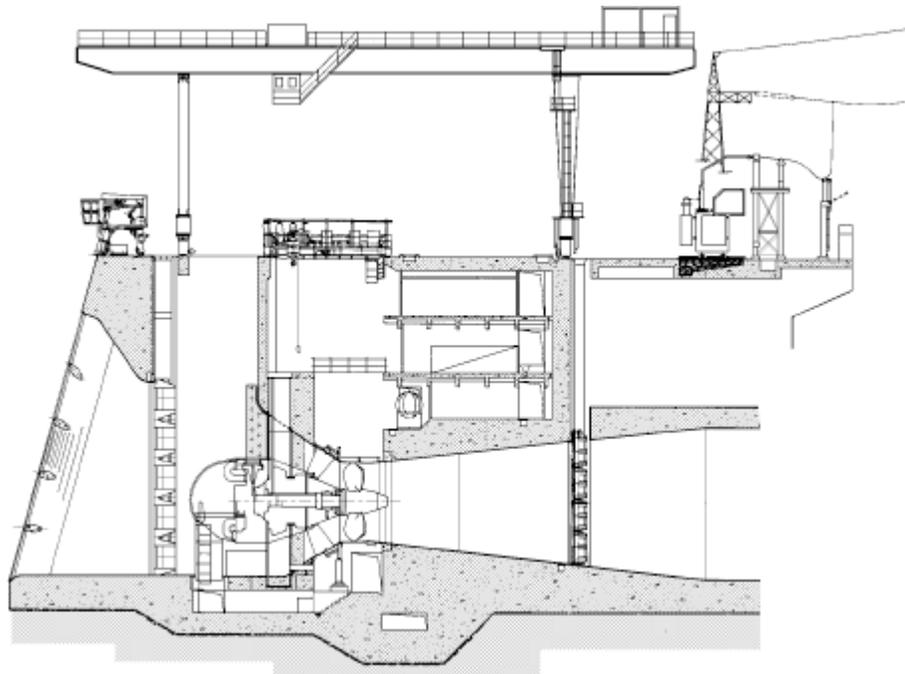
Este tipo de turbinas se componen principalmente de un conducto de entrada, que posteriormente se ensancha alrededor del bulbo que contiene el generador-alternador. En el interior del bulbo, que es una cámara blindada, pueden colocarse un sistema de transmisión por engranajes para transmitir el movimiento del eje del rotor al 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. Su función es que por medio de un distribuidor formado por álabes directrices puedan dirigir el agua en la dirección conveniente hacia el rodete móvil.

Estos álabes son orientables, un esquema de un grupo bulbo es un mecanismo servomotor hidráulico accionado automáticamente, para adaptar su disposición a las variaciones del caudal y altura del salto, manteniendo siempre un elevado rendimiento.

Los grupos Bulbo, como parte fundamental de algunas centrales mini hidráulicas y 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 y posteriormente han sido empleados también

por las centrales mareomotrices, que como se sabe se caracterizan, por pequeñas alturas y grandes caudales.

Figura 62. **Turbina bulbo instalada en un dique**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbinas Kaplan y Bulbo*, 2011. p 110.

Si además de tener las palas orientables, las turbinas funcionan en los dos sentidos de rotación (turbinas reversibles), y asimismo pueden actuar como bombas hélice accionadas por el propio generador, se las denomina turbinas Bulbo.

5.1.6.2. Hélices

Una de las partes más importantes son las hélices, que permite mantener un valor alto del rendimiento para condiciones variables, tanto del

salto como del caudal. Es una turbina con cuatro o cinco palas fijas en forma de hélice de barco con álabes ajustables, de forma que la incidencia del agua en el borde de ataque del álabe pueda producirse en las condiciones de máxima acción, cualesquiera que sean los requisitos de caudal o de carga.

Al tener este diseño, la turbina puede funcionar como generador eléctrico o motor; ya que, si el nivel de agua en la marea es bajo, se puede bombear agua del mar hacia este por medio de estas turbinas. Al subir el nivel del agua se puede usar como riego en el día y a la noche se deja circular el cauce de manera normal para la generación de energía. Por estas grandes ventajas, es la turbina más usada para este tipo de energía.

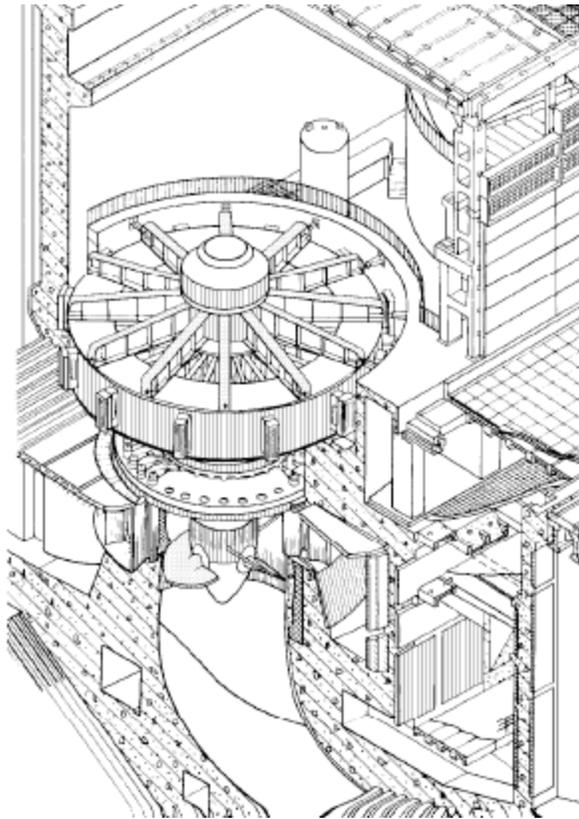
5.1.6.3. Trazado de los conductos hidráulicos de los grupos bulbo

Lo que se trata de conseguir con los grupos Bulbo es aumentar la potencia específica, mediante un aumento de la velocidad específica. 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.

Mientras la turbina Kaplan, con 9 megawatt, necesitaba una longitud de dique de 20,5 metros, la turbina Bulbo, con 1 megawatt más, ocupaba solo 13,3 metros, pudiéndose apreciar 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.

Figura 63. **Turbina Kaplan (para efecto de comparación)**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbinas Kaplan y Bulbo*, 2011. p 100.

5.1.6.4. El tubo de aspiración

La energía cinética a la salida de la rueda 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 sólo sentido de funcionamiento, se obtendría un excelente rendimiento si se tomase la precaución de escoger un adecuado ángulo en el codo del tubo de aspiración.

Sin embargo para este ángulo ideal 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.

La elección de un momento cinético residual y de una ley de reparto de velocidades tangenciales a lo largo de la sección, es difícil, pues 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.

5.1.6.5. Ventajas de utilizar turbina tipo bulbo en centrales mareomotrices

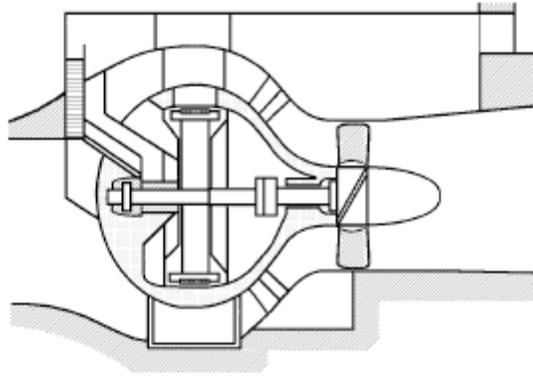
Este tipo de turbinas son utilizadas principalmente por su característica de entrada axial del fluido. No son más que un tipo especial de turbina hélice capaces de aprovechar saltos de pequeño desnivel pero de gran caudal. Estos grupos fueron concebidos en un principio para ser utilizados en cuencas fluviales de grandes caudales y posteriormente han sido empleados también por las centrales mareomotrices, entre sus ventajas están:

- Una mejor distribución de velocidades del agua sobre las palas, lo que permite un aumento del caudal específico y de la potencia específica, o lo que es lo mismo, una reducción del diámetro para un caudal dado o para igual potencia en comparación con los de eje vertical.
- La disminución de pérdidas de carga a la entrada y salida implica una mejora en el rendimiento.
- La mejora sobre la cavitación debida a las condiciones del flujo que aumenta la velocidad de rotación lo que conduce a un alternador más económico.
- Esta disposición se acompaña de una simplificación y reducción del volumen de la obra civil, así como del coste de las obra.

5.1.6.6. Los grupo bulbo como proyecto

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, tendentes a mejorar la rentabilidad de las micro centrales 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 metros, con ellos se dio un paso decisivo en el conocimiento de los numerosos problemas que se fueron presentando, tanto hidráulicos como mecánicos.

Figura 64. **Primer proyecto de grupo bulbo para Rance**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Turbinas Kaplan y Bulbo*, 2011. p 103.

5.1.7. Turbina Wells

Otro tipo de turbina utilizada en transformar las fuerzas de las olas, es la turbina Wells y posiblemente la más indirecta con respecto a las otras turbinas antes mencionadas. La turbina Wells es el dispositivo aerodinámico utilizado para extraer la energía cinética generada por un flujo oscilante de aire, como el que se presenta al desplazar una columna de aire por acción de las olas.

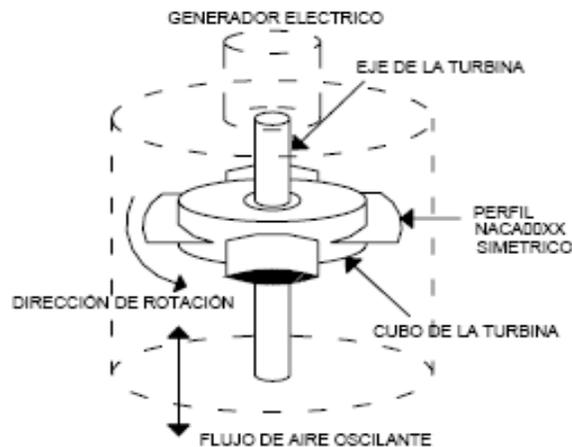
La utilización de las turbinas Wells en sistemas de generación de energía a pequeña escala es aún limitada, debido a lo desconocido que es este sistema de transformación, al cual no se le ha prestado un estudio mas serio para sacarle mas provecho, principalmente en países en vía de desarrollo, debido a la falta de recursos involucrados en el estudio de fuentes alternativas de energía. Este proyecto representa los primeros esfuerzos realizados en Guatemala para el estudio y aplicabilidad de los conceptos de la turbina Wells.

5.1.7.1. Funcionamiento

Para aprovechar esta forma de energía el rotor de la turbina Wells, la cual consiste en un determinado número de aspas con perfiles simétricos, distribuidos alrededor de un cubo central. Esta característica de construcción induce un sólo sentido de giro en la turbina independiente de la dirección de flujo de aire que incida sobre ella.

La turbina Wells debe extraer la energía cinética disponible del aire sin cambios bruscos en su velocidad de rotación, esto se refleja en una transmisión de un movimiento rotacional uniforme representado en potencia mecánica al eje del generador. Las pérdidas mecánicas deben ser mínimas para garantizar una potencia final en el generador eléctrico.

Figura 65. Diagrama de una turbina Wells



Fuente: Pinilla E., Álvaro. *Diseño de turbina Wells*, 2011. p 8.

La extracción de energía en el rotor de la turbina implica un cambio en el momento angular de la corriente de aire, este cambio ocurre por la interacción

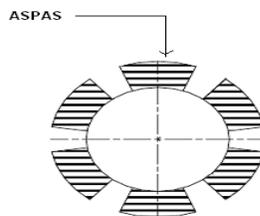
existente entre el flujo de aire y los alabes de la turbina. El adecuado diseño de una turbina Wells consiste en producir una componente de energía cinética rotacional después de la turbina, lo más reducida posible. Esta reducción se ve reflejada en la obtención de un flujo de aire axial y en una caída de presión aproximadamente lineal respecto al flujo de aire. La componente de energía cinética rotacional queda entonces representada por la velocidad inducida al flujo de aire.

5.1.7.2. Aspas

Las aspas son el elemento encargado de extraer la energía disponible de la corriente de aire. Para evitar variaciones en la velocidad de diseño, la superficie de las aspas debe ser lo más perfecta posible, debido a que variaciones en la superficie o en la geometría inducen un desprendimiento prematuro de la capa límite y como consecuencia pérdidas aerodinámicas.

La consideración inicial en la selección del perfil es determinada por la relación existente entre su coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre. Para el diseño aerodinámico de la turbina se recurre a la teoría de conservación del momentum angular en combinación con el análisis individual de un elemento de aspa.

Figura 66. **Aspas de una turbina Wells**



Fuente: Pinilla E., Álvaro. *Diseño de turbina Wells*, 2011. p 8.

5.1.7.3. Construcción del direccionador de flujo

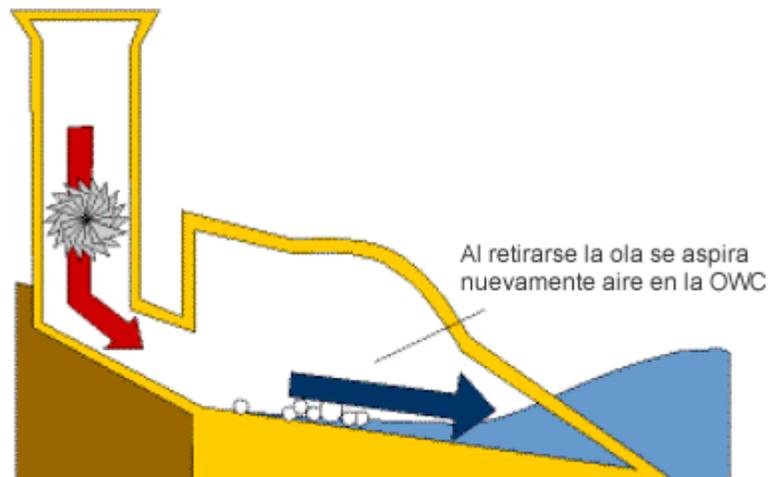
El cubo en un disco de turbina Wells ocupa un área grande respecto al área total de la turbina. Dicha área se convierte en una zona muerta en la cual incide el flujo de aire produciendo una fuerte caída de presión y pérdidas aerodinámicas en las aspas. Con el fin de obligar al flujo de aire a incidir directamente sobre las aspas se fabrica un direccionador de flujo, el cual es enfrentado directamente al cubo de la turbina.

El direccionador es construido largo para que permita que el flujo se corrija axialmente antes de incidir sobre las aspas de la turbina. Para producir una menor caída de presión, el direccionador se enfrenta al flujo con una esfera.

Figura 67. **Posible utilización de una turbina Wells**



Continuación de la figura 67.



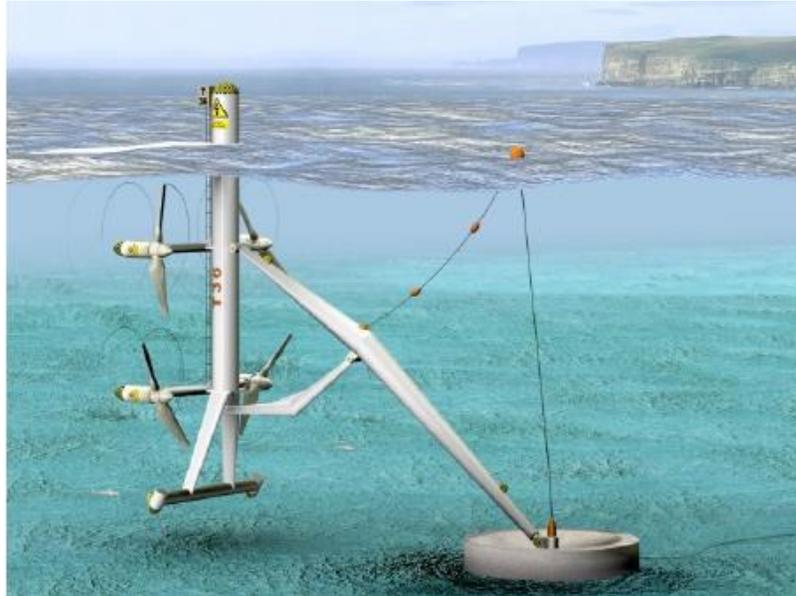
Fuente: <http://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>.

Consulta: 13 de mayo de 2011.

5.2. Turbinas del futuro para corrientes de marea

La más simple de todas las configuraciones consiste en unos rotores montados sobre un poste fijado al fondo del mar. Para mantener los extremos de las palas libres de cavitación, se diseñan para una relación de velocidad de punta o TSR por sus siglas en ingles de 10 metros por segundo o menos, las palas estarían moldeadas en fibra de carbono. El diseño lleva 2 rotores de 20 m de diámetro, que pueden proporcionar entre 1 y 2 megawatt, dependiendo de la velocidad de la corriente, funcionando en aguas entre 30 y 50 metros de profundidad. Este diseño no sería apropiado para aguas profundas debido a las cargas en la base del poste y a la dificultad de acceder al fondo del mar.

Figura 68. **Prototipo de turbinas para el futuro**



Fuente: Díez Fernández, Pedro. *Energía de las corrientes marinas*, 2011. p 55.

El brazo pivota en la horizontal con ayuda de la boya flotante del mástil, lo que permite que la turbina se pueda orientar horizontalmente siguiendo la dirección de las corrientes marinas y verticalmente hasta la superficie, para operaciones de mantenimiento. Para elevarse y poner los rotores en situación horizontal, mantenimiento en superficie, una de las turbinas funciona, mientras que la otra se frena, lo que provoca el que el conjunto se levante, esta idea fue patentada en el Reino Unido en 2003.

El diseño se conoce como SST (turbina semisumergida). En el diseño actual de la turbina de Pentland Firth, el flujo a 60 metros de profundidad es capturado por 2 pares de rotores de 20 metros de diámetro, siendo la energía generada de 4 megawatt.

CONCLUSIONES

1. Queda más que demostrado que la ingeniería mecánica es vital al momento de plantearse estudios sobre energía mareomotriz, la cual aún esta en vías de desarrollo, ya que el diseño y la perfecta elección del equipo mecánico es fundamental para el óptimo desempeño de las centrales.
2. El tener un amplio conocimiento sobre los distintos sistemas mecánicos utilizados para transformar la energía mecánica en energía eléctrica, se convierte en un arma poderosa, porque proporciona criterio para saber cuál sería la mejor elección para el tipo de ambiente o de terreno que se desea utilizar para instalar una central mareomotriz.
3. Las centrales mareomotrices pueden ocasionar un gran impacto ecológico, pero parte de la ingeniería es evitar esto, haciendo estudios reales en los diseños, para mejorar materiales e implementar los equipos más adecuados para producir el menor daño posible en el ambiente marino.
4. Estudios como la transformación de la energía mecánica en electricidad por medio de sistemas mecánicos, son verdaderamente importantes si se pone a pensar la crisis energética actual por la que se pasa, además las corrientes marinas son un recurso muy constante, dándole un fuerte potencial para el futuro.

5. Proyectos como este dan paso a las mejoras en el país debido a que motiva y da la iniciativa a implementar otro tipo de generación eléctrica y no sólo explotar las ya conocidas como se viene haciendo. Esto le da un nuevo enfoque a la generación eléctrica a nivel nacional, haciendo pasar a Guatemala a una nueva era de desarrollo.

RECOMENDACIONES

1. Para este tipo de proyectos no solo hay que tomar en cuenta la generación de energía para hacer viable este proyecto, es necesario tomar en cuenta el impacto ambiental y el costo beneficio de la obra.
2. También se debe tomar en cuenta los materiales y su durabilidad en un ambiente tan severo como lo es el mar, además de estar expuesto a corrientes fuertes, por lo que se tendría que hacer un estudio sobre polímeros para poder dar más alternativas de diseño y construcción.
3. Es necesario actualizar los equipos y sistemas mecánicos, ya que algunos de estos son afectados por la modernización y están avanzando tan rápido tecnológicamente que no es prudente quedarse estancando con los equipos vistos, para poder ser más eficiente.
4. El uso de combustibles fósiles, como fuentes de energía contribuye en el calentamiento global de la tierra, por lo que es importante promover el uso de energías renovables como alternativas no contaminantes. El uso de energías limpias provenientes del mar, son una alternativa siempre y cuando se tomen en cuenta todos los aspectos necesarios.
5. Considerar que las instalaciones para su aprovechamiento deben ejecutarse en zonas donde la afluencia de personas es mínima, ya que con este tipo de proyectos se prevé producir energía renovable, pero también produce contaminación visual y sonora.

BIBLIOGRAFÍA

1. Centro de documentación Soluciones Prácticas. ITDG. *Ficha Técnica Turbina Mitchell-Banki*. [en línea] <http://www.solucionespracticas.org.pe>. [Consulta: 25 de marzo de 2011].
2. DÍEZ FERNÁNDEZ, Pedro. *Energía mareomotriz. Energía de las corrientes marinas. Energía mareomotriz. Técnicas que aprovechan la energía de las olas I y II. Turbina Francis. Turbinas Kaplan y Bulbo. Turbina Pelton*. [en línea] <http://libros.redsauce.net/>. [Consulta: 21 de marzo de 2011].
3. FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, José; JARABO FRIEDICH, Francisco; MACÍAS HERNÁNDEZ, Erika. *El libro de las energías renovable*. Sociedad Anónima de publicaciones técnicas. [Madrid] 1991. [en línea] <http://www.prepa9.unam.mx/academia/cienciavirtual/c2.pdf> [Consulta: 5 de marzo de 2011].
4. GALLEGOS, Marisol. *La energía del mar*. Seminario Virtual. España. 2002. [en línea] <http://www.oannes.org.pe/seminario/02oceanografGallegosEnergias.htm>. [Consulta: 5 de abril de 2011].
5. GIBRAT, Robert. *La energía de las mareas*. Boix, Barcelona: Labor, 1973. 130 p. ISBN: 84-335-5522-7.

6. *Ingeniería y medio ambiente*. [en línea]<www.allpe.com> [Consulta: 20 de abril de 2011].
7. PINILLA, Álvaro. *Diseño de turbina Wells*. Documento interno de trabajo. Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Los Andes, Bogotá. Colombia. 2001. [en línea] <http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/446/mi_1266.pdf?sequence=1>. [Consulta: 15 de abril de 2011].
8. SANTA, Alfredo; LOZANO, Marco; PINILLA, Álvaro. *Generación de energía eléctrica con turbinas Wells*, Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes Bogotá-Colombia. No. 7, mayo de 2002.