



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**POSGRADO DE INGENIERÍA**

**DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE  
CONVERSIÓN DE ENERGÍA DE LAS CORRIENTES  
MARINAS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL-HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

**JOSÉ LÓPEZ GONZÁLEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN**



MEXICO, D.F. MAYO 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar

Secretario: Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes

Vocal: Dr. Silva Casarín Rodolfo

1er Suplente: Dr. Salles Afonso de Almeida Paulo

2do Suplente: Dr. Mendoza Baldwin Edgar G.

Ciudad Universitaria, México Distrito Federal

**TUTOR DE TESIS:**

**Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN**

---

**FIRMA**



## **Dedicatoria**

*Me gustaría dedicar esta Tesis a toda mi familia.*

*A mis padres que afortunadamente aún me acompañan en las buenas y en las malas y en especial a mi madre que me ha enseñado a encarar las adversidades y contratiempos sin desfallecer en el intento. A mi hermana que ha sido un ejemplo de valentía y perseverancia*

*A mi mujer, por su paciencia y comprensión. Es la persona que directamente ha sufrido las consecuencias del trabajo realizado.*

*A mis hijas. Que junto a su madre me han apoyado y me han dado fuerza para continuar.*

## **Agradecimientos**

*Primero, me gustaría agradecer a mi director de Tesis, Dr. Rodolfo Silva Casarín, su esfuerzo y dedicación.*

*Al Dr. Edgar Mendoza Baldwin por su asesoría en la redacción de la tesis y los consejos recibidos a lo largo de los últimos años*

*Al Instituto de Ingeniería y en especial al proyecto IMPULSA “Desalación de agua de mar con energía renovables” sin los cuales no hubiera sido posible este trabajo. También agradecer a los compañeros del proyecto IMPULSA que colaboraron conmigo*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico.*

*Para ellos, muchas gracias por todo.*



## Resumen

En el presente trabajo de investigación se desarrolló un sistema que transforma la energía cinética de las corrientes marinas en energía mecánica para posteriormente convertirla en energía eléctrica. Se propuso un hidrogenerador nombrado IMPULSA el cual, se puede clasificar como una turbina flotante de eje vertical y flujo conducido. La concepción del sistema, parte del análisis de otros dispositivos de conversión, lo que dio origen a un nuevo concepto que se construyó y probó, en escala reducida, tanto en campo como en laboratorio. El dispositivo consta de dos partes principales, el cuerpo central llamado carcasa que alberga los rotores y los flotadores que, además, sirven como concentradores de flujo (efecto venturi). El hidrogenerador IMPULSA posee varias características que lo distinguen y destacan de otros mecanismos, como son el conducto interior de la carcasa que direcciona el flujo de forma más eficiente sobre un lado de los álabes, que la carcasa cuenta con dos compartimentos para los rotores que solo permiten que el flujo incida en un lado de los álabes y el uso de rotores helicoidales que permiten aprovechar flujos de baja velocidad. Estas características hacen del hidrogenerador IMPULSA un dispositivo novedoso y con altas expectativas de funcionalidad.

El diseño preliminar se realizó a partir de los resultados del programa PHOENICS, el cual es una herramienta que permite modelar la interacción de flujos con obstáculos. Se modelaron diferentes configuraciones de la carcasa, los concentradores y los rotores. La configuración óptima se eligió en función del desempeño hidrodinámico, flotabilidad y estabilidad del sistema.

Para verificar la eficiencia del dispositivo se realizaron pruebas en el laboratorio OHMSETT, localizado en New Jersey, USA. Cuenta con un canal de remolque de 203 m de largo, 20 m de ancho y 3.4 m de profundidad, con un puente con la capacidad de desplazarse hasta una velocidad de 6.5 nudos. Los parámetros que se registraron fueron velocidad del puente, velocidad angular, torque y fuerza de arrastre. Con los datos obtenidos se obtuvieron las curvas de eficiencia del hidrogenerador IMPULSA. El dispositivo se probó también en el Río de las Estacas, Morelos, mostrando un muy buen comportamiento hidrodinámico.

## **Abstract**

This thesis outlines the development of a new system which transforms the kinetic energy of sea currents into mechanical energy, which is then converted into electrical energy. This novel system is called IMPULSA hydrogenerator and it can be classified as a floating turbine with a vertical axis and directed flow. From an initial analysis of other types of conversion devices, a prototype was designed and its efficiency tested, in small scale, in the field and in the laboratory. The IMPULSA device has two main parts: a shell or body which lodges the rotor blades and the floating structures which are also designed to constrict the hydraulic area (venturi effect). The new system has several design features which suggest it can prove to be highly efficient, including an internal conduit, which directs the flow within the shell onto one side of the blades thereby increasing the efficiency of the motor, the shape of the shell that allows the flow only to hit one side of the rotor blades and the use of helicoidal rotor blades which let the device to convert energy even from low velocity currents.

The preliminary design was made using the PHOENICS routines, which is a tool that simulates the interaction of flows and obstacles. Several configurations of the case, concentrators and rotor blades were analysed. The optimum configuration was selected by a combination of hydrodynamic efficiency, floatability and the stability of the system.

To analyse efficiency, the device was subjected to laboratory tests at OHMSETT, New Jersey, USA, in a wave channel of 230m length, 20m width and 3.4m depth and a moveable bridge which can move at 6.5 knots. The parameters registered were bridge velocity, angular velocity, torque and drag force. With this data efficiency curves were obtained for the IMPULSA turbine and it was then tested in the Estacas River, Morelos, Mexico, showing very good hydrodynamic behavior.

## Contenido

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | Introducción .....   | 3  |
| 1.1   | Definición del problema .....  | 3  |
| 1.2   | Justificación .....  | 6  |
| 1.3   | Hipótesis .....  | 7  |
| 1.4   | Objetivo general .....   | 7  |
| 1.5   | Metodología .....  | 8  |
| 1.6   | Alcances y limitaciones .....  | 8  |
| 1.7   | Aportaciones .....   | 9  |
| 1.8   | Organización del trabajo .....   | 9  |
| 2     | Antecedentes.....  | 11 |
| 2.1   | Corrientes oceánicas.....  | 12 |
| 2.2   | Corrientes de marea.....   | 13 |
| 2.3   | La corriente del canal de Yucatán .....                                      | 14 |
| 2.4   | Corrientes en el Golfo de California.....                                    | 15 |
| 2.5   | Dispositivos de conversión de energía, Estado del arte .....                 | 18 |
| 2.6   | Clasificación de los dispositivos de conversión .....                        | 20 |
| 2.7   | Actividad internacional .....  | 21 |
| 2.7.1 | Turbinas de eje Horizontal fijas al fondo marino .....                       | 24 |
| 2.7.2 | Turbinas de eje Horizontal flotantes.....                                    | 27 |
| 2.7.3 | Turbinas de Eje Vertical.....  | 29 |
| 2.8   | Actividad nacional .....   | 30 |
| 3     | Trabajo de campo.....  | 32 |
| 3.1   | Introducción .....   | 32 |
| 3.2   | Campaña de corrientes .....  | 33 |
| 3.3   | Análisis de los datos.....   | 34 |
| 3.4   | Análisis de los datos de corrientes .....                                    | 39 |
| 3.5   | Energía disponible y aprovechable.....                                       | 43 |
| 4     | Pre-diseño del Hidrogenerador IMPULSA.....                                   | 46 |
| 4.1   | Análisis de la energía suministrada a una turbina .....                      | 46 |
| 4.2   | Sobre el uso del rotor tipo Savonius o Panémona de cuatro álabes.....        | 50 |
| 4.3   | Modelo Matemático del Torque Desarrollado en una Turbina tipo Savonius ..... | 50 |
| 4.4   | Prueba de laboratorio para cálculo de potencia de rotores tipo Savonius..... | 55 |
| 4.5   | Resultados .....   | 58 |
| 4.5.1 | Caso1. Rotor Recto (Torcido 0°).....   | 58 |
| 4.5.2 | Caso 2. Rotor Helicoidal (Torcido 90°).....                                  | 59 |
| 4.6   | Comparación de Resultados .....  | 61 |
| 4.7   | Modelo Conceptual .....  | 62 |
| 4.8   | Determinación de la geometría de los elementos de la turbina .....           | 62 |
| 4.8.1 | Carcasa .....  | 63 |
| 4.9   | Modelado numérico.....   | 64 |
| 5     | Modelado físico.....   | 69 |
| 5.1   | Introducción .....   | 69 |

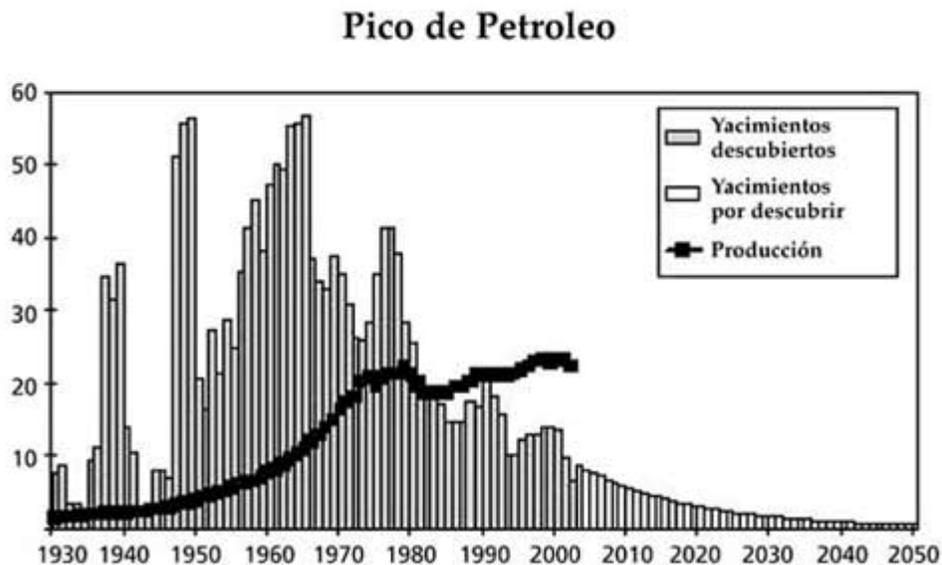
|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.2   | Generalidades de las turbinas marinas .....         | 70 |
| 5.3   | Hidrogenerador impulsa .....                        | 71 |
| 5.4   | Diseño geométrico del dispositivo .....             | 72 |
| 5.5   | Construcción de modelos físicos.....                | 74 |
| 5.5.1 | Etapa 1 .....                                       | 74 |
| 5.5.2 | Etapa 2.....  | 76 |
| 5.5.3 | Etapa 3.....  | 80 |
| 5.6   | Transmisión con engranes .....                      | 81 |
| 5.7   | Pruebas con el hidrogenerador IMPULSA.....          | 83 |
| 5.8   | Primera etapa de experimentación.....               | 84 |
| 5.9   | Segunda etapa de experimentación .....              | 86 |
| 6     | Conclusiones y futuras líneas de investigación..... | 90 |
| 6.1   | Conclusiones particulares .....                     | 90 |
| 6.1.1 | Corrientes .....                                    | 90 |
| 6.1.2 | Dispositivos de conversión .....                    | 91 |
| 6.1.3 | Dispositivo Hidrogenerador IMPULSA .....            | 91 |
| 6.1.4 | Conclusiones generales.....                         | 92 |
| 6.2   | Futuras líneas de investigación .....               | 93 |
|       | BIBLIOGRAFÍA.....                                   | 95 |

# 1. Introducción

## 1.1 Definición del problema

El petróleo es una de las fuentes de energía más utilizadas en la actualidad. Su descubrimiento y aplicación coincide con el crecimiento acelerado de la población, provocando que la demanda de este producto experimente también un crecimiento acelerado. En la actualidad se consume más petróleo del que se descubre, por lo que la duración de las reservas, de acuerdo con la tasa actual de consumo, se estima de dos o tres décadas. Por lo tanto, el tiempo para que las reservas mundiales de petróleo se agoten es cada vez menor; como lo señala Fernando Ballenilla en su artículo "El final del petróleo barato" (Ballenilla 2004).

A pesar de que todavía queda un poco más de la mitad del petróleo convencional que la naturaleza creó en eras geológicas anteriores, éste va a ser cada vez más difícil y caro de extraer porque el petróleo fácil y barato de producir ya se consumió. Aunque se invierta más en exploración; solo se van a descubrir yacimientos más pequeños porque todos los grandes fueron descubiertos hace medio siglo (**Figura 1-1**). Actualmente se descubre sólo un barril de petróleo por cada cinco que se consumen a nivel mundial.

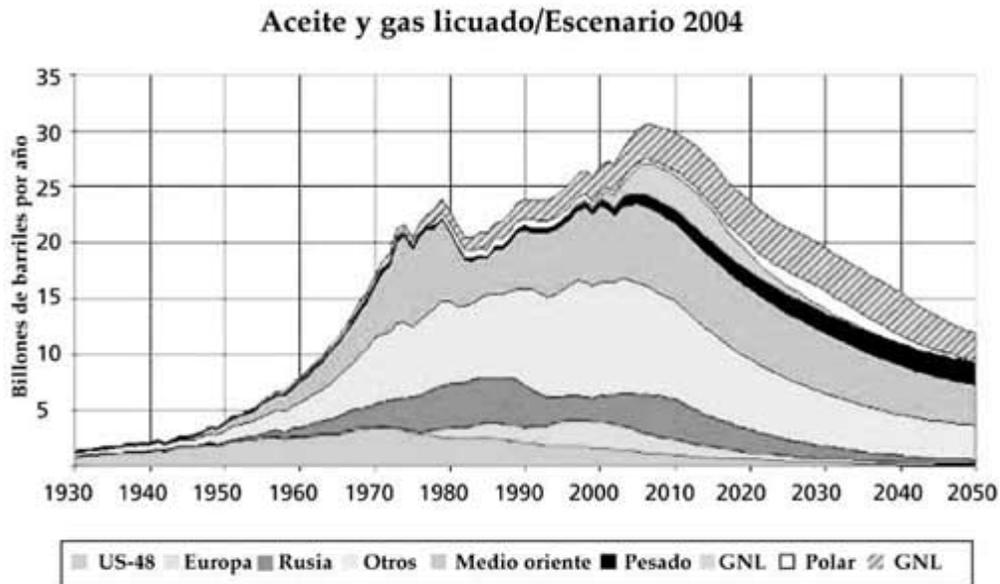


**Figura 1-1 Descubrimientos y producción de petróleo a nivel mundial, en Gb (1 Gb = mil millones de barriles). Fuente: ASPO, Boletín Nº 57 - Septiembre 2005.**

A este fenómeno se le conoce como pico de producción del petróleo (Deffeyes and Silverman 2004), un término introducido por el geofísico estadounidense M. King Hubbert, quien encontró que la extracción petrolera se puede graficar como una campana donde la base representa los años y la altura la producción petrolera. Cuando ya se ha extraído la mitad del petróleo se ha llegado al punto más alto de producción (la cúspide de la campana) y pronto comienza un irremediable declive. En 1956 Hubbert predijo correctamente el pico de petróleo de los Estados Unidos, que ocurrió a principios de los

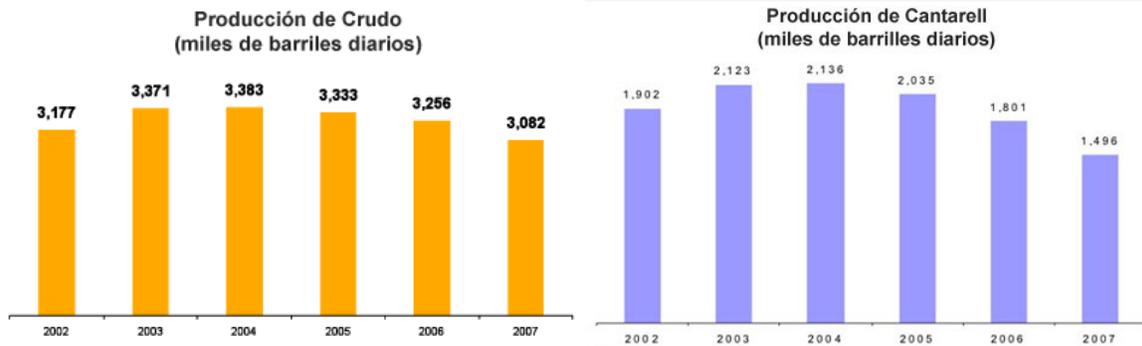
años setenta. Actualmente más de 50 países productores, incluyendo México, ya pasaron su pico de producción y queda sólo una decena de países con capacidad de aumentarla. Este modelo de extracción de recursos fósiles, así como el hecho de que el petróleo barato se está acabando, es algo bastante aceptado por la comunidad científica internacional y, cada vez más, por la industria petrolera.

La Asociación para el Estudio del Pico de Petróleo y el Gas (ASPO por sus siglas en inglés) estimó que el pico mundial ocurrió en 2007, 10 años después de lo predicho por Hubbert. En la **Figura 1-2** se incluye el petróleo no convencional (petróleos pesados, reservas bajo aguas marinas profundas [AMP], en regiones polares y el gas natural licuado (GNL). Las áreas debajo de cada curva o "campana" representan las reservas por región o por tipo de combustible. Según este modelo, el pico mundial de producción petrolera ocurrió en el 2007. Por otro lado, hay quienes aseguran que actualmente estamos en el pico de producción, y que el problema principal para predecirlo con certeza es que la mayoría de los países no dan cifras verdaderas o inflan los reportes de sus reservas para aumentar sus cuotas de producción o para atraer inversionistas. Bajo esta óptica, el escenario podría ser inclusive más pesimista de lo que creemos.



**Figura 1-2. Producción petrolera a nivel mundial (en miles de millones de barriles (cúspide de la "campana" total). Fuente: ASPO, Boletín N° 53 - Mayo, 2005.**

Al ritmo en que se consumé petróleo mundialmente, nos acabaríamos lo que queda en menos de 40 años. Aunque resulte difícil de creer, para México la situación no es muy alentadora. Se estima que en el territorio Mexicano sólo quedan aproximadamente 15 mil millones de barriles. Al ritmo actual de producción, que asciende a cerca de mil 400 millones de barriles al año, de los cuales se vende casi el 45% a Estados Unidos, el petróleo mexicano se agotaría en los próximos 11 años. Sin embargo, debido a que el petróleo paulatinamente es cada vez más difícil de extraer, la producción de petróleo disminuiría extendiendo algunos años la vida de los yacimientos como se puede apreciar en la **Figura 1-3**.



**Figura 1-3 Producción de Crudo en los últimos años (fuente: PEMEX)**

Por más que Pemex invierta en exploración, sin importar si el dinero es federal o privado, las reservas de petróleo no van a crecer lo suficiente para incrementarse en un 50%, lo que equivaldría a menos de seis años (al ritmo actual de producción). Esto sugiere que en aproximadamente una década podríamos perder cerca de la cuarta parte de los ingresos para el presupuesto federal o qué, entonces, tendríamos que importar petróleo a, quizás, 300 dólares o más el barril. Las implicaciones serían desastrosas.

Existen otros grupos quienes aseguran que quedan 100 años más de petróleo. Este grupo consiste sobretodo de políticos y economistas que incluyen en sus cálculos el petróleo no convencional. Este es, por ejemplo, el que se encuentra en arenas asfálticas; o el petróleo pesado (parecido al chapopote); o el que se localiza fuera de la plataforma continental a grandes profundidades dentro del mar. Su producción es mucho más cara que el petróleo convencional y requiere del uso de energía fósil (carbón, petróleo o gas natural) por lo que la energía neta resultante es casi nula. Esto quiere decir que si se consumen directa e indirectamente 8 litros de petróleo para producir 10 litros, la energía neta es de 2 litros solamente y por lo tanto, la explotación de estos yacimientos no es rentable. Inclusive en algunos casos la energía neta podría ser negativa. Los avances tecnológicos pueden ayudar a aumentar la energía neta y extender un poco el pico de producción, pero no a crear más petróleo.

A consecuencia del pico del petróleo seguramente vamos a ver un resurgimiento de plantas de fisión nuclear para generar electricidad. A pesar del reclamo de ecologistas por los altos riesgos de contaminación nuclear, así como de los gobiernos que ven en ello el potencial de proliferación de armas de destrucción masiva, la energía nuclear puede ser fundamental para cubrir el déficit de electricidad y mantener los sistemas de telecomunicación e Internet, así como servicios médicos y de educación necesarios para el desarrollo y funcionamiento de cualquier país. Aunado a ello para producir e instalar alternativas renovables se requiere de mucha energía por lo que la energía nuclear va a ser necesaria para contrarrestar la escasez de petróleo. Sin embargo, aún el uranio, que se usa de combustible en la fisión nuclear, es un recurso finito.

Por su parte, la fusión nuclear parece ser la panacea energética ya que sería bastante limpia y casi ilimitada. Desafortunadamente, después de medio siglo de extensa investigación, los científicos todavía están muy lejos de sostener controladamente este tipo de reacción por más de una fracción de segundo. En efecto, no existe material alguno en la Tierra que resista y contenga la temperatura de más de 10 millones de grados centígrados que ocurre cuando, como en el sol, dos átomos de hidrógeno se fusionan en uno de helio, detonando una reacción en cadena.

Como se puede ver, se tienen dos situaciones, una sería mantener nuestro nivel de vida mediante el aprovechamiento racional del petróleo en función de su versatilidad para usos petroquímicos y otra, continuar con su desperdicio quemándolo como combustible para generar la electricidad necesaria en la producción de otros satisfactores. Por lo tanto se busca un abasto eléctrico alternativo a través de fuentes renovables diferentes o complementarias a la nuclear y que no requieran de la quema de combustibles fósiles para su viabilidad.

Con esta perspectiva, aunado con el deterioro ambiental que ha traído consigo el uso de hidrocarburos, la preocupación por buscar nuevas fuentes de energía está en aumento día con día. Actualmente existen numerosas instancias e iniciativas internacionales, regionales e intergubernamentales que apoyan la penetración de las fuentes de energía renovables en los mercados energéticos, tanto en los países industrializados como en vías de desarrollo (Altonmonte 2004). Unas de estas opciones puede ser la energía del océano, que aunque no satisface completamente la demanda de energía, sí contribuirá en buena medida a reducir el consumo de fuentes de energía fósil, mediante ingenios que permitan aprovechar la fuerza cinética del oleaje, las mareas y las corrientes marinas.

En este contexto, este trabajo está enfocado al **desarrollo de un dispositivo de conversión de energía de corrientes marinas**.

## 1.2 Justificación

Como parte de un sistema termodinámico muy complicado, los océanos han sido reconocidos a través de los años como grandes colectores de energía, la cual se manifiesta en forma de mareas, corrientes y oleaje principalmente, este último en algunas ocasiones incluso destructivo. También a través de los años, el hombre ha tratado de aprovechar la energía del océano por medio de molinos de marea que aprovechaban el ir y venir del agua en el ascenso y descenso de la marea. Con el descubrimiento del petróleo estas tecnologías y los esfuerzos por aprovechar la energía del oleaje fue abandonado, pero a partir de la crisis del petróleo en 1975 y en últimas fechas los efectos adversos de los gases de efecto invernadero producto de la combustión de combustibles fósiles ha vuelto el interés por este tipo de energía y como consecuencia han surgido con mas empuje los esfuerzos por aprovechar la energía del océano.

México tiene un gran rezago en materia de aprovechamiento de la energía oceánica, sin embargo es importante mencionar que la tecnología que se utiliza con este fin es muy similar a la que se emplea en los aprovechamientos hidráulicos actuales, materia en la cual nuestro país ha tenido grandes avances tecnológicos de implementación y desarrollo.

Un factor del rezago en el aprovechamiento de la energía oceánica, es posiblemente el alto costo de construcción, operación y mantenimiento de las plantas de generación de energía eléctrica construidas en los océanos o en las costas con respecto a los sistemas convencionales (termoeléctricas). Sin embargo, con la tendencia del precio del petróleo a la alza y los costos de exploración y producción cada vez más elevados, llegará un momento en que el costo no será un impedimento. Incluso las hidroeléctricas que no consumen combustible para operar, tienen un alto costo inicial además de los costos ecológicos y sociales. Por lo tanto es necesario iniciar con la investigación y el desarrollo

de tecnología para la explotación y aprovechamiento de la energía oceánica (Brunch 1994).

Aunque en países desarrollados la búsqueda de tecnología para la explotación de energía oceánica lleva varios años y se han logrado avances significativos, quedan muchas preguntas sin responder en cuanto a generación de energía oceánica se refiere. Estas van desde la eficiencia de los dispositivos de conversión, como a las obras complementarias y sus efectos en los diversos procesos físicos (hidrodinámicos y morfodinámicos) y sus efectos en la zona costera. Existe poca planeación acerca de cuáles serían las medidas de mitigación adecuadas en caso de la construcción de una obra de ingeniería civil y cuál sería el lugar adecuado de construcción. Estos son solo algunos cuestionamientos que deben ser estudiados a detalle para contribuir a la toma de decisiones en materia de generación de energía renovable oceánica.

### **1.3 Hipótesis**

En la actualidad es posible la explotación de la energía de las corrientes marinas con componentes y sistemas de ingeniería convencionales, pero se requiere investigación y desarrollo que permitan mejorar los dispositivos para lograr fiabilidad y durabilidad a bajo costo de operación y mantenimiento. Además de investigaciones en cuanto a convertidores eficientes y formas de almacenamiento y transmisión que permitan desarrollar unidades de energía eléctrica rentables.

El desarrollo de dispositivos que aprovechan la energía oceánica y en especial los que utilizan la energía cinética de las corrientes marinas para producir electricidad aun se encuentran en fase de experimentación y desarrollo y falta bastante investigación para que los primeros dispositivos estén listos en el mercado para la explotación de este recurso.

El atraso en el desarrollo de estos dispositivos, se debe, por un lado a intereses políticos y comerciales del petróleo y por otro lado, al elevado costo de instalación y mantenimiento en el océano de este tipo de dispositivos, lo que reduce el interés de inversionistas y centros de investigación por estas fuentes de energía.

El dispositivo en desarrollo ofrece varias ventajas sobre otros dispositivos, por lo cual, es necesario implementar una serie de sistemas dentro y fuera del mismo para que pueda considerarse funcional. Ya que la energía cinética del fluido que puede transformarse en energía eléctrica depende mucho de la forma y características hidrodinámicas del dispositivo.

### **1.4 Objetivo general**

Desarrollar con tecnología mexicana un dispositivo de conversión de energía de un flujo de agua en energía eléctrica.

Objetivos particulares

- Fabricar el modelo de conversión de energía

- Realizar pruebas del modelo en laboratorio para verificar su funcionamiento y eficiencia
- Obtener un modelo paramétrico con los resultados de laboratorio

## 1.5 Metodología

1. Investigar y evaluar los diferentes dispositivos existentes de conversión de energía de corrientes marinas
2. Medición y adquisición de datos de corrientes para evaluar su eventual utilización en el litoral mexicano
3. Selección de uno de los dispositivos analizados, que reúna las características apropiadas a los requerimientos y condiciones del país
4. Diseño, construcción y adecuación del modelo
5. Pruebas de laboratorio
  - a. En esta etapa, se colocará el hidrogenerador en un canal con un gasto constante, para simular la velocidad promedio, instrumentando el modelo con dispositivos para conocer la eficiencia del sistema.
  - b. Variación de los parámetros de las pruebas (velocidad, profundidad, potencia de la turbina)
  - c. Análisis de los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio
  - d. Con los resultados de los experimentos se conocerá la velocidad antes y después de la turbina y la potencia generada
6. Se estará en posibilidad de formular un modelo paramétrico que describa el funcionamiento de la turbina, la relación de velocidad de la corriente y potencia de la turbina
7. Con el modelo paramétrico obtenido se realizaran simulaciones con los registros de corrientes obtenidos en la campaña de campo de por lo menos un mes de registro.

## 1.6 Alcances y limitaciones

Este trabajo de investigación representa un primer esfuerzo para contribuir a la generación de conocimiento en el tema de aprovechamiento de energía cinética del mar y para evaluar la conveniencia de futuros estudios y desarrollo de tecnología teniendo en cuenta que México cuenta con una extensión importante de litoral y varias zonas potencialmente aprovechables. Cuantificar la cantidad de energía que puede ser aprovechable con la tecnología disponible en la actualidad, servirá para tomar decisiones futuras en materia de política energética y destinar recursos a la investigación y desarrollo de esta tecnología de conversión.

El trabajo incluye como objetivo principal, el desarrollo de un equipo de conversión de energía. Para ello se requiere el estudio y conocimiento de los dispositivos actuales de conversión de energía y la adecuación de alguno de ellos o sus características más sobresalientes para integrarlas al dispositivo en desarrollo para que funcione adecuadamente con las condiciones actuales de desarrollo en el país, pudiendo generar tecnología para la puesta en marcha.

El trabajo no abarca al 100% los tópicos del desarrollo de un dispositivo de conversión y en algunos casos solo se mencionaran los más importantes, siendo estos objeto de futuras líneas de estudio, como por ejemplo los efectos de escala, los precios de producción tanto del dispositivo como de la energía transformada, el estudio de materiales anticorrosivos y sistemas automatizados de operación y mantenimiento así como los efectos hidrodinámicos y morfológicos que una granja de generación causaría.

## 1.7 Aportaciones

Las aportaciones principales de este estudio son:

- Caracterización con modelos a escala del proceso de transformación de la energía.
- Establecimiento de las bases para la selección de sitios de aprovechamiento de las corrientes marinas de acuerdo al dispositivo desarrollado
- Generación de tecnología para la puesta en marcha del dispositivo desarrollado o los equipos existentes.

## 1.8 Organización del trabajo

El trabajo está organizado en cinco capítulos.

El capítulo 1, es el que se está presentando con el tema de investigación, justificación y objetivos y organización del trabajo.

En el capítulo 2 se presenta una introducción de las corrientes oceánicas, se investiga el recurso disponible en las costas de la república mexicana y se presenta un resumen de los dispositivos de conversión existentes, (tidal energy) los cuales cuentan con un grado de desarrollo tal, que se encuentran en fase de prueba y/o demostración así como, las características principales de funcionamiento y capacidad.

En el capítulo 3 se presenta un caso de estudio acerca de las corrientes del Golfo de California y particularmente del canal de Infiernillo, lugar donde se colocó un dispositivo de medición durante más de tres meses. En este apartado se muestran los resultados de las mediciones así como un análisis de la capacidad de generación eléctrica de acuerdo a los datos recabados. Las corrientes en este sitio de estudio son forzadas principalmente por el gradiente hidráulico de la marea, aunque se observan componentes no astronómicas que incrementan la capacidad de generación lo cual también es cuantificado.

El capítulo 4 contiene las bases para el diseño del dispositivo de conversión “Hidrogenerador IMPULSA” llamado así por haber surgido dentro del Proyecto IMPUSA 4 “Desalación de agua de mar con energías renovables”, y sus características de conversión, para lo cual se utilizaron modelos numéricos para determinar la forma del dispositivo y cómo esta influía en el flujo, tratando de evitar o disminuir la separación de las líneas de corriente. Así mismo, se presenta un modelo matemático para determinar el torque máximo disponible en los rotores y el ángulo de torcimiento óptimo.

Finalmente en el capítulo 5 se presenta el diseño del Hidrogenerador IMPULSA, los modelos físicos construidos y su proceso, las pruebas realizadas y los resultados de los

experimentos de donde se desprenden conclusiones interesantes y se pueden observar aciertos y algunas ventajas en comparación a los dispositivos existentes, así como deficiencias y nuevas líneas de investigación. Se presenta un resumen en el capítulo 6 con conclusiones, observaciones y nuevas líneas de investigación necesarias para el mejoramiento del dispositivo.

Adicionalmente a la investigación realizada, se encuentra en proceso una posible solicitud de patente o modelo de utilidad para su eventual transferencia de tecnología.

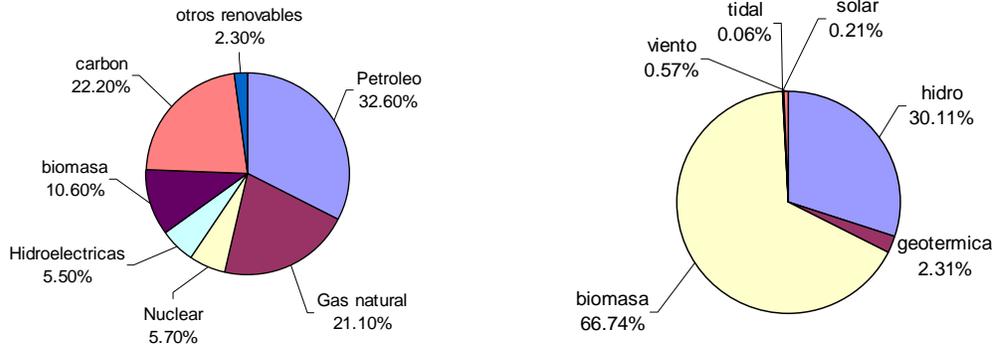
## 2 Antecedentes

El cambio climático es un tema de interés mundial respecto del cual han surgido muchas hipótesis y teorías tratando de explicar sus causas y consecuencias. Una de las causas que se mencionan al respecto, es el impacto negativo que los gases de efecto invernadero ocasionan al medio ambiente (Noss 2001), los cuales son producto principalmente de la combustión de hidrocarburos originada por las actividades de la vida cotidiana. Este hecho, aunado a la creciente demanda de energía, ha despertado la inquietud en muchos gobiernos y organismos internacionales por buscar nuevas fuentes de energía y la forma de aprovecharlas de manera que no contaminen el medio ambiente (Blunden and Bahaj 2007).

En este sentido, las fuentes de energía renovable se vislumbran como una alternativa viable para hacer frente a estos requerimientos, ya que representan un recurso abundante y de bajo impacto ambiental (EUR 1996), por lo cual su aprovechamiento se ha venido incrementando paulatinamente. Sin embargo, el uso de este tipo de fuentes de energía no es nuevo, se tienen registros del aprovechamiento de energías renovables desde tiempos inmemorables, en forma de molinos o generadores eléctricos de viento o marea (Charlier and Justus 1993), las cuales con el descubrimiento de los combustibles fósiles se abandonaron por resultar poco eficientes en comparación con la producción utilizando máquinas de combustión interna. Actualmente, con el inminente agotamiento del petróleo y los costos cada vez más elevados de exploración y explotación, las fuentes de energía renovables han vuelto a surgir con mayor fuerza, entre las más importantes se cuentan la energía eólica, solar, hidráulica y geotérmica, (Altonmonte 2004; Dincer 2000).

El sol es una de las principales fuentes de energía del planeta, ya sea de forma directa, como radiación, o indirecta como bioenergía, circulación de agua o viento. Esta energía es transferida al océano y toma formas conocidas como oleaje, corrientes marinas, viento, gradiente de densidad y biomasa. Por otra parte, el sol junto con la luna generan fuerzas de atracción gravitacional que originan un movimiento de la masa de agua del océano conocido como marea, la cual es otra fuente de energía oceánica que puede ser aprovechada (Charlier and Justus 1993). Así, el océano ha sido reconocido a través de la historia como una enorme fuente de energía (Bernshtein et al. 1997). Se estima que tan solo la potencia de generación de las corrientes oceánicas es del orden de 5 millones de MW (Isaacs and Seymour 2001) y aún cuando, en términos reales, solo una mínima fracción de esa energía se puede aprovechar, sigue siendo una cantidad considerable. A pesar de este potencial, no fue sino hasta la crisis del petróleo de los años setentas, cuando se iniciaron estudios y avances serios para el aprovechamiento de la energía del océano, de ahí que esta área del conocimiento se considere joven y poco desarrollada.

En la **Figura 2-1**, se presenta de manera resumida la contribución de las diversas fuentes de energía para suplir la demanda mundial. Se puede observar que las energías renovables representan un porcentaje muy pequeño del total y aun es menor si se considera lo que se refiere a las **energías renovables del océano**, por ello, este tema representa una magnífica oportunidad para la investigación y desarrollo. Es por ello que este trabajo de investigación se ha dirigido al estudio de las energías del océano, con especial énfasis en las corrientes oceánicas y la forma de aprovecharlas



**Figura 2-1 Distribución de Fuentes de energía para suplir la demanda mundial y distribución de energías renovables (IEA 2007)**

## 2.1 Corrientes oceánicas

Una de las fuentes de energía más abundantes del planeta, son las corrientes oceánicas y una de las primeras etapas para su aprovechamiento consiste en conocer sus características físicas. México cuenta aproximadamente con 11000 km de litoral y corrientes oceánicas y de marea susceptibles de aprovechamiento.

Las corrientes oceánicas o flujos de agua marina pueden tener diferentes orígenes; uno de ellos es el calentamiento del agua y de la atmosfera cerca del ecuador por la radiación solar. El calentamiento del agua genera variaciones en densidad (temperatura y salinidad) que resultan en movimiento de las masas de agua y el calentamiento de la atmosfera genera vientos que al desplazarse de un lugar a otro, arrastran por fricción partículas de agua de la superficie del mar. Esto, aunado al movimiento de rotación de la tierra y la inercia del agua, da lugar a las corrientes marinas de gran escala conocidas también como corrientes geostróficas (Gill 1982). De esta manera, el agua fría de los polos se mueve hacia el ecuador y el agua caliente del ecuador se mueve hacia los polos en el sentido al movimiento planetario como se puede apreciar en la **Figura 2-2**. Estas corrientes son relativamente constantes y sólo fluyen en una dirección (Cetina et al. 2005). La magnitud de las corrientes oceánicas puede aumentar considerablemente por la configuración del fondo marino, particularmente en la vecindad con los continentes o en estrechos entre islas y continentes.

En resumen, los patrones de circulación de las aguas oceánicas se originan por una compleja síntesis de fuerzas y factores que interactúan de forma diversa y variable en el tiempo y en el espacio. Las más importantes de estas fuerzas y factores son:

- El movimiento de rotación terrestre
- Configuración del fondo marino
- La forma de las costas y su influencia en la dirección de las corrientes
- La desigual absorción y transporte de calor por la radiación solar absorbida por las aguas marinas
- Cambios de densidad salino
- La influencia mutua entre las corrientes marinas y los vientos
- La desviación de las corrientes debido al efecto de Coriolis (que a su vez, también se debe a los efectos de la rotación terrestre)

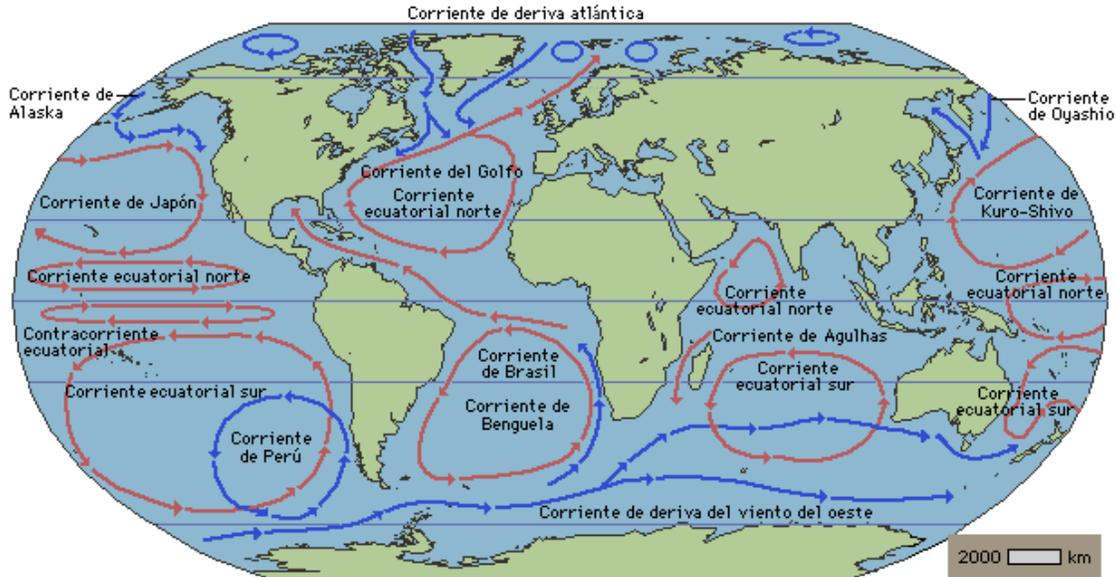


Figura 2-2 Corrientes Oceánicas

## 2.2 Corrientes de marea

La fuerza de atracción que ejerce el sol y la luna sobre los océanos genera diferencia en el nivel del mar, lo cual mueve millones de metros cúbicos de agua diariamente, a este movimiento se le conoce como flujo de marea astronómico o corriente de marea astronómico y generalmente ocurre en dos direcciones y en magnitud directamente proporcional a la amplitud de la marea (Palacios et al. 2005).

Las mareas son ondas oceánicas de muy grande periodo y longitud, por ello, prácticamente en todo el planeta se comportan como ondas en aguas-someras. Las mareas en las costas se perciben como variaciones en el nivel de la elevación de la superficie libre y, usualmente, suceden dos máximos y dos mínimos al día. Esta oscilación de la superficie genera gradientes que se traducen en las conocidas **corrientes asociadas o corrientes de marea**. El conocimiento de las periodicidades, rangos y extensión de los flujos y reflujos asociados a la marea tiene una gran aplicabilidad principalmente en las zonas costeras y, en este trabajo de investigación, representan un potencial de energía renovable susceptible de ser transformada a energía eléctrica.

La variación de nivel del mar sobre la plataforma continental exige un movimiento alternativo del agua hacia la costa y hacia el mar. Como la profundidad del agua no es la misma cuando la marea sube que cuando baja y la forma de los obstáculos cambia con respecto a la dirección, la velocidad de la corriente tampoco es la misma. El vector velocidad dibuja una especie de elipsoide cuyo eje mayor es casi paralelo a la costa. En sitios donde las mareas tienen gran amplitud, las velocidades del agua también pueden ser muy grandes. Por ejemplo, en el Canal de la Mancha, en el Raz de Sein (en el extremo oeste de Bretaña, en Francia) y en el Raz Blanchard (al norte de la península del Cotentín, Francia), la corriente sobrepasa los 10 nudos (18 km/h ó 5 m/s) durante las grandes mareas (Balme et al. 2007) y en el estrecho de Mesina (entre Italia y la isla de Sicilia), la corriente puede llegar a 5 nudos (El-Geziry and Couch 2009). En mar abierto, la dirección de la corriente de marea cambia continuamente hasta 180 grados en forma

diurna y semidiurna, en cambio, en regiones costeras la alternancia de las corrientes de marea está dominada por la topografía, pudiendo presentarse en una sola dirección.

Los patrones de corrientes de marea son modificados por factores como la forma de la línea de costa, topografía del fondo, condiciones climáticas, frentes de ola, entre otros, todos ellos producen asimetrías en las elipses idealizadas dando como resultado lo que se conoce como corrientes residuales, que son movimientos netos de agua en direcciones bien definidas. Las corrientes residuales inducidas por marea son importantes porque son persistentes y están relacionadas con la posición de línea de costa y la topografía del fondo.

### 2.3 La corriente del canal de Yucatán

La Corriente del Golfo es parte de la circulación oceánica superficial más importante, que se dirige al Norte (**Figura 2-3**). En este sector del Atlántico las corrientes describen un enorme círculo que se mueve en sentido anticiclónico (es decir, en dirección de las agujas del reloj). Esta corriente empieza en la parte oriental del Golfo de México, fluye a través de los estrechos de la Florida y sigue a lo largo de la costa sureste de los Estados Unidos hasta cabo Hatteros en Carolina del norte, donde se separa del continente hacia aguas más profundas siguiendo su recorrido hacia Europa, donde toma el nombre de corriente del Atlántico Norte. A pesar de tener muchos segmentos y un recorrido muy largo, la corriente del Golfo es considerada como un sistema de una sola corriente que se desplaza aproximadamente a 1.8 m/s con un caudal de alrededor de 80 Sverdrup ( $1 \text{ Sv}=10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Esta corriente, en gran parte de su larga trayectoria, tiene una anchura aproximada de más de 1000 km, lo que da una idea aproximada de la enorme cantidad de energía que transporta y de las consecuencias benéficas de la misma.

La corriente del Caribe Mexicano es una continuación de la corriente norte del Brasil, llamada corriente Caimán, la cual pasa a través del canal de Yucatán, alimenta la circulación del Golfo de México (Gordon 1967) y posteriormente la corriente del Golfo. La corriente del canal de Yucatán tiene gran importancia, ya que es la responsable del flujo de calor oceánico hacia latitudes medias, ayuda a modular el clima en el Océano Atlántico (Schmitz and McCartney 1993) y pertenece al sistema Caribe-Golfo de México con un flujo que se estima de 24 Sv (Chávez et al. 2003).

El canal de Cozumel muestra propiedades interesantes, tiene un ancho promedio de 18 km, 50 km de largo y 400 m de profundidad media. Está situado 70 km al suroeste del canal de Yucatán, limitado por la península de Yucatán al Oeste y la Isla de Cozumel al Este, con una batimetría muy regular (Chávez et al. 2003). En este canal, el flujo de la corriente Caimán se divide, pasando una parte por dentro de canal de Cozumel y otra por la parte occidental de la Isla, la cantidad de masa que pasa por el canal de Cozumel se estima en aproximadamente 5 Sv (Chávez et al. 2003). A diferencia de las corrientes por marea, la corriente del canal del Yucatán es relativamente constante, con una velocidad promedio de 1.5 m/s (Cetina et al. 2005) y algunas fluctuaciones importantes (con una desviación estándar de 1.2 m/s), que en algunos casos tienen una duración entre un día y una semana (Ochoa et al. 2005). Tomando en cuenta que el flujo de energía se puede calcular como:

$$P = \frac{1}{2} \rho \int_A U^3 dA$$

Integrando en el tiempo y considerando una velocidad de 1.5 m/s se obtiene 14.78 GWh/año por metro cuadrado lo que representa una importante fuente de energía. Por ejemplo, considerando dos turbinas de 17 m de diámetro (227 m<sup>2</sup>) y un factor de eficiencia de 37% que es un valor aceptable para este tipo de dispositivos se obtienen 2492 GWh/año, lo que equivale a la producción de la presa Chicoasen.

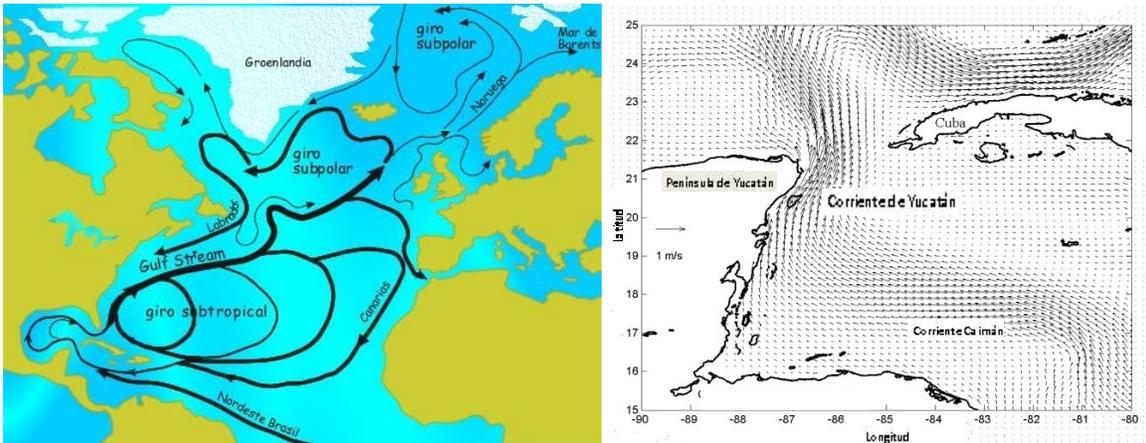


Figura 2-3 Circulación a lo largo del Caribe Mexicano y resultados de Modelo OPA Francés (Cetina et al. 2005)

## 2.4 Corrientes en el Golfo de California

El Golfo de California (**Figura 2-4**), es un mar rodeado por la península de Baja California y la costa continental de México, que incluye los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit. Se extiende en dirección noroeste en una longitud de 1,500 km, con anchuras variables de 92 a 222 km, y contiene una línea de costa de más de 3,000 km. La parte norte es relativamente somera (250 m de profundidad), mientras que la porción sur alcanza profundidades mayores de 3,000 m.

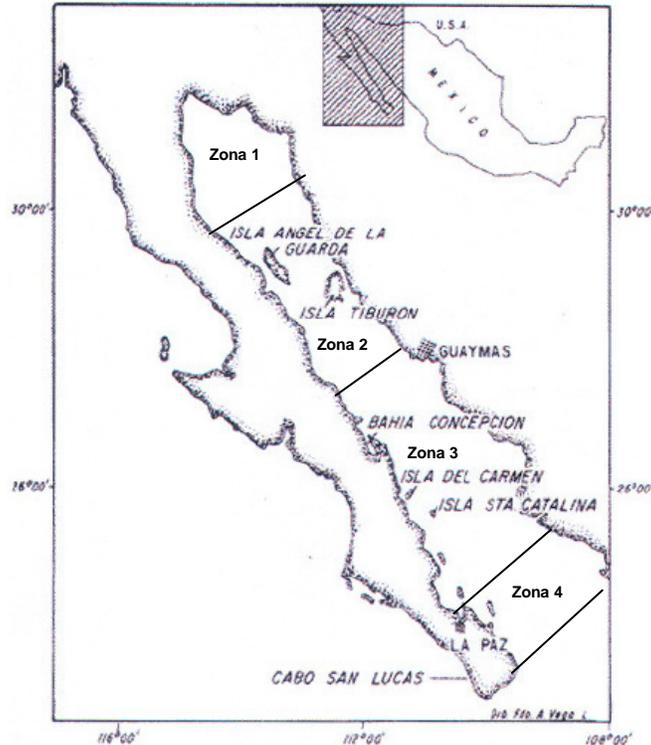


Figura 2-4 Localización del Golfo de California o Mar de Cortes

En el Golfo de California se reconocen cuatro áreas oceanográficas generales que se distinguen de acuerdo a las siguientes características.

1. **Golfo Norte o Alto Golfo.** Es la región entre el Delta del Río Colorado y la zona de las grandes islas. Los fondos someros (50-200 m) tienen una ligera pendiente hacia el suroeste. El fondo marino de esta región cuenta con una gran cantidad de sedimentos de origen continental, que en su mayoría fueron acarreados por el Río Colorado. Estos depósitos se extienden un poco al sur de la región de las grandes islas y en algunos sitios alcanzan un espesor de hasta 5 km. Debido a esta sedimentación existen pocas características batimétricas conocidas. Hay una alta turbidez cerca de la costa y, de manera permanente, cerca del delta del Río Colorado. La evaporación es alta y la precipitación baja, por su parte, las temperaturas son extremas, 10 °C en invierno y 32 °C en verano. Se caracteriza por alta salinidad superficial (35.5 ppm). Las mareas presentan una gran amplitud. En el golfo son predominantes las mareas de tipo semidiurno (dos mareas altas y dos bajas en poco más de 24 horas). En el Alto Golfo las mareas se encuentran entre las mayores del mundo: en la boca del Río Colorado se han medido fluctuaciones de más de nueve metros. Este gran desplazamiento vertical de agua crea enormes áreas de intermareas, de hasta 5 km de extensión y genera fuertes corrientes de marea, en algunos casos de más de 1.5 m/s. (Palacios et al. 2005)

2. **Región de las grandes islas.** El fondo está conformado por cinco cuencas en forma de "V". En el norte, "Cuenca el Delfín", tiene un fondo casi plano; posteriormente, hacia el sur, alcanza 900 m de profundidad. Ahí continúa la cuenca "Salsipuedes" la cual es muy estrecha y con profundidades de hasta 1,400 m. Ésta cuenca no tiene gran cantidad de sedimentos a causa de las altas velocidades que alcanzan las corrientes de marea. Las cuencas de "San Esteban", "Tiburón" y "San Pedro Mártir", alcanzan

profundidades de 900 m. Ésta es una de las características batimétricas más sobresalientes de la región, y enmarca un régimen hidrográfico único. Las cuencas funcionan como embudos y restringen la circulación entre las áreas oceanográficas golfo norte y golfo central. Por otro lado, actúan como punto de generación de la mezcla intensa de masas de agua por fuertes corrientes de marea. Las surgencias ocurren durante todo el año, de acuerdo al régimen de mareas. Este fenómeno es de gran importancia, pues provee a la zona superficial del mar, donde penetran los rayos del sol, de gran cantidad de nutrientes que son aprovechados por el plancton.

3. **Golfo Central.** Se encuentra entre el límite sur de la región de las grandes islas hasta las bahías de Topolobampo en el este y de La Paz al oeste. Sus cuencas marinas son profundas. La mayor depresión en todo el golfo es la cuenca de Guaymas, con una longitud cercana a los 220 km y con profundidades de hasta 2,000 m. La amplitud de mareas en el Golfo Central es menor que en la parte norte del golfo, con un promedio de 1.5 m en Guaymas. Las corrientes de marea son menos importantes que las creadas por el efecto de los vientos. Esta región, donde se localiza el mayor número de islas, presenta importantes zonas de surgencias estacionales en ambas costas. Se registra una fuerte estacionalidad en la temperatura superficial, la que tiene valores de 16°C de febrero a marzo y de hasta 31°C en agosto, cuando las diferencias de temperatura entre la superficie y los 150 m de profundidad llegan a ser hasta 16°C.

4. **Región sur.** Está en comunicación abierta con el Océano Pacífico Tropical Oriental a través de la boca de aproximadamente 200 km de ancho y de cuencas cuya profundidad excede a los 3,600 m. Su estructura hidrográfica es complicada debido a la confluencia de distintas masas de agua en la boca del golfo. Es un hecho que el extremo sur de esta región del Golfo de California está fuertemente influenciada por las aguas del Océano Pacífico; ahí tienen lugar los mayores oleajes.

La gran amplitud de marea que se presenta en el Alto Golfo de California producto de un efecto de resonancia y someramiento, genera transporte de masa en flujo y reflujo que deriva en corrientes de marea muy importantes que son modificadas tanto en magnitud como en dirección por el movimiento de rotación terrestre, configuración del fondo marino, desigual absorción y transporte de calor por la radiación solar generando a su vez cambios de densidad salino. Las corrientes de marea, fluctúan con la intensidad de las mareas semidiurnas en un ciclo de mareas muertas-vivas, sin embargo en el Golfo de California existen ciertas anomalías como giros ciclónicos en una temporada del año y giros anticiclónicos en otra, inducido principalmente por las condiciones de densidad y temperatura estacional (Lavín et al. 1997; Palacios et al. 2005; Roden 1964).

El Mar de Cortés tiene la particularidad que la longitud del mismo es submúltiplo de la longitud de onda de marea (una onda de marea en general se considera como una onda en aguas someras  $d/L < 1/20$ ) lo que ocasiona un efecto de resonancia y someramiento, provocando una amplitud importante de marea en el Alto Golfo de California y por consiguiente fuertes corrientes

## 2.5 Dispositivos de conversión de energía, estado del arte

Conocer de manera confiable la capacidad y las diversas formas de energía oceánica, así como los procesos involucrados en los fenómenos oceanográficos, es el primer paso para el aprovechamiento de estas fuentes de energía, pero otra parte fundamental, es el conocimiento de los mecanismos físicos necesarios para convertir o transformar esta energía en electricidad o energía mecánica. En este sentido, los sistemas más desarrollados de conversión de energía del océano, se dividen principalmente en cuatro grupos: (1) **Energía de amplitud de mareas**, (2) **de corrientes marinas**, (3) **de gradiente térmico** (OTEC) y (4) **energía del oleaje o undimotriz**. A continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

La energía de las mareas generalmente conocida como energía mareomotriz, se aprovecha construyendo una especie de presa o embalse con una cortina, que permite que al subir la marea el embalse se llene y al bajar, se genere un desnivel entre la superficie del agua dentro y fuera del embalse que acciona turbinas de baja carga colocadas directamente en la cortina. Comúnmente las turbinas son de tipo bulbo aunque últimamente se ha optado por las turbinas Starflow que requieren menos espacio. Un ejemplo muy destacado de instalaciones de este tipo es la mareomotriz en la Rance, Francia que opera desde 1966. Está ubicada en una sección del río de 750 m, con una cortina de 910 m de longitud, crea un embalse de 22 km<sup>2</sup> con capacidad de 184x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, la generación se lleva a cabo con 24 turbinas tipo bulbo reversibles de 10 MW y su producción promedio es de 540 GWh anuales, (Charlier and Justus 1993).

La tecnología para el aprovechamiento de la energía cinética de un flujo de agua, en este caso corrientes marinas, es muy similar a la que se ocupa en los emplazamientos eólicos, donde se acoplan generadores eléctricos y turbinas eólicas para producir electricidad. Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En esos casos, la energía eólica o energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, (normalmente un alternador trifásico) que, a su vez, convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. Esta misma tecnología y principios físicos se aplican en el aprovechamiento de las corrientes marinas, con la diferencia que las condiciones oceánicas para la colocación operación y mantenimiento de los dispositivos colocados en altamar son más agresivas que en tierra firme (Bahaj and Myers 2003) y por otro lado, la densidad del agua es aproximadamente 1000 veces la densidad del aire.

El principio básico del aprovechamiento con tecnología OTEC o gradiente térmico, se basa en las características de ciertas zonas oceánicas, donde sus aguas son muy frías a poca profundidad, mientras que en la superficie son relativamente más cálidas producto de la radiación solar. Esta diferencia de temperatura es aprovechada para calentar y evaporar un fluido de trabajo, el cual a su vez acciona una turbina. El fluido, al salir de la turbina, se condensa aprovechando las bajas temperaturas del agua profunda. Aunque se han llevado a cabo experimentos desde 1928, este tipo de tecnología aun se encuentra en fase de experimentación y desarrollo ya que presenta una serie de inconvenientes, entre ellos altos costos de operación y mantenimiento (Charlier and Justus 1993).

El oleaje es una de las fuentes de energía oceánica más estudiada, el principio operativo consiste en aprovechar el movimiento incesante del mar (oleaje) con dispositivos que transforman este movimiento en energía mecánica o potencial, para posteriormente convertirla en energía eléctrica. Se han propuesto infinidad de dispositivos de conversión, cuya eficiencia depende de muchos factores, entre ellos la localización respecto de la costa o la forma de convertir el movimiento ondulatorio en mecánico. De esta manera, existen dispositivos costeros que se desplantan directamente en la línea de costa y otros que se colocan mar adentro. Uno de los dispositivos más avanzados es el llamado sistema pelamis, que es una especie de gusano articulado que se mueve al paso de las olas, en las articulaciones se colocan pistones que comprimen aceite o algún otro fluido de trabajo. Con la presión ganada en los pistones, se impulsa una turbina para generar electricidad.

México, con su vasto litoral, cuenta con suficiente potencial para abastecer la demanda con fuentes de energía oceánica, entre las que se pueden destacar la energía "undimotriz" en las costas del Océano Pacífico y la energía cinética de las corrientes marinas, especialmente la corriente de Yucatán y las corrientes de marea en el Mar de Cortés.

La energía cinética de las corrientes marinas, generalmente puede ser de dos tipos: corrientes oceánicas derivadas de gradientes térmicos y salinos y las corrientes de marea. Estas últimas más comunes y estudiadas para su aprovechamiento generalmente conocidas como energía de mareas (tidal energy) y se refieren solamente a la energía cinética de un flujo de agua forzado por gradiente de marea (tidal stream energy).

Durante mucho tiempo, la humanidad ha tratado de aprovechar la energía de las mareas. Las primeras instalaciones surgieron en Siria antes de la era cristiana, mientras que otras surgieron en China en el siglo quinto. El desarrollo de estos dispositivos no se detuvo hasta el inicio de la revolución industrial, con la puesta en marcha de fábricas y motores de combustión o motores térmicos y el advenimiento de la electricidad, lo cual puso fin al uso de estos sistemas históricos (aunque algunos de ellos se encuentran en funcionamiento por razones históricas).

Paradójicamente, el constante aumento del precio de la electricidad y la apertura del mercado de la energía ha creado una reactivación de la micro hidráulica: Francia por ejemplo, cuenta con alrededor de 2,000 micro hidráulicas, pequeños molinos hidráulicos y otras presas pequeñas, de propiedad privada. Una buena alternativa es extraer la energía del océano, los investigadores pioneros han estado trabajando en ello durante los últimos 50 años. Más de 1,500 patentes se han registrado y es casi imposible mencionar todos y realizar pruebas o comparaciones.

Hoy en día, salvo a efectos de ensayo, todavía no existe la producción de electricidad procedente de turbinas marinas para la oferta comercial conectada a la red. Los proyectos más avanzados se encuentran a nivel de pruebas en el primer plano con máquinas a escala preindustrial. Todavía no se sabe cuál será el costo del kWh producido por las máquinas de este tipo, pero se estima que el costo será comparable con la producción de energía eólica ya que cuenta con varios factores que la hacen atractiva como es el hecho de su predictibilidad a largo plazo.

Esta energía puede ser aprovechada usando técnicas relativamente convencionales, las cuales son similares, como ya se dijo antes, a las de extracción de energía del viento,

utilizando convertidores submarinos similares a los aerogeneradores. En la actualidad, es posible comenzar la explotación de la energía de las corrientes marinas, con componentes y sistemas de ingeniería convencionales, pero es necesario, para lograr fiabilidad y durabilidad a bajo costo, investigación y desarrollo. Además de investigaciones futuras en cuanto a convertidores eficientes y formas de almacenamiento y transmisión, para lograr unidades de energía eléctrica rentables (Khan et al. 2009a).

El recurso energético de las corrientes marinas y en especial las corrientes de marea han sido en los últimos años una fuente de energía alterna viable para su explotación, dada su semejanza con el aprovechamiento eólico, mismo que ha tenido un crecimiento exitoso. El Reino Unido y algunos países europeos, así como los Estados Unidos entre los más importantes, están tomando acciones derivadas de políticas energéticas para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar en el corto plazo la generación de energía eléctrica con fuentes renovables. Por ejemplo, el gobierno del Reino Unido publicó en 2003, una política energética visionaria, que lo coloca en el camino para reducir las emisiones de bióxido de carbono hasta en un 60% para el año 2050 (Mitchell and Connor 2004).

Por otro lado, la predictibilidad de las corrientes marinas y el alto factor de carga, son elementos importantes para pensar en su utilización. Sin embargo, aun permanece el desconocimiento con respecto a las características detalladas de este recurso marino. Los datos disponibles de las corrientes marinas son limitados y en algunos casos no son completamente consistentes, por ello también se están llevando a cabo estudios para cuantificar el potencial energético y realizar estimaciones acertadas de recursos así como para seleccionar los sitios adecuados para su colocación.

## 2.6 Clasificación de los dispositivos de conversión

Los dispositivos de conversión de las corrientes marinas, se clasifican de acuerdo a su eje de rotación con respecto al flujo en: horizontales o verticales, aunque existen algunos dispositivos que transforman la energía de otra manera, entre los cuales se pueden mencionar los de movimiento reciproco. En cuanto al anclaje al fondo marino; en fijos o flotantes y de acuerdo a cómo captan el flujo; en libre o conducido. La **Figura 2-5** muestra de forma resumida las diferentes formas de energía del océano y la clasificación de los dispositivos de conversión de las corrientes marinas.

Las turbinas más desarrolladas son de tipo de eje horizontal, principalmente porque ésta configuración de turbina ha sido muy empleada para el aprovechamiento de recursos eólicos y para el caso de los recursos marinos se intenta aprovechar la experiencia en la construcción y diseño de estas máquinas (**Figura 2-6**).

Las turbinas de eje vertical tienen menor eficiencia en comparación con las turbinas de eje horizontal, pero tienen ventajas como que su diseño es sencillo y asequible, no necesitan de ningún elemento adicional para inicio del movimiento, funcionan con bajas velocidades y no dependen de la dirección del fluido para funcionar.

El movimiento de rotación de las máquinas de este tipo se funda en el desequilibrio que el fluido ejerce sobre los alabes de la turbina, esto quiere decir que el coeficiente de arrastre en los alabes (generalmente perfiles aerodinámicos) cambia con respecto al ángulo de

ataque del fluido, originando fuerzas de intensidad variable, resultando un momento motor perpendicular a la dirección del fluido

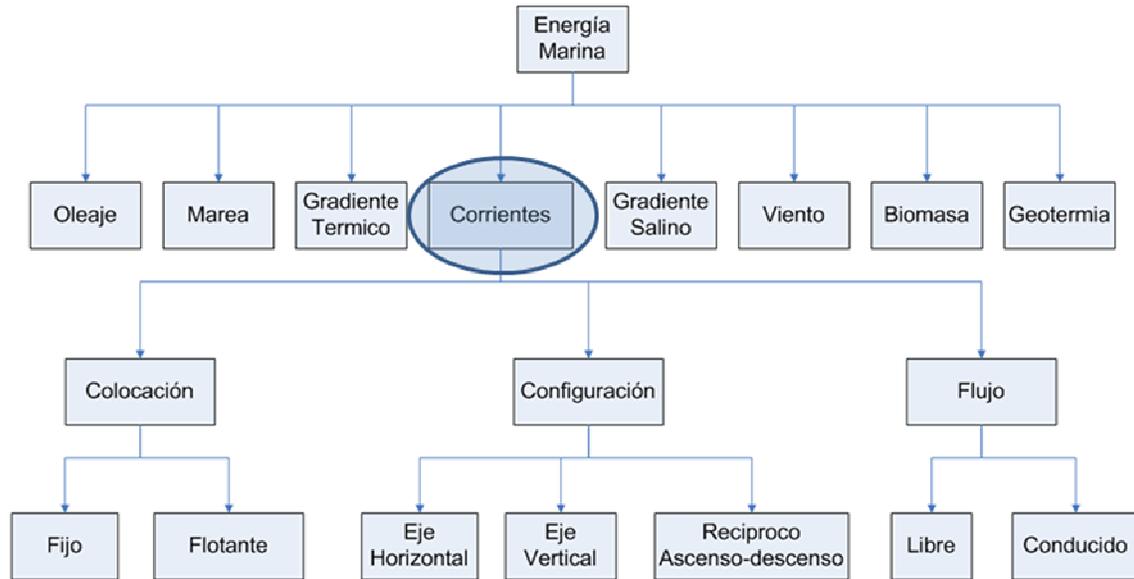


Figura 2-5 Clasificación de dispositivos de conversión

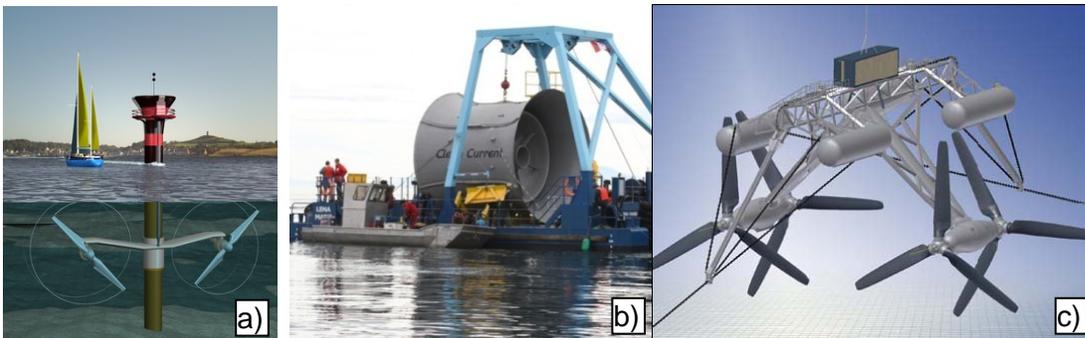


Figura 2-6 Turbinas a) de eje horizontal fija al fondo b) de flujo conducido y c) flotante

## 2.7 Actividad internacional

En cuanto al concepto de aprovechar la energía de las corrientes de marea y el diseño del dispositivo, existen numerosas propuestas, por lo tanto se mencionarán sólo aquellos que han alcanzado pruebas o demostraciones exitosas en el mar o en el laboratorio. Los dispositivos para aprovechar la energía de las corrientes pueden ser flotantes y colocados en la superficie del agua, con anclaje flexible al fondo marino como las turbinas "Hydro-Gen" o, semi-sumergidos solo por debajo de la superficie como "Scotrenewables". Existen otros que pueden estar fijos en el fondo del mar por un marco metálico como el prototipo Noruego "Hammerfest Strom", o más pequeño como el "Sabella" en Francia. Algunos presentan flujo libre y algunos otros, inducido como el "Clean Current Tidal Turbine"

Como se puede observar todos ellos muestran una característica muy similar y las ventajas y desventajas de cada uno de ellos está ligado íntimamente con la facilidad de colocación mantenimiento y operación.

La **Tabla 2-1** muestra un resumen de las tecnologías en fase de desarrollo y experimentación, en ella se puede observar que la mayoría es del tipo de eje horizontal seguida por la tecnología de eje vertical algunos de movimiento reciproco y otros no clasificados en ningún grupo. Los datos se obtuvieron de los dispositivos registrados en The European Marine Energy Centre (EMEC) el cual es un centro localizado en las islas Orkey en Escocia, creado para proporcionar las condiciones necesarias naturales para la prueba y experimentación de los dispositivos de aprovechamiento tanto de oleaje como de corrientes de marea. El centro cuenta con instalaciones para conectar los dispositivos a una red eléctrica y evaluar el desempeño, en una zona que cuenta con profundidades de 25 a 50 m en un ancho de 2 km y longitud de 4 km, donde la velocidad de la corriente alcanza los 4 m/s.

Otro centro, con la misma finalidad se encuentra en la bahía de Fundy (Offshore Energy and Environmental Research Association, OEER) cuyo objetivo es llevar a cabo investigación aplicada sobre el potencial de la energía del océano y las implicaciones inherentes al ambiente marino. En esta zona se presentan las más grandes variaciones de marea, con un rango de mareas de 16 m aproximadamente durante mareas vivas, generando corrientes asociadas de gran magnitud.

**Tabla 2-1 Tecnologías de aprovechamiento de corrientes marinas registradas en The European Marine Energy Centre (EMEC) [http://www.emec.org.uk/tidal\\_developers.asp](http://www.emec.org.uk/tidal_developers.asp)**

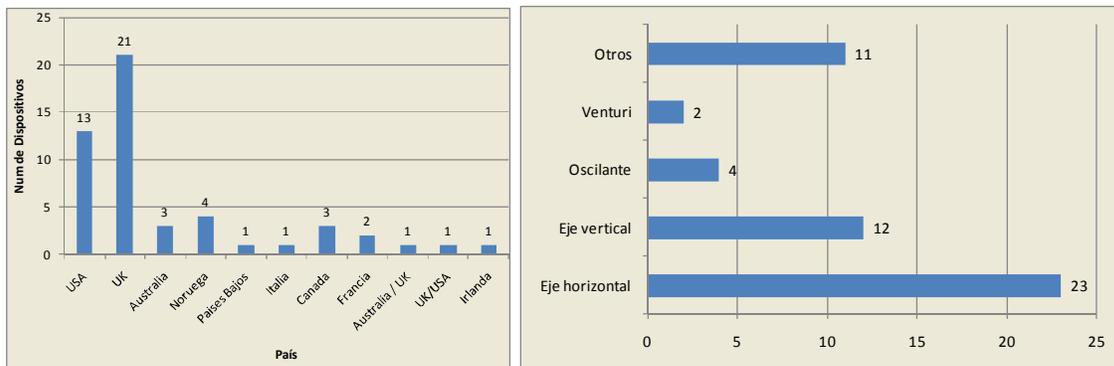
| Turbinas de Eje Horizontal |  |   |              |   |
|----------------------------|--|---|--------------|---|
| No                         | Compañía                                   | Tecnología  | Pais         | Website   |
| 1                          | Aquamarine Power                           | Neptune   | UK           | <a href="http://www.aquamarinepower.com/">http://www.aquamarinepower.com/</a>           |
| 2                          | Balkee Tide and Wave Electricity Generator | TWPEG   | Mauritius    |   |
| 3                          | Clean Current Power Systems                | Clean Current Tidal Turbine   | Canada       | <a href="http://www.cleancurrent.com/">http://www.cleancurrent.com/</a>                 |
| 4                          | Hammerfest Strom                           | Tidal Stream Turbine  | Norway       | <a href="http://www.e-tidevanssenergi.com/">http://www.e-tidevanssenergi.com/</a>       |
| 5                          | Hydrohelix Energies                        | hydro-helix   | France       | <a href="http://www.hydrohelix.fr/">http://www.hydrohelix.fr/</a>                       |
| 6                          | Kinetic Energy Systems                     | Hydrokinetic Generator, KESC Bowsprit Generator, KESC Tidal Generator | USA          | <a href="http://www.kineticenergysystems.com/">http://www.kineticenergysystems.com/</a> |
| 7                          | Lunar Energy                               | Rotech Tidal Turbine  | UK           | <a href="http://www.lunarenergy.co.uk/">http://www.lunarenergy.co.uk/</a>               |
| 8                          | Marine Current Turbines                    | Seagen, Seaflow   | UK           | <a href="http://www.marineturbines.com/">http://www.marineturbines.com/</a>             |
| 9                          | Oceana Energy Company                      | TIDES   | USA          | <a href="http://www.oceanaenergy.com/">http://www.oceanaenergy.com/</a>                 |
| 10                         | OpenHydro                                  | Open Centre Turbine   | Irlanda      | <a href="http://www.openhydro.com/">http://www.openhydro.com/</a>                       |
| 11                         | Overberg Limited                           | Evopod  | UK           | <a href="http://www.oceanflowenergy.com/">http://www.oceanflowenergy.com/</a>           |
| 12                         | Robert Gordon University                   | Sea Snail   | UK           | <a href="http://www.rgu.ac.uk/cree/general">http://www.rgu.ac.uk/cree/general</a>       |
| 13                         | Scotrenewables                             | SRTT (Scotrenewables Tidal Turbine)                                   | UK           | <a href="http://www.scotrenewables.com/">http://www.scotrenewables.com/</a>             |
| 14                         | SMD Hydrovision                            | TIDEL   | UK           | <a href="http://www.smdhydrovision.com/">http://www.smdhydrovision.com/</a>             |
| 15                         | Statkraft                                  | Tidevannkraft   | Noruega      | <a href="http://www.statkraft.com/">http://www.statkraft.com/</a>                       |
| 16                         | Swanturbines Ltd.                          | Swan Turbine  | UK           | <a href="http://www.swanturbines.co.uk/">http://www.swanturbines.co.uk/</a>             |
| 17                         | Teamwork Tech.                             | Torcado   | Países Bajos | <a href="http://www.teamwork.nl/">http://www.teamwork.nl/</a>                           |
| 18                         | Tidal Generation Limited                   | Deep-gen  | UK           | <a href="http://www.tidalgeneration.co.uk/">http://www.tidalgeneration.co.uk/</a>       |
| 19                         | Tidal Hydraulic Generators Ltd             | Tidal Hydraulic Generators  | UK           | <a href="http://www.thglimited.com/">http://www.thglimited.com/</a>                     |
| 20                         | TidalStream                                | TidalStream   | UK           | <a href="http://www.teleos.co.uk/Home.htm">http://www.teleos.co.uk/Home.htm</a>         |
| 21                         | University of Southampton                  | Southampton Integrated Tidal Generator                                | UK           | <a href="http://www.uekus.com/">http://www.uekus.com/</a>                               |
| 22                         | University of Strathclyde                  | Contra-rotating marine current turbine                                | UK           | <a href="http://www.na-me.ac.uk/index_2.htm">http://www.na-me.ac.uk/index_2.htm</a>     |
| 23                         | Verdant Power                              | Various   | USA          | <a href="http://www.verdantpower.com/">http://www.verdantpower.com/</a>                 |

| Turbinas de eje vertical |                              |   |           |   |
|--------------------------|------------------------------|---|-----------|---|
| No                       | Compañía                     | Tecnología                                    | Pais      | Website   |
| 1                        | Blue Energy                  | Blue Energy Ocean Turbine (Davis Hydro Turbin | Canada    | <a href="http://www.bluenergy.com/">http://www.bluenergy.com/</a>                           |
| 2                        | Edinburgh Designs            | Vertical-axis, variable pitch tidal turbine   | UK        | <a href="http://www.edesign.co.uk/">http://www.edesign.co.uk/</a>                           |
| 3                        | Edinburgh University         | Polo  | UK        |   |
| 4                        | GCK Technology               | Gorlov Turbine                                | USA       | <a href="http://www.gcktechnology.com/">http://www.gcktechnology.com/</a>                   |
| 5                        | Neo-Aerodynamic Ltd Company  | Neo-Aerodynamic                               | USA       |   |
| 6                        | Neptune Renewable Energy Ltd | Proteus                                       | UK        | <a href="http://www.neptunerenewableenergy.com/">http://www.neptunerenewableenergy.com/</a> |
| 7                        | New Energy Corp.             | EnCurrent Vertical Axis Hydro Turbine         | Canada    | <a href="http://www.newenergycorp.ca/">http://www.newenergycorp.ca/</a>                     |
| 8                        | Tidal Energy Pty Ltd         | DHV Turbine                                   | Australia | <a href="http://tidalenergy.net.au/">http://tidalenergy.net.au/</a>                         |

| Turbinas de efecto venturi |                    |                      |      |   |
|----------------------------|--------------------|----------------------|------|---|
| No                         | Compañía           | Tecnología           | Pais | Website   |
| 1                          | Hydro Green Energy | Hydrokinetic Turbine | USA  | <a href="http://www.hgenergy.com/">http://www.hgenergy.com/</a>         |
| 2                          | Hydroventuri       | Rochester Venturi    | UK   | <a href="http://www.hydroventuri.com/">http://www.hydroventuri.com/</a> |

La **Figura 2-7** muestra la distribución de dispositivos por país y tipo de dispositivo. Estos datos muestran que el Reino Unido y los Estados Unidos son los principales promotores de las tecnologías para el aprovechamiento de las corrientes marinas, sumando 34 dispositivos que representan el 65% del total, también se puede observar que la potencia en cada parte del desarrollo van de algunos cientos de Watts en modelos de laboratorio, seguidos por dispositivos de entre 50 a 500 kw en proyecto de prueba y para prototipos en fase de comercialización la potencia en promedio es de 1 MW.



**Figura 2-7 Distribución de dispositivos por país y por tipo de dispositivo**

La tecnología de mayor uso para la explotación de las corrientes marinas es el rotor con eje horizontal paralelo a la dirección del flujo, ya sea con dispositivos instalados en el fondo marino o suspendidos de una plataforma flotante. Las primeras instalaciones para aprovechamiento comercial, se planea, serán en profundidades de 20 a 30 m, mientras que la segunda generación serán instaladas en profundidades mayores de 50 m.

La mayoría de los dispositivos se encuentran en fase de demostración lo que significa un gran avance de desarrollo en este tipo de dispositivos, aun existen muchas interrogantes en cuanto a costo de operación y mantenimiento, impactos que estos sistemas de generación tendrán en el medio ambiente y la hidrodinámica. Por su parte, la gran cantidad de dispositivos, demuestra el interés que los diferentes organismos tienen en el

aprovechamiento de estas fuentes de energía, aunque aún no existe un dispositivo 100% comercial que sea realmente capaz de hacer frente a los requerimientos del mercado mundial.

La primera generación de dispositivos está basada en el uso de sistemas y componentes de ingeniería convencionales logrando razonable fiabilidad y bajo costo. Una turbina de tamaño medio, de 10 a 15 m y 200 a 700 kW de capacidad colocada en aguas bajas, parece ser la solución más conveniente para la primera generación de maquinas de este tipo. El mayor problema técnico para este tipo de equipos, es la adecuación de la operación aunado a los costos de mantenimiento de la maquinaria, operando en un ambiente muy agresivo.

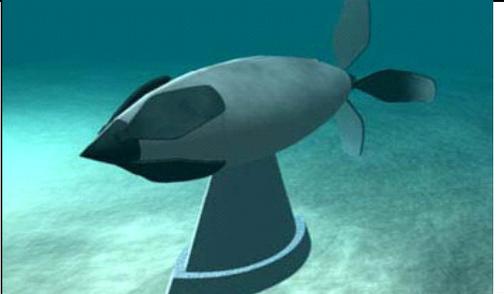
El segundo sistema de generación seguirá al anterior introduciendo componentes especiales, tales como generadores eléctricos de multipoleas de baja velocidad, o generadores sin caja de engranes con imanes permanentes en la carcasa exterior de la turbina como la turbina "Open Hydro", sistemas de transmisión hidráulica, materiales anticorrosivos y sistemas de generación más eficientes, así como sistemas para mantenimiento de bajo costo así mismo, se espera que con la demanda del mercado, costos de producción menores, entre otros.

Algunas ventajas que se mencionan en cuanto a estas fuentes de energía renovable comparándolas con la radicación solar y viento e incluso el oleaje, el cual depende directamente del viento es su predictibilidad y mayor densidad de energía por metro cuadrado.

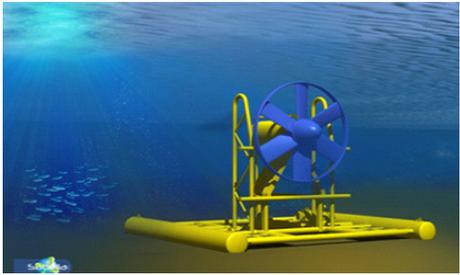
A continuación se presenta un resumen de los dispositivos existentes.

### 2.7.1 Turbinas de eje Horizontal fijas al fondo marino

|                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| <b>Compañía</b>   | Clean Current Power Systems (CCPS)  |  |
| <b>Tecnología</b> | Clean Current Tidal Turbine   |  |
| <b>Pais</b>       | Canada  |  |
| <b>Fase</b>       | <b>Demostración</b>   |  |
| <b>Prototipo</b>  | Tres prototipos de 17 m de diametro diseñados con 2.2, 1.5 y 1 MW de Pot Nominal y velocidades de corriente de 4.1, 3.25 y 2.6 m/s y 28%, 38% y 49% de eficiencia |  |
| <b>Costo</b>      | 2000-3000 por KW instalado<br>0.20 dls por KWh  |  |
| <b>website</b>    | <a href="http://www.cleancurrent.com">http://www.cleancurrent.com</a>   |  |
| <b>Notas</b>      | bidireccional con generador de magneto permanente sin eje ni caja de engranes   |  |

|                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| <b>Compañía</b>   | Kinetic Energy Systems Corporation (KESC) |  |
| <b>Tecnología</b> | KESC Bowsprit Generator                   |  |
| <b>Pais</b>       | US  |  |
| <b>Fase</b>       | <b>Ing. Básica y experimentación</b>      |  |
| <b>Prototipo</b>  |   |  |
| <b>Costo</b>      |   |  |
| <b>Notas</b>      | bidireccional                             |  |

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p><b>Compañía</b><br/><b>Tecnología</b><br/><b>Pais</b><br/><b>Fase</b><br/><b>Prototipo</b><br/><b>Costo</b><br/><br/><b>website</b><br/><b>Notas</b></p> | <p>Lunar Energy<br/>Rotech Tidal Turbine<br/>UK<br/><b>Ing. Básica y experimentación</b><br/>21 m de Diam y 27 m de Longitud<br/><br/><a href="http://www.lunarenergy.co.uk/">http://www.lunarenergy.co.uk/</a><br/>bidireccional con generador de magneto permanente sin eje ni caja de engranes</p>                         |    |
| <p><b>Compañía</b><br/><b>Tecnología</b><br/><b>Pais</b><br/><b>Fase</b><br/><b>Prototipo</b><br/><b>Costo</b><br/><br/><b>website</b><br/><b>Notas</b></p> | <p>Tidal generation limited (TGL)<br/>Tidal Generation<br/>UK<br/><b>Ing. Básica y experimentación</b><br/>En construccion un prototipo de 500 kW<br/>11.95-13.40 dls inicial / kWh<br/>7.50-9.0 dls comercial /kWh<br/><a href="http://www.tidalgeneration.co.uk">http://www.tidalgeneration.co.uk</a><br/>bidireccional</p> |    |
| <p><b>Compañía</b><br/><b>Tecnología</b><br/><b>Pais</b><br/><b>Fase</b><br/><b>Prototipo</b><br/><b>Costo</b><br/><br/><b>website</b><br/><b>Notas</b></p> | <p>Hammerfest Strom<br/>The Blue Concept<br/>Noruega<br/><b>Demostración</b><br/>Un prototipo de 300 kW instalado y desarrollando un modelo de 1 MW<br/><br/><a href="http://www.e-tidevannsenergi.com">http://www.e-tidevannsenergi.com</a><br/>bidireccional</p>  |   |
| <p><b>Compañía</b><br/><b>Tecnología</b><br/><b>Pais</b><br/><b>Fase</b><br/><b>Prototipo</b><br/><b>Costo</b><br/><br/><b>website</b><br/><b>Notas</b></p> | <p>Verdant Power<br/>Free Flow Turbine<br/>USA<br/><b>Demostración</b><br/>Un prototipo de 35 kW de 5 m Diam.<br/><br/><a href="http://verdantpower.com">http://verdantpower.com</a><br/>bidireccional</p>  |  |
| <p><b>Compañía</b><br/><b>Tecnología</b><br/><b>Pais</b><br/><b>Fase</b><br/><b>Prototipo</b><br/><b>Costo</b><br/><br/><b>website</b><br/><b>Notas</b></p> | <p>Swanturbines<br/>Cygnet<br/>UK<br/><b>Demostración</b><br/>1 m de diam para pruebas de laboratorio en construccion un prototipo Cygnet de 350 kW<br/><br/><a href="http://www.swanturbines.co.uk/">http://www.swanturbines.co.uk/</a><br/>bidireccional sin caja de engranes</p>   |  |

|                   |  |  |
|-------------------|--|--|
| <b>Compañía</b>   | Hydrohelix Turbine   |  |
| <b>Tecnología</b> | Sabella  |  |
| <b>Pais</b>       | Francia  |  |
| <b>Fase</b>       | <b>Demostracion</b>  |  |
| <b>Prototipo</b>  | D03 rotor de 3 m de Diam y en fase de construcción, un prototipo de 10 m de diam con capacidad de 200-500 kW |  |
| <b>Costo</b>      |  |  |
| <b>website</b>    | <a href="http://www.sabella.fr">http://www.sabella.fr</a>  |  |
| <b>Notas</b>      | colocacion en el fondo marina por gravedad   |  |

|                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| <b>Compañía</b>   | Marine Current Turbines Ltd (MCT)   |  |
| <b>Tecnología</b> | Seaflow   |  |
| <b>Pais</b>       | UK  |  |
| <b>Fase</b>       | <b>Demostración</b>   |  |
| <b>Prototipo</b>  | Turbina de 300 kW   |  |
| <b>Costo</b>      |   |  |
| <b>website</b>    | <a href="http://www.marineturbines.com/">http://www.marineturbines.com/</a> |  |
| <b>Notas</b>      | Esta tecnología evoluciono a SeaGen   |  |

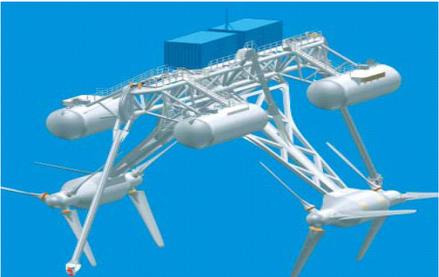
|                   |  |   |
|-------------------|--|---|
| <b>Compañía</b>   | Marine Current Turbines Ltd (MCT)  |  |
| <b>Tecnología</b> | SeaGen   |   |
| <b>Pais</b>       | UK   |   |
| <b>Fase</b>       | <b>Pre-comercial</b>   |   |
| <b>Prototipo</b>  | 2 rotores de 16 m de Diam de 1.2 MW a una velocidad de 2.4 m/s en demostracion en Strangford Lough, Northern Ireland |   |
| <b>Costo</b>      |  |   |
| <b>website</b>    | <a href="http://www.marineturbines.com/">http://www.marineturbines.com/</a>  |   |
| <b>Notas</b>      | Generador con caja de engranes. Los rotores se elevan fuera del agua para mantenimiento rendimiento 43%              |   |

|                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| <b>Compañía</b>   | Open Hydro  |  |
| <b>Tecnología</b> | Open Centre Turbine   |  |
| <b>Pais</b>       | Irlanda   |  |
| <b>Fase</b>       | <b>Demostración en Bay of Fundy</b>                               |  |
| <b>Prototipo</b>  | Turbina de 6 m de Diametro  |  |
| <b>Costo</b>      |   |  |
| <b>website</b>    | <a href="http://www.openhydro.com/">http://www.openhydro.com/</a> |  |
| <b>Notas</b>      | En nov. 2009 instalaron una turbina de 1 MW en Bahía de Fundy     |  |

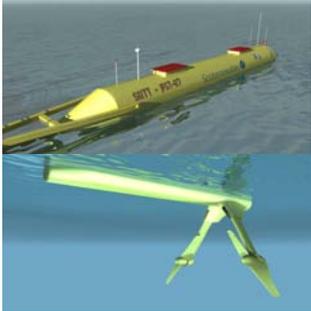
|            |   |  |
|------------|---|--|
| Compañía   | Tocado BV Internacional                               |  |
| Tecnología | Tocado  |  |
| Pais       | Países bajos  |  |
| Fase       | <b>Demostración y pre-comercialización</b>            |  |
| Prototipo  | de 50 KW y 150 KW                                     |  |
| Costo      |   |  |
| website    | <a href="http://tocardo.com/">http://tocardo.com/</a> |  |
| Notas      | Se tienen dos modelos de 50 y 150 KW para venta       |  |

## 2.7.2 Turbinas de eje Horizontal flotantes

|            |  |  |
|------------|--|--|
| Compañía   | Underwater Electric Kite   |  |
| Tecnología | Underwater Electric Kite   |  |
| Pais       | USA  |  |
| Fase       | comercialización   |  |
| Prototipo  | dos turbinas gemelas de 3 m de diametro  |  |
| Costo      |  |  |
| website    | <a href="http://uekus.com/">http://uekus.com/</a><br>El primer prototipo se construyo en 1981 y des pue de 8 prototipos en 2005 se construyo el primer prototipo precomercial en 2007 se construyo la primera turbina comercial para Zambia Africa |  |
| Notas      |  |  |

|            |   |  |
|------------|---|--|
| Compañía   | Hydra Tidal Energy Technology-Statkraft                                   |  |
| Tecnología | Morild  |  |
| Pais       | Noruega   |  |
| Fase       | Construcción y Demostración   |  |
| Prototipo  | Turbina flotante de 1.0 MW con 4 rotores de 23 m de diametro              |  |
| Costo      |   |  |
| website    |   |  |
| Notas      | Una característica a destacar del dispositivo es que usa alabes de madera |  |

|            |   |  |
|------------|---|--|
| Compañía   | New and Renewable Energy Centre                             |  |
| Tecnología | Evopod  |  |
| Pais       | UK  |  |
| Fase       | Demostracion y prueba                                       |  |
| Prototipo  | turbina de 300 kW   |  |
| Costo      |   |  |
| website    | <a href="http://www.narec.co.uk">http://www.narec.co.uk</a> |  |
| Notas      | se planea la construccion de una granja de 1.5 MW           |  |

|            |   |  |
|------------|---|--|
| Compañía   | Scotrenewables Ltd  |  |
| Tecnología | SRTT  |  |
| Pais       | UK  |  |
| Fase       | Demostración  |  |
| Prototipo  | Modelo a escala 1:7 y en construcción prototipo de 1.2 MW                   |  |
| Costo      | costo estimado inicial 10-18 dls/kWh  |  |
| website    | <a href="http://www.scotrenewables.com/">http://www.scotrenewables.com/</a> |  |
| Notas      |   |  |

|            |  |  |
|------------|--|--|
| Compañía   | SMD Hydrovision  |  |
| Tecnología | TidEI (UK)   |  |
| Pais       | UK   |  |
| Fase       | Demostración   |  |
| Prototipo  | se tiene un modelo escala 1:10   |  |
| Costo      | estimado de 8.5 dls/kwh  |  |
| website    | En construcción un prototipo de 1 MW con dos rotores de 500 kW, diseñado para una vel de 2.3 m/s |  |
| Notas      |  |  |

|            |   |  |
|------------|---|--|
| Compañía   | Tidal Stream  |  |
| Tecnología | Triton' Semi-Submersible Turbine (SST)                                    |  |
| Pais       | UK  |  |
| Fase       | Ing. Basica y experimentación   |  |
| Prototipo  | Modelos experimentales  |  |
| Costo      | se estima en 7.4-14.8 dls/kWh   |  |
| website    | <a href="http://www.tidalstream.co.uk/">http://www.tidalstream.co.uk/</a> |  |
| Notas      |   |  |

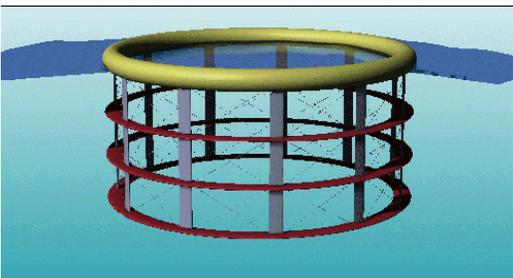
|            |   |  |
|------------|---|--|
| Compañía   | Energy Systems Research Unit  |  |
| Tecnología | CORMAT (UK)   |  |
| Pais       | UK  |  |
| Fase       | Demostración  |  |
| Prototipo  | Prototipo de 2.5 m de diametro  |  |
| Costo      |   |  |
| website    | <a href="http://www.talentscotland.com/">http://www.talentscotland.com/</a> |  |
| Notas      | La turbina cuenta con dos rotores que giran en contrasentido                |  |

### 2.7.3 Turbinas de Eje Vertical

|            |   |  |
|------------|---|--|
| Compañía   | Ocean Renewable Power Company   |  |
| Tecnología | OCGen   |  |
| Pais       | USA   |  |
| Fase       | Demostración en bahía de fundy  |  |
| Prototipo  | de 2.13 m de diam y 10.37 m de longitud   |  |
| Costo      |   |  |
| website    | <a href="http://www.oceanrenewablepower.com/">http://www.oceanrenewablepower.com/</a> |  |
| Notas      |   |  |

|            |  |  |
|------------|--|--|
| Compañía   | Hydro-Gen  |  |
| Tecnología | Hydro-Gen  |  |
| Pais       | Francia  |  |
| Fase       | Demostración   |  |
| Prototipo  | Un prototipo de 10 kW de 2.3 m diam y 4.5 de longitud                  |  |
| Costo      |  |  |
| website    | <a href="http://www.hydro-gen.fr/">http://www.hydro-gen.fr/</a>        |  |
| Notas      | Se construye un prototipo de 20 kW y un prototipo precomercial de 1 MW |  |

|            |   |   |
|------------|---|---|
| Compañía   | Neptuno   |  |
| Tecnología | Proteus   |   |
| Pais       | UK  |   |
| Fase       | Demostración en the Humber estuario   |   |
| Prototipo  | de 6x6 m de area transversal  |   |
| Costo      |   |   |
| website    | <a href="http://www.neptunerenewableenergy.com">http://www.neptunerenewableenergy.com</a> |   |
| Notas      | Esta diseñado para ser usado en estuarios   |   |

|            |   |  |
|------------|---|--|
| Compañía   | Universidad de Edinburgo  |  |
| Tecnología | Polo  |  |
| Pais       | UK  |  |
| Fase       | ing. Basica y experimentación   |  |
| Prototipo  | sin modelos de prueba   |  |
| Costo      |   |  |
| website    | <a href="http://www.mech.ed.ac.uk/research/">http://www.mech.ed.ac.uk/research/</a> |  |
| Notas      |   |  |

|            |   |  |
|------------|---|--|
| Compañía   | Blue Energy   |  |
| Tecnología | Davis Hydro Turbine   |  |
| País       | Canada  |  |
| Fase       | Demostración  |  |
| Prototipo  | 20 kW y 100 KW  |  |
| Costo      |   |  |
| website    | <a href="http://www.bluenergy.com/">http://www.bluenergy.com/</a> |  |
| Notas      | Seis prototipos iniciales   |  |

## 2.8 Actividad nacional

En la Estrategia Nacional de Energía de 2010 (ENE) que es parte del plan de desarrollo 2007-2012, se plantea como uno de sus objetivos “incrementar la utilización de fuentes renovables de energía” y, para ello se define como acción específica, la “creación de un programa anual de fomento a la generación de energía eléctrica, a partir de energía renovable” e incrementar la participación de las tecnologías limpias en el parque de generación al 35%. Esto como resultado del potencial de generación de electricidad con energías limpias que no han sido explotadas.

Tomando en cuenta que cada tecnología empleada para generar electricidad tiene características específicas de construcción, inversión, operación y mantenimiento y vida útil, entre otras. Los recursos renovables permanecen sin ser explotados en todo su potencial. En 2008, México tuvo alrededor de 1,984 MW de capacidad instalada de generación eléctrica basada en energías renovables sin incluir las grandes hidroeléctricas, lo cual representa 3.3 % de la capacidad instalada para el servicio público del país y autoabastecimiento remoto. Para enfrentar los retos que el aprovechamiento de la energía renovable significa, en agosto de 2009, el gobierno federal publicó el “programa Especial para el aprovechamiento de las Energías Renovables”, en el cual se establece que la capacidad instalada con renovables alcance 7.6% en 2012. (ENE).

Actualmente, está en curso el levantamiento del inventario nacional de energías renovables para conocer el potencial total de estas fuentes de energía. Este inventario proveerá una visión más clara de la dimensión y localización de las oportunidades de desarrollo de las energías renovables en el país.

## Conclusiones

Las energías del océano representan una opción viable como fuente de energía para México, tanto técnica como económicamente, además representan una alternativa ambiental adecuada para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, a la vez que diversifican las fuentes de energía y son fuentes potenciales de trabajo.

México con sus 11000 km de litoral, cuenta con el potencial energético suficiente para hacer frente a los requerimientos de energía de la población, es necesario contar con el desarrollo tanto científico como tecnológico para hacer frente a este reto. Por lo cual es indispensable el iniciar la investigación y desarrollo de dispositivos de generación eléctrica que aprovechen estas fuentes de energía oceánica.

Los dispositivos más desarrollados con algunos prototipos en fase de demostración, son las turbinas de eje horizontal, seguidas por las turbinas de eje vertical, en este sentido, existe un amplio campo para la investigación y desarrollo de dispositivos de conversión de eje vertical, así como los efectos que estos dispositivos podrían ocasionar al medio ambiente y su relación en la hidrodinámica. Por otro lado, el estudio de materiales anticorrosivos y sistemas automatizados de operación y mantenimiento son amplios campos de estudio en donde también se requiere de investigación científica y aplicada para desarrollar turbinas oceánicas rentables en términos económicos y ambientales.

## 3 Trabajo de campo

### 3.1 Introducción

El calentamiento global y la dependencia en los combustibles fósiles han estimulado el interés por utilizar fuentes de energía renovables y lograr la producción de energía de manera sustentable. Las corrientes oceánicas y de marea son, obviamente, enormes fuentes de energía y durante años se han hecho numerosos esfuerzos tanto por la comunidad científica como la iniciativa privada en encontrar mejores formas para producir electricidad a partir de este recurso (Bryden and Couch 2007).

Una forma de aprovechar este recurso consiste en construir una barrera en un estuario o una bahía, en zonas donde la amplitud de mareas sea importante (mayor a 3 metros), comúnmente conocidas como mareomotrices. La tecnología de una mareomotriz es similar a la que se utiliza en una hidroeléctrica de baja carga. Un ejemplo de estas instalaciones es la mareomotriz de La Rance en Francia construida en 1960 con 240 MW de potencia instalada (Andre 1978).

Las instalaciones mareomotrices tienen la ventaja que utilizan tecnología completamente desarrollada, por lo cual, se asegura su funcionamiento y alto desempeño, pero por otro lado, requieren una importante obra de ingeniería civil además de que los impactos ambientales pueden ser considerablemente adversos y el número de sitios adecuados es limitado.

De manera similar al aprovechamiento eólico, la energía cinética del flujo libre del agua es otra forma de aprovechar la energía de las corrientes de mareas. A los dispositivos que aprovechan este tipo de energía comúnmente se les conoce como TISEC o MCEC por sus siglas en inglés Tidal In-Stream Energy Conversion y Marine Current Energy Converters o simplemente MCT Marine Current Turbines. Con estos dispositivos se eliminan grandes diques y reservorios y se reduce significativamente el impacto negativo en el medio ambiente local. La extracción de energía con MCT ofrece una forma de generar electricidad sin emisiones de gases efecto invernadero durante la operación.

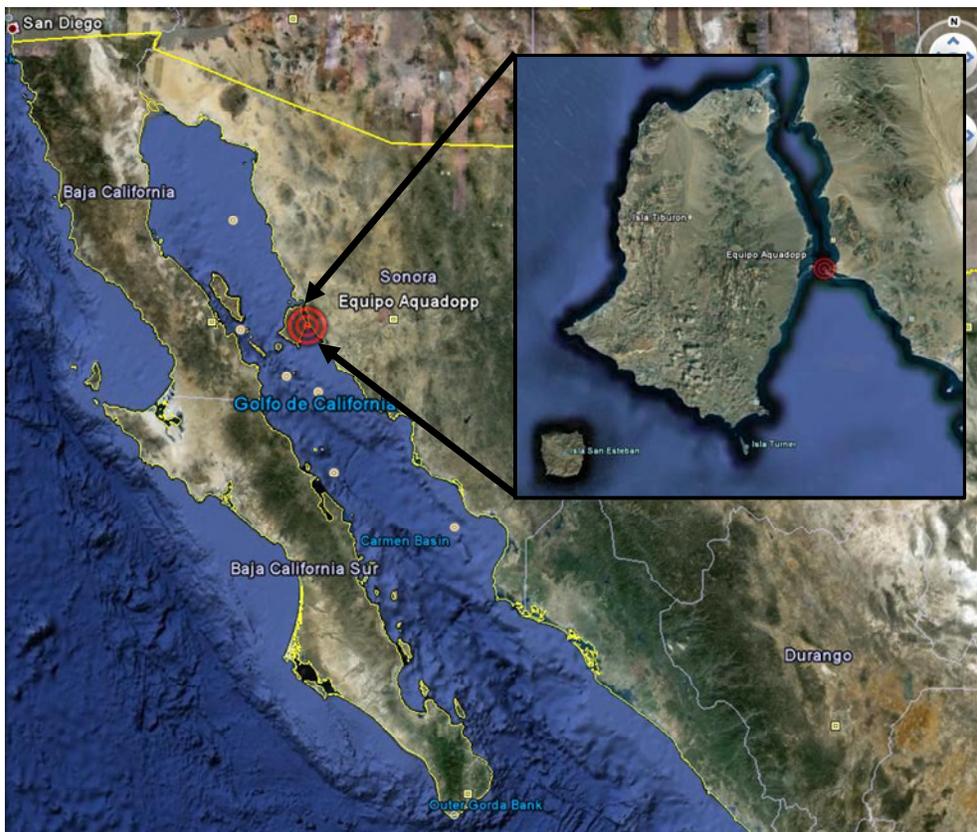
La energía cinética contenida en las corrientes de ríos o de estructuras artificiales como canales de riego o canales de salida de centrales termoeléctricas, es una fuente de energía alternativa altamente viable para su aprovechamiento. El conocimiento de la magnitud de estas corrientes y los efectos adversos que tendría su eventual utilización, son fundamentales para la correcta implementación de nuevas centrales eléctricas.

En este sentido y con la finalidad de evaluar el potencial de una de estas zonas, se llevó a cabo una campaña de mediciones en el Canal de Infiernillo, localizado entre la Isla Tiburón y la costa de Sonora, a 15 km al norte de bahía Kino en Hermosillo Son. Este canal recibe su nombre por las fuertes corrientes que se presentan en temporada de mareas vivas, las cuales pudieran ser aprovechadas para abastecer de energía eléctrica a las comunidades Seris que habitan en la zona.

Estas fuertes corrientes es un caso particular de la hidrodinámica del mar de Cortes y no es general, ya que la circulación del mar de Cortes es muy compleja y depende de muchos factores (Palacios et al. 2005). Al igual que otras bahías o cuerpos de agua, donde existe una frontera abierta bien delimitada e ingresa la onda de marea y esta recorre una distancia similar a su longitud de onda, se presenta como resultado una concentración de energía por efecto de resonancia y en el caso particular del mar de Cortés asomeramiento. Aunado a lo anterior, el flujo de agua en algunos casos se ve modificado por gradientes de temperatura y densidad así como por la batimetría de la zona, que es el caso del canal de Infiernillo.

### 3.2 Campaña de corrientes

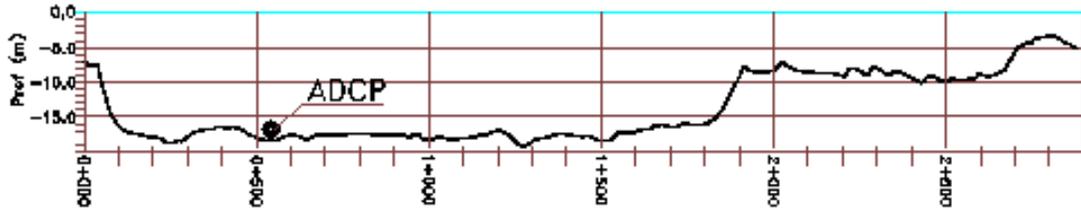
Se llevó a cabo una campaña de corrientes con un perfilador acústico Aquadopp Profiler, el cual se instaló en el Canal de Infiernillo. Los datos que se registraron incluyen: presión y temperatura en el fondo, perfil de velocidades con capas a cada metro e inclinación del aparato durante un período de 4 meses (del 19 de julio al 21 de octubre del 2007). La estación se ubicó en las coordenadas  $28^{\circ} 58' 31.24''$  de latitud norte y  $112^{\circ} 11' 03.14''$  de longitud Oeste (**Figura 3-1**).



**Figura 3-1** Localización de la estación oceanográfica Aquadopp profiler

El perfilador de corrientes, registró las componentes de la velocidad paralelas a sus tres ejes de medición y reportó más de 13,000 datos en la dirección **X** (Este-Oeste), **Y** (Norte-Sur) y **Z** (Vertical), ó también llamadas coordenadas ENU. Los datos fueron registrados a cada 10 minutos promediando las lecturas de cada segundo durante un minuto. En la

**Figura 3-2** se muestra el perfil de la sección donde se colocó el instrumento a una profundidad aproximada de 18 m. El perfil de la sección se obtuvo con GPS diferencial para el control horizontal y las profundidades se obtuvieron con un ecosonda marca Valeport de registro continuo.



**Figura 3-2** Sección en el Canal de infiernillo donde se colocó el Aquadopp Profiler



**Figura 3-3** Colocación de equipo Aquadopp profiler

### 3.3 Análisis de los datos

Con los datos del sensor de presión se obtuvo el nivel medio del mar y la amplitud de marea. La profundidad media que registró el aparato resultó de 18.20 m con amplitud máxima de marea de 1.15 m. En la **Figura 3-4** se muestra la marea corregida de acuerdo al nivel medio y la predicción de mareas (CICESE 2007), así como la marea residual que es la diferencia entre la marea registrada y la astronómica. Se puede observar que el residual es considerable, probablemente debido a la configuración del fondo y vientos locales. En este caso la diferencia media cuadrática entre la marea registrada y la predicción fue de 0.21 m. Con el fin de corroborar estos resultados se hizo un análisis armónico, cuyos resultados se presentan en la **Figura 3-5**; en este caso se encontró mayor similitud entre los datos registrados y la predicción con componentes armónicos (la diferencia media cuadrática fue de 0.13 m). Sin embargo, definitivamente existen factores como la configuración del fondo, diferencias de densidad y probablemente vientos locales que influyen directamente sobre la marea astronómica.

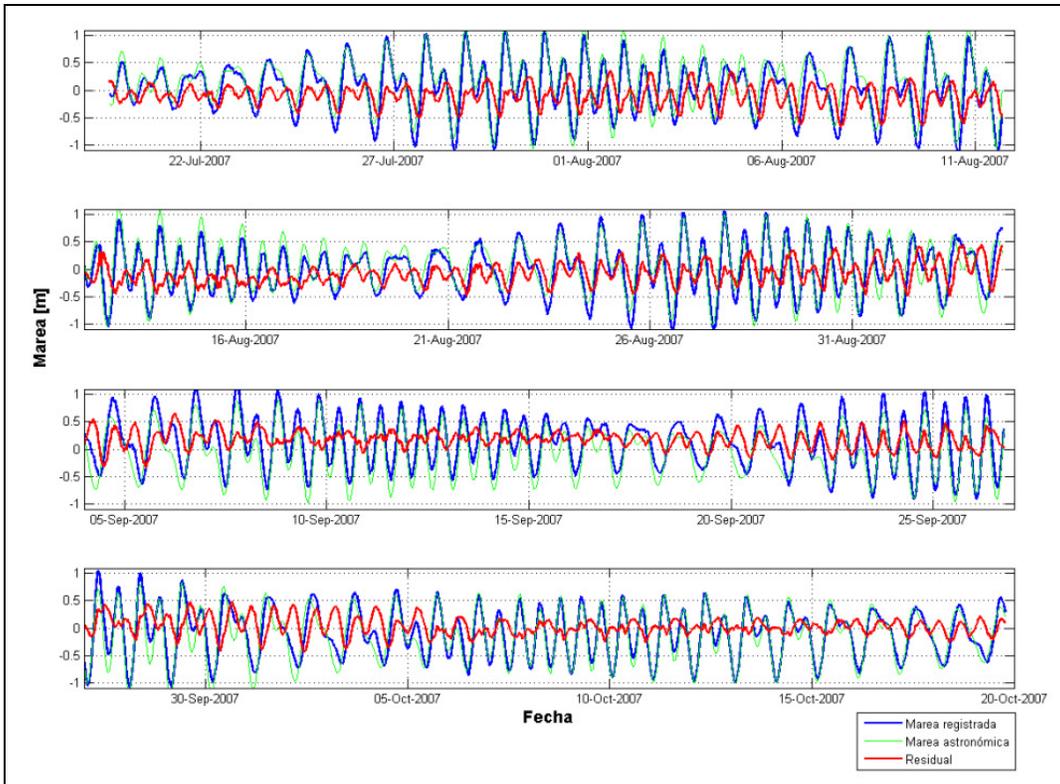


Figura 3-4 Marea registrada, marea astronómica y residual (Predicción de mareas CICESE)

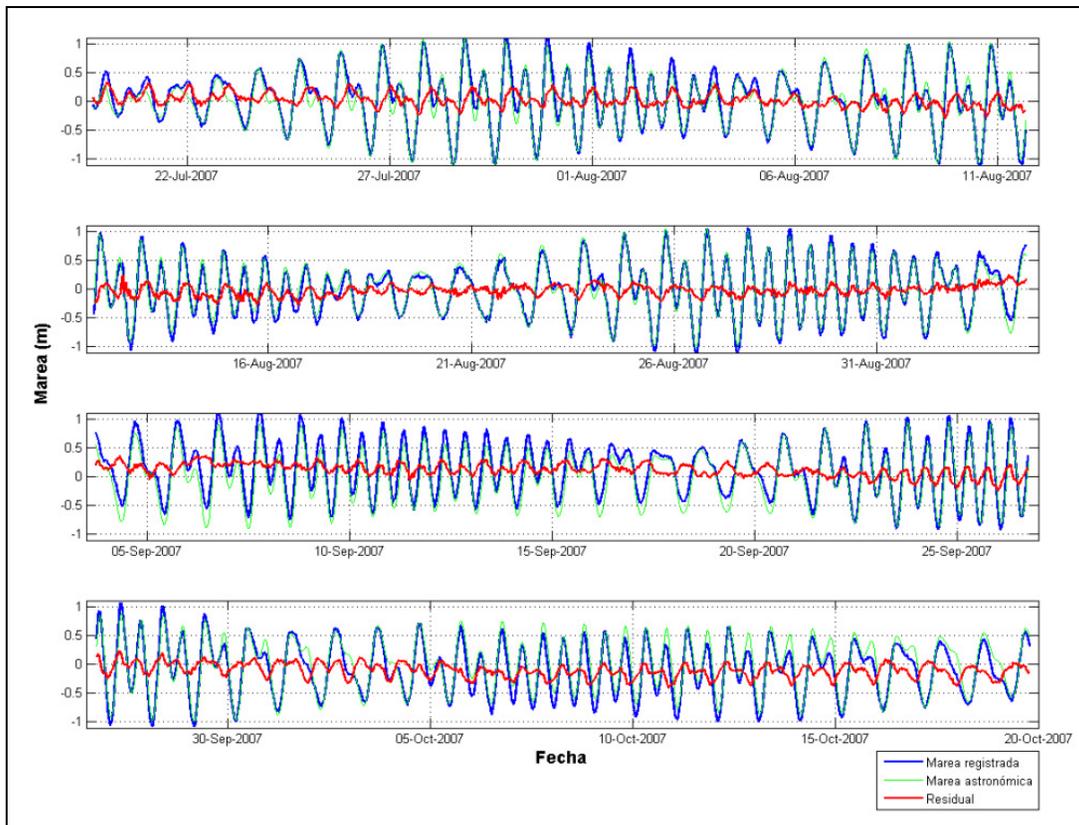
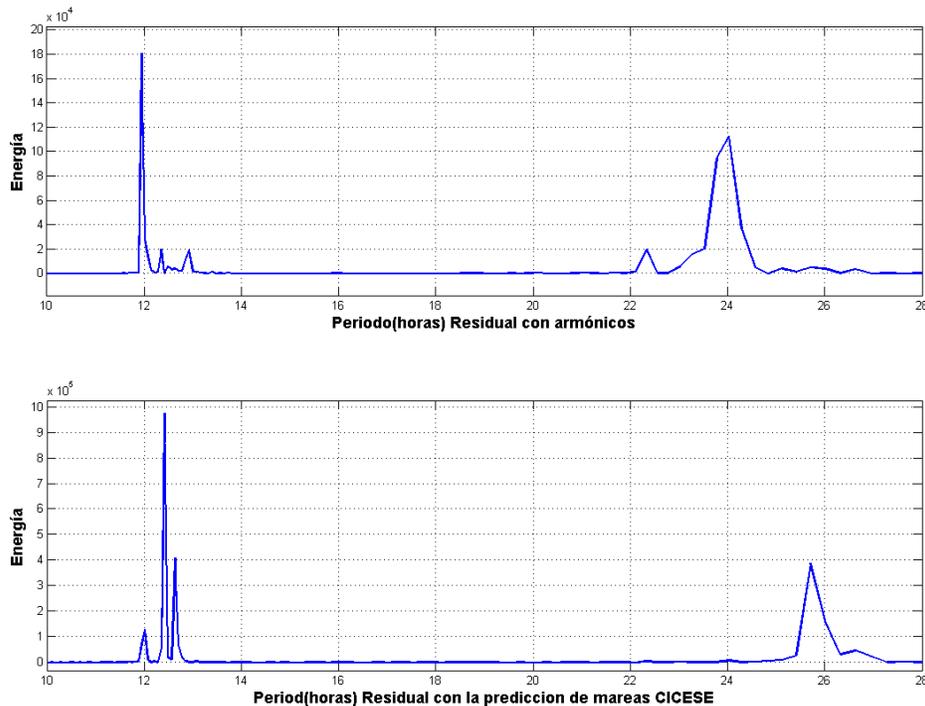


Figura 3-5 Marea registrada, marea con armónicos y residual

El análisis de espectro de energía del residual (**Figura 3-6**), muestra que hay principalmente dos componentes semidiurnos de 12 y 24 horas, lo que sugiere la afectación del patrón de mareas por algún fenómeno meteorológico adicional a las fuerzas gravitacionales.



**Figura 3-6 Espectro de energía del residual**

Con el objetivo de cuantificar la importancia del residual en cuanto a la generación de energía, se llevó a cabo una comparación, con y sin residual y se integro en el dominio del tiempo. Los resultados muestran que las corrientes no armónicas pueden ser importantes para aumentar o disminuir la energía cinética. En este caso, la energía total fue de 358 KWh/m<sup>2</sup> y la energía con armónicos de 324 KWh/m<sup>2</sup>, lo que representa un incremento del 10%, hay que tener en consideración que esto no siempre es un aumento, en algunos casos también podría ser menor. Por lo tanto, es importante estimar si las variaciones de la corriente serán en general mayores a las astronómicas y asegurar de esta manera una producción mínima de energía con las componentes armónicas de las corrientes.

En este sentido, en la **Figura 3-7** se muestran los datos de temperatura registrados en el instrumento (18 m de profundidad) durante el periodo de medición, se puede observar que la temperatura tiene fluctuaciones diarias producto de la radiación solar y a partir de octubre hay un descenso importante en la temperatura, lo que supone algún tipo de surgencia o cambio estacional. En la **Figura 3-8** se muestran los datos de la estación meteorológica de bahía Kino donde se observan cambios horarios de temperatura. En el mes de octubre particularmente, no se observa mucha variación que sugiera que el cambio en la temperatura del agua es por cambios de la radiación solar o estacional local más bien por cambios de temperatura estacional global y algún tipo de surgencia.

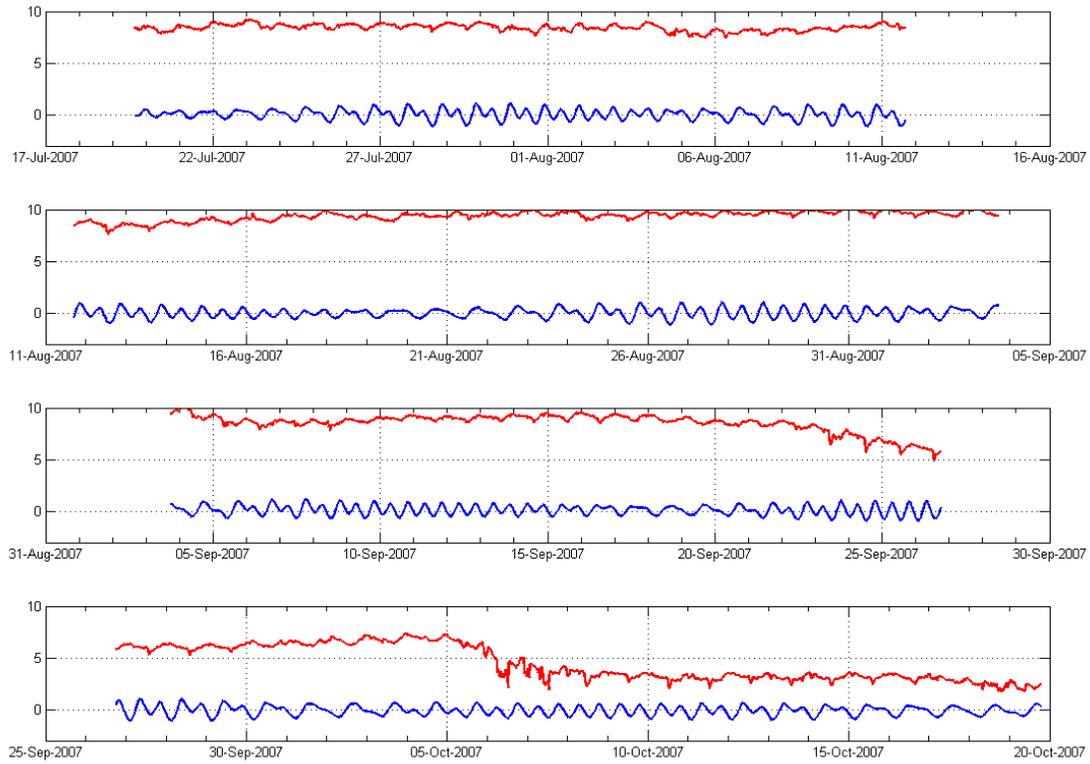


Figura 3-7 Temperatura registrada (color rojo) y marea (azul)

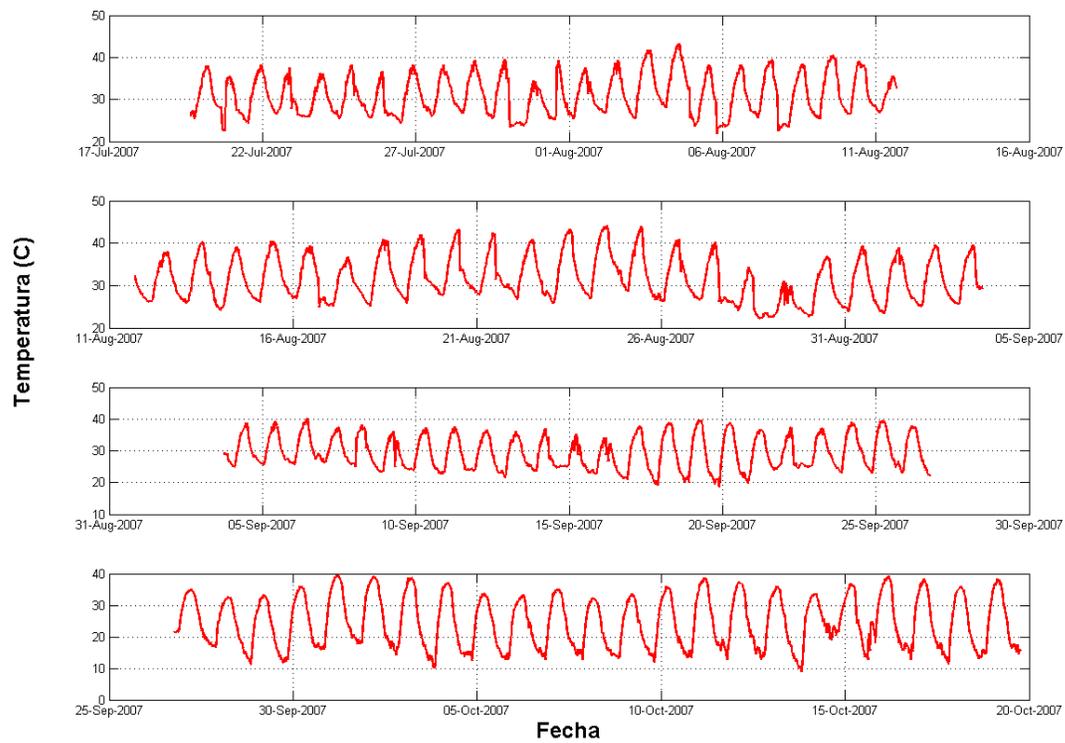
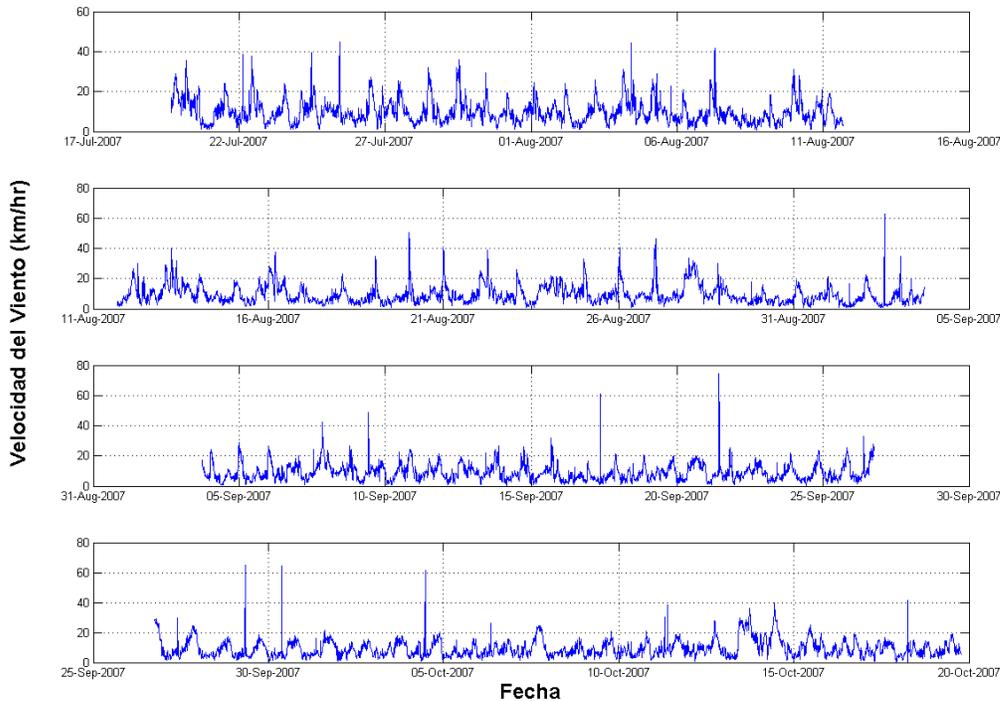


Figura 3-8 Temperatura Ambiente (estación meteorológica)

Como se mostro anteriormente, la energía cinética del residual puede llegar a ser importante, por lo cual se investiga las posibles causas del mismo. En la **Figura 3-9** se presentan las velocidades de viento de la estación meteorológica de bahía Kino donde se observa una frecuencia diaria del viento con picos de velocidad mayor a 10 km/h con una alternancia de aproximadamente 180 grados de Noreste a Suroeste como se aprecia en la **Figura 3-11** e intervalos de 12 y 24 horas. Los resultados sugieren que el viento local puede ser la causa de la diferencia entre la marea astronómica y la registrada.



**Figura 3-9** Velocidad del viento de la estación meteorológica del SMN de Bahía Kino

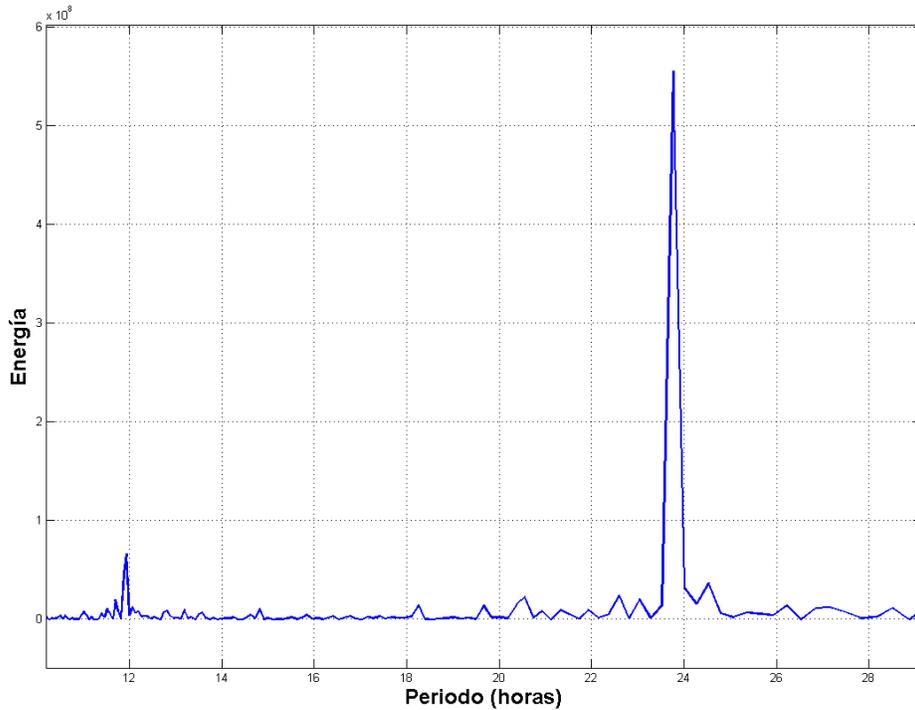


Figura 3-10 Espectro de energía velocidad del viento

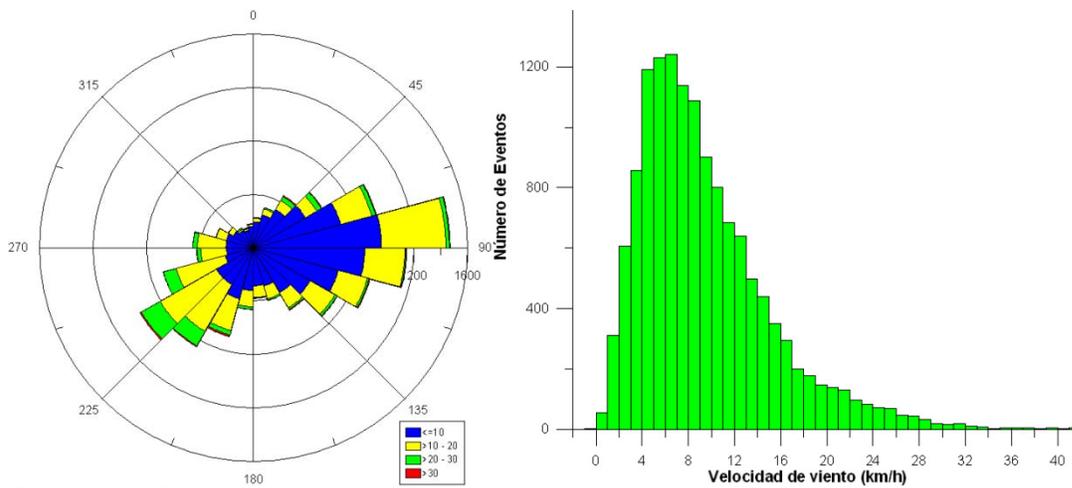
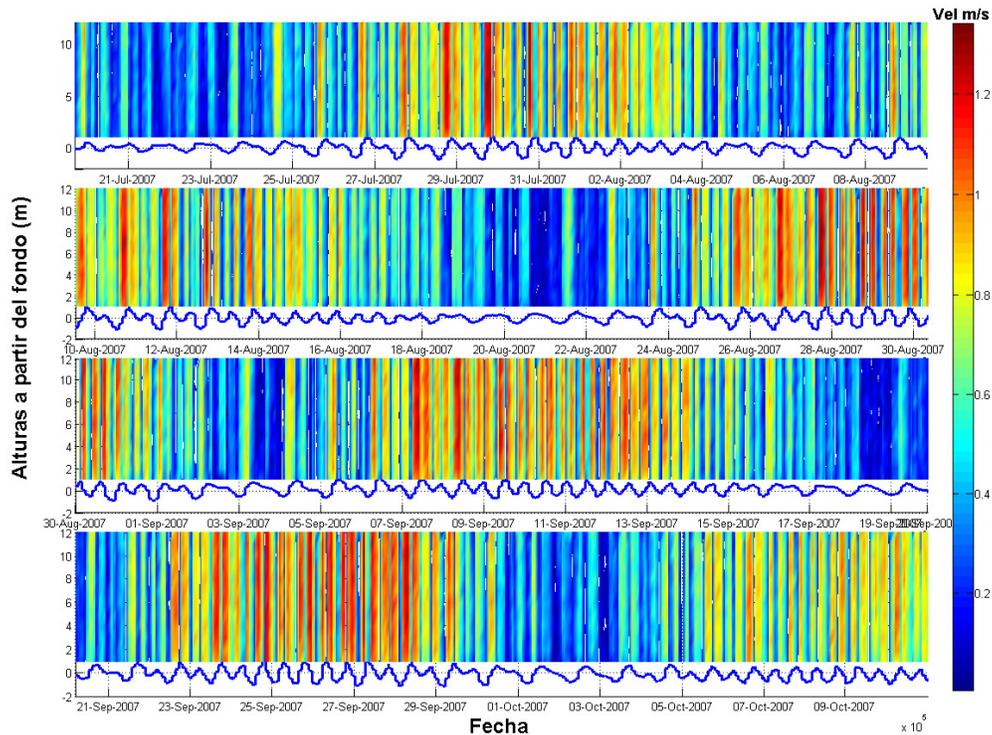


Figura 3-11 Rosa de vientos e histograma

### 3.4 Análisis de los datos de corrientes

Una de las características del perfilador de corrientes “Aquadopp” es que no mide en la primera y última capa (1 m por debajo de la superficie libre), por lo tanto, los datos de corrientes solo se presentan hasta la capa 12 suprimiendo las capas superficiales que presentan demasiada interferencia (ruido) debido a la variación de la superficie del agua. Los datos registrados de la columna de agua durante el periodo de medición, se

presentan en la **Figura 3-12**, donde aparece la magnitud de la corriente y la marea registrada. Se observa una correspondencia entre las mareas y la magnitud de las corrientes, lo que indica que con mareas vivas se obtienen las mayores velocidades y con mareas muertas las velocidades disminuyen significativamente. La máxima velocidad alcanzada durante el periodo de medición fue de 1.3 m/s y la velocidad promedio de 0.56 m/s.



**Figura 3-12 Velocidad de la corriente en toda la columna de agua.**

En la **Figura 3-13** y **Figura 3-14** se muestran los perfiles de velocidad a cada hora con capas de medición a cada metro en un día de mareas muertas y vivas respectivamente. Se observa que en mareas muertas, la velocidad apenas sobrepasa 0.50 m/s y en mareas vivas llega hasta 1.30 m/s también se observa una velocidad más constante en mareas vivas en todo el perfil. Estos datos muestran un perfil sensiblemente vertical lo que sugiere que toda la columna de agua puede ser adecuada para la extracción de energía, principalmente porque la zona de estudio es muy somera.

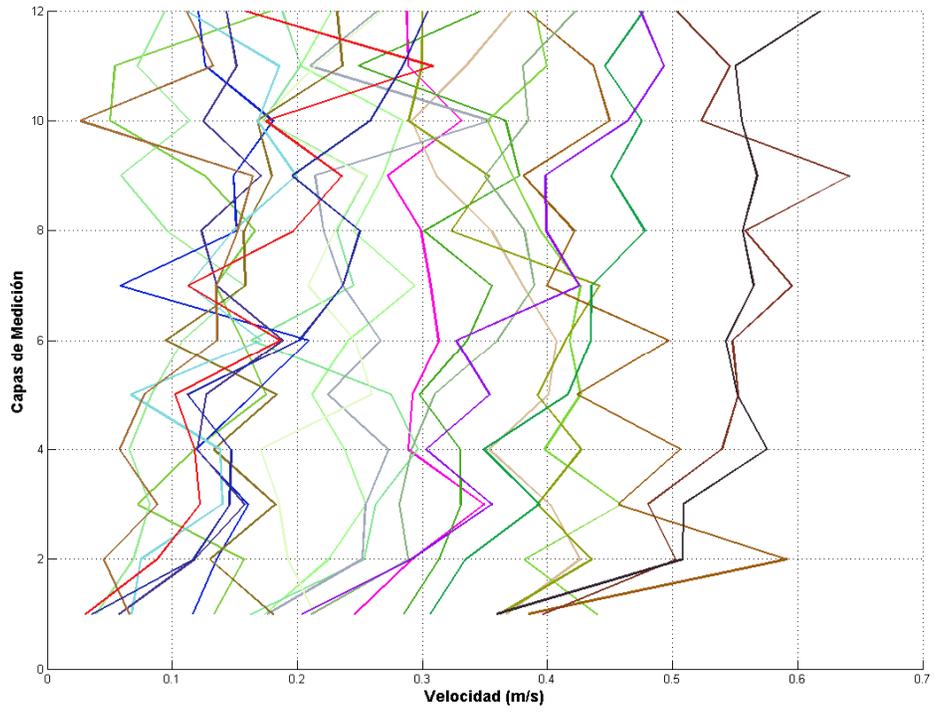


Figura 3-13 Perfil de velocidades marea muerta 22 de Julio

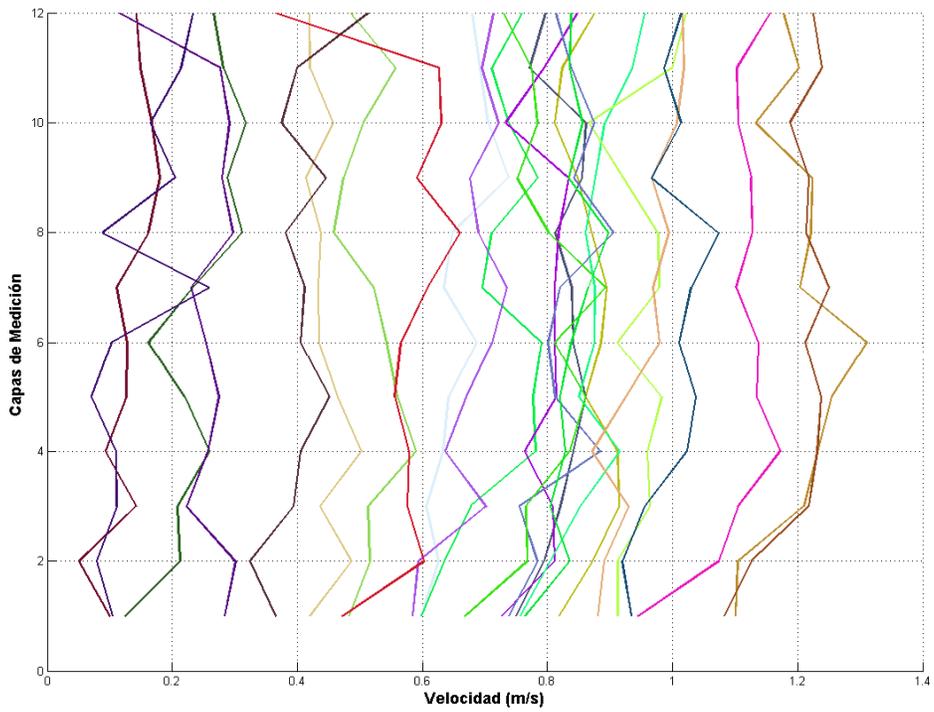
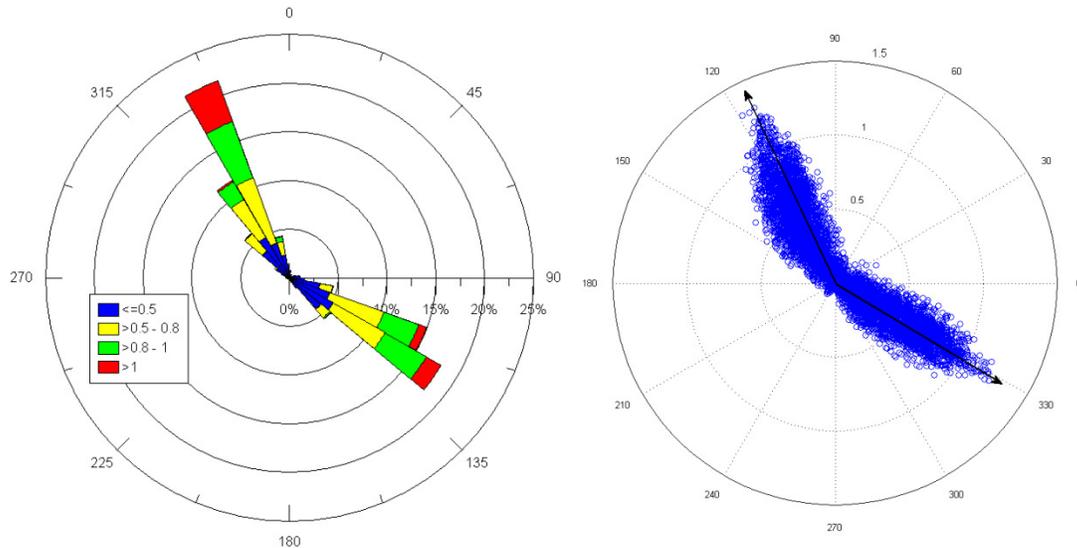
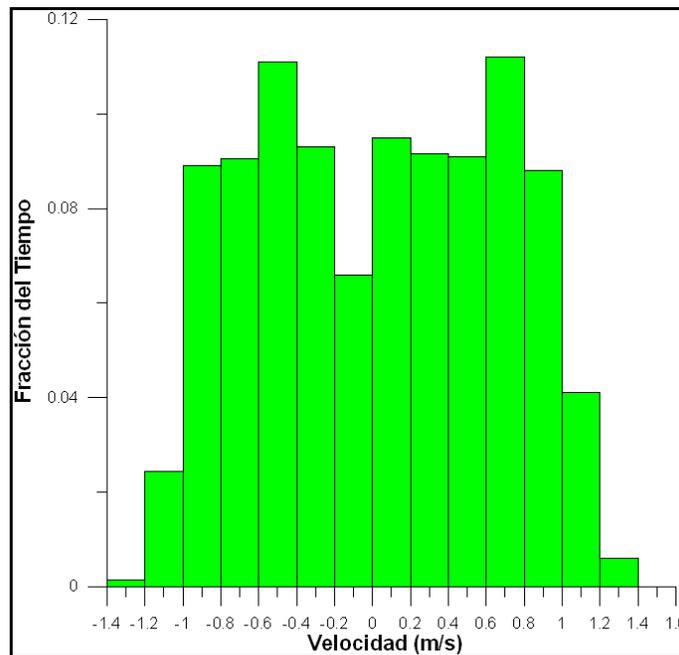


Figura 3-14 Perfil de velocidades marea viva 29 Julio

Un dato importante de resaltar es que la velocidad de la corriente no es simétrica con respecto a la dirección (**Figura 3-15**) ya que cuando la marea esta ascendiendo la dirección de la corriente es 60° SE y cuando está descendiendo la dirección es 25° NW lo cual representa un ángulo de 115° en lugar de 180°, debido principalmente a la configuración del terreno. En la **Figura 3-16** se muestra un histograma de velocidades donde se aprecia una relativa simetría en las velocidades de norte a sur (negativas) y las velocidades de Sur a Norte (positivas)

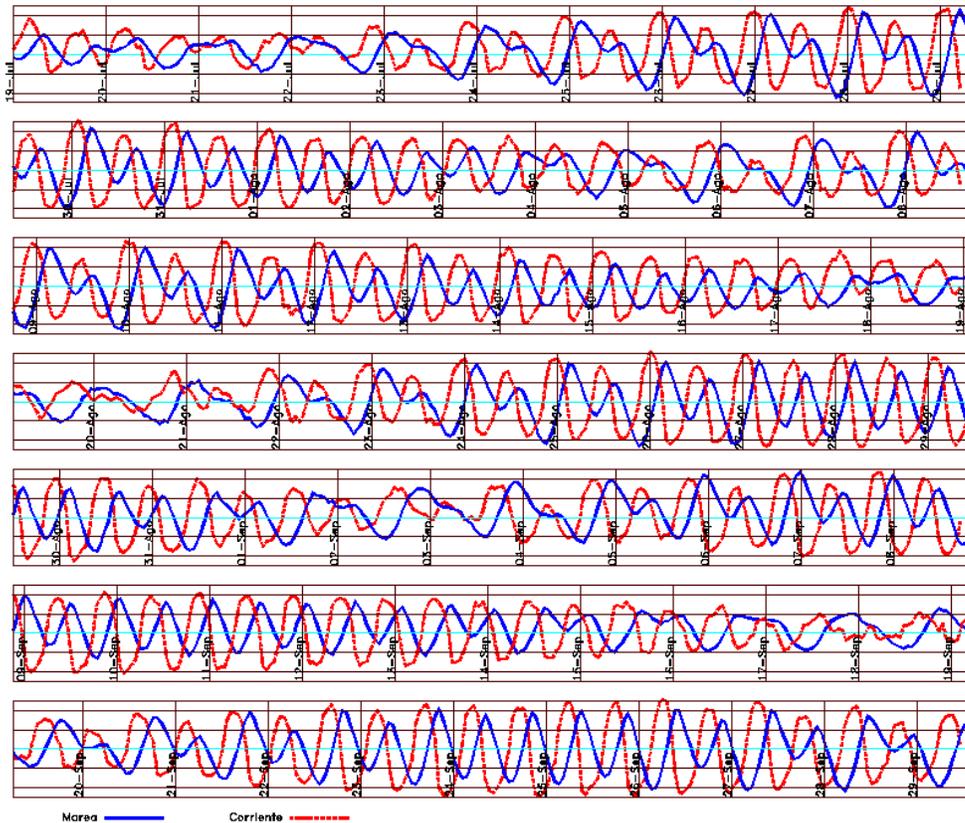


**Figura 3-15 Dirección e intensidad de las corrientes**



**Figura 3-16 Histograma velocidades de la corriente**

En la **Figura 3-17** se presentan la marea y velocidades de la corriente, se observa claramente que cuando la marea esta ascendiendo, el flujo de agua es de sur a norte hasta alcanzar un máximo cuando la marea es cero, posteriormente comienza a descender hasta que la marea alcanza el punto máximo donde la velocidad es nula por lo cual hay un desfase entre los máximos y mínimos de la marea y el flujo de 90 grados que equivalen aproximadamente a 3 horas.



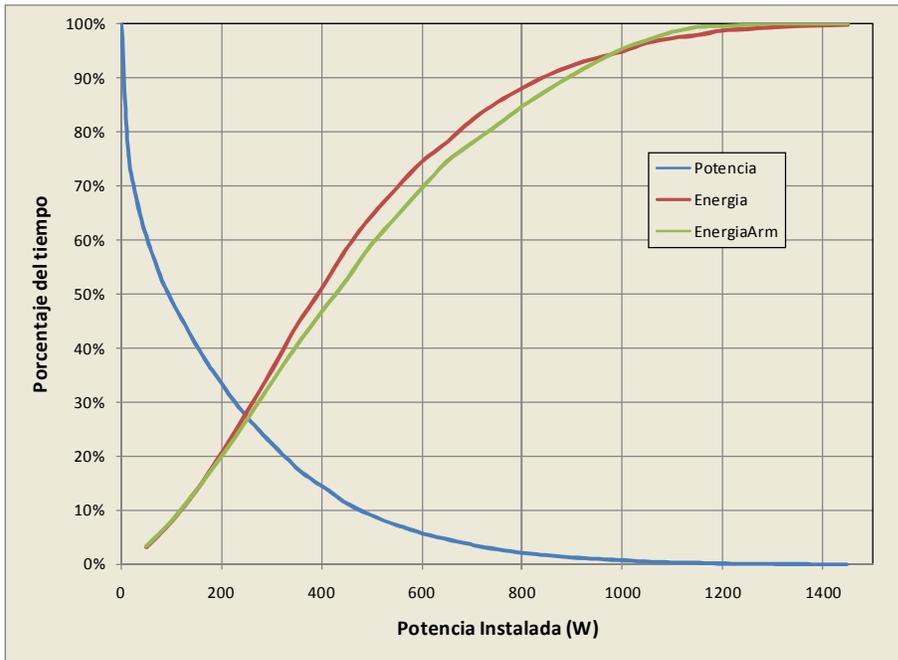
**Figura 3-17** Marea y corrientes

### 3.5 Energía disponible y aprovechable

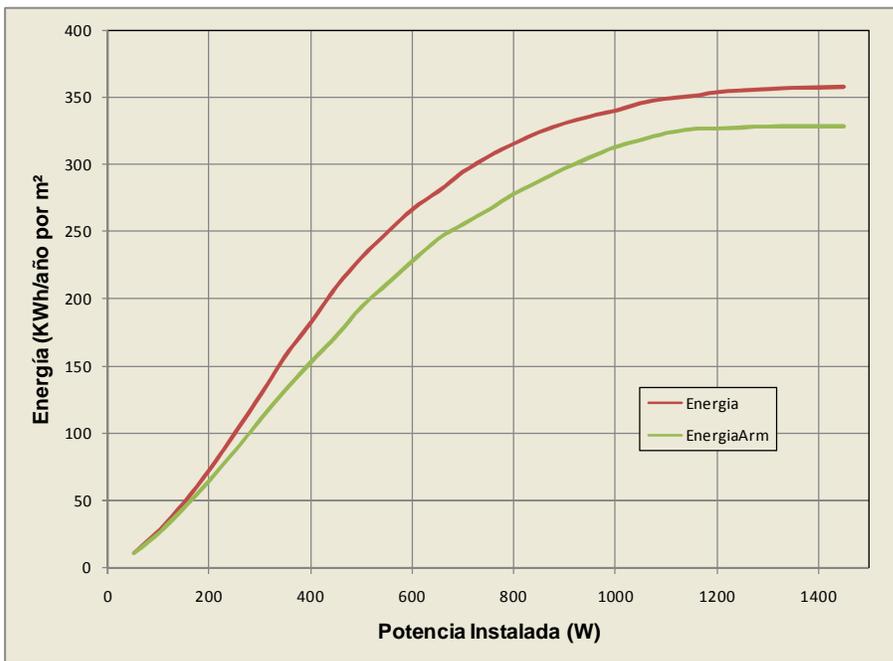
No obstante que existe un potencial de energía disponible en el canal de infiernillo 1.57 GWh/año por  $m^2$ , por diversas causas, no toda la energía se puede aprovechar. Una de estas causas es la que se refiere a la potencia instalada (cantidad de turbinas o capacidad de generación), debido a que hay picos de energía, es necesario colocar suficientes turbinas para aprovechar esos excedentes, sin embargo, con esta alternativa, la instalación estaría inactiva durante los periodos que no se alcanzan esos niveles, por lo general se instala menos capacidad del máximo posible, de tal manera que la potencia instalada se mantenga en operación durante la mayor cantidad de tiempo posible.

En la **Figura 3-18** se muestra la gráfica de potencia instalada contra factor de planta. Esta gráfica relaciona la potencia instalada con la generación. Por ejemplo: 400 Watts de

potencia instalada tiene un factor de planta del 15% (o sea solo el 15% del tiempo se estará generando a la máxima capacidad) y se tendrá una generación del 50% de la energía total (785 KWh/año por m<sup>2</sup>). En la **Figura 3-19** se presenta una comparación de generación con la marea registrada y con componentes armónicos, se observa un aumento apreciable en la generación utilizando los datos de la marea registrada por lo cual es importante conocer los parámetros y condiciones que alteran las mareas y corrientes del canal de infiernillo para un periodo más largo.



**Figura 3-18** Factor de planta



**Figura 3-19** Generación contra factor de planta

## Conclusiones

Las corrientes asociadas a la marea tienen las mismas frecuencias que las oscilaciones verticales.

Cuando las corrientes están restringidas a canales o cuerpos de agua estrechos, éstas fluyen en una dirección en la mitad del ciclo y fluyen en la otra dirección en la otra mitad (noroeste-sureste). Lo dicho anteriormente concuerda con los resultados obtenidos.

En periodos de marea muerta la velocidad de la corriente es muy reducida con máximos de 0.50 m/s y en mareas vivas se alcanzan velocidades de hasta 1.3 m/s

Un hecho importante de resaltar es que la energía aprovechable, depende de la cantidad de potencia que se instale, de esta manera, aunque existe más de 1.50 GWh/año por m<sup>2</sup> de energía, por razones obvias no toda esta cantidad se puede aprovechar, por lo cual, la energía aprovechable será un porcentaje de esta cantidad y dependerá en buena medida del costo de las instalaciones. Aunque también es importante resaltar que día con día este tipo de instalaciones tienden a reducir sus costos, mientras que los costos con fuentes de energía fósiles tienden a aumentar rápidamente.

En las figuras: **Figura 3-18 y Figura 3-19** se muestra el funcionamiento de una instalación en el canal de infiernillo el cual relaciona la capacidad instalada contra la generación y el porcentaje de tiempo en el cual la potencia instalada estará trabajando al 100%. Se puede observar que el factor de planta es muy bajo en todos los casos, debido a la variabilidad de las corrientes, lo que incrementa el costo de generación, por otro lado, no se tiene un flujo constante de energía lo que obliga a complementar la generación con otro tipo de sistemas.

## 4 Pre-diseño del Hidrogenerador IMPULSA

En este capítulo se presenta el pre-diseño del hidrogenerador IMPULSA, para lo cual se tomaron en cuenta desarrollos previos y la velocidad media de las corrientes marinas del litoral mexicano. Como un resumen del proceso de diseño, a continuación se mencionan las principales fases que se tomaron o se tomarán en cuenta:

Fase 1 – Etapa de planeación. Se consideran todos los desarrollos, incluso aquellos que están en una fase de estudio experimental básico. En esta etapa se madura el diseño conceptual utilizando información de la literatura y con el apoyo de modelos numéricos, se valora la eficiencia del dispositivo convertidor de la energía de la corriente marina.

Fase 2 – Selección del sitio donde se emplazara el dispositivo. En esta etapa se realiza un análisis de las bases de datos disponibles de corrientes marinas del sitio y se estima el potencial energético disponible. Eventualmente, en caso de no existir bases de datos de corrientes, éstas se construyen de forma sintética con el complemento de mediciones *in situ*.

Fase 3 – Desarrollo del modelo a escala y pruebas de su funcionamiento en canal de corrientes. Además del desarrollo de cada uno de los elementos a detalle, se realiza una validación o corrección de las modelaciones numéricas utilizadas en la Fase 1.

Fase 4 - Despliegue parcial. Se elabora un proyecto para un primer modelo a mayor escala y se estiman las condiciones de funcionamiento en el mar. Este proyecto puede ser modificado y ampliado en función de los resultados esperados en el sitio particular.

Fase 5 - Implementación. Se instalan los prototipos piloto con todos los dispositivos proyectados en el agua (los dispositivos pueden o no estar conectadas a la red).

Fase 6 – Evaluación de pertinencia económica y ambiental.

Todas estas fases tienen un proceso de retroalimentación y corrección. Para este trabajo de investigación se aborda principalmente, y de manera integral, hasta la fase 3, es decir, el objeto central es dirigir todos los esfuerzos al diseño y estudio del comportamiento y eficiencia del hidrogenerador IMPULSA. Como lo señala (Dincer 2000), la investigación y desarrollo de dispositivos de transformación de energía oceánica, representa un mercado de oportunidades, ya que se crean empleos y se activa una nueva industria, además de disminuir los impactos negativos al ambiente y el costo económico asociado.

### 4.1 Análisis de la energía suministrada a una turbina

En el siguiente análisis de eficiencia con un rotor Savonius, se ha considerado que la potencia desarrollada por la turbina es directamente proporcional al torque por la velocidad angular. En este sentido, la velocidad del fluido se considera constante y por lo tanto en su diseño se puede controlar el área transversal de la turbina y de esta manera aumentar o disminuir el torque desarrollado por ésta. Una manera de realizar dicha evaluación es a través de la energía cinética ( $E_c$ ), por unidad de volumen:

**Ecuación 1**

$$E_c = \frac{1}{2} \rho v^2$$

La cual se utiliza como nivel de referencia para conocer la cantidad máxima de energía que puede proporcionar un fluido, donde “ $v$ ” es la velocidad del fluido y “ $\rho$ ” la densidad del mismo. Para este caso de estudio, se analiza el comportamiento de una turbina y como valor de referencia se utiliza la definición de potencia por unidad de área.

**Ecuación 2**

$$P_f = \frac{1}{2} \rho v^3$$

Según el teorema de Euler, otra manera para determinar la potencia de un fluido es:

**Ecuación 3**

$$P_f = F_f v$$

Donde:

**Ecuación 4**

$$F_f = Q(v_2 - v_1)$$

$F_f$  es la fuerza que el fluido ejerce sobre los álabes y depende del cambio de velocidad de entrada y salida del fluido, así como de la cantidad de masa. El gasto volumétrico  $Q$ , se supone conocido y corresponde a la velocidad del fluido que atraviesa un área determinada ( $vA$ ) o también, representado como el volumen de fluido que circula en un determinado tiempo ( $V/t$ ), tal que:

**Ecuación 5**

$$Q = Q_1 = Q_2 = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

La expresión anterior es una forma simple de la Ecuación de Continuidad. Suponiendo que la velocidad del flujo antes de que interactúe con la turbina es ( $v_1$ ) y al momento de salir de la turbina ( $v_2$ ), entonces, la velocidad en la turbina será el promedio entre la velocidad de entrada y la velocidad de salida, tal que:

**Ecuación 6**

$$F_f = Q(v_2 - v_1) = Av(v_2 - v_1)$$

**Ecuación 7**

$$P_f = Fv = Av^2(v_1 - v_2)$$

Por otro lado, la potencia también puede ser calculada como:

**Ecuación 8**

$$P = \frac{1}{2} A v (v_1^2 - v_2^2)$$

Por lo tanto

**Ecuación 9**

$$\frac{1}{2} A v (v_1^2 - v_2^2) = A v^2 (v_1 - v_2)$$

De donde se obtiene que

**Ecuación 10**

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2)$$

Sustituyendo este valor en las expresiones de Fuerza y Potencia, ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se obtienen las siguientes expresiones

**Ecuación 11**

$$F = \frac{1}{2} A (v_1 + v_2)(v_1 - v_2) = \frac{1}{2} A (v_1^2 - v_2^2)$$

**Ecuación 12**

$$P = \frac{1}{2} A (v_1^2 - v_2^2) \left[ \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \right] = \frac{1}{4} A (v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)$$

Si ( $v_2$ ) representa la velocidad después de la turbina, considerando la potencia absorbida por la misma, entonces, se puede calcular la potencia como variación de la velocidad de salida. Suponiendo la velocidad de entrada constante.

**Ecuación 13**

$$\frac{dP}{dv_2} = \frac{1}{4} A (v_1^2 - 2v_2v_1 - 3v_2^2)$$

Los puntos críticos resultan:

$v_2 = -v_1$       Que no tiene sentido físico

$v_2 = \frac{1}{3}v_1$       Que corresponde al máximo de potencia

Sustituyendo esta última relación en la formula de potencia

**Ecuación 14**

$$P_{\max} = \frac{1}{4} A \left( v_1^2 - \left( \frac{1}{3} v_1 \right)^2 \right) \left( v_1 + \frac{1}{3} v_1 \right) = \frac{8}{27} A v_1^3 = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} A v_1^3 \right)$$

**Ecuación 15**

$$P_{\max} = 0.59 \left( \frac{1}{2} A v_1^3 \right)$$

La cual es la expresión de la fórmula de Betz (Duran et al. 2006). De esta forma, se muestra que la energía máxima capaz de ser recogida por un dispositivo de este tipo, no puede superar en ningún caso el 59% de la energía cinética de la masa del fluido que atraviesa el rotor.

En realidad, la potencia de los dispositivos actuales más perfeccionados no superan en general el 60 o 70% de la potencia máxima calculada por la fórmula de Betz. Otras investigaciones muestran que este valor de referencia es mucho menor y que oscila alrededor del 30% (Gorban et al. 2001)

Otro modelo de análisis, es suponer que existe un flujo que ejerce una fuerza sobre el área transversal del rotor.

**Ecuación 16**

$$F_f = \frac{1}{2} C_d A v^2$$

Donde  $C_d$  es el coeficiente de arrastre el cual es función del área y la forma del rotor. Este coeficiente es menor a medida que el flujo mueve con mayor intensidad el rotor, en otras palabras, el coeficiente de arrastre es proporcional a la fuerza y la potencia producida. Por otro lado, este coeficiente refleja la cantidad de agua que pasa por los rotores. Un coeficiente bajo significa que el flujo pasa con relativa facilidad, por el contrario, un coeficiente alto o máximo significa que el rotor está sin movimiento con la máxima fuerza de empuje. De esta manera, el coeficiente de arrastre es función de la velocidad de entrada y salida del fluido, de tal manera que el  $C_d$  puede ser de la forma:

**Ecuación 17**

$$C_d = \left( 1 - \frac{v_2}{v_1} \right)^n$$

Donde  $n$  es una constante que está en función de la forma del rotor.

Los aspectos importantes a considerar para la utilización del rotor *Savonius* como hidrogenerador y lograr mayor eficiencia son:

- Contar con mayor área de contacto en sus álabes, siendo la forma cóncava la que proporciona un coeficiente de arrastre mayor que aumenta la fuerza.

- La geometría del dispositivo, de tal manera que ésta permita el paso del fluido con las menores pérdidas posibles.

## **4.2 Sobre el uso del rotor tipo Savonius o Panémona de cuatro álabes**

El rotor Savonius es un dispositivo mecánico muy antiguo utilizado en fluidos y estudiado desde 1920 por diversos investigadores. Algunas de sus características son que puede desarrollar un alto par de arranque a bajas velocidades y tiene un bajo costo de fabricación (Khan et al. 2009b; Saha et al. 2005), lo cual representa una ventaja en el aprovechamiento de las corrientes marinas.

Una de las desventajas que se encontraron al estudiar el dispositivo, es que se produce un torque negativo que repercute en el desempeño del mismo y por consiguiente en la eficiencia, siendo necesario un mayor torque estático para iniciar el movimiento (Saha et al. 2005). La turbina de eje vertical tiene bajos niveles de eficiencia ya que solo aprovecha una pequeña parte de la energía del fluido que toca su área transversal. El rendimiento se encuentra del orden del 15 al 20% (Johnson 2001; Wilson and Lissaman 1974). Esto no es desalentador ya que la eficiencia de las turbinas eólicas más sofisticadas y excesivamente costosas tan solo logran el 45% de eficiencia (Wilson and Lissaman 1974) y se requiere de una velocidad de viento muy intensa.

Durante años de investigación, el rotor Savonius ha tenido diferentes aplicaciones como: bombas de agua, generadores de electricidad, ventiladores, agitadores o mezcladores de líquidos para hacerlos circular y homogeneizarlos, entre otros (Fernando and Modi 1989; Menet 2004; Ogawa et al. 1989; Sadrul Islam et al. 1993). Se han realizado numerosas investigaciones para estudiar las características y desempeño de este tipo de turbina, por ejemplo, las realizadas en túnel de viento para evaluar cómo afectan las características y diseño de sus componentes en la eficiencia de la turbina e.g. el radio del rotor, álabes traslapados y huecos, perfiles aerodinámicos, entre otros álabes (Alexander and Holownia 1978; Fujisawa and Gotoh 1994; Saylers 1985; Sheldahl et al. 1978; Ushiyama et al. 1982).

Aunque el rotor Savonius es uno de los más antiguos, existen pocas investigaciones del mismo como generador de electricidad utilizando agua como fluido, sin embargo, dadas las características mencionadas anteriormente, se considera que la turbina Savonius tiene un interesante potencial. Las razones principales para su elección se deben a que las velocidades de las corrientes marinas son bajas, comparadas con las velocidades del viento, lo cual hace necesario tener rotores que generen alto torque para bajas velocidades, de esta manera lograr un mejor rendimiento. En este trabajo se estudia un rotor de 4 álabes con diferentes grados de torcimiento con el fin de utilizarlo en un hidrogenerador.

## **4.3 Modelo Matemático del torque desarrollado en una turbina tipo Savonius**

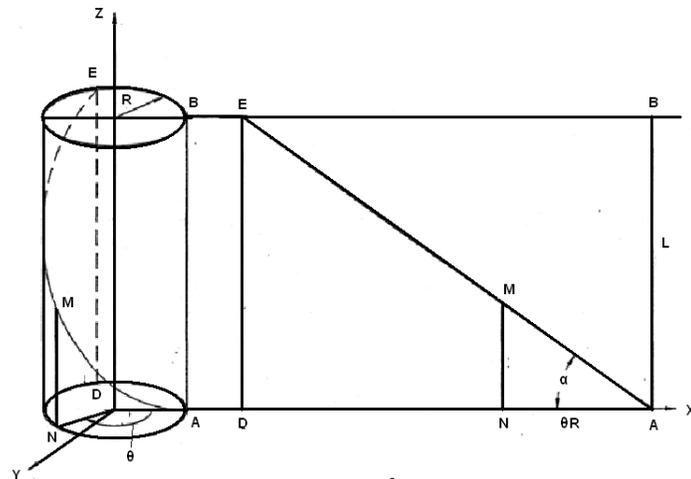
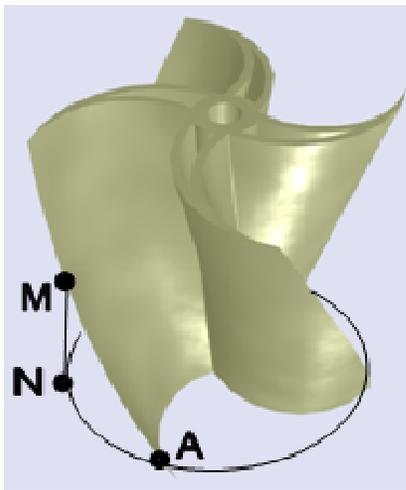
Uno de los aspectos más relevantes en el diseño de una turbina es la forma y características del rotor, por ejemplo el radio, la curvatura, la altura, que determinan ciertas propiedades y sus relaciones la eficiencia. Uno de estos parámetros en un rotor

tipo Savonius es la determinación del ángulo de torcimiento con el fin de obtener una relación de torque óptima.

Considérese un punto M sobre la trayectoria curva del álabe, **Figura 4-1**. Suponiendo que proyectamos esta trayectoria sobre una superficie plana, se puede observar que la recta para la hélice helicoidal girada está definida por los puntos AME. Ahora, las ecuaciones para un espacio en  $R^3$  (es decir, para X, Y y Z), que definen cada punto de esta recta están dados por las siguientes relaciones:

**Ecuación 18**

$$x = R \cos \theta \quad y = R \sin \theta \quad z = \frac{1}{H} \tan \theta$$



**Figura 4-1 Representación en el plano de un Álabe**

Donde  $R$  es el radio del rotor,  $\theta$  es el ángulo con respecto al plano XY del punto de la hélice considerado,  $\alpha$  al ángulo de inclinación del álabe y  $\theta_0$  al ángulo de torcimiento del rotor en planta. Si se considera un segmento  $\epsilon$  en dicha recta, éste se puede determinar vectorialmente como:

**Ecuación 19**

$$(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} |\mathbf{r}' * \mathbf{r}'| dr$$

Donde  $\mathbf{r}$  es el vector de posición de cualquier punto  $\mathbf{M}$  sobre la trayectoria de la hélice, entonces la función vectorial de la posición está dada por:

**Ecuación 20**

$$\mathbf{r} = R \cos \theta \vec{i} + R \sin \theta \vec{j} + R \tan \theta \vec{k}$$

**Ecuación 21**

$$\vec{r}' = -R \sin \theta \vec{i} + R \cos \theta \vec{j} + R \tan \theta \vec{k}$$

Y la longitud de un segmento de curva será:

**Ecuación 22**

$$L(\theta) = \int_0^\theta R(1 + (\tan \theta)^2)^{1/2} d\theta = R \int_0^\theta (1 + (\tan \theta)^2)^{1/2} d\theta$$

Y podemos dejar el ángulo en función de la longitud de línea de la siguiente manera.

**Ecuación 23**

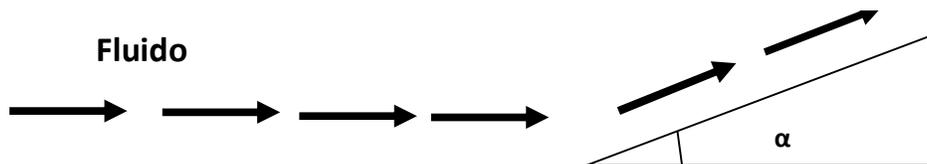
$$\theta = \arcsin \left( \frac{L}{R} \right)$$

Una vez definidos los parámetros geométricos, se analizan las fuerzas que intervienen en el movimiento. El torcimiento de la turbina induce una fuerza del fluido sobre los álabes, es decir un par motor (T). El par motor simplemente es la fuerza multiplicada por el brazo de palanca, que en este caso será el radio del rotor.

**Ecuación 24**

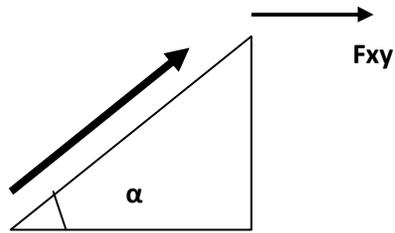
$$T = F_f R$$

Sin embargo, cuando el fluido está en contacto con la superficie del álabe, si éste se encuentra inclinado o torcido, hace que la dirección de la fuerza cambie y junto con esto la fuerza del álabe se modifica para girar. Esto se puede apreciar mejor en la **Figura 4-2**:



**Figura 4-2 Representación del movimiento del Fluido**

Debido al cambio de dirección, la fuerza ahora tiene dos componentes, una paralela al eje Z y otra paralela al plano XY, **Figura 4-3**.



**Figura 4-3 Diagrama de los componentes de la Fuerza del Fluido**

Por lo tanto, la fuerza total aplicada sobre el álabe disminuye en el punto donde toca el álabe, pues la componente en Z no es perpendicular al área transversal de la turbina, por el contrario, es paralela a la misma. Esto hace que el torque producido quede expresado como:

$$T = F_{xy} R = F_f R \sin$$

**Ecuación 25**

Si se sustituye la ecuación de fuerza del fluido, según Euler, la ecuación anterior se puede expresar como:

$$T = \left( \frac{1}{2} C_d A v^2 \right) R \sin$$

**Ecuación 26**

En la ecuación anterior, la densidad  $\rho$ , la velocidad  $v$  y el radio del rotor  $R$  son parámetros constantes para todos los pasos de tiempo y solo varía el área de contacto del fluido. Un diferencial de área del rotor, se puede calcular como:

$$dA = b d \cos$$

**Ecuación 27**

Donde  $b$  es la cuerda del álabe. Sustituyendo la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se obtiene:

$$T = \left( \frac{1}{2} (b d \cos ) v^2 \right) R \sin = \frac{1}{2} R b v^2 d \cos \sin$$

**Ecuación 28**

Dado que los primeros elementos son constantes, se puede utilizar la siguiente relación:

**Ecuación 29**

$$C_0 = \frac{1}{2} R C_d b v^2$$

Ahora sustituyendo, se obtiene:

**Ecuación 30**

$$T = C_0 d \cos \sin$$

Para obtener el torque en toda el área, donde la fuerza es perpendicular, se sustituye la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y se integra de de 0 a  $\theta$ , obteniéndose la siguiente relación:

**Ecuación 31**

$$T = \frac{1}{2} C_0 R \left[ 1 + (\tan \quad )^2 \right] (\sin \quad )^2$$

De la ecuación anterior se puede observar que el torque está en función del ángulo de torcimiento ( $\theta_0$ ) y del ángulo de inclinación, sin embargo el ángulo de inclinación está dado por:

**Ecuación 32**

$$\tan \quad = \frac{L}{\quad R}$$

**Ecuación 33**

$$= \tan^{-1} \left( \frac{L}{\quad R} \right)$$

Donde  $\theta_0$  corresponde al valor del ángulo de torcimiento del álabe. Sustituyendo la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

**Ecuación 34**

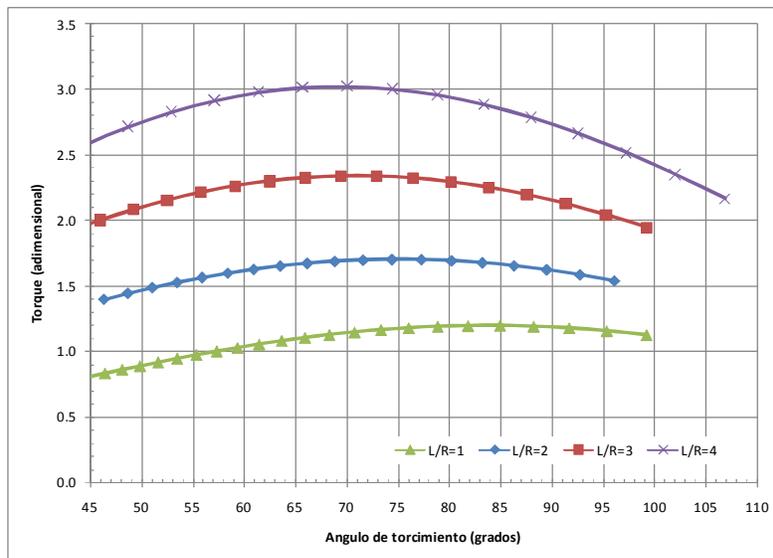
$$T = C_0 R \left[ 1 + \left( \frac{L}{\quad R} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{1}{2} (\sin \quad )^2$$

Dividiendo entre las constantes para obtener un valor adimensional, se tiene que:

**Ecuación 35**

$$T_2 = \left[ 1 + \left( \frac{L}{R} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{1}{2} (\sin \theta)^2$$

Las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** permiten evaluar el torque en función del ángulo de torcimiento en función de L/R. En la **Figura 4-4** se muestra la evolución del torque según el ángulo de torcimiento para diferentes relaciones L/R. De esta figura, se puede observar que para una relación del rotor L/R=2 el mejor desempeño se logra con ángulos de torcimiento entre 70 a 80 °, lo cual coincide con los resultados experimentales obtenidos por (Grinspand et al. 2001).



**Figura 4-4** Comportamiento de torque para diferentes grados de torcimiento y diferente área L/R

**4.4 Prueba de laboratorio para cálculo de potencia de rotores tipo Savonius.**

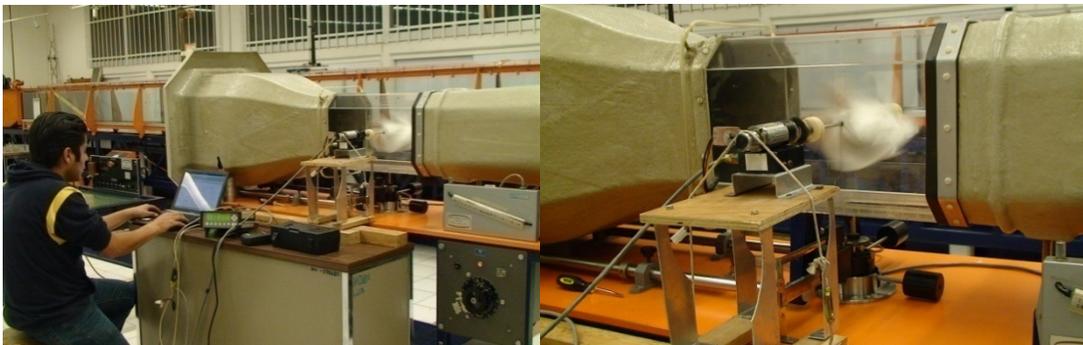
Se construyeron dos modelos de rotor tipo Savonius de 4 alabes. Uno recto y otro helicoidal con 90 grados de torcimiento los cuales se hicieron con placas de plástico de 5 mm de espesor y se fueron rotando para lograr el grado de inclinación requerido los modelos tienen 9 cm de radio y 18 cm de altura L/R=2.



**Figura 4-5 Construcción rotor Savonius**

El experimento consiste en encontrar la curva de comportamiento de los rotores (*Velocidad angular vs Potencia*), para esto, es necesario conocer la velocidad del flujo y la velocidad angular de la turbina, sin oposición y con oposición al giro, así como, el torque generado por la turbina.

Las pruebas de laboratorio se realizaron en el túnel de viento del laboratorio de hidráulica del posgrado de Ingeniería el cual tiene las siguientes dimensiones, 31.5 cm de ancho por 35 cm de alto, cuenta con una parte de acrílico transparente donde se colocaron los rotores.



**Figura 4-6 Representación y dimensiones del Túnel de viento**

El túnel de viento cuenta con un medidor de flujo donde se fija la velocidad del aire. En las paredes laterales del acrílico, tiene dos orificios por los cuales se atravesó el eje del rotor. Así mismo, en los extremos del eje, se colocaron rodamientos para disminuir las pérdidas por fricción con las paredes del túnel. En uno de los extremos del eje se colocó un tope, para evitar que el eje se moviera horizontalmente y se saliera del rodamiento. En el otro extremo se acopló un torquímetro, con un freno que aumentaba la resistencia al movimiento en la turbina.

Finalmente para conocer la velocidad angular de la turbina se utilizaron 2 métodos, el primero fue el uso de un tacómetro óptico (con una resolución de 0.1 rpm) y el segundo, un sensor con una interfaz a una PC (con una resolución del 0.01 rpm), que mostraba la velocidad angular en rpm.

Las unidades que maneja el torquímetro son [oz-in] y es de la serie *MCRT 48000V, Non-Contact* de la compañía *S. HIMMELSTEIN AND COMPANY*.



Figura 5. Torquímetro

Como se puede apreciar en la figura anterior, el torquímetro cuenta con una conexión a una interfaz, que a su vez se comunica con la PC. Además su eje atraviesa completamente el cuerpo del torquímetro, condición que simplifica la aplicación de freno mecánico. Un esquema de la instalación se muestra a continuación (**Figura 4-7**).

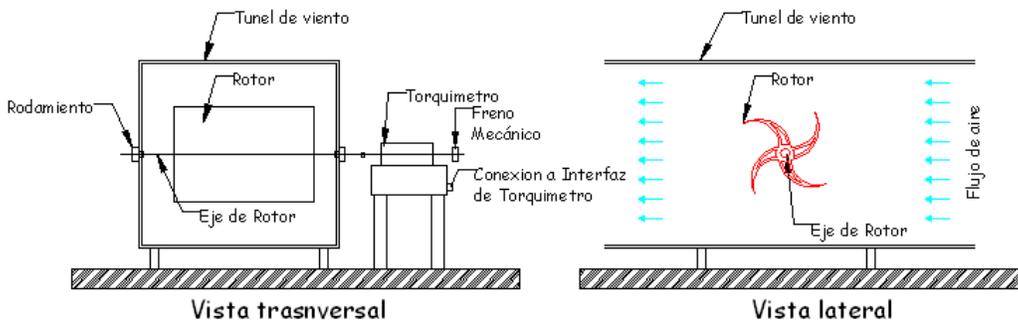


Figura 4-7 Esquema de experimento

Se realizaron pruebas a los rotores antes mencionados, para construir su curva de comportamiento. Para realizar el análisis se estableció un valor de referencia, es decir, un valor que permita conocer la eficiencia de los rotores, lo cual se realizó a través de las siguientes relaciones:

**Ecuación 36**

$$\eta = \frac{P_t}{P_f}$$

Donde  $P_t$  es la potencia de la turbina y  $P_f$  es la potencia del fluido, los cuales se calculan como:

**Ecuación 37**

$$P_t = T \omega$$

Donde la potencia de la turbina es función del torque o par generado (T) y la velocidad angular ( $\omega$ ) de la misma. Mientras que para el fluido utilizando la **Ecuación 3**, **Ecuación 16** y **Ecuación 17** se obtiene la potencia como:

## Ecuación 38

$$P_f = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{v_2}{v_1} \right)^n A v^3$$

Expresándose en función del coeficiente de arrastre el cual a su vez se encuentra en función de la cantidad de agua que pasa por la turbina, la densidad del fluido ( $\rho$ ), el área transversal de la turbina perpendicular al flujo de contacto entre la turbina y el fluido ( $A$ ), y la velocidad del mismo ( $v$ ); como se ya había mencionado anteriormente.

El experimento consistió en medir la velocidad angular y el torque generado por la turbina al presentarse resistencia al giro.

## 4.5 Resultados

Las pruebas realizadas para cada uno de los rotores fueron 4, con velocidades del fluido de: 10, 11, 12 y 13 m/s. En algunos casos de incertidumbre, los experimentos se realizaron más de una vez, cuando a simple vista la diferencia entre uno y otro experimento era considerable la prueba era repetida nuevamente. En el caso del rotor helicoidal, en algunos casos se repitieron dos veces y en otros 3.

A continuación se presentan las curvas de comportamiento de los rotores, en estas graficas se muestra también, de acuerdo a la Ecuación 38 una curva de ajuste para cada uno de los experimentos con una línea continua, donde el valor  $n$  del coeficiente de arrastre resulto de uno para el rotor recto y 1.5 para el rotor helicoidal. El coeficiente de arrastre como era de esperarse se incremento proporcionalmente a la velocidad del fluido de 1.3 hasta 2.1, y tuvo una variación no lineal en función del torque en los alabes.

El modelo matemático es función de la velocidad de salida conocida la velocidad inicial (**Ecuación 38**). Para obtener la velocidad angular se multiplica la velocidad de salida por un coeficiente  $C_w$ , que toma en cuenta la variación de la velocidad en el área transversal. En el caso del rotor recto este coeficiente resulto de 1.30 y para el rotor helicoidal de 1.45, En la **Figura 4-16** se presenta un comparativo de los diferentes experimentos del rotor recto donde se puede observar que a mayor velocidad del fluido la eficiencia del rotor aumenta.

### 4.5.1 Caso1. Rotor Recto (Torcido 0°)

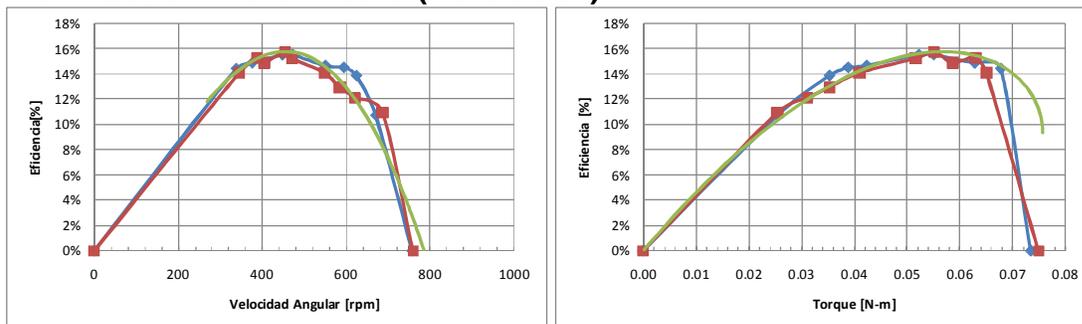


Figura 4-8 Rotor recto, Velocidad de 10 m/s

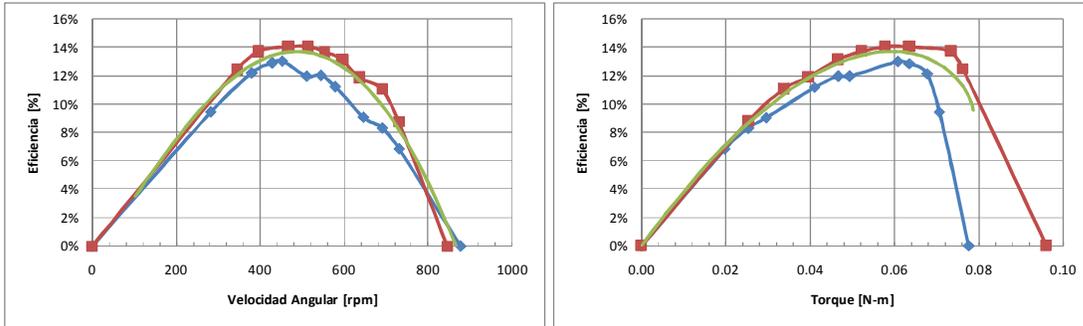


Figura 4-9 Rotor recto, velocidad 11 m/s

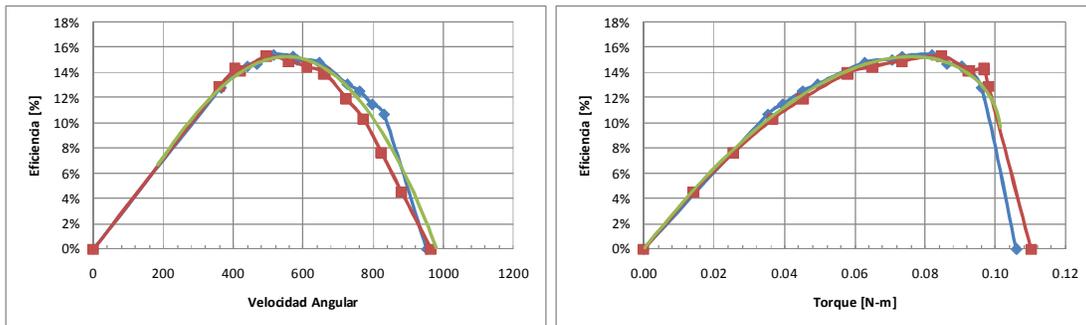


Figura 4-10 Rotor recto, velocidad 12 m/s

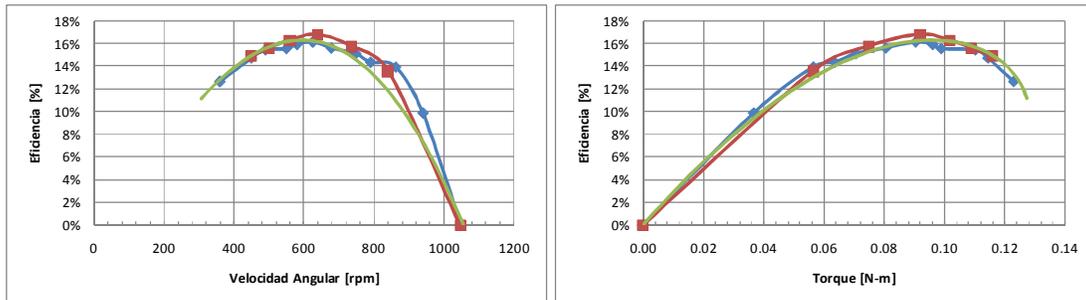


Figura 4-11 Rotor recto, velocidad 13 m/s

#### 4.5.2 Caso 2. Rotor Helicoidal (Torcido 90°)

Los resultados del rotor helicoidal mostraron que la velocidad angular, es menor en comparación con el rotor recto, pero el torque es mayor. También se puede observar que la curva matemática de acuerdo a la Ecuación 38, se ajusta muy bien a los resultados de los experimentos. Solo en la parte inicial de la curva de velocidad contra torque hay un cierto error en el ajuste, esto se debe a que al final del experimento, cuando el torque se acerca al máximo, hay mucha variación en las lecturas de velocidad angular y torque y los datos obtenidos probablemente no son los correctos, pero en la parte importante de la curva donde la eficiencia es máxima la curva se ajusta correctamente en ambos casos.

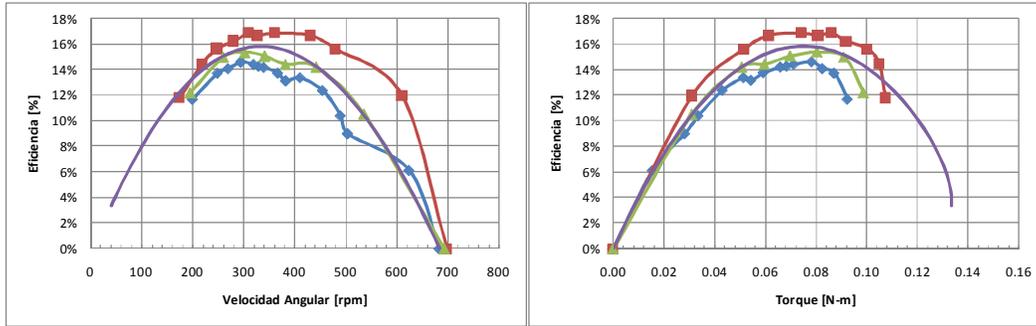


Figura 4-12 Rotor helicoidal, velocidad 10 m/s

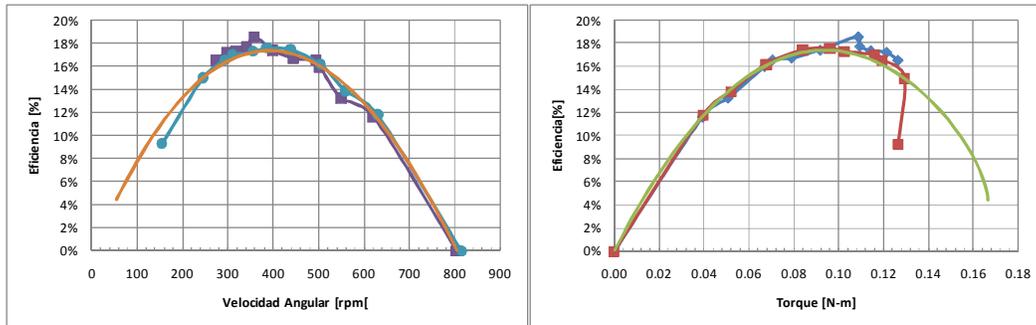


Figura 4-13 Rotor helicoidal, velocidad 11 m/s

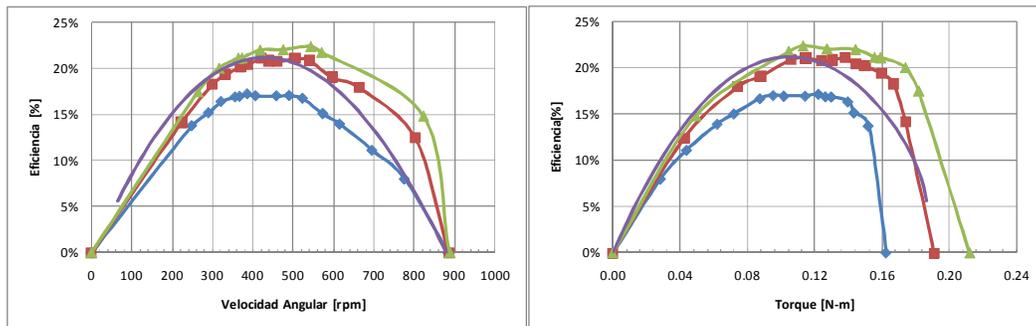


Figura 4-14 Rotor helicoidal, velocidad 12 m/s

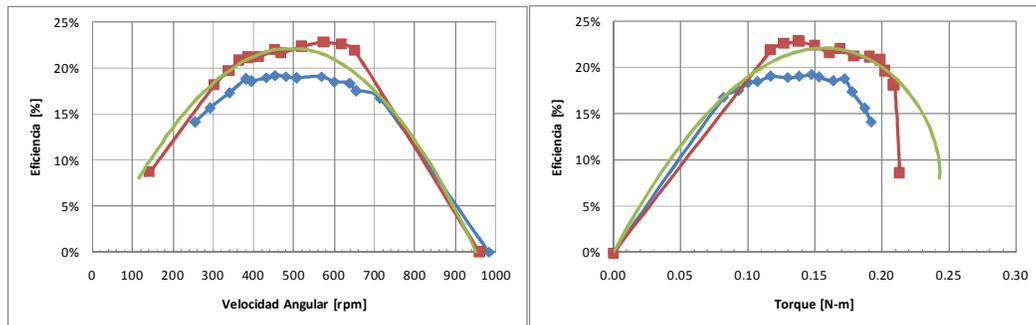


Figura 4-15 Rotor helicoidal, velocidad 13 m/s

## 4.6 Comparación de Resultados

Los resultados mostraron que el rotor helicoidal tiene mejor desempeño. En principio el rotor helicoidal comienza el movimiento con velocidad del fluido de 5 m/s mientras que el rotor recto hasta los 8 m/s. Por otro lado, se puede observar que para la misma velocidad del fluido la eficiencia en el rotor helicoidal es un poco mayor que el rotor recto.

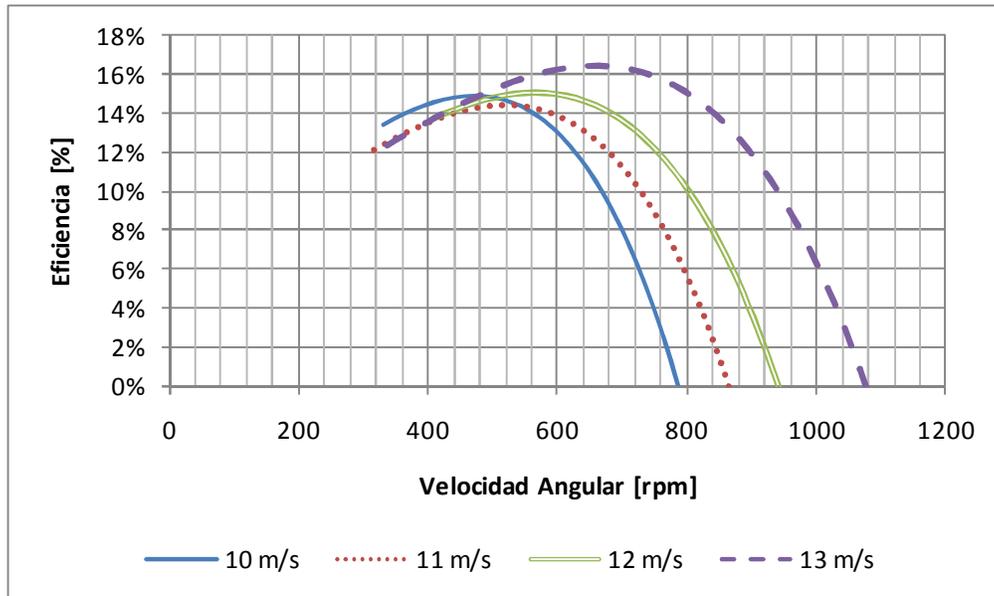


Figura 4-16 Comparación entre los diferentes experimentos, rotor recto (curvas de ajuste)

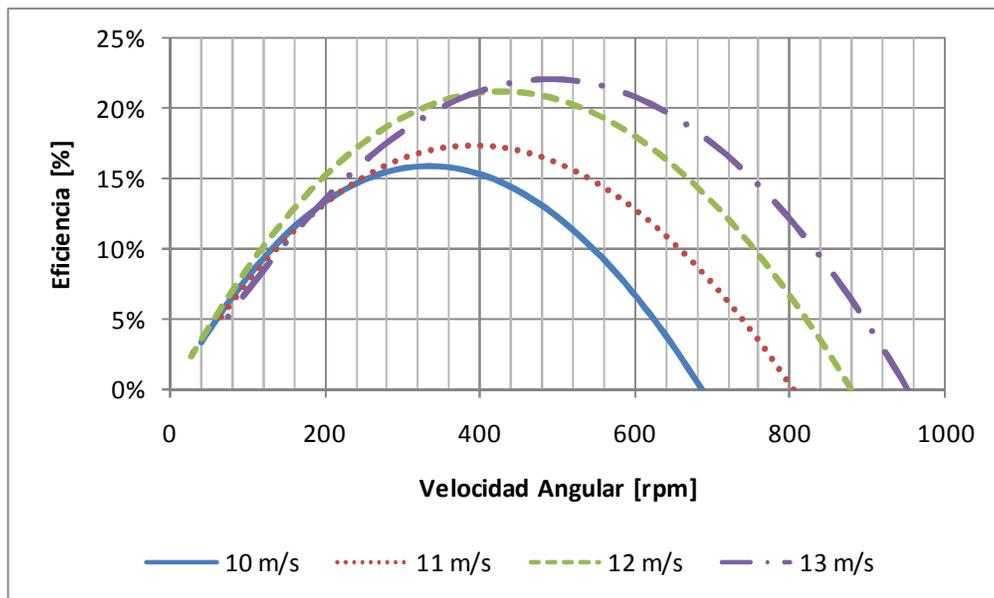
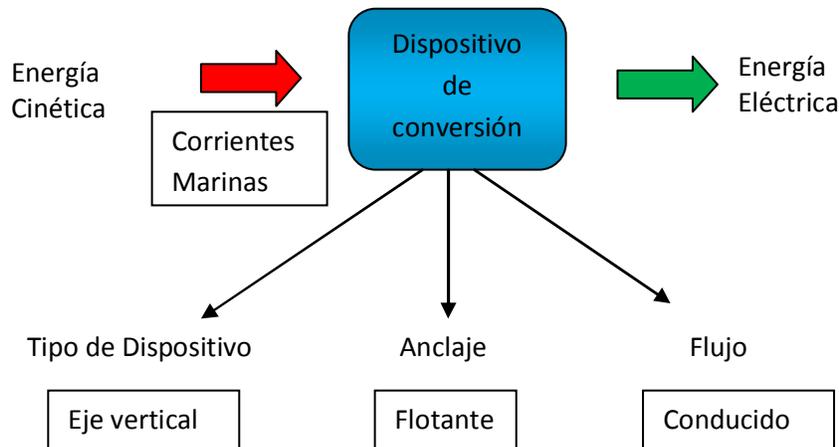


Figura 4-17 Comparación entre los diferentes experimentos, rotor helicoidal (curvas de ajuste)

## 4.7 Modelo conceptual

En el capítulo anterior se esbozó de forma general las características de los dispositivos de transformación de energía cinética de una corriente marina en energía eléctrica. Con base en el estado del arte, se establece que el dispositivo a desarrollar será un dispositivo de eje vertical flotante y de flujo conducido con un rotor tipo savanius helicoidal, denominado hidrogenerador IMPULSA. A continuación se mencionan las características primarias de operación, las cuales se presentan también, de manera esquemática en la **Figura 4-18**:

- Sistema flotante. El hecho de que la turbina sea flotante permite colocar los generadores eléctricos fuera de la superficie del agua, lo cual disminuye los costos de mantenimiento y operación (Bahaj and Myers 2003)
- Eje vertical. Las turbinas de eje vertical, aunque son menos eficientes en comparación con las turbinas de eje horizontal, resultan viables debido a que los costos de fabricación, colocación y mantenimiento son menores y las hace competitivas en lo que a costo de producción se refiere, (costo por kw producido).
- Flujo conducido. Con el flujo conducido es posible captar energía sin importar la dirección de la corriente, aumentando de esta manera la energía transformada y disminuyendo los costos (Deda et al. 2008), lo que representa una característica conveniente (Hartono 2002).



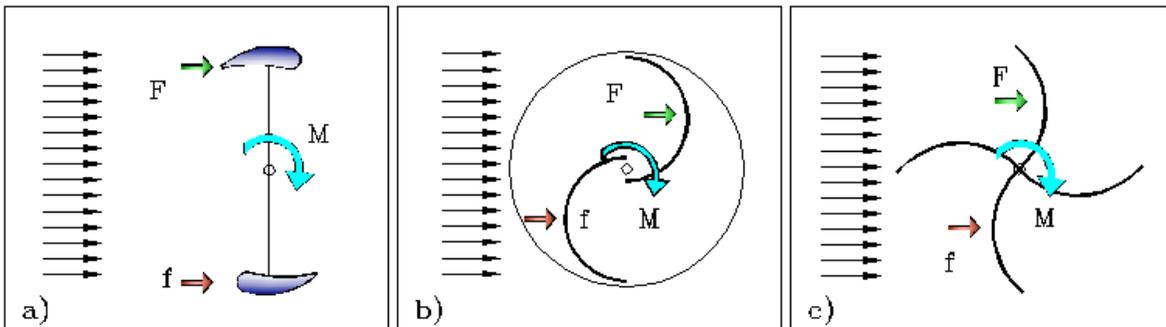
**Figura 4-18 Modelo conceptual dispositivo de conversión**

## 4.8 Determinación de la geometría de los elementos de la turbina

A continuación se desarrolla el procedimiento empleado para el diseño geométrico preliminar tanto de la carcasa como del rotor.

### 4.8.1 Carcasa

Una de las causas de la baja eficiencia de las turbinas de eje vertical es que existen fuerzas diferenciales en ambos lados del eje, las cuales se oponen al movimiento circular. En la **Figura 4-19** se muestran tres tipos de turbina de eje vertical, en ella se observan las fuerzas mencionadas. Con la finalidad de evitar la fuerza sobre el lado convexo de los álabes, en este trabajo se propone la adición de una estructura que impide el flujo sobre los rotores, para aumentar de esta manera la eficiencia de la turbina, esto se corrobora con los experimentos en túnel de viento que consistieron en colocar cortinas para direccionar el flujo a una turbina Savonius (Deda and Atilgan 2008; Deda et al. 2008)



**Figura 4-19 a) Turbina Darrieus, b) Turbina Savonius, c) Turbina Panémona**

Las turbinas de eje vertical, en general, tienen mejor desempeño con altas velocidades del fluido. Los rotores helicoidales tipo Savonius y Gorlov tienen mejor desempeño a bajas velocidades, sin embargo, el rotor Savonius tiene mayor torque (Menet 2004) y, debido a que el fluido en cuestión es agua y las velocidades son menores a 4 m/s, el rotor helicoidal tipo Savonius es una de las mejores opciones (Saha and Jaya 2006). Al aumentar el número de álabes se disminuye la oscilación de la fuerza con respecto al ángulo de incidencia, sin embargo, también disminuye el torque por lo que en algunos diseños existe una combinación entre turbina Savonius para inicio del movimiento y una turbina con mayor velocidad de arranque, por ejemplo la tipo Darrieus (Kamoji et al. 2009).

Con base en lo anterior, la carcasa del dispositivo se diseñó con la idea principal de incluir un compartimiento para los rotores así como un conducto interior para direccionar el flujo sobre los álabes. La **Figura 4-20** muestra el arreglo inicial del dispositivo, así como una representación en 3D.

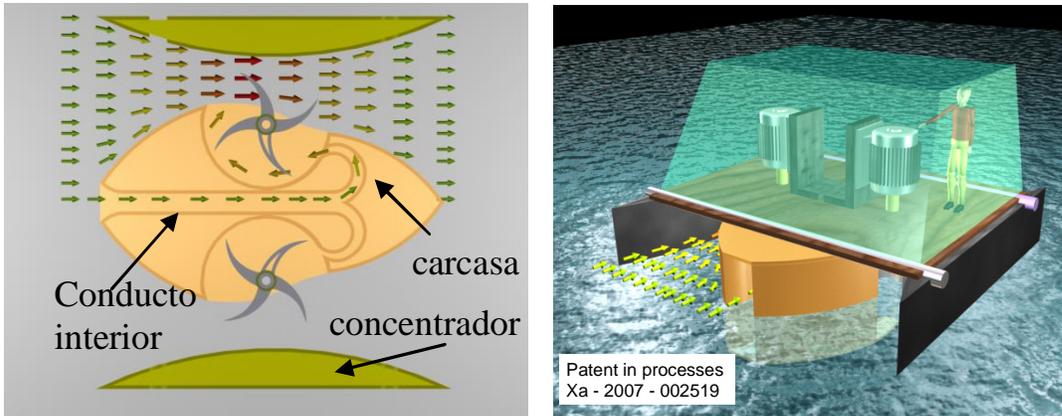


Figura 4-20 Diseño original hidrogenerador IMPULSA

#### 4.9 Simulación del flujo a través del dispositivo

En la actualidad, es práctica común la utilización de herramientas numéricas como un apoyo para el diseño y estudio del comportamiento hidrodinámico de estructuras. En el presente trabajo de investigación y en la etapa del pre-diseño con respecto a la geometría de la carcasa y de los concentradores, se determinó el comportamiento hidrodinámico de la estructura utilizando el código numérico Computational Fluid Dynamics Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series, CFD PHOENICS por sus siglas en inglés.

El código CFD PHOENICS está conformado por una serie de rutinas que permiten la programación con técnicas de dinámica de fluidos en 2D y 3D, resuelve numéricamente las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía en sus tres formas parabólica, hiperbólica o elíptica (Spalding 1981). El programa consiste de un módulo de entrada que genera un archivo donde se especifican el tamaño del dominio computacional, detalles del arreglo de la malla, tipo de coordenadas, la posición y dimensiones de los elementos dentro del fluido, las características físicas del fluido, las condiciones iniciales y los valores de frontera (Bascaran 1994; Cham 1989).

El programa cuenta con varios modelos de turbulencia, en este caso se decidió utilizar el  $k$ - (energía cinética turbulenta, tasa de disipación turbulenta) con función logarítmica de la superficie. Las ecuaciones de masa y momento usadas por el programa en su forma general son:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j) = 0$$

Ecuación 39

Ecuación de momentum

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial x_j} + S_i$$

Ecuación 40

En las dos ecuaciones;

|        |   |
|--------|---|
| $x_i$  | Coordenadas cartesianas ( $j = 1, 2, 3$ )           |
| $u_i$  | Componentes de la velocidad en la dirección $x_i$   |
| $P$    | Valor Piezométrico $= P_s - \rho \cdot g \cdot x_m$ |
| $P_s$  | Presión estática                                    |
| $\rho$ | Densidad de referencia                              |
| $g$    | Aceleración de la gravedad                          |
| $x_m$  | Coordenada definida por $\rho$                      |
| $ij$   | Componentes del tensor de esfuerzos                 |

Con el objeto de forzar el la simulación con los parámetros oceanográficos correspondientes a la zona de aplicación, se recurrió a la literatura especializada. En México las corrientes marinas más importantes y relativamente constantes se encuentran asociadas a la corriente del Golfo, con velocidades máximas de 2 a 3 m/s, por ejemplo, la velocidad media en el canal de Cozumel es de 1.5 m/s (Cetina et al. 2005; Chávez et al. 2003). Otra zona con velocidades importantes es el alto Golfo de California con velocidades máximas del orden de 1.3 m/s (Lavín et al. 1997; Palacios et al. 2005; Roden 1964). Se espera que a mayor velocidad de fluido la potencia y eficiencia de los dispositivos sean mayores, sin embargo, en muchas ocasiones la máxima velocidad del fluido solo se presenta en periodos cortos. Para fines del pre-diseño y con el objeto de realizar una comparación cuantitativa, se propusieron varias configuraciones y se modelaron con velocidad constante de 1.5 m/s.

En la **Figura 4-21** se presentan los resultados de la simulación numérica una vez alcanzado el equilibrio. En el panel (a) se observa la carcasa sin conducto interior, donde se aprecia una concentración de energía en la zona de los rotores. En el panel (b) se muestra la carcasa y el conducto interior, y se observa muy poca velocidad del fluido sobre los álabes por lo cual se aumenta el área transversal del conducto interior (panel c), originando esta modificación, mayor flujo en la salida de los conductos. El panel (d) muestra el arreglo inicial del dispositivo con concentradores circulares, el cual se toma como definitivo en esta primera etapa y se construye el prototipo **Figura 4-22**.

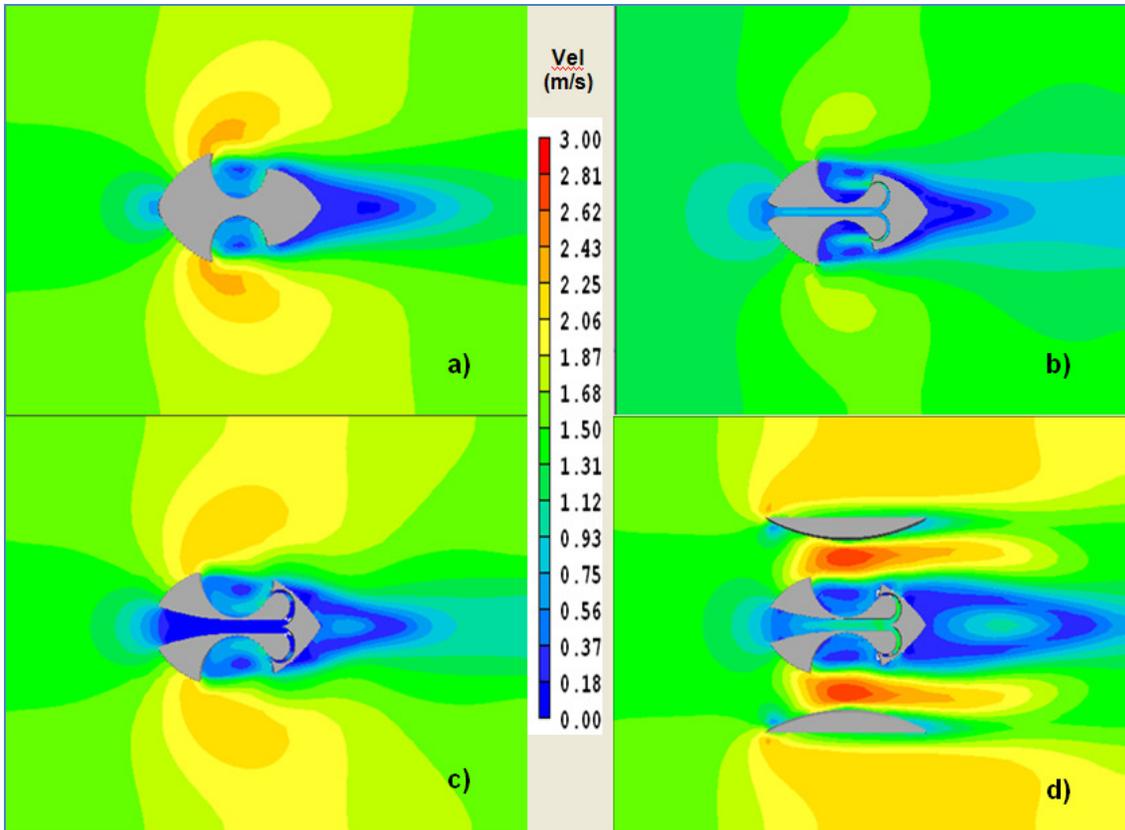


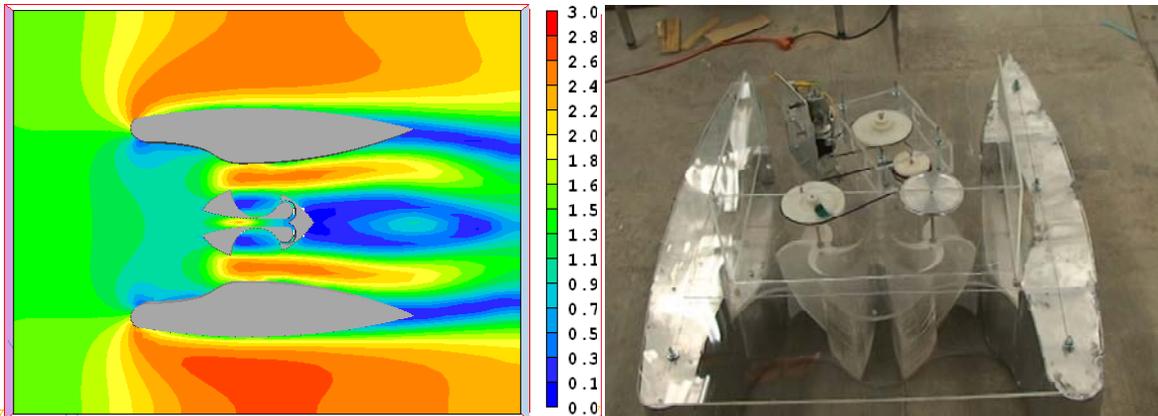
Figura 4-21 Distribución de velocidades a) Carcasa simple sin conducto interior b) carcasa con conducto interior, c) carcasa con mayor amplitud en la entrada del conducto interior d) carcasa con concentradores.



Figura 4-22 Prototipo inicial con concentradores circulares.

Una vez construido el prototipo, se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento en el canal de pendiente variable del Instituto de Ingeniería. En estas pruebas se observó que la forma de los concentradores cambian el flujo bruscamente e inciden de manera incorrecta sobre los álabes, por lo cual, se requirió modificarlos. La configuración final tiene la forma

de un venturi **Figura 4-23**, de esta manera se capta mayor energía y se direcciona el flujo de manera gradual sobre los rotores. Por lo tanto, la forma de los concentradores se modificó en el modelo. Esta configuración se consideró adecuada para la construcción del modelo físico, cuyos resultados se presentan en el siguiente capítulo.



**Figura 4-23 Resultados modelo numérico con concentradores en forma de venturi y modificación al modelo físico.**

## Discusión y conclusiones

Los resultados analíticos y experimentales mostraron que el rotor helicoidal (torcido  $90^\circ$ ), tiene un mejor desempeño. Un primer punto de análisis, es el rango de velocidades del fluido en los cuales el rotor puede trabajar. El rotor recto aumenta su desempeño conforme aumenta la velocidad del fluido, obteniendo el más alto rendimiento para la mayor velocidad con la que se realizó la prueba (13 m/s), mientras que el rotor helicoidal aumenta su desempeño desde los 10 m/s; es decir, el rotor recto tiene una mejor aplicación para altas velocidades. Recuérdese que el rotor tipo Savonius se utilizará para un hidrogenerador, donde el fluido en cuestión es el agua, el cual presenta perfiles de velocidad baja, en comparación con las velocidades en aerogeneración (Cadenas and Riviera 2008). Por lo tanto el rotor torcido en  $90^\circ$  es una mejor opción que el rotor recto.

El segundo punto es el torque máximo alcanzable, en el cual de nueva cuenta se vio superado el rotor recto por el helicoidal como se esperaba, de acuerdo al análisis del modelo matemático. En la **Figura 4-4** se observa que para una relación de L/R igual a dos que es la relación de los modelos construidos, el mejor ángulo de torcimiento es de  $75^\circ$ , y en los experimentos se observa que el torque en el rotor helicoidal es superior en alrededor 50 % al torque del rotor recto.

Un tercer punto a favor del rotor helicoidal, es el torque de arranque o torque necesario para iniciar el movimiento. En los experimentos el rotor helicoidal comienza a girar con muy bajas velocidades del fluido alrededor de 2 a 4 m/s mientras que el rotor recto necesitaba de mayores velocidades (alrededor de 5-6 m/s) y vibra al inicio del movimiento, esto sin tener torque inicial lo cual repercutiría mas en el desempeño del mismo.

En el caso del experimento con velocidad de 13 m/s, se aprecia un aumento significativo en la eficiencia en los dos rotores, con una eficiencia de 17% para el rotor recto y 22% para el rotor helicoidal, lo que demuestra la conveniencia de utilizar un rotor helicoidal.

Por lo tanto, la configuración de turbina Savonius con cuatro alabes en un dispositivo de conversión de energía cinética de las corrientes, será con un rotor helicoidal, ya que permite tener un rango mayor de velocidades del fluido en las cuales el hidrogenerador puede trabajar. Este rotor también presenta la ventaja de lograr alto par de arranque, así como desarrollar alto torque dinámico, superior en un 50% a los registrados en un rotor recto. Además, la eficiencia del rotor helicoidal es mayor que la eficiencia en el rotor recto a bajas velocidades, lo que aumenta la eficiencia del hidrogenerador. Para este caso de estudio el rotor helicoidal representa por mucho la mejor opción para el dispositivo de conversión de energía cinética de las corrientes.

Como resultados del modelo numérico CFD PHEONICS se obtuvieron las dimensiones y forma preliminar de la carcasa del Hidrogenerador IMPULSA el cual será un dispositivo de eje vertical, flotante y de flujo conducido.

Las simulaciones muestran que el conducto interior aumenta la eficiencia del sistema por lo cual este será un punto de particular interés en los experimentos con el modelo físico.

El rotor tendrá una relación de dos con respecto al radio y la altura, con lo cual, el rotor torcido o helicoidal con 75 grados es la mejor opción.

Las pruebas experimentales consistirán en verificar si el rotor helicoidal tiene mejor desempeño que el rotor recto y se obtendrán las curvas de eficiencia del hidrogenerador IMPULSA con diferentes velocidades del fluido.

## 5 Modelado físico

### 5.1 Introducción

A medida que el tiempo avanza, la generación de energía por medios convencionales es una alternativa que en términos económicos rápidamente pierde viabilidad. Desde el punto de vista de responsabilidad ambiental, es necesario deponer el uso de los combustibles fósiles, más aún cuando su disponibilidad es cada vez menor y las dificultades que representa su extracción tienden a encarecer la energía que generan (Ballenilla 2004). Por otro lado, está el caso de las hidroeléctricas que es una de las fuentes de energía renovables más limpias, sin embargo, requieren el almacenamiento de grandes volúmenes de agua y obligan cambios de hábitat normalmente en áreas social y ambientalmente muy sensibles, lo cual también se traduce en consecuencias adversas de tipo social y ambiental.

Aunado a lo anterior, la demanda de energía mantiene una tendencia ascendente, ya que aún cuando los avances tecnológicos han reducido significativamente el consumo de energía de los aparatos electrodomésticos y mecánicos, la cantidad de usuarios también ha aumentado exponencialmente. De ahí que, de acuerdo con la IEA (International Energy Agency), se espera que la producción mundial de electricidad se incremente a más del doble al llegar al primer cuarto del siglo XXI y la producción de energías renovables; un 57% (IEA 2007). El aumento poblacional y las necesidades energéticas previstas hacen que el enfoque mundial esté centrado en la utilización de energías y combustibles limpios, los cuales además de no contaminar, se encuentran en el medio ambiente de manera natural, es decir, no se requiere de un gasto energético adicional para su extracción y su explotación no supone descargas o emisiones residuales dañinas. El reto, desde hace décadas, es encontrar la forma de captar este tipo de energía de manera óptima, eficiente y a un costo tal que les permita competir contra las fuentes de energía convencionales (Dincer 2000).

En este sentido, entre las fuentes de energía limpia que han atraído la atención del hombre desde hace siglos se encuentra el océano, ya que en él se concentran la energía solar, eólica y astronómica que dan origen a fenómenos como el oleaje, las mareas, los gradientes térmicos y las corrientes, de los cuales es posible captar y convertir la energía que contienen (Charlier and Justus 1993).

De las diferentes fuentes de energía disponibles en el océano, este capítulo presenta el diseño de un dispositivo capaz de aprovechar la energía de las corrientes marinas, las cuales presentan las ventajas de ser abundante, regular y predecibles (Bahaj and Myers 2003; Charlier 2003). En México, las corrientes marinas más importantes y relativamente permanentes se encuentran asociadas a la corriente del Golfo, con velocidades máximas de 2 a 3 m/s; un caso específico es el canal de Cozumel donde las velocidades alcanzan los 1.5 m/s y son muy regulares (Cetina et al. 2005; Chávez et al. 2003). Otra zona con velocidades importantes es el alto Golfo de California donde la velocidad máxima es de 1.3 m/s (Lavín et al. 1997; Palacios et al. 2005; Roden 1964).

El dispositivo ideado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México para aprovechar las corrientes marinas, lleva por nombre Hidrogenerador IMPULSA, el principio de operación del Hidrogenerador IMPULSA es semejante al de los sistemas que actualmente se utilizan para el aprovechamiento eólico o aerogeneradores, los cuales aunque se encuentran en funcionamiento desde hace décadas, siguen siendo sujetos de investigación y desarrollo (Bryden et al. 2004); lo mismo ocurre en el caso que atañe a este trabajo, en el que el dispositivo de conversión se encuentra dentro del mar y busca aprovechar las corrientes marinas.

El diseño de un dispositivo de conversión de energía oceánica es un proceso que involucra varias fases o etapas además de ser recursivo o iterativo, porque al llevarse a cabo cierta actividad es necesario revisar y rediseñar. Una de estas etapas es el modelado, el cual puede ser físico o numérico, lejos de ser excluyentes, ambos tipos se complementan. El modelado físico incluye pruebas de laboratorio, con ciertas condiciones, de tal manera que se puedan controlar las variables más significativas y de esta manera establecer condiciones reproducibles hasta lograr resultados confiables. Con estos resultados se establecen condiciones o rangos de trabajo, la eficiencia del dispositivo, sus curvas características y se pueden tomar decisiones en cuanto a modificar elementos o características del dispositivo.

A continuación, a modo de marco conceptual, se presenta una breve revisión del funcionamiento de las turbinas comúnmente empleadas para el aprovechamiento de las corrientes marinas.

## **5.2 Generalidades de las turbinas marinas**

Las turbinas mayormente empleadas para aprovechar las corrientes marinas son dos; por un lado, las conocidas como de eje horizontal o paralelo a la dirección del fluido. Este tipo de turbina se ha empleado con gran éxito en el aprovechamiento de recursos eólicos, por ello existe una serie de esfuerzos por trasladar esa experiencia al caso de las corrientes marinas (Bahaj and Myers 2003). Los resultados obtenidos reportan eficiencias de entre 30 y 40% respecto de la energía cinética del fluido (Briden et al. 1998; Garret and Cummins 2004; Gorban et al. 2001). El segundo tipo de turbinas es conocido como de eje vertical o perpendicular a la trayectoria del fluido.

Las turbinas marinas de eje vertical han sido objeto de menos estudios y aplicaciones, y aunque algunos autores reportan eficiencias alrededor de 20 a 30% (In et al. 2009; Kamoji et al. 2009; Saha et al. 2008), su instalación y construcción requieren menores inversiones y esfuerzos; adicionalmente los dispositivos ya terminados son más robustos, lo que compensa su relativamente baja eficiencia.

Es de notar que aún cuando las eficiencias promedio reportadas parecen bajas (del orden de 30%), se ha demostrado analíticamente que la eficiencia máxima de una turbina es de aproximadamente 60% de acuerdo con Ley de Betz (Rauh and Seelert 1984), más aún, de acuerdo con (Gorban et al. 2001) este valor teórico de referencia es mucho menor. En este contexto, eficiencias promedio de 30%, aunque superables, quedan dentro del rango de los dispositivos comerciales existentes.

Aun con el alto grado de desarrollo de algunos dispositivos de conversión existen una serie de interrogantes y problemas por resolver como son: la eficiencia y respuesta del

dispositivo a la variación en la dirección de las corrientes, la interacción y perturbación de la capacidad instalada del Hidrogenerador con diferentes condiciones de oleaje, la afectación hidrodinámica cuando se coloca una serie de dispositivos y problemas internos del mismo como corrosión, cavitación, anclaje y mantenimiento entre otros (Bahaj et al. 2007).

### 5.3 Hidrogenerador impulsiva

El dispositivo que se está desarrollando lleva por nombre Hidrogenerador IMPULSA surgido dentro del proyecto IMPULSA “Desalación de agua de mar con energías renovables” el cual es una turbina flotante de eje vertical y de flujo conducido. En estos dispositivos, la energía cinética del fluido actúa sobre los álabes, cuya forma favorece la generación de fuerzas diferenciales en la cara expuesta al flujo, de donde se deriva un momento motor con intensidad dependiente del ángulo de ataque con respecto a la dirección del fluido.

El Hidrogenerador IMPULSA, que es una combinación entre la turbina Savonius y la Panémona, consiste de una carcasa que aloja dos rotores con cuatro álabes y está diseñada de forma aerodinámica para disminuir las pérdidas a la entrada del dispositivo. Este hidrogenerador cuenta con dos cavidades que evitan el flujo sobre el lado convexo de los álabes para evitar el torque negativo y aumentar de esta manera la eficiencia (Deda and Atilgan 2008; Deda et al. 2008). Adicionalmente, cuenta con un conducto interior que direcciona el flujo hacia el lado protegido del rotor.

El sistema está diseñado de manera que se mantenga en flotación, lo que permite que los generadores se ubiquen fuera del agua, que la colocación en sitio sea por medio de un sistema de anclaje común y que el retiro para mantenimiento o deposición sea relativamente fácil. Otra importante ventaja de dichas características geométricas y de colocación es que al limitar pocos grados de libertad, el sistema es capaz de auto alinearse con la dirección del fluido (Hartono 2002). El Hidrogenerador IMPULSA cuenta también con dos concentradores laterales que provocan un efecto venturi (amplificación de la velocidad por reducción del área hidráulica), aumentan el área de captación, direccionan el flujo sobre un lado de los alabes y aseguran la flotabilidad y estabilidad de todo el dispositivo (**Figura 5-1**).

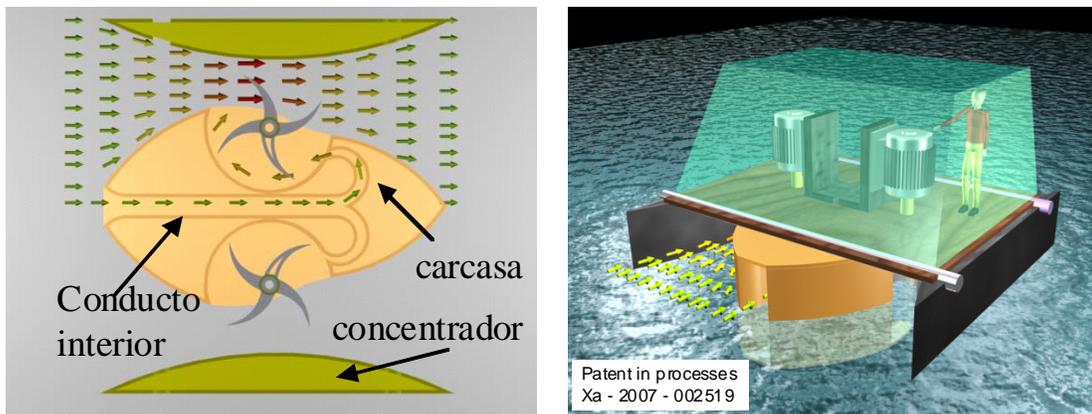


Figura 5-1 Esquema hidrogenerador IMPULSA

## 5.4 Diseño geométrico del dispositivo

La forma de la carcasa intenta disminuir las pérdidas y evitar la separación de las líneas de corrientes, la cual, se supone se encuentra inmersa en un fluido incompresible en el cual no hay esfuerzos cortantes (viscosidad nula) y movimiento constante, por lo tanto, cumple con las ecuaciones de conservación de masa y momentum.

El diseño inicial de la carcasa se obtuvo utilizando la técnica de transformada conforme, por la cual se determinan la sustentación y presión de un perfil de ala de avión a partir del flujo sobre un cilindro, el cual está definido a partir de las funciones de corriente y potencial de las ecuaciones: Ecuación (1) y Ecuación (2) respectivamente, estas funciones se pueden graficar en el plano complejo así como en el plano Dseta y la función de transferencia que relaciona ambos planos es la presentada en la Ecuación (3), en la **Figura 5-2** se muestra esta correspondencia. De esta manera se seleccionaron las dimensiones mínimas requeridas para alojar tanto el conducto interior como el radio de los alabes. Posteriormente se realizaron simulaciones numéricas del fluido con la carcasa y los diferentes elementos de la turbina, los resultados fueron presentados en el capítulo anterior.

$$=Ur\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)\sin$$

Ecuación 41

$$\Phi=Ur\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)\cos$$

Ecuación 42

$$=z+\frac{a^2}{z}$$

Ecuación 43

Donde

$U$  Velocidad en la dirección X

$a$  Radio del círculo

$\theta$  Componente angular polar

$r$  Componente radial polar

$z$  Numero complejo  $z = x + yi$

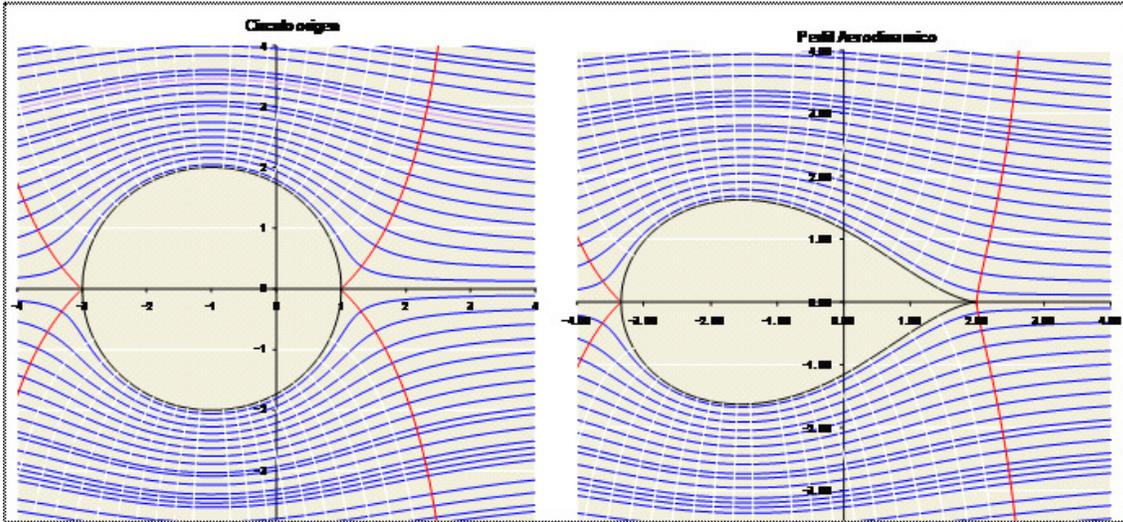


Figura 5-2 Función de corriente y potencial en los planos cartesiano y complejo

En la **Figura 5-3** y **Figura 5-4** se muestra a detalle, las dimensiones de la carcasa y los dispositivos complementarios (rotores y concentradores). Los rotores tienen cuatro alabes de manera que al menos uno de ellos se encuentra sometido a la acción de la fuerza hidrodinámica.

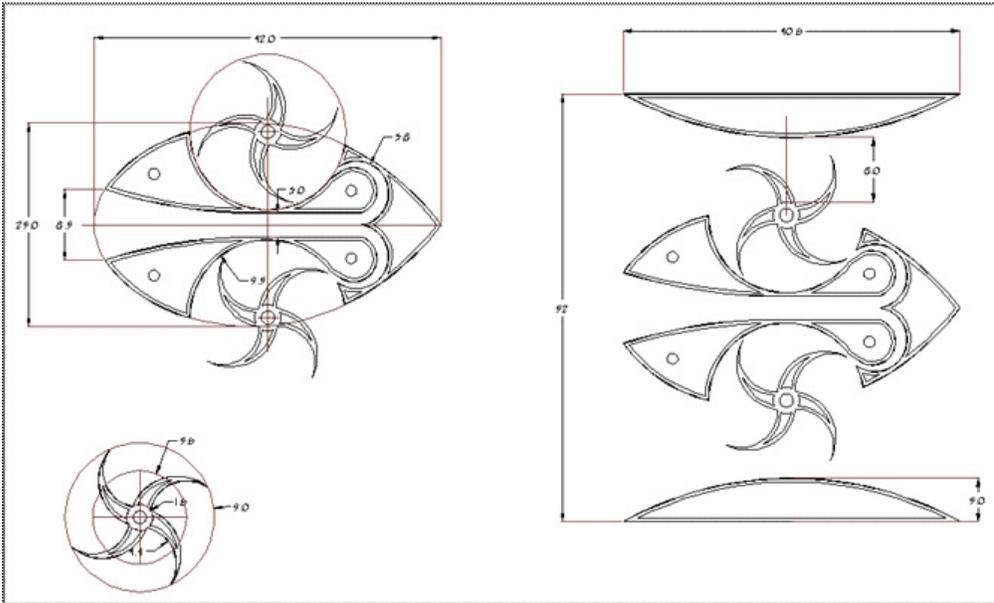


Figura 5-3 Diseño geométrico del modelo

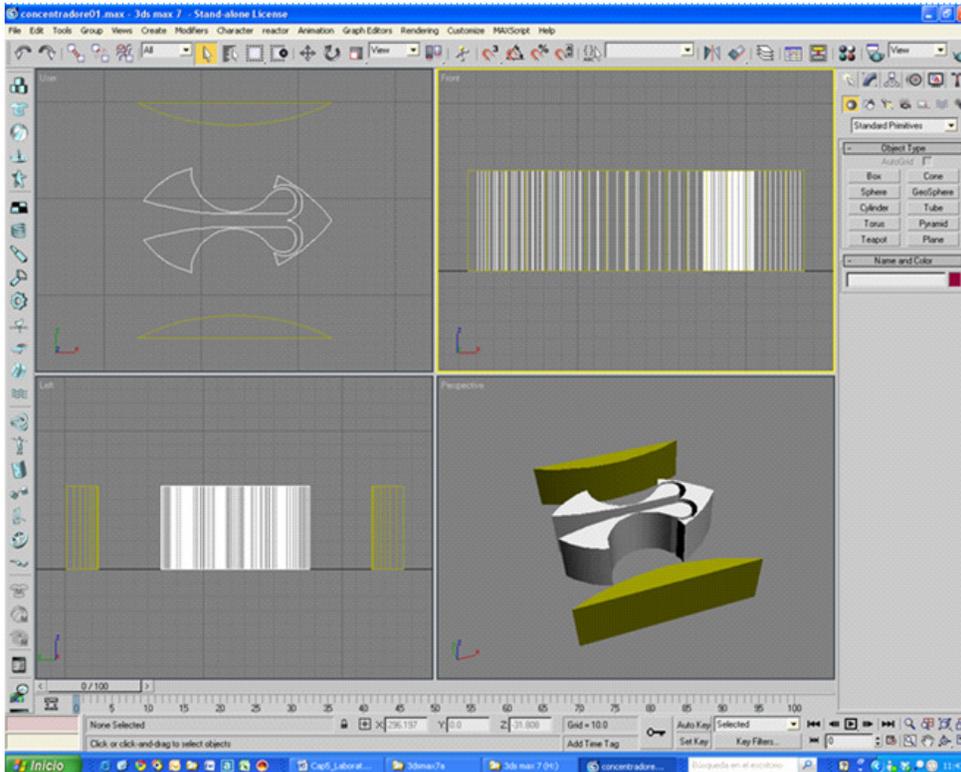


Figura 5-4 Diseño en 3D Studio Max

## 5.5 Construcción de modelos físicos

Una vez definida la geometría, la construcción de los modelos físicos experimentales fue realizado en tres etapas, en cada una de ellas se construyó un modelo a diferente escala considerando un prototipo de 35 KW y velocidad del fluido de 1.5 m/s (prototipo de 6 m de altura y 15.5 m de ancho).

### 5.5.1 Etapa 1

El primer modelo se construyó a escala 1:100 con dimensiones de 6 cm de alto, 6 cm de ancho y 10 cm de largo. El diseño se llevó a cabo en el programa cad 3D y posteriormente se materializó en una impresora de prototipos rápidos del Centro de Diseño Mecánico (CDM) de la Facultad de Ingeniería, la cual coloca delgadas capas de material plástico que al entrar en contacto con el aire se enfría y rigidiza (Figura 5-5, Figura 5-6). Con este modelo se hicieron pruebas de funcionamiento en el canal de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica en el Posgrado de Ingeniería de la UNAM. En esta primera etapa se verificó la viabilidad del sistema y se realizaron las primeras observaciones.

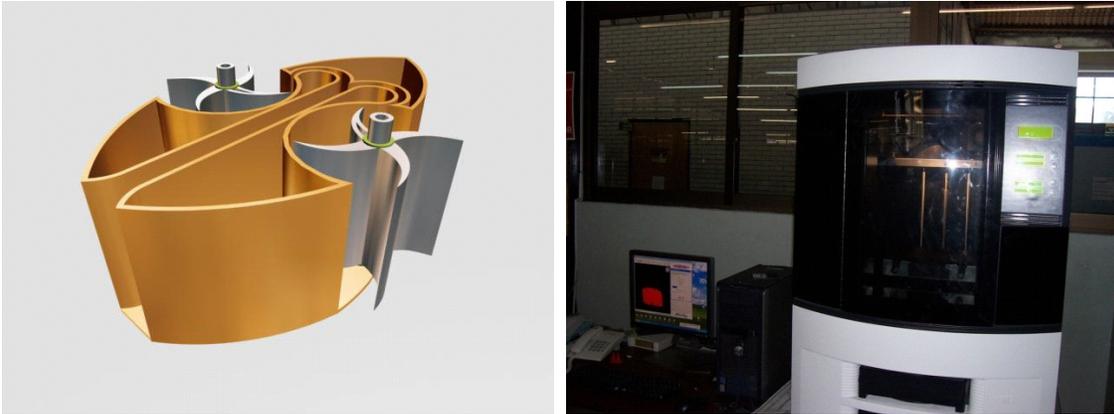


Figura 5-5 Diseño 3D e Impresora de prototipos rápidos del CDM

El experimento consistió en colocar el modelo en un flujo de agua, observar y medir las pérdidas de energía inherentes a la colocación de un obstáculo. Las dimensiones del canal y las condiciones del experimento realizado se muestran en la **Tabla 5-1**, en la que los parámetros corresponden a flujo sin obstáculo.

**Tabla 5-1 Parámetros del experimento**

| Gasto (m <sup>3</sup> /s) | Ancho del canal (m) | Tirante (m) | Área hidráulica (m <sup>2</sup> ) | Velocidad media (m/s) | Energía (mca) |
|---------------------------|---------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------|
| 0.021                     | 0.300               | 0.120       | 0.0360                            | 0.583                 | 0.137         |

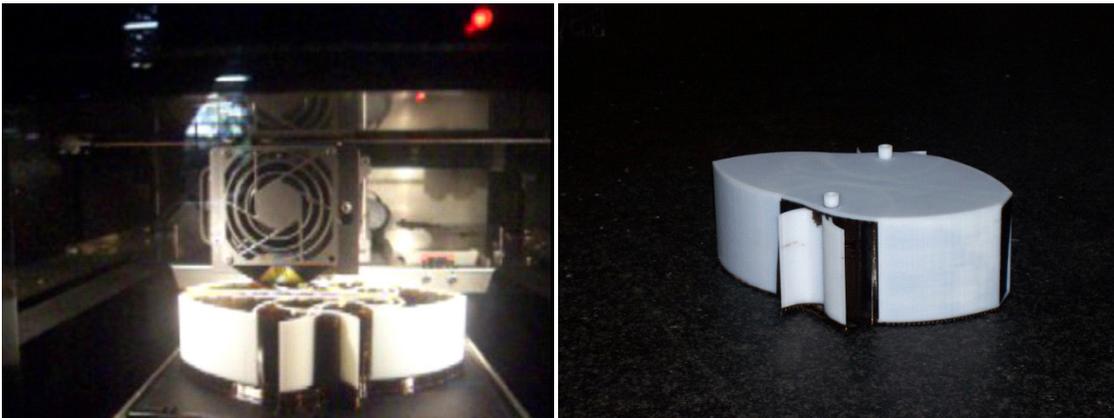


Figura 5-6 Modelo en proceso y terminado

Con flujo constante se tomaron dos lecturas del nivel del agua, antes y después del dispositivo y se realizaron tres experimentos.

Experimento 1: se colocó el dispositivo sin concentradores, permitiendo que el agua pasara por el conducto interior (**Figura 5-7**)

Experimento 2: se colocó el dispositivo sin concentradores y se impidió que el flujo pasara a través del conducto interior colocando una cinta adhesiva a la entrada del conducto.

Experimento 3: se colocó el dispositivo con concentradores y se permitió el paso del agua por el conducto interior (**Figura 5-8**)

Los resultados se presentan en la **Tabla 5-2** donde se observa que el conducto interior mejora las condiciones del flujo.



Figura 5-7 Experimento 1



Figura 5-8 Experimento 3

**Tabla 5-2 Resultados de los experimentos en el canal de pendiente variable**

|                        | Características del modelo físico |       |                    |       |                             |       |
|------------------------|-----------------------------------|-------|--------------------|-------|-----------------------------|-------|
|                        | Con flujo interior                |       | Sin flujo interior |       | Concentradores y flujo Int. |       |
|                        | S1                                | S2    | S1                 | S2    | S1                          | S2    |
| Tirante (m)            | 0.116                             | 0.094 | 0.104              | 0.084 | 0.127                       | 0.090 |
| Área (m <sup>2</sup> ) | 0.035                             | 0.028 | 0.031              | 0.025 | 0.038                       | 0.027 |
| Vel (m/s)              | 0.603                             | 0.746 | 0.670              | 0.837 | 0.550                       | 0.777 |
| Energía (mca)          | 0.135                             | 0.122 | 0.127              | 0.119 | 0.143                       | 0.121 |
| Perdida                |                                   | 11%   |                    | 13%   |                             | 12%   |

### 5.5.2 Etapa 2

En la etapa 2 se construyó un modelo de acrílico transparente a escala 1:30, con la finalidad de observar el flujo a través del mismo. La técnica para la construcción del dispositivo fue cortar secciones de acrílico en un contador recto vertical (router) automatizado y posteriormente las secciones fueron pegadas para formar el cuerpo de la estructura. En esta etapa también se construyeron dos tipos de rotores, un par de rotores rectos y un par helicoidales, la técnica fue similar, se cortaron secciones y se pegaron

hasta la altura requerida. En el caso de los rotores helicoidales, cada sección se rotaba un cierto ángulo con respecto al anterior para darle la inclinación de  $30^\circ$  (rotación de  $90^\circ$ ) (Figura 5-9).

El acabado final se obtuvo, lijando manualmente y aplicando pintura acrílica (Figura 5-10).



Figura 5-9 Proceso de construcción modelo 1:50

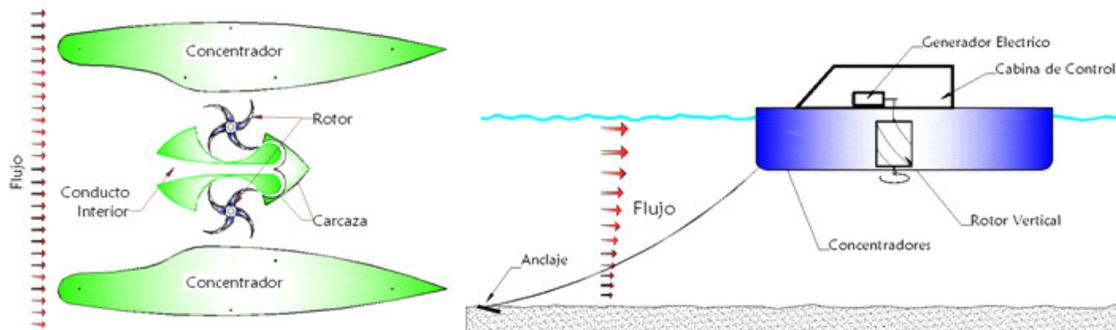


Figura 5-10 Dispositivo terminado, concentradores circulares, rotores rectos y helicoidales.

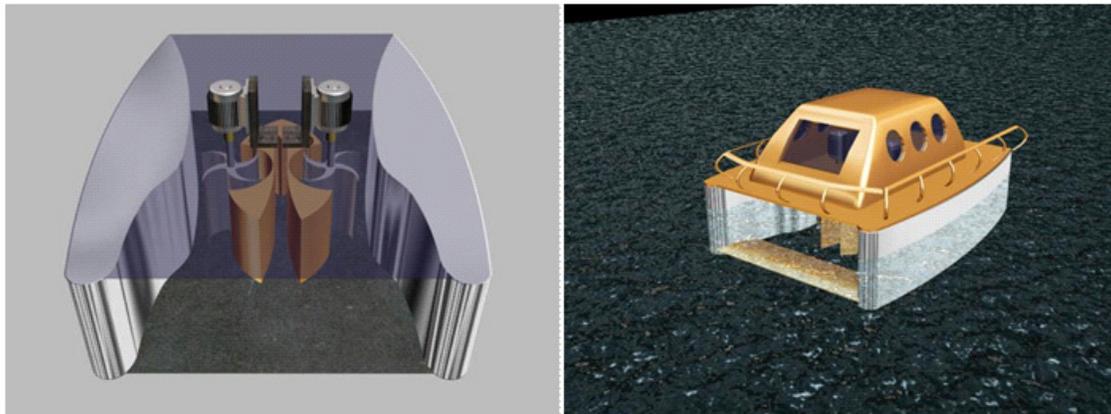
Una vez construido el modelo, se llevaron a cabo pruebas preliminares de operación donde se observó que los concentradores no eran los adecuados, ya que el flujo incidía sobre los rotores con un ángulo de aproximadamente  $45^\circ$  en lugar de  $90^\circ$ , lo que disminuía el torque y en algunas ocasiones el movimiento circular, por lo que se realizaron nuevos diseños de concentradores, quedando al final los mostrados en la Figura 5-11, mientras que en la Figura 5-12 se muestra la conceptualización artística del dispositivo y en la Tabla 5-3, las dimensiones del dispositivo. Finalmente en la Figura 5-13 se muestra el modelo físico del hidrogenerador IMPULSA, con capacidad nominal de 38 W.

**Tabla 5-3 Dimensiones de los modelos de Hidrogenerador  
Hidrogenerador de 100 W**

| Elemento                        | Dimensión | Unidad         |
|---------------------------------|-----------|----------------|
| Radio de los rotores            | 0.09      | m              |
| Altura transversal              | 0.20      | m              |
| Ancho transversal               | 0.60      | m              |
| Área en la entrada              | 0.12      | m <sup>2</sup> |
| Ancho transversal en la turbina | 0.09      | m <sup>2</sup> |
| Área en la turbina              | 0.02      | m <sup>2</sup> |



**Figura 5-11 Esquema Hidrogenerador QK a) Planta, b) Perfil**



**Figura 5-12 Conceptualización artística del Hidrogenerador IMPULSA con nuevos concentradores.**



**Figura 5-13 Modelo físico de 38 W**

En esta etapa también se investigaron y probaron varias soluciones de transmisión, entre las cuales una de ellas consistía en bandas y poleas (**Figura 5-14a**) y otra de engranes (**Figura 5-14b**).

Por el tamaño del modelo, la transmisión representaba una cantidad considerable de pérdidas, finalmente se optó por el sistema de engranes debido principalmente porque el sistema de bandas patinaba al incrementar el torque.

El torque de los rotores se acopló por medio de un tornillo sin fin a un eje y éste, a su vez, se acopló a un torquímetro digital (**Figura 5-14b**)

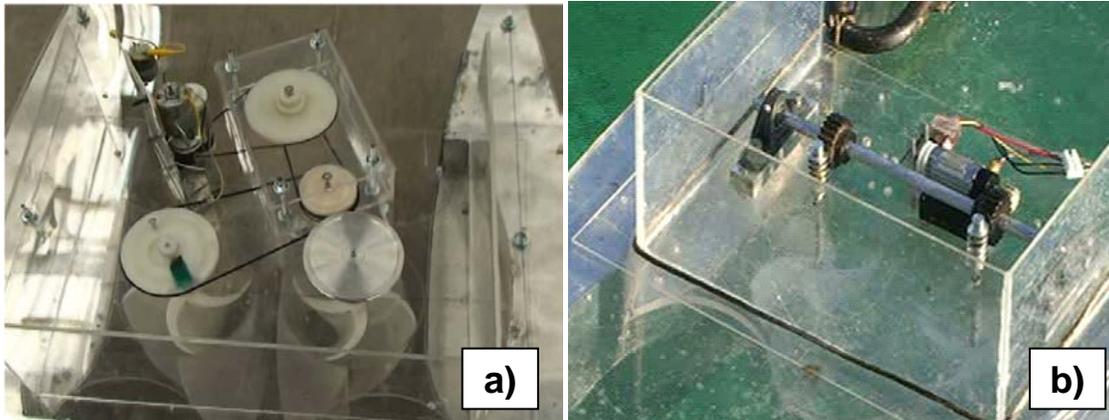


Figura 5-14 Hidrogenerador IMPULSA con bandas (a) y con engranes (b)

### 5.5.3 Etapa 3

El último modelo, escala 1:12 de 240 Watts, con 50 cm de altura, 120 cm de ancho y 200 cm de largo, tiene una caja de engranes como transmisión con relación 10:1 acoplada al torquímetro. El cuerpo principal está construido de fibra de vidrio y concentradores de aluminio (ver **Figura 5-16**). La **Tabla 5-4** muestra las dimensiones del modelo. Cabe mencionar que el dispositivo, fue construido en su totalidad por becarios del proyecto IMPULSA.

Tabla 5-4 Dimensiones del modelo de 240 W

| Elemento                        | Dimension | Unidad         |
|---------------------------------|-----------|----------------|
| Radio de los rotores            | 0.18      | m              |
| Altura transversal              | 0.50      | m              |
| Ancho transversal de entrada    | 1.20      | m              |
| Area en la entrada              | 0.60      | m <sup>2</sup> |
| Ancho transversal en la turbina | 0.18      | m <sup>2</sup> |
| Area en la turbina              | 0.09      | m <sup>2</sup> |



Figura 5-15 Proceso de construcción dispositivo de 240 W



Figura 5-16 Hidrogenerador IMPULSA de 240 W

## 5.6 Transmisión con engranes

Es un hecho que la transformación de energía es un proceso que involucra varias fases y en cada una de ellas, invariablemente hay pérdidas de energía ya sea por fricción y/o disipación de calor. En el caso del hidrogenerador IMPULSA la transmisión con engranes es, quizás, la parte del sistema donde existen las mayores pérdidas. Con el fin de cuantificar la magnitud de estas pérdidas, se realizaron pruebas experimentales con los diferentes arreglos de transmisión (**Figura 5-17**).



Figura 5-17 Cuantificación de pérdidas con engranes

El experimento consistió en obtener la potencia nominal de un motor eléctrico con el objeto de simular la potencia de los rotores. Para lo cual se utilizó una fuente eléctrica con un transformador de 1 amp a 15 volts, un torquímetro digital y un tacómetro digital. La potencia entonces se obtuvo aplicando torque y registrando los valores tanto de torque como de velocidad angular. La potencia obtenida fue de 10.9 W, los valores se muestran en la **Figura 5-18**

| test | Torque |       | Vel Ang medida |        | Vel tang | Pot   |
|------|--------|-------|----------------|--------|----------|-------|
|      | Oz-in  | N-m   | RPM            | rad    | m/s      | Watts |
| -    | 0.0    | 0.00  | 2652.0         | 277.72 | 0.00     | 0.0   |
| M01  | 1.6    | 0.01  | 2565.0         | 268.61 | 0.00     | 3.0   |
| M02  | 2.2    | 0.02  | 2462.0         | 257.82 | 0.00     | 4.0   |
| M03  | 2.7    | 0.02  | 2420.0         | 253.42 | 0.00     | 4.7   |
| M04  | 3.1    | 0.02  | 2370.0         | 248.19 | 0.00     | 5.4   |
| M05  | 3.7    | 0.03  | 2312.0         | 242.11 | 0.00     | 6.3   |
| M06  | 4.2    | 0.03  | 2230.0         | 233.53 | 0.00     | 6.9   |
| M07  | 4.7    | 0.03  | 2162.0         | 226.40 | 0.00     | 7.4   |
| M08  | 5.0    | 0.03  | 2112.0         | 221.17 | 0.00     | 7.7   |
| M09  | 6.2    | 0.04  | 1974.0         | 206.72 | 0.00     | 9.0   |
| M10  | 7.4    | 0.05  | 1834.0         | 192.06 | 0.00     | 10.1  |
| M11  | 9.5    | 0.07  | 1550.0         | 162.32 | 0.00     | 10.9  |
| M12  | 12.3   | 0.087 | 1155.0         | 120.95 | 0.00     | 10.5  |

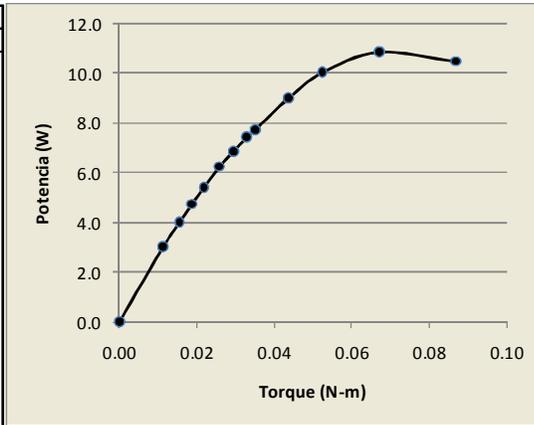


Figura 5-18 Potencia de un motor eléctrico

Posteriormente se colocó el motor en el eje de la turbina y la transmisión al torquímetro con dos engranes, uno de 20 dientes en el eje del motor y otro de 10 en el eje del torquímetro. La potencia máxima en este caso resultó de 8.6 W, lo que representa una pérdida de 21.1% (Figura 5-19)

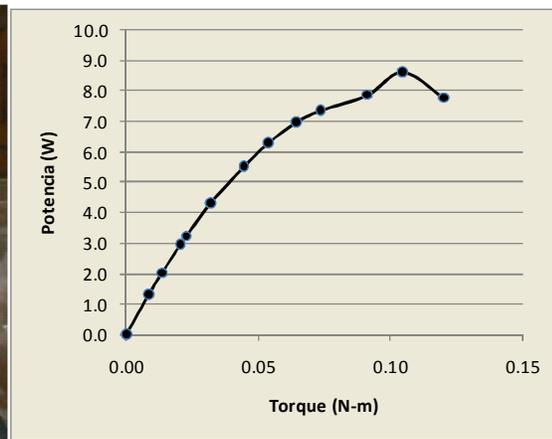
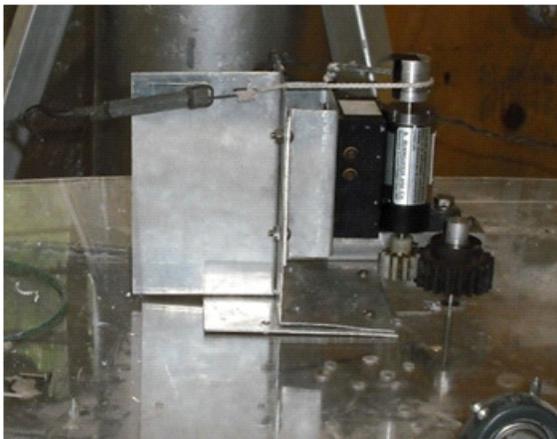


Figura 5-19 Transmisión con dos engranes

Finalmente se utilizaron dos tornillos tipo “sin fin”, un eje horizontal para unir la fuerza de los dos rotores y los engranes de 20 y 10 dientes (Figura 5-20). Se puede observar que la eficiencia del sistema disminuye considerablemente puesto que las pérdidas en este caso son de 80.7%, por lo cual en los resultados de los experimentos se tienen que considerar o, en su defecto, colocar el torquímetro directamente sobre el eje del rotor.

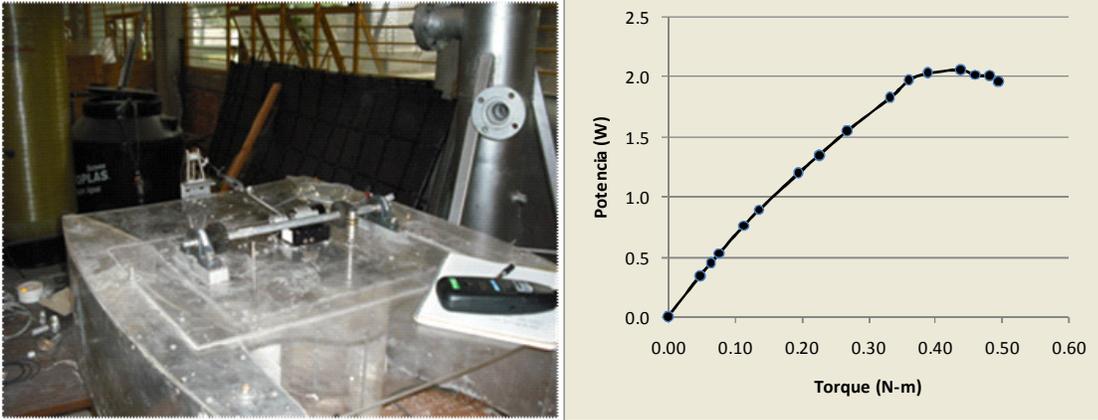


Figura 5-20 Configuración de transmisión con tornillo sin fin al eje y engranes

## 5.7 Pruebas con el hidrogenerador IMPULSA

Se llevaron a cabo dos etapas de experimentación, la primera se realizó en el canal de remolque del laboratorio Ohmsett- (The National Oil Spill Response Test Tank Facility), New Jersey USA (Figura 5-21). Estas instalaciones, que son mantenidas y operadas por el departamento del interior Minerals Management Service (MMS), consisten en un canal de 203 m de largo, 20 m de ancho y 3.4 m de profundidad. La velocidad máxima del puente de arrastre donde se colocó el dispositivo es de 3.34 m/s.

La segunda etapa experimental se llevó a cabo en un canal artificial de riego en las Estacas, en el estado de Morelos, México (Figura 5-22), cuyas dimensiones, en la zona donde se llevó a cabo la prueba, son 4 m de ancho y 1.5 m de profundidad. La velocidad de la corriente, no controlada en específico para los ensayos, fue de 1.04 m/s.



Figura 5-21 Canal de arrastre en las instalaciones de Ohmsett, New Jersey USA



Figura 5-22 Canal en las Estacas, Morelos

## 5.8 Primera etapa de experimentación

Las pruebas de la primera etapa consistieron en arrastrar el dispositivo a lo largo del canal a una velocidad y torque constante, terminado cada recorrido se incrementó el torque apretando un tornillo media vuelta cada vez. El torque se aplicó directamente en el eje del torquímetro de forma mecánica (fricción en el eje del torquímetro) y la velocidad angular se registró por medio de un dispositivo digital que reporta el número de vueltas y el tiempo transcurrido. Los datos fueron colectados en una computadora durante todo el tiempo de experimentación. Este proceso se repitió hasta alcanzar el torque máximo (rotor

totalmente detenido para la velocidad seleccionada). Las velocidades de las pruebas fueron de 1.29 m/s, 1.54 m/s y 1.9 m/s, que corresponden a 2.5, 3.0 y 3.7 nudos. En estos experimentos se colocó el arreglo de 2 engranes con una pérdida cuantificada, como se explicó antes, de aproximadamente 21%.

Como equipo adicional se colocó una celda de carga para medir la fuerza de arrastre y en la torre de control y se colectaron los datos de la velocidad de desplazamiento del puente. De esta manera, la potencia del dispositivo,  $P$  [W], se puede evaluar como el producto del torque,  $T$  [Nm], y la velocidad angular,  $\omega$  [1/s], de modo que la potencia queda expresada como

$$P = T \omega \quad (1)$$

La potencia del sistema es comparada, entonces, con la potencia teórica del fluido, la cual es proporcional a la densidad del fluido  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] por el área transversal de la turbina  $A$  [m<sup>2</sup>] y por la velocidad del fluido al cubo  $v$  [m/s], a fin de estimar la eficiencia del dispositivo

$$P_f = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

Por otra parte, la potencia del fluido puede ser calculada en función de la cantidad de agua que pasa por el dispositivo y ésta, a su vez, es inversamente proporcional a la fuerza de arrastre, lo cual se puede escribir como

$$P = Cd \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3)$$

Donde el coeficiente de arrastre  $Cd$  puede ser expresado de la siguiente manera

$$Cd = \left( 1 - \frac{v}{v_0} \right)^n \quad (4)$$

Donde  $n$  es un coeficiente que depende de la forma de los alabes, por lo tanto el coeficiente de arrastre tendrá una variación no lineal de acuerdo con la relación de velocidad del fluido antes de la turbina  $v_0$  y la velocidad promedio en los rotores, la cual puede ser estimada a partir de la velocidad tangencial en los rotores  $v$ .

Los coeficientes de arrastre, para elementos donde el flujo no penetra el objeto, dependen de la forma de la superficie, la velocidad del fluido y la rugosidad relativa y se obtienen, generalmente, de manera experimental. En la Tabla 5-5 se presentan algunos valores del coeficiente de arrastre para cuerpos sumergidos en un fluido. Un coeficiente aproximado para el Hidrogenerador IMPULSA, de acuerdo con dicha tabla y la forma del dispositivo, oscilará entre 2.0 y 2.3. Por otra parte, el número de Reynolds en los experimentos se encuentra entre los valores de  $1 \times 10^6$  y  $1.6 \times 10^6$ .

El coeficiente de arrastre se obtuvo experimentalmente, conocida la fuerza de arrastre, el área transversal y la velocidad promedio del fluido, se despeja de la ecuación 5. Los valores obtenidos se presentan en el panel izquierdo de la **Figura 5-23**, la diferencia entre estos resultados y los coeficientes de la **Tabla 5-2** se deben principalmente a que el

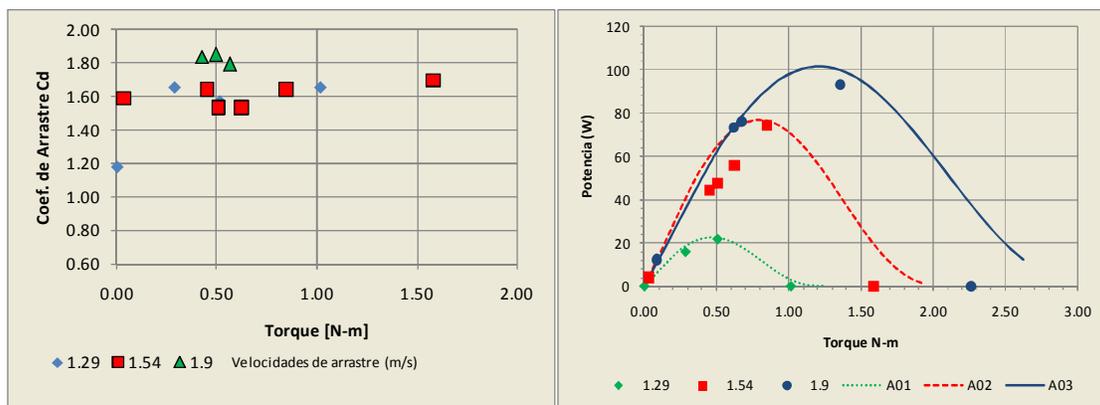
dispositivo es semi-impermeable y en consecuencia el valor del coeficiente de arrastre osciló entre 1.6 y 1.8.

$$F = Cd \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (5)$$

En el panel derecho de la **Figura 5-23** se muestran los datos obtenidos en los experimentos con velocidad del puente de 1.29, 1.54 y 1.9 m/s. Las curvas de ajuste de torque contra potencia, se obtuvieron con las ecuaciones 3, 4 y 5 con valores de  $n = 1.6$  y  $n = 0.5$ .

**Tabla 5-5 Valores aproximados de CD para cuerpos sumergidos (Streeter et al. 2000)**

| Forma del Cuerpo | Relación      | $C_D$ | Reynolds |         |
|------------------|---------------|-------|----------|---------|
| Circular         | $\rightarrow$ | 1.20  | 1.0E+04  | 1.5E+05 |
| Elíptico         | $\rightarrow$ | 2:1   | 0.60     | 4.0E+04 |
|                  |               | 4:1   | 0.46     | 1.0E+05 |
|                  |               | 8:1   | 0.32     | 2.5E+04 |
|                  |               |       | 0.29     | 2.5E+04 |
| Cuadrado         | $\rightarrow$ | 2.00  | 3.5E+04  |         |
|                  | $\rightarrow$ | 1.60  | 1.0E+04  | 1.0E+05 |
| Triangular       | $\rightarrow$ | 2.00  | 1.0E+04  |         |
| Semitubular      | $\rightarrow$ | 2.30  | 4.0E+04  |         |
|                  | $\rightarrow$ | 1.12  | 4.0E+04  |         |



**Figura 5-23 Resultados canal de arrastre Ohmsett (Hidrogenerador 1:12)**

## 5.9 Segunda etapa de experimentación

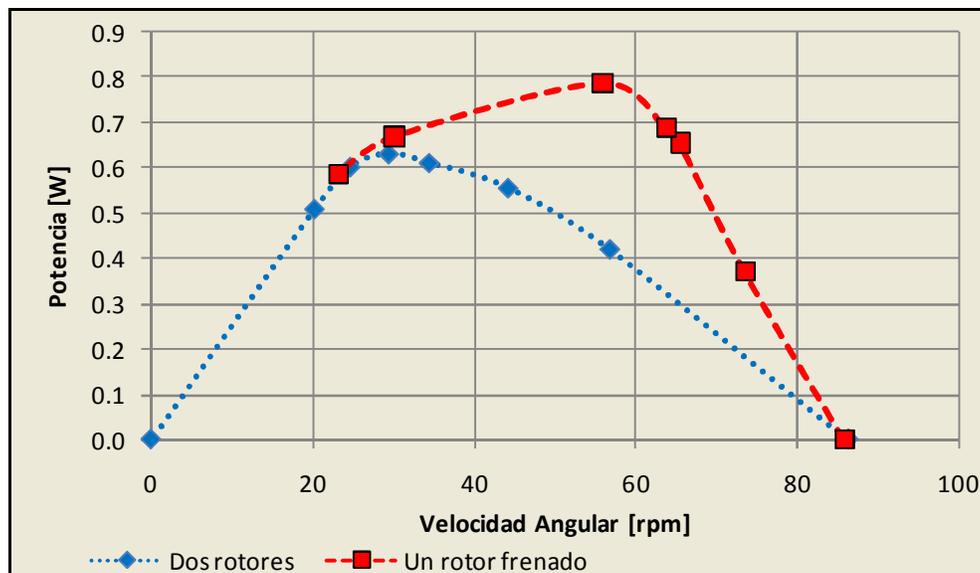
Adicionalmente a los experimentos efectuados en el canal de arrastre Ohmsett, se realizaron varios experimentos en un canal localizado en las Estacas, Morelos. Los experimentos consistieron en determinar la velocidad angular máxima de los rotores sin

torque y posteriormente incrementar el torque hasta detener completamente el rotor (torque máximo). También se hicieron pruebas para verificar la conveniencia del conducto interior, para lo cual se obstruyó la entrada del flujo y posteriormente se permitió el flujo. Adicionalmente, se trabajó con uno de los rotores girando libremente y a continuación, el mismo rotor completamente detenido. La velocidad de la corriente en los ensayos fue de 1.04 m/s (**Figura 5-25**).

En la **Figura 5-24** se muestran dos experimentos iniciales, los cuales consisten en: Primer experimento, uno de los rotores completamente detenido (torque máximo), y sin flujo por el conducto interior. Segundo experimento con los dos rotores trabajando y sin flujo por el conducto interior. La comparación de estos dos experimentos (**Figura 5-24**), muestra un mejor desempeño del dispositivo con un solo rotor puesto que se obliga a que mayor flujo pase por este rotor y aumenta la potencia de 0.6 W a 0.8 W,

En la **Figura 5-25** se presentan tres experimentos adicionales en los cuales en todos ellos, se permitió el flujo por el conducto interior. El primer experimento de esta serie consistió en evaluar el dispositivo trabajando normalmente, aumentando el torque paulatinamente a ambos rotores. El segundo experimento tuvo la variante de un rotor completamente detenido (torque máximo) y otro trabajando normalmente y finalmente el tercer experimento con uno de los rotores completamente libre. En este caso, el mejor desempeño se obtuvo con los dos rotores trabajando a la par.

Los experimentos con el conducto interior tapado y destapado muestran la conveniencia del mismo ya que la potencia de salida se incrementa de 0.6 o 0.8 W a 2.0 W, que representa un aumento de aproximadamente 250%



**Figura 5-24** Potencia hidrogenerador 32 W sin flujo en el conducto interior

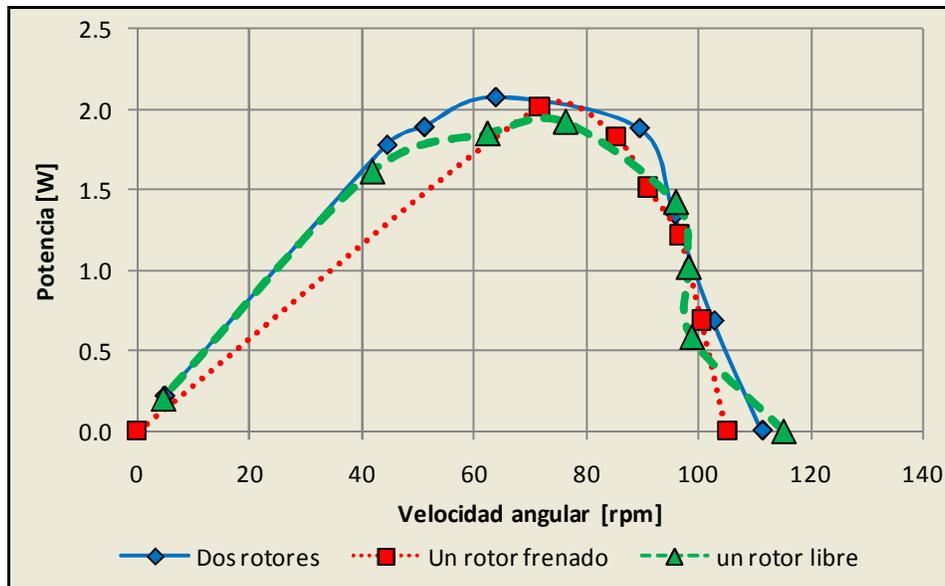


Figura 5-25 Potencia hidrogenerador 32 W con flujo en el conducto interior

## CONCLUSIONES

A pesar de la incertidumbre que aún se tiene, el Hidrogenerador IMPULSA posee un grupo de características, ya probadas y evaluadas experimentalmente, que la convierten en una opción viable para la generación de energía eléctrica.

- Los rotores helicoidales permiten captar energía aún con bajas velocidades del fluido y mejoran el desempeño general de la turbina, los resultados son consistentes con otros experimentos (Kamoji et al. 2009; Saha and Jaya 2006; Saha et al. 2005).
- El conducto interior incrementa substancialmente la eficiencia del sistema
- Los concentradores mejoran el paso del flujo a través de la turbina a la vez que le dan estabilidad al sistema
- El hecho de que el sistema sea flotante permite colocar equipo comercial en la plataforma y disminuir los costos de mantenimiento y operación
- Uno de los resultados que no se presentan en el trabajo pero se observaron en los experimentos, es lo concerniente a la estabilidad del sistema. En este aspecto cabe resaltar que el dispositivo es muy sensible a la fuerza de arrastre y como resultado se presenta un momento que desestabiliza al dispositivo, ocasionando que este se hunda peligrosamente por lo que un elemento adicional y fundamental para el sistema tendrá que consistir en un sistema de sustentación que pueden ser un par de alas de avión, y las dimensiones y ángulo de ataque serán futuras líneas de estudio.

Respecto del conducto interior, es claro que aumenta considerablemente la eficiencia ya que, por un lado, aumenta el flujo que pasa a través de la turbina y, por otro, disminuye el torque negativo y la presión negativa en los rotores. Se pudo demostrar que, con un rotor completamente libre, se presenta mayor flujo en el segundo rotor, lo que disminuye la eficiencia del sistema. Por otro lado, con un rotor completamente detenido, aumenta la potencia sobre el segundo rotor pero aumentan las pérdidas de energía. Por lo tanto, para

que el sistema funcione adecuadamente, es conveniente que los dos rotores trabajen de manera sincronizada.

Un punto importante es que el coeficiente de arrastre sin torque es muy elevado y no cambia considerablemente a medida que se incrementa el torque, lo que significa que el sistema es muy impermeable y de ahí su bajo desempeño. En la búsqueda de elevar la eficiencia el sistema se pueden tomar acciones como aumentar la separación entre los rotores y permitir mayor paso de agua a través de la turbina.

El Hidrogenerador IMPULSA, en el estado de avance que se encuentra actualmente, es un dispositivo capaz de generar energía. Su adaptación y colocación dependerá de las condiciones de cada sitio en específico y la eficiencia esperada es muy sensible al régimen de corrientes locales (magnitud y dirección). Sin embargo, el dispositivo es aún objeto de estudios y mejoras, entre las que se cuentan la búsqueda de una geometría capaz de captar mayor flujo y que presente menor resistencia al paso del flujo (disminución del coeficiente de arrastre), los cuales se están llevando a cabo como parte de las futuras líneas de investigación.

## 6 Conclusiones y futuras líneas de investigación

Se sabe que las fuentes fósiles de energía tienen un periodo finito. Por lo tanto, la diversificación de las fuentes de energía es fundamental para el desarrollo social y económico de una nación, dado que (i) disminuye, o al menos frena, la demanda de energías fósiles generadoras de gases de efecto invernadero y (ii) favorece la disponibilidad energética al no depender de una sola fuente de energía.

Por otro lado, no existen mejores o peores alternativas para transformar la energía ya que tanto la eficiencia como la adaptación e implementación de sistemas y dispositivos dependen de muchos factores y condiciones. Es así que una tecnología que es adecuada para un sitio puede no serlo en otro o incluso, ante un cambio de condiciones (ambientales, sociales o económicas), una misma alternativa puede dejar de ser útil en una localidad determinada. De ahí que las tecnologías para el aprovechamiento de las fuentes de energía y muy particularmente las fuentes de energía renovable pueden ser las mejores y más rentables si se presentan las condiciones apropiadas. De esta manera es necesario encontrar el nicho de aplicación de cada una de las tecnologías de energía renovable.

### 6.1 Conclusiones particulares

#### 6.1.1 Corrientes

- a. Por lo que respecta al aprovechamiento de la energía oceánica, existen diversos fenómenos dinámicos que pueden convertirse en fuentes de energía y su aprovechamiento estará, por un lado, condicionado a la disponibilidad del recurso y, por otro, a la tecnología disponible. En este sentido, esta tesis se enfocó en el estudio del aprovechamiento de las corrientes oceánicas. Por lo anterior, en el capítulo 2 se presentaron dos de las principales corrientes oceánicas presentes en el territorio nacional. Específicamente, la Corriente del Golfo y en particular la corriente del Canal de Cozumel, la cual representa una futura fuente de energía para las comunidades costeras en la Isla de Cozumel. Esta corriente tiene la particularidad de que es cuasi-permanente con una velocidad promedio de 1.5 m/s de Sur a Norte, con un potencial de 14.78 GWh/año por metro cuadrado
- b. Otro sitio interesante por la magnitud de sus corrientes que se investigó fue el Canal de Infiernillo. Esta corriente que se deriva del gradiente hidráulico de mareas tiene las siguientes características: velocidad promedio 0.80 m/s, velocidad máxima 1.4 m/s. Una particularidad que es importante destacar es que la marea tiene componentes no astronómicos que incrementan la cantidad de energía en aproximadamente 10% los cuales sería importante conocer y caracterizar correctamente para cuantificar el incremento de energía que al parecer puede variar estacionalmente.

- c. En el caso de la corriente en el canal de infiernillo se obtuvieron curvas de generación, con las cuales es posible conocer rápidamente la cantidad de energía aprovechable en función de la potencia instalada y su factor de planta.
- d. Finalmente, se puede decir que las corrientes en el canal de Infiernillo son moderadas, tomando en cuenta que la velocidad promedio es de 0.80 m/s. Por otro lado, los dispositivos que se revisaron en el capítulo 2, están diseñados para velocidades mayores a 2 m/s y los emplazamientos considerados para la colocación de estos dispositivos alcanzan velocidades de hasta 4 m/s (ej. El canal que se forma entre la isla de Vancouver y el continente en Canadá) por lo cual este sitio no presenta un alto potencial de energía, más bien moderado comparado con otros emplazamientos, pero no por esto despreciable (1.57 GWh/año por metro cuadrado).

### **6.1.2 Dispositivos de conversión**

En el capítulo 2 se presentó el estado del arte de los dispositivos para el aprovechamiento de la energía del océano, cada uno con su propio nivel de desarrollo y se pudo observar que estos dispositivos en sus inicios empiezan con modelos a escala con apenas unos watts de potencia para realizar pruebas de laboratorio preliminares. Posteriormente existe otra fase con modelos a mayor escala, del orden de 100 a 1000 watts, para pruebas completas y formales de laboratorio. Enseguida, en las pruebas de campo los rangos de potencia de los modelos son de 50 a 500 kW y, finalmente, los prototipos en fase de demostración son del orden de 500 a 1500 KW, diseñados en general para velocidades mayores a 2 m/s. Los dispositivos más abundantes y con mayor grado de desarrollo son las turbinas de eje horizontal.

### **6.1.3 Hidrogenerador IMPULSA**

El hidrogenerador IMPULSA consta de varios elementos, los cuales se enuncian a continuación con las observaciones de cada uno y al final las conclusiones del sistema en general.

#### **6.1.3.1 Sobre la transmisión**

Una de las conclusiones que arrojan las pruebas experimentales de los diferentes sistemas de transmisión es que para el tamaño de los modelos fabricados, las pérdidas por fricción son muy importantes; del orden de la energía suministrada. Esto se debe principalmente a que se utilizaron elementos convencionales y se observó que estas pérdidas disminuían conforme la escala del modelo aumentaba. De cualquier manera, se requiere el diseño de un sistema de transmisión eficiente para disminuir las pérdidas de energía.

#### **6.1.3.2 Sobre el conducto interior**

Tanto los resultados de la simulación numérica como las pruebas experimentales demostraron la conveniencia del conducto interior, no solo porque direcciona el flujo sobre los álabes en la dirección del giro, si no porque incrementa el flujo total sobre el sistema,

umentando la potencia. Además, disminuye de manera considerable la presión negativa que se genera en los álabes justo en la salida del conducto interior. En efecto, la disminución de esta presión negativa aumenta la velocidad angular de los rotores y por consiguiente su desempeño.

### **6.1.3.3 Sobre los concentradores**

Los concentradores tienen la finalidad de captar más energía y direccionarla sobre un lado del rotor. La forma de los concentradores inició con un semi-círculo, y después de algunas pruebas en un canal de pendiente variable se observó que el flujo incidía incorrectamente sobre los álabes, particularmente los rectos y en algunas ocasiones se detenía el movimiento. A diferencia de los rotores rectos, los rotores helicoidales funcionaron adecuadamente aunque con cierto grado de dificultad, por lo cual se decidió realizar nuevas simulaciones numéricas con otras geometrías de concentradores, llegando finalmente a los concentradores con forma de Venturi para precisamente tratar de obtener ese efecto en el flujo al pasar a través del dispositivo. Después de las pruebas realizadas se observa un buen desempeño de los concentradores, los cuales además de captar más energía y direccionar el flujo, le dan estabilidad al sistema.

### **6.1.3.4 Sobre los rotores**

- a. En el capítulo 3 se presentaron los resultados de las simulaciones numéricas y un modelo matemático de los rotores para la obtención del torque máximo. Con estos dos rotores se llevó a cabo experimentación en un túnel de viento y se obtuvo el desempeño de los dos tipos de rotores con gráficas que muestran que la eficiencia de las turbinas es directamente proporcional a la velocidad del fluido en el rango de velocidad experimentado.
- b. Por otro lado, se pudo observar que el rotor helicoidal supera, por mucho, el desempeño del rotor recto tanto en eficiencia como en torque además de que opera desde bajas velocidades del fluido, condición necesaria para el aprovechamiento más eficiente de las corrientes oceánicas.

## **6.1.4 Conclusiones generales**

- 1 Es un hecho que el desarrollo de un dispositivo de conversión de esta naturaleza en un proceso largo y complicado que involucra varias disciplinas. Este trabajo no pretende ser definitivo sino pionero en el tema y por lo mismo abre más preguntas de las respuestas que ofrece. A pesar de que se presentan en este trabajo avances en cuanto a metodología, procesos de manufactura y técnicas de laboratorio, es necesaria más investigación y experimentación para complementar el desarrollo del dispositivo. En este trabajo se cumplió con una fase del desarrollo y se tienen como conclusiones las siguientes:
- 2 Se identificaron dos zonas susceptibles para el aprovechamiento de las corrientes marinas no solo por su potencial energético sino también por la necesidad de energía en sus alrededores lo que ofrece un nicho de oportunidad importante (Canal de

Cozumel y Canal de Infiernillo). Además de los perfiles de velocidad analizados se desprende que las mayores velocidades se encuentran en la superficie, por ejemplo en el canal de Cozumel las mayores velocidades se encuentran dentro de los primeros 50 metros de profundidad y el canal de Infiernillo es relativamente somero, por lo cual el sistema de conversión flotante es una buena opción.

- 3 Del estado del arte de los diferentes dispositivos de conversión se desprende que todavía existen muchas preguntas por responder y aun no existe un dispositivo que pueda cumplir ampliamente con los requerimientos del clima marítimo. Por otra parte, no se encontró algún otro dispositivo o institución privada o gubernamental en México que este enfocada a este tipo de desarrollos lo cual es un incentivo para continuar con la investigación y desarrollo de este tipo de dispositivos y no quedarse rezagados en el tema.
- 4 Se construyeron dos prototipos de rotor tipo Savonius, uno recto y otro Helicoidal y se comprobó que el rotor helicoidal presenta mejor desempeño para bajas velocidades del fluido.
- 5 Se observó que un generador acoplado directamente sobre el eje del rotor disminuye las pérdidas de energía.
- 6 El hidrogenerador IMPULSA es capaz de transformar la energía cinética de un flujo de agua, por el momento con una eficiencia del 10%
- 7 Se encontró que una de la causas de la baja eficiencia del dispositivo se debe a la perdida de flujo a través del dispositivo, por lo cual es necesario investigar más con respecto a la geometría del mismo.
- 8 Finalmente, se puede decir que la integración de los concentradores con el cuerpo (carcasa y conducto interior) y los rotores helicoidales dan como resultado un dispositivo novedoso y funcional.

## 6.2 Futuras líneas de investigación

En el desarrollo de la investigación y de los resultados de laboratorio, se observaron algunas deficiencias del sistema las cuales se vislumbran como posibles líneas de investigación.

Se observo que la transmisión mecánica entre rotor y generador es una parte fundamental del sistema donde existen muchas pérdidas, una opción será construir un generador de bajas revoluciones acoplado directamente a los rotores. El inconveniente es que se aumenta el costo del dispositivo, por lo tanto será necesario evaluar en un futuro la conveniencia de generadores con torque directo o un sistema de engranes tanto en costo como en eficiencia.

Un aspecto fundamental del sistema es lo que se refiere al mantenimientos por lo tanto una futura línea de investigación puede estar enfocada al estudio sobre la corrosión y mantenimiento del sistema, en este sentido, es necesario investigar sobre posibles materiales con el objeto de disminuir la corrosión y de esta manera los costos de operación y mantenimiento

Como se menciono anteriormente, una de las causas de la baja eficiencia del sistema es la perdida de flujo a través del dispositivo. Para aumentarlo, es posible modificar las dimensiones del conducto interior, aumentar la separación de los concentradores y/o agregar un par de rotores por fuera de los concentradores para aprovechar el flujo que existe a los costados del dispositivo.

En cuanto a la flotabilidad del sistema, se prevé, es necesario un sistema de sustentación hidrodinámico de manera que a mayor velocidad de fluido se tenga mayor sustentación y esta se puede lograr con un alerón a ambos lados del dispositivo.

Hasta el momento se cuenta con dos dispositivos a diferente escala y se planea investigar los posibles efectos de escala realizando experimentos equivalentes a ambos dispositivos.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Alexander, A. J., and Holownia, B. P. (1978). "Wind Tunnel Test on a Savonius Rotor." *Journal of Industrial Aerodynamics*, 3, 147-153.
- Altonmonte, H. (2004). "Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe." CEPAL/Mexico.
- Andre, H. (1978). "Ten years of experience at the la Rance tidal power plant." *Spec Issue, Pap from the Oceanol Int '78 Conf, March 5, 1978 - March 10, 1978*, 4(2-4), 165-178.
- Bahaj, A. S., Battena, W. M. J., and Mccannb, G. (2007). "Experimental verifications of numerical predictions for the hydrodynamic performance of horizontal axis marine current turbine." *Renewable Energy*, 32(15), 2479-2490.
- Bahaj, A. S., and Myers, L. E. (2003). "Fundamentals applicable to the utilization of marine current turbines for energy production." *Renewable energy*, 28, 2205-2211.
- Balme, R., Le Saux, K., Ben Elghali, S. E., Benbouzid, M. E. H., Charpentier, J. F., Hauville, F., and Drouen, L. "A simulation model for the evaluation of the electrical power potential harnessed by a marine current turbine in the Raz de Sein." *OCEANS 2007 - Europe*.
- Ballenilla, F. (2004). "El final del petroleo barato." *El ecologista*, Alicante España.
- Bascaran, A. (1994). "A numerical model to evaluate the performance of pressure equalized rainscreen walls." *J. Bug Environ*, 29, 159-171.
- Bernshtein, L. B., Wilson, E. M., and Song, W. O. (1997). "Tidal power plants." Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Korea.
- Blunden, L. S., and Bahaj, A. S. "Tidal energy resource assessment for tidal stream generators."
- Briden, I. G., S., N., P., F., and C.R., B. (1998). " Matching Tidal Current Plant to Local flow conditions, ." *Energy, Elsevier Science Ltd*, 23(9), 699-709.
- Brunch, V. L. (1994). "An assessment of research and development leadership in ocean energy technologies." Albuquerque, NM 87185.
- Bryden, I. G., and Couch, S. J. (2007). "How much energy can be extracted from moving water with a free surface: A question of importance in the field of tidal current energy?" *Renewable Energy*, 32(11), 1961-1966.
- Bryden, I. G., Grinstead, T., and Melville, G. T. (2004). "Assessing the potential of a simple tidal channel to deliver useful energy." *Applied Ocean Research*, 26(5), 198-204.
- Cadenas, E., and Riviera, W. (2008). "Análisis Estadístico de Mediciones de Velocidad del Viento Utilizando la Técnica de Valores Desviados", ., Centro de Investigaciones en Energía, UNAM, Morelos, México.
- Cetina, P., Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., and Badan, A. (2005). "Circulation along the Mexican Caribbean coast." *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 111, 1-19.
- Cham, T. (1989). "The PHEONICS-I.66 user guide,." *CHAM Development Team, Wimbledon, London*.
- Charlier, R. H. (2003). "A " Sleeper " awakes: tidal current power." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(6), 515-529.
- Charlier, R. H., and Justus, J. R. (1993). *Ocean Energies, environmental, economic and technological aspects of alternative power sources*, Elsevier.
- Chávez, G., Candela, J., and Ochoa, J. (2003). "Subinertial flows and transports in Cozumel Channel." *Journal of Geophysical Research*, 108, 1-19.

- Deda, B., and Atilgan, M. (2008). "An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius win rotor." *Energy Conversion and Management*, 49, 3425-3432.
- Deda, B., M., A., and Ozdamar, A. (2008). "An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining." *Experimental Thermal and fluid Science*, 32, 1673-1678.
- Deffeyes, K. S., and Silverman, M. P. (2004). "Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage." *American Journal of Physics*, 72(1), 126-.
- Dincer, I. (2000). "Renewable energy and sustainable development: a crucial review." *Renewable and sustainable energy reviews*, 4, 157-171.
- Duran, A., Dincer, I., and Rosen, M. A. (2006). "Thermodynamic analysis of wind energy." *International Journal of Energy Research*, 30(8), 553-566.
- El-Geziry, T. M., and Couch, S. J. (2009). "Environmental impact assessment for tidal energy schemes: An exemplar case study of the Strait of Messina." *Proceedings of the Institute of Marine Engineering, Science and Technology Part A: Journal of Marine Engineering and Technology*(13), 39-48.
- EUR, E. C. (1996). "The exploitation of tidal and marine currents." Commission of the European Communities.
- Fernando, M. S. U. K., and Modi, V. J. (1989). "A Numerical Analysis of the Unsteady Flow Past a Savonius Wind Turbine." *Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamics*, 32, 25-35.
- Fujisawa, N., and Gotoh, F. (1994). "Experimental Study on the Aerodynamic Performance of a Savonius Rotor." *ASME of Journal of Solar Energy Engineering*, 116, 456-468.
- Garret, C., and Cummins, P. (2004). "Generating power from tidal currents, Journal of waterway." *Journal of Waterway, port, coastal and ocean engineering, ASCE*, 114-118.
- Gill, A. E. (1982). *Atmosphere-Ocean Dynamics*.
- Gorban, A. N., M.Gorlov, A., and Silantyev, V. M. (2001). "Limits of the Turbine Efficiency for free fluid flow." *Journal of energy Resources Technology*, 123, 311-317.
- Gordon, L. A. (1967). "Circulation of the Caribbean Sea,." *Geophys. Res.*, 72(24), 6207-6223.
- Grinspand, A. S., Suresh Kumar, P., Saha, U. K., Mahanta, P., Ratnarao, D. V., and Veda Bhanu, G. "Design, Development and Testing of Savonius Wind Turbine Rotor with Twisted Blades,." *Proc. Of 28th Nat. Conference on Fluid Mechanic and Fluid Power*, Chandigarh, 13-15.
- Hartono, W. (2002). "A floating tied platform for generating energy from ocean current." *Renewable Energy*, 25, 15-20.
- IEA. (2007). "Energy technologies at the cutting edge." International Energy Agency, Paris, France.
- In, S., Han, Y., and K., S. (2009). "Optimization of cycloidal water turbine and the performance improvement by individual blade control." *Applied Energy*, 86, 1532-1540.
- Isaacs, J. D., and Seymour, R. J. (2001). "The Ocean as a power resource." *International Journal of Environmental Studies*, 4(3), 13-25.
- Johnson, G. L. (2001). *Wind energy systems*, Manhattan, KS.
- Kamoji, M. A., Kedare, S. B., and Prabhu, S. V. (2009). "Performance tests on helical Savonius rotors." *Renewable Energy*, 34, 521-529.
- Khan, J., Bhuyan, G. S., and Moshref, A. (2009a). "Potential opportunities and differences associated with integration of ocean wave and marine current energy plants in comparison to wind energy." Powertech Labs Inc.

- Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., and Quaicoe, J. E. (2009b). "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review." *Applied Energy*, 86(10), 1823-1835.
- Lavín, M. F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M. L., and Carrillo, L. (1997). "Lagrangian Observations of the Circulation in the Northern Gulf of California,." *Journal of physical oceanography*, 27, 2298-2305.
- Menet, J.-L. (2004). "A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study." *Renewable energy*, 11, 1843-1862.
- Mitchell, C., and Connor, P. (2004). "Renewable energy policy in the UK 1990-2003." *Energy Policy for a Sustainable Energy Future*, 32(17), 1935-1947.
- Noss, R. F. (2001). "Beyond Kyoto: Forest Management in a Time of Rapid Climate Change." *Conservation Biology*, 15(3), 578-590.
- Ochoa, J., Candela, J., Badan, A., and Sheinbaum, J. (2005). "Ageostrophic fluctuations in Cozumel Channel." *Geophys. Res.*, 110, 1029-1038.
- Ogawa, T., Yoshida, H., and Yocota, Y. (1989). "Development of Rotational speed Control Systems for a Savonius-Type wind Turbine." *ASME Journal of Fluids Engineering*, 111, 418-435.
- Palacios, E., Carrillo, L., Lavín, M. F., Zamudio, L., and García, A. (2005). "Hydrography and circulation in the Northern Gulf of California during winter of 1994-1995,." *Continental Shelf Research*, 26, 82-103.
- Rauh, A., and Seelert, W. (1984). "The Betz optimum efficiency for windmills." *Applied Energy*, 17(1), 15-23.
- Roden, G. L. (1964). "Oceanographic aspects of the Gulf of California, Marine Geology of the Gulf of California:." *A symposium. Amer. Assoc. Petroleum Geologists.*, 3, 30-58.
- Sadrul Islam, A. K. M., Islam, M. Q., Mandal, A. C., and Razzaque, M. M. (1993). "Aerodynamic characteristics of a Stationary Savonius Rotor,." *RERIC International Energy Journal*, 15, 48-56.
- Saha, U. K., and Jaya, M. (2006). "On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades." *Renewable Energy*, 31, 1776-1788.
- Saha, U. K., Mahanta, P., Grinspan, A. S., Suresh, K. P., and Goswami, P. (2005). "Twisted bamboo bladed rotor for Savonius wind turbines SAVONIUS WIND TURBINES." *Journal of the Solar Energy Society of India (SESI)*, 4, 1-10.
- Saha, U. K., Thotla, S., and Maity, D. (2008). "Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1359-1375.
- Saylers, A. T. "Blade Configuration Optimization and Performance Characteristics of a Simple Savonius Rotor,." *Proceeding of Institution of Mechanical Engineers*.
- Schmitz, W. J. J., and McCartney, M. S. (1993). "On the North Atlantic circulation,." *Geophys. Res.*, 31(1), 29-50.
- Sheldahl, R. E., Blackwell, B. F., and Feltz, L. V. (1978). "Wind Tunnel Performance Data for two and three Bucket Savonius Rotor." *ASME Journal Energy*, 2, 36-48.
- Spalding, D. B. (1981). "A general purpose computer program for multidimensional one and two-phase flow." *Math Comput. Simulation*, 267-276.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., and Bedford, K. W. (2000). *Mecanica de Fluidos*, Mc Graw Hill.
- Ushiyama, I., Nagai, H., and Mino, M. "The Optimum Design configurations of Savonius Wind Turbine,." *Proceeding of 17th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*.

Wilson, R., and Lissaman, P. (1974). "Applied Aerodynamics of wind power machines, Oregon State University." *Research Applied to National Needs*.