



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÁREA DE ENERGÍA**

***HIDRODINÁMICA Y OPTIMIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO
ENERGÉTICO TIPO TAPCHAN***
**(Y SU APLICACIÓN PARA CAPTAR, TRANSFORMAR Y ALMACENAR LA
ENERGÍA DE LAS OLAS EN FORMA DE HIDRÓGENO)**

**TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA**

**PRESENTA
RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO**

**TUTOR: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN
Instituto de Ingeniería, UNAM**

MÉXICO, D.F.

Febrero 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fernández Zayas José Luis

Secretario: Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo

Vocal: Dr. Silva Casarín Rodolfo

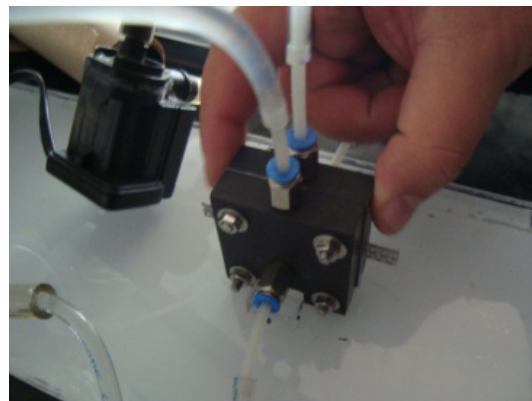
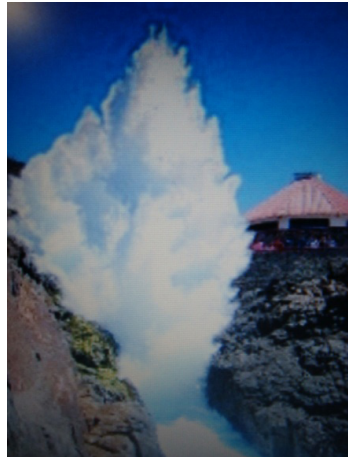
1er. Suplente: Dra. González Huerta Rosa de Guadalupe

2do. Suplente: Dr. Alatorre Mendieta Miguel Ángel

Lugar donde se realizó la tesis: **Instituto de Ingeniería de la UNAM**

TUTOR DE TESIS:

Dr. Silva Casarín Rodolfo



La Bufadora en Ensenada, Baja California, *TAPCHAN* en Noruega, *Blowjet* en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y Celda de Electrólisis de Membrana Polimérica en el IPN.

HIDRODINÁMICA Y OPTIMIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO ENERGÉTICO TIPO *TAPCHAN*
(y su aplicación para captar, transformar y almacenar la energía
de las olas en forma de hidrógeno)

Rafael Sánchez Dirzo



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE INGENIERÍA

TUTOR: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

RESUMEN

Conceptualizar, diseñar, construir, operar, administrar e innovar sistemas de energías renovables que disminuyan el consumo del petróleo, gas natural, carbón y leña como combustibles es un reto con respuestas positivas pero insuficientes. No existen soluciones universales al desafío energético sino diversas alternativas que han sido desarrolladas de manera independiente a lo largo de los años. De las diferentes fuentes de energía renovable esta tesis aborda la menos explorada en *México*: la energía del oleaje. Pese a sus inmensos recursos marinos nuestro país aún no aprovecha sus litorales para estos fines.

Esta tesis propone, a escala de laboratorio, un nuevo proceso para almacenar químicamente la energía de las olas en forma de hidrógeno. La conversión de la energía del oleaje se logra al concentrar la energía de la onda a través de un dispositivo en estrechamiento y una rampa en forma de copa, a través de las cuales las oscilaciones son forzadas a concentrarse, transformándose por consiguiente a la energía cinética de un chorro de agua. La forma del dispositivo desarrollado está inspirada en el fenómeno conocido como "*La Bufadora*" y una *Central* de energía noruega llamada *TAPCHAN*; tal dispositivo es semejante en su forma al instrumento musical, *la tuba*, y es denominado *Blowjet*. El *Blowjet* logró convertir la energía de pequeñas olas de entre 8 y 20 cm de altura, en intermitentes chorros que, al ser dirigidos a un turbogenerador tipo *Pelton* de construcción casera, generó corrientes directas entre 2 y 200 miliamperios y, entre 1.7 y 1.8 voltios. Esta electricidad de baja calidad y reducidos costos bastó para romper la molécula del agua dentro de electrolizadores de membrana de intercambio protónico, obteniendo, bajo las mejores condiciones experimentales logradas, 82 cm³ por hora de hidrógeno y con ello abrir la alternativa tecnológica de obtener el hidrógeno de manera masiva a partir de una fuente renovable de energía, como lo es el oleaje.

ABSTRACT

To conceptualize, design, build, operate and manage renewable energy systems that may decrease the consumption of oil, natural gas, coal and wood as fuel is a challenge with positive but insufficient answers today. There are no universal solutions to this energy challenge but alternatives that have been developed independently over the years. Of the various renewable energy sources this thesis addresses one of the least explored in *Mexico*: wave energy. Despite its vast marine resources our country has still not explored its coastlines, coasts and islands for this end.

This thesis proposes, at laboratory scale, a new process to chemically store wave energy in hydrogen form. The conversion of the wave energy is achieved by concentrating potential energy through a narrowing ramp and cup, through which the oscillations are forced, transforming it into kinetic energy (water jet). The shape of the device is inspired by the marine phenomenon known as "*La Bufadora*" and a Norwegian device called *TAPCHAN*. It thus resembles a musical instrument, the tuba, and it is called *Blowjet*. The *Blowjet* managed to direct the energy of small waves, between 8 and 20 cm, in intermittent jets, to a *Pelton* turbine generator, producing direct current between 2 and 200 mA and 1.7 to 1.8 V. This low quality, low cost electricity was sufficient to break the water molecule within the proton exchange membrane electrolyzers, obtaining, under the best experimental conditions, 82 cm³/h of hydrogen. In this way, the *Blowjet* has opened up a technological possibility of obtaining hydrogen on a massive scale from a renewable energy source.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un proceso tecnológico con la capacidad de transformar la energía del oleaje en la energía cinética de un chorro de agua con la meta de generar energía eléctrica de baja calidad, pero suficiente potencia, para romper la molécula del agua.

Los objetivos particulares son:

1. Diseñar y construir un dispositivo tipo *TAPCHAN* que permita transformar la energía potencial del oleaje en la energía cinética de un chorro de agua.
2. Diseñar y construir un sencillo turbogenerador tipo *Pelton* adaptado al dispositivo anterior para la generación de una corriente continua de baja calidad.
3. Diseñar y construir un electrolizador de membrana de intercambio protónico para la producción de hidrógeno.
4. Determinar la viabilidad técnica del proceso propuesto para su escalamiento.

HIPÓTESIS

La complejidad energética del oleaje en las inmediaciones de la costa, puede ser captada y transformada en la energía cinética de un chorro de agua mediante un dispositivo tipo *TAPCHAN*. La energía hidrodinámica concentrada de esta manera, puede ser transformada en corriente eléctrica directa, intermitente y de baja calidad, pero con suficiente potencia para romper la molécula del agua.

ORGANIZACIÓN E INTRODUCCIÓN A LOS CAPÍTULOS

El capítulo 1 inicia con la presentación de una perspectiva del dilema energético centrada en el concepto de recursos físicos y económicos finitos delineados por las teorías de la ola solitaria de *Hubbert*, la predicción de *Olduvai* y los límites del crecimiento de *Meadow*, estableciendo a su vez, la importancia de las cadenas de transformación energética requeridos para el consumo final de la energía. Se enfatiza la trascendencia de la eficiencia energética de los procesos y su permanente innovación, comparándose

históricas cadenas de transformación energética con la cadena de conversión del proceso propuesto en esta tesis.

El segundo capítulo resume el estado del arte de la explotación energética de los océanos: introduce al desarrollo de la ingeniería que actualmente está en curso para transformar las energías de los mares en electricidad y trabajo mecánico. Enfatiza la naturaleza creativa y de innovación permanente del actual periodo de desarrollo de esta rama de las renovables.

El tercer capítulo describe el concepto, diseño, construcción y operación del *Blowjet*, dispositivo elemental, inspirado en el dispositivo noruego *TAPCHAN* y en el fenómeno costero conocido como *La Bufadora*, cuyo objetivo es captar y transformar la energía potencial del oleaje en energía cinética del chorro de agua: se le analiza desde la óptica termodinámica de un volumen de control y se establecen sus variables termo-hidrodinámicas básicas.

El cuarto capítulo describe el fenómeno químico-físico de la ruptura de la molécula del agua y se fundamenta el hecho de que la potencia energética para realizar la electrólisis puede ser obtenida de la potencia hidrodinámica del *Blowjet*, objetivo que se logra dirigiendo el chorro del mismo hacia un sencillo turbogenerador tipo *Pelton*. Se establecen criterios para la selección de un electrolizador de membrana protónica que pueda ser acoplado al chorro del *Blowjet*.

Finalmente, se concluye la viabilidad del nuevo proceso a escala de laboratorio y su potencial escalamiento a planta piloto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ola Solitaria de Hubbert.....	11
Figura 2. Curva de Sostenibilidad	12
Figura 3. Cadena de Conversión: Energía Eléctrica a Energía Luminosa.....	13
Figura 4. Cadena de Conversión: Energía Química a Energía Cinética.....	14
Figura 5. Cadena de Conversión: Energía del Oleaje a Energía de Hidrógeno	14
Figura 6. México: País de Mares, Costas e Islas	17
Figura 7. LIMPET, Oscilador de Columna de Onda, Escocia.....	20
Figura 8. Mutriku, España	21
Figura 9. Oceanlinx, Australia.....	21
Figura 10. Wavester, Dinamarca	22
Figura 11. Pelamis, UK.....	22
Figura 12. CETO, Australia.....	23
Figura 13. Olson, Noruega	23
Figura 14. Corrientes Oceánicas.....	25
Figura 15. Turbina Alstom.....	25
Figura 16. Central Osmomotriz	27
Figura 17. <i>TAPCHAN</i>	30
Figura 18. <i>La Bufadora</i> , Ensenada, Baja California, México.....	31
Figura 19. Perfil de Mínima Resistencia al Flujo	33
Figura 20. Perfil Parabólico del <i>Blowjet</i>	34
Figura 21. Construcción del <i>Blowjet</i>	35
Figura 22. Primer <i>Blowjet</i> de Acrílico.....	35
Figura 23. <i>Blowjet</i>	36
Figura 24. Primeros Ensayos con el <i>Blowjet</i>	36
Figura 25. Soportería del <i>Blowjet</i>	37
Figura 26. <i>Blowjet</i> en Acción	37
Figura 27. Esquema Experimental del <i>Blowjet</i>	38
Figura 28. Perfil de Velocidades en el Tiempo	40
Figura 29. Velocidades Promedio y Factores de Amplificación.....	40
Figura 30. Jet Energéticamente Significativo (sintónico).....	42
Figura 31. Velocidad Máxima Adimensional.....	43
Figura 32. Velocidad Media Adimensional.....	44

Figura 33. Electrolizador de Vapor de Agua	49
Figura 34. Electrolizador Alcalino de 2 MW.....	50
Figura 35. Principio de Funcionamiento del Electrolizador PEM.....	52
Figura 36. Desempeño del Electrolizador PEM a 25 °C	55
Figura 37. Proceso <i>Blowjet</i> -Electrólisis	55
Figura 38. Turbogenerador Construido Exprofeso	57
Figura 39. <i>Blowjet</i> -Turbogenerador.....	57
Figura 40. Pruebas a la Celda Electrolítica PEM	59
Figura 41. Estructura del Electrolizador PEM.....	59
Figura 42. Respuesta del Electrolizador a la Corriente del <i>Blowjet</i>	61
Figura 43. Curva de Desempeño del Electrolizador PEM.....	62
Figura 44. Eficiencia de Cada Componente del Proceso.....	62
Figura A. <i>Blowjet</i> Formando Parte de un Bloque Unitario	69
Figura A.1. Olas Snell Rompiendo Sobre la Línea de Costas.....	75
Figura A.2. Ondas Trocoidales de Gerstner, 1802	76
Figura A.3. Ondas Monocromáticas Bidimensionales de Pequeña Amplitud de Airy, 1845	77
Figura A.4. Contraste Entre los Modelos de Ondas	78
Figura A.5. Modelado Moderno del Fenómeno Ondulatorio	78
Figura A.6. Onda Armónica, Bidimensional y Monocromática.....	79
Figura A.7. <i>La Bufadora</i> , 1967 (Ensenada, 2011).....	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Recursos Oceanomotrices.....	19
Tabla 2 a, b,c,d y e. Velocidades de Chorros “Sintónicos” en cm/s	41
Tabla 3. Factores de Amplificación de Potencia del <i>Blowjet</i>	64

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
OBJETIVO GENERAL.....	3
HIPÓTESIS.....	3
ORGANIZACIÓN E INTRODUCCIÓN A LOS CAPÍTULOS.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	5
CONTENIDO.....	7
AGRADECIMIENTOS.....	9
1. EL DILEMA ENERGÉTICO: LA OTRA VISIÓN.....	10
1.1 LA OLA SOLITARIA DE HUBBERT.....	11
1.2 LAS CADENAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA.....	13
1.3 CADENA DE CONVERSIÓN DEL PROCESO PROPUESTO EN ESTA TESIS.....	14
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 1.....	15
2. EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS OCÉANOS Y EL ESTADO DEL ARTE DE SU EXPLOTACIÓN.....	16
2.1 UNA VISIÓN CRÍTICA PARA MÉXICO.....	17
2.2 RECURSOS POTENCIALES DE ENERGÍA DE LOS OCÉANOS Y LAS TECNOLOGÍAS DE SU EXPLOTACIÓN.....	19
2.1.1 Energía del oleaje.....	20
2.1.2 Energía de las corrientes de mareas astronómica.....	24
2.1.3 Energía de gradientes térmicos.....	25
2.1.4 Energía de gradientes salinos.....	26
2.1.5 Contribuciones mexicanas.....	27
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2.....	28

3. DEL TAPCHAN Y LA BUFADORA AL BLOWJET (DE LA ONDA AL CHORRO)....	29
3.1 <i>TAPCHAN</i>	30
3.2 <i>LA BUFADORA</i>	31
3.3 <i>BLOWJET</i>	33
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3.....	46
4. DEL JET AL HIDRÓGENO.....	48
4.1 LAS CENTRALES DE ELECTRÓLISIS.....	49
4.2 TERMODINÁMICA DEL ROMPIMIENTO DE LA MOLÉCULA DEL AGUA.....	51
4.3 PROCESO BLOWJET-ELECTRÓLISIS.....	55
4.4 EFICIENCIA DEL PROCESO.....	62
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4.....	65
CONCLUSIONES GENERALES, APORTACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	67
ANEXOS.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	94

AGRADECIMIENTOS

A México, la nación más bella del mundo.

A la UNAM e IPN las conciencias de tal nación.

Al grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, sin su apoyo este proyecto no existiría.

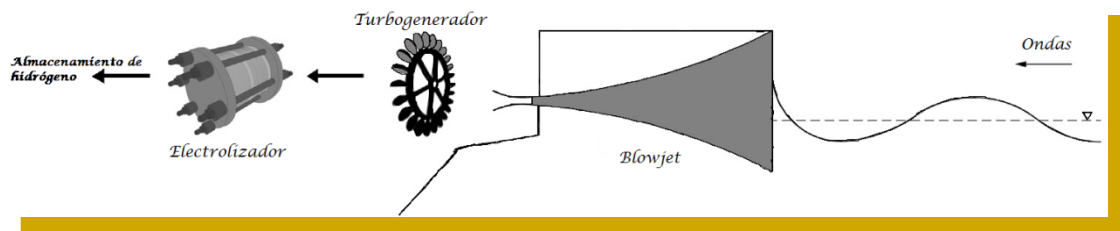
Al grupo de Electroquímica de la ESIQIE del IPN, con su apoyo este proyecto pudo aterrizar en su primera fase.

A mi Comité Académico que me permitió seguir aprendiendo y lo hice con alegría y mucho trabajo.

A mis alumnos, que sepan que su profesor se esfuerza por seguir superándose.

A mi Familia. La puse hasta abajo porque es la que sostiene todo lo de arriba.

1. EL DILEMA ENERGÉTICO: La otra visión



Las cadenas de transformación energética son claves para entender el actual dilema energético y son parte de sus soluciones. Esta tesis propone una cadena de conversión de una fuente de energía renovable poco estudiada en el país que transforma la energía de la ola en energía química del hidrógeno (Sánchez Dirzo, et al., 2014). Las energías del océano ni siquiera están contempladas en la Estrategia Nacional de Energía 2013-2027: quizá estos estudios puedan integrarlas a corto plazo (<https://www.youtube.com/watch?v=Uue7NHQU7ts&feature=youtu.be>).

1.1 LA OLA SOLITARIA DE HUBBERT

Todo proceso físico, químico y biológico requiere energía para llevarse a cabo. No toda la energía es transformada en trabajo útil, un alto porcentaje de la misma se disipa al ambiente en forma de calor y es así como se establece el requerimiento de valorar la eficiencia de los procesos. El acceso a la energía económica, abundante y de calidad proveniente del petróleo como vector energético, hace físicamente posible la transformación masiva de materias primas como minerales, plantas y animales en una gran cantidad de bienes como casas, alimentos y vestidos, por sólo citar los básicos. De hecho, tomando como base el consumo energético es posible describir la más sencilla historia de la humanidad: representando en el eje de las x el transcurso del tiempo, desde hace miles de años antes de la *Revolución Industrial*, que se considera el punto cero, hasta después de dicho evento y, el consumo de energía en el eje de las y. La gráfica obtenida semeja el paso de una ola solitaria en el devenir denominada en esta tesis "*Ola Solitaria de Hubbert*" (Figura 1), aunque también se le conoce como "*Cenit del Petróleo*" o "*Pico del Hubbert*", en honor de quien la propuso (Hubbert, 1949)(Hubbert, 1956).

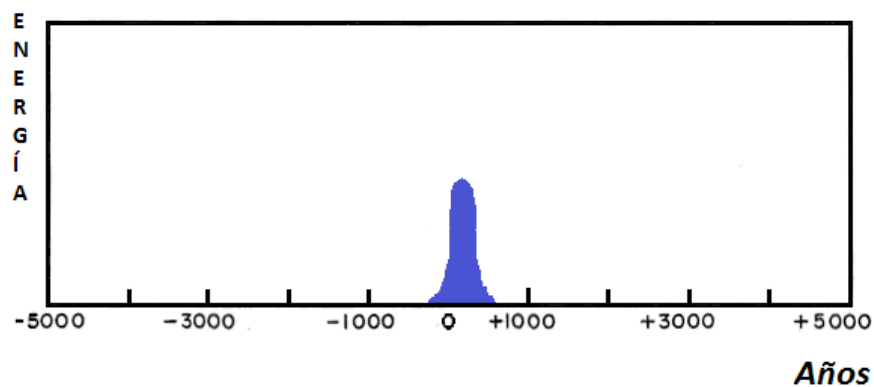


Figura 1. Ola Solitaria de Hubbert.

Es fácil comprender que la explotación inicial de todo recurso no renovable crece a medida que se extrae con recursos tecno-económicos de la época, luego, tal explotación disminuye hasta alcanzar un máximo, lo que significa que la mitad del recurso ha sido extraído, más tarde, el declive aparece hasta que el bien, simplemente se agota. La obra de *King Hubbert* sostiene una visión del desarrollo humano que no es posible seguir ignorando (Campbell

& Laherrère J, 1998) (Meadows & Randers, 2006) (Campbell C, 2013) (Heinberg, 2014) (Cenit-del-Petróleo, s.f.). La predicción de mayor incertidumbre de la teoría de *Hubbert* es el declive de su curva. La predicción extrema la ha realizado *Richard Duncan* al afirmar que nuestra civilización es fundamentalmente una civilización eléctrica y que la debacle de la misma iniciará precisamente en los tendidos eléctricos de alto voltaje a corto plazo (Duncan, 2001) (Duncan, 2005-06).

Es razonable la tesis que una estrategia encaminada a la captación, transformación y almacenamiento masivo de las energías renovables, en particular el sol, vientos y mares, en forma de hidrógeno, sería parte de la solución al cenit de *Hubbert* y el no regreso a *Olduvai* planteado por *Duncan*. Entonces la “ola solitaria de *Hubbert*” adquiriría una forma sigmoideal “S” de sostenibilidad mostrada en la Figura 2, donde el consumo energético mundial está en EJ (10^{18} Joule) por año.

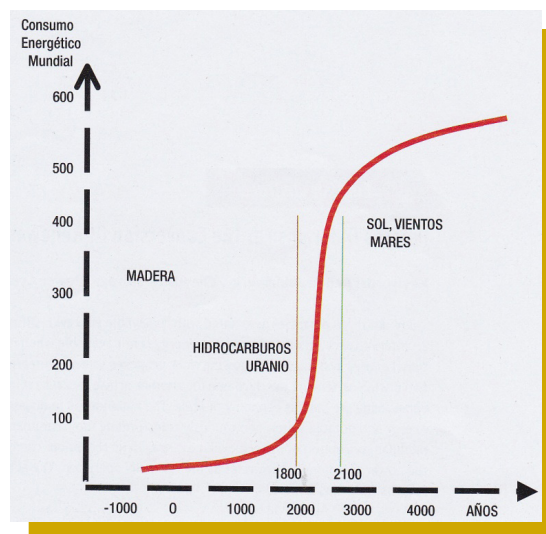


Figura 2. Curva de Sostenibilidad.

La curva de sostenibilidad energética implica evitar el cenit de *Hubbert* y sobre todo la caída de *Duncan* buscando la curva del crecimiento sostenible basado en el rediseño de las ciudades, el cuidado del ambiente, el fin de la economía del uso desmedido de mercancías superfluas, el incremento de la eficiencia de los procesos productivos, el final de la cultura del auto y el uso de la electricidad proveniente de la hibridación de las renovables y su almacenamiento masivo en forma de hidrógeno como vector energético. Todas estas

propuestas son razonables, técnicamente posibles y económicamente factibles para lo que resta del siglo XXI. Esta tesis se concentra en la energía del oleaje como parte de las renovables que requieren ser desarrolladas en el transcurso de este siglo.

1.2 LAS CADENAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA

Son ya célebres las imágenes nocturnas del planeta desde el espacio (NASA, 2015). Un 60-70% de la electricidad generada globalmente se utiliza para iluminar. Hay que recordar que el foco de *Edison* alumbró el mundo hasta fechas recientes, cuando las lámparas fluorescentes y, en los últimos años, los *LED's* lo sustituyeron. El resto de la electricidad mueve motores acoplados a gran diversidad de máquinas como bombas, compresores y ventiladores, por citar los más conocidos. En forma resumida, la electricidad se utiliza para iluminar las noches y mover la mayoría de las máquinas en las empresas y el hogar. Un dato poco difundido es que las pérdidas de energía desde “el pozo al foco” son superiores al 90%. Las cadenas de conversión de la energía generalmente no salen de la literatura especializada (Brandwein, et al., 1968) (Culp, 1991) (IEA, s.f.). Una cadena de conversión energética elemental desde la generación de electricidad hasta la iluminación, se muestra en la Figura 3.

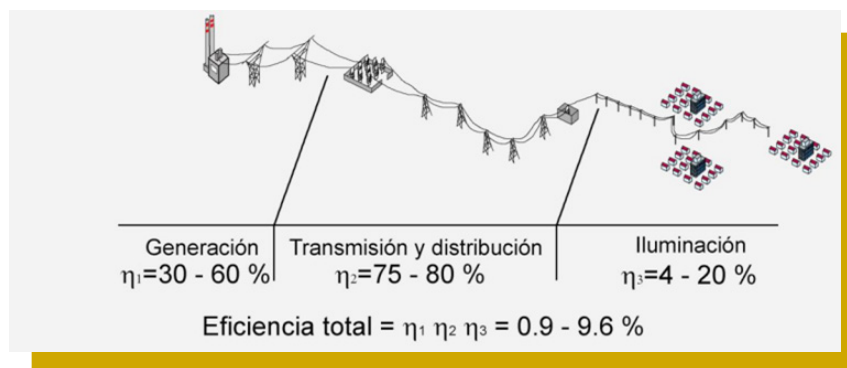


Figura 3. Cadena de Conversión: Energía Eléctrica a Energía Luminosa.

Otro ejemplo importante lo es la cadena de conversión “del petróleo a la llanta”, la cual es descrita en la Figura 4.

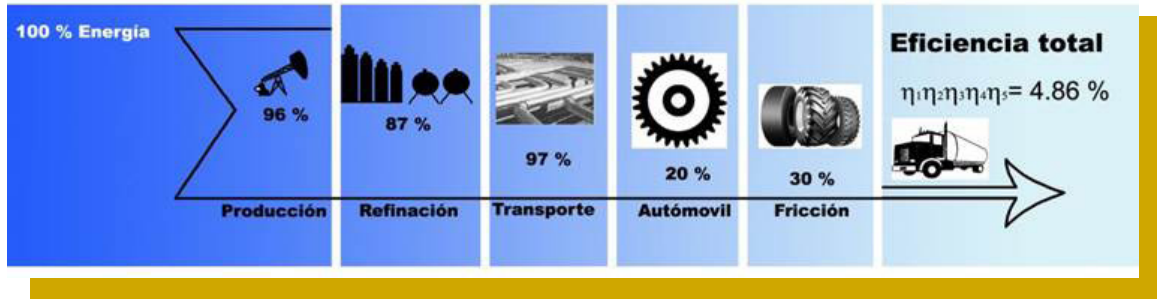


Figura 4. Cadena de Conversión: Energía Química a Energía Cinética.

Los eslabones de la cadena son transformaciones elementales de energía regidos por leyes termo-económicas y ambientales toda vez que cada eslabón conlleva un costo tanto en dinero como en impacto al ambiente en forma de desperdicios y gases invernadero. Al usar la energía calorífica de 100 barriles de petróleo sólo cinco se transformará en la energía cinética requerida para moverse dentro de un auto. Si se toma como base los millones de autos que circulan en el mundo y se multiplican por lo que la cadena de conversión indica se puede tener una estimación de la cantidad de toneladas de gases invernadero y partículas que son emitidas a la atmósfera (junto a sus consecuencias), lo cual ha generado una explosión de documentos de tipo ambiental (IPCC, 2014) (WWF, 2012-14) (Steffen, 2015).

1.3 CADENA DE CONVERSIÓN DEL PROCESO PROPUESTO EN ESTA TESIS

La cadena de transformación energética, de las olas al hidrógeno, y sobre la cual se desarrollan todos los cálculos de ingeniería de esta tesis es descrito en la Figura 5.

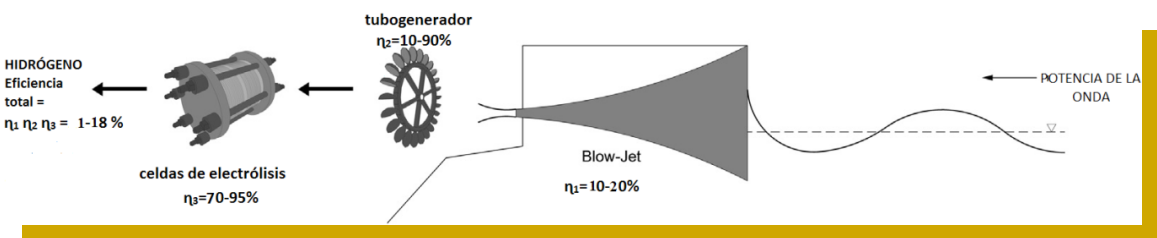


Figura 5. Cadena de Conversión: Energía del Oleaje a Energía de Hidrógeno.

Es importante resaltar las pocas etapas de la transformación fisicoquímica para alcanzar la meta deseada. Los intervalos de eficiencia se establecieron mediante estimaciones y

cálculos asentados en la propia investigación bibliográfica y en los resultados propios de esta tesis. Es evidente que las eficiencias del nuevo proceso pueden modificarse bajo condiciones reales del océano, pero los resultados obtenidos a escala de laboratorio permiten establecer un intervalo de valores confiable y las cadenas de transformación serían competitivas toda vez que la energía de las olas está disponible de manera permanente a costos accesibles.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 1

Una crítica sustancial a las energías renovables es el hecho de su imposibilidad de sustituir a los hidrocarburos, tanto en calidad como en cantidad, en su función de combustibles para sostener una civilización consumista (Trainer, 2007). Una posible solución a dicho dilema es replantear, bajo la condición de su hibridación en zonas marinas, el problema del rediseño de las urbes y ciudades donde se concentran los más grandes y graves problemas, en particular, la movilidad de personas y mercancías y, el acceso a la electricidad y al agua potable. De manera paralela, elevar la eficiencia de todos los procesos industriales, incluidos las cadenas de conversión energética, donde el reciclamiento fuera la norma y no la excepción, permitiría el ahorro sustancial de la energía y, con ello, la disminución de sus fuentes tanto fósiles como renovables. Es en este escenario es donde se sitúa el nuevo proceso de obtención de hidrógeno propuesto en esta tesis: es un proceso que puede ser la base de una central de energía y/o de un conglomerado de empresas químicas y/o, formar parte de tecnologías que la hibriden con el resto de las renovables.

Debe observarse que determinar la viabilidad de un nuevo proceso no sólo contempla el cálculo de sus eficiencias: hay que recordar que las primeras centrales de potencia instaladas a finales del siglo XIX no rebasaban el 5% de eficiencia. Durante casi todo el siglo XX tales eficiencias promediaban el 30% y no fue sino hasta finales de tal siglo que las eficiencias alcanzaron el 60% con la implantación de los ciclos combinados. Semejante trayecto lo han seguido las eficiencias de los autos, los turbogeneradores, las turbinas y en general todos los procesos y dispositivos industriales actualmente implantados. Esto es pertinente considerarlo antes de juzgar las aparentemente bajas eficiencias obtenidas en el proceso presentado en esta tesis. Un argumento adicional a favor del proceso es que el criterio para valorar el *Blowjet*, además de su sencillez y bajos costos, no sería su eficiencia energética sino su *Factor Amplificador de Potencia* (FAP) por las razones que serán expuestas a lo largo de esta tesis.

2. EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS OCÉANOS Y EL ESTADO DEL ARTE DE SU EXPLOTACIÓN



Un dispositivo tipo *TAPCHAN* inspirado en *La Bufadora* y denominado *Blowjet* fue probado en el generador de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La energía de las olas representa una de las seis formas en que los océanos pueden contribuir a disminuir la función de energéticos de los hidrocarburos.

2.1 UNA VISIÓN CRÍTICA PARA MÉXICO

Espetaba el poeta *Pellicer* al visitante de *Tabasco*: “bienvenidos a mi agua”. En uno de sus más logrados poemas aseveraba: “Agua de *Tabasco* vengo y agua de *Tabasco* voy. De agua hermosa es mi abolengo. Y es por eso que aquí estoy, dichoso con lo que tengo” (*Pellicer*, 2007). Es evidente a la luz de la geomorfología del país mostrada en el mapa de la Figura 6 que el sentido del poema en nada cambiaría si en vez de *Tabasco* se utiliza la palabra *México*. En su ensayo más logrado, *Padilla* analiza el por qué los mares son ajenos a los mexicanos desde que los aztecas le dieron la espalda para buscar águilas comiendo serpientes en un hermoso lago situado a dos mil metros de altura y a cientos de kilómetros de la costa más cercana (*Padilla*, 2011). Desde entonces, los océanos se han excluido salvo como destinos turísticos y objetos de extracción desmedida de petróleo y gas, los cuales así como salen, crudos, se exportan; muy poco se refina para extraer productos de mayor valor agregado.



Figura 6. México: País de Mares, Costas e Islas.

En diferentes bases de información sobre *México* se encuentran datos valiosos de sus recursos energéticos, incluidos los solares y eólicos, como por ejemplo el de la insolación (*UNAM*, 2007) (*Geografía-UNAM*, 2007). Diversas fuentes similares a éstas sustentan el

hecho de que *México* es uno de los países más asoleados del mundo pero, los océanos y sus islas no aparecen en tales estudios. Salvo la temperatura superficial, ninguna otra variable meteorológica marina que permita evaluar sus enormes recursos océano-motrices, existe. Esta falta de información debe ser llenada a corto plazo donde el primer paso ya ha sido dado (Pérez Peña, 2013). Un buen ejemplo de lo que sería conveniente para *México* puede ser consultado en (England, 2008) (RU, 2008), donde se presenta de manera muy detallada los recursos océano-motrices de una isla bastante bien conocida. La mayor parte de la información consultada para este capítulo proviene de fuentes europeas y estadounidenses. Una síntesis muy completa sobre la energía de los océanos es de la *Ocean Energy Systems (OES)* de la *Agencia Internacional de Energía (OES, 2014)*, pero no es la única. La *OES* plantea seis recursos de energía que se puede extraer del océano:

- oleaje, derivado de la transferencia de energía cinética por parte del viento hacia la superficie marina;
- rango de mareas, derivado de las fuerzas gravitatorias del sistema sol-luna-tierra;
- corrientes de mareas, flujos de agua resultante del flujo y reflujo de ciertas zonas costeras debido al ascenso y descenso de las mareas;
- corrientes oceánicas, derivadas de las corrientes termosalinas de los océanos;
- conversión de la energía térmica de los mares (*Ocean Thermal Energy Ocean, OTEC*), derivada de las diferencias de temperatura de la superficie del mar y del fondo (del orden de 1000 m) y, finalmente,
- gradientes de salinidad, derivada de la diferencia de concentraciones entre el agua del mar y el agua en la boca de los ríos que llegan al mismo.

Las metas de la *OES* para el año 2050 es la instalación de 337 GW de capacidad energética extraída de las ondas y mareas, generando 1.2 millones de empleos directos y evitando un billón de toneladas de CO₂ a la atmósfera. Su planeación no sólo abarca el desarrollo de la tecnología como tal sino que, también, se extiende a los posibles impactos que tales tecnologías pueden causar, generándose información básica al respecto, como puede corroborarse en la base datos denominada *Tethys*, que contiene información relevante sobre el impacto ambiental de los dispositivos oceanomotrices (UE, 2014).

El país dispone de un alto número de zonas capaces de proveer los recursos solares, eólicos, geotérmicos, océano-motrices y de biomasa que, híbridos, pueden iniciar la disminución de la quema de los hidrocarburos, concibiendo a su vez *Centrales de Energía*

2. El potencial energético de los océanos y el estado del arte de su explotación

de nuevo tipo (Schwartz, 2005) (AMIP, 2009) (England, 2010) (UK, 2011) (OES, 2012) (UE, 2013) (Bigg, et al., 2003) (Li, 2000) (López González, et al., 2010). Lo que se describe a continuación resume la información sobre el potencial de los océanos del mundo y sintetiza el estado del arte de la ingeniería océano-motriz, en permanente innovación.

2.2 RECURSOS POTENCIALES DE ENERGÍA DE LOS OCÉANOS Y LAS TECNOLOGÍAS DE SU EXPLOTACIÓN

Un resumen de los recursos energéticos de los mares, y las tecnologías de su explotación se describen en la tabla 1 (IEA-OES, 2002-14):

Tabla 1. Recursos Oceanomotrices.

FUENTE	Nivel de Desarrollo	Capacidad Instalada	Potencial Teórico Mundial
Barrera de Mareas	Escala Comercial pero de gran impacto ecológico	Francia 240 MW, Corea 254 MW, Canadá 20 MW, China 11 MW	1 200 TWh/año
Corrientes de Mareas	Pocos proyectos piloto, demostraciones a escala real y uno comercial	La mayoría en UK con 4.8 MW	470 TWh/año
Energía de Ondas	Pocos proyectos piloto y demostraciones a escala comercial	La mayoría en UK con 2 MW y el resto en Portugal, España, Dinamarca, Australia, Suecia, Japón, EU y Nueva Zelanda	25 500 TWh/año
Gradiente Térmico	Prototipos experimentales	Hawaii EU y Francia	44 000 TWh/año
Gradiente Salino	Prototipos experimentales	Noruega	1 650 TWh/año

En el año 2012 el mundo generó 22 668 TWh de electricidad, de los cuales el 40.4% se obtuvo quemando carbón, el 22.5% quemando gas natural, el 16.2% de las hidroeléctricas, el 10.9% de las nucleoeeléctricas y el 5% del petróleo (OES, 2014) (Quirin Schiermeier, et al., 2008). Si se comparan con el potencial marino total que asciende a 72 820 TWh, descrito en la tabla 1, resulta que el pronóstico de que los océanos pueden contribuir con el 20% de la electricidad proveniente de las renovables al final del siglo, es razonable y *México* debe participar.

2.1.1 ENERGÍA DEL OLAJE

Los dispositivos para aprovechar la energía del oleaje se clasifican de maneras diferentes. La forma más útil es clasificarlos según la zona para la que están diseñados. Se distinguen tres ubicaciones diferentes, cada una de ellas con ventajas y desventajas:

1. Sobre tierra (On-shore): la estructura del dispositivo está fija en tierra y se puede acceder sin necesidad de una embarcación. La ubicación puede ser el área natural del litoral o una estructura artificial, como un rompeolas. La profundidad del agua suele ser menor a 15 m.
2. Próximo a la costa (Near-shore): la profundidad del agua suele ser de 15 a 25 m.
3. Mar adentro (Off-shore): La profundidad es grande para instalar dispositivo sujetos al fondo por lo que se emplean unidades amarradas y/o flotantes, el agua tiene una profundidad mayor a 25 m pero menor a los 75 m.

El dispositivo más frecuente para las zonas en tierra es el de *Columna de Agua Oscilante* (OWC, por sus siglas en inglés). La OWC es una solución muy conveniente para instalaciones en tierra ya que el cuerpo principal del dispositivo es un cajón volteado, siendo el dispositivo más destacado el de la empresa *Voith Hydro Wavegen* (VOITH, 2014). Su planta *LIMPET* (Boake, et al., 2002), que se muestra en la Figura 7, se construyó en el año 2000 en *Islay*, costa oeste de *Escocia*, y es un ejemplo de tecnología OWC en tierra construido en litoral natural.

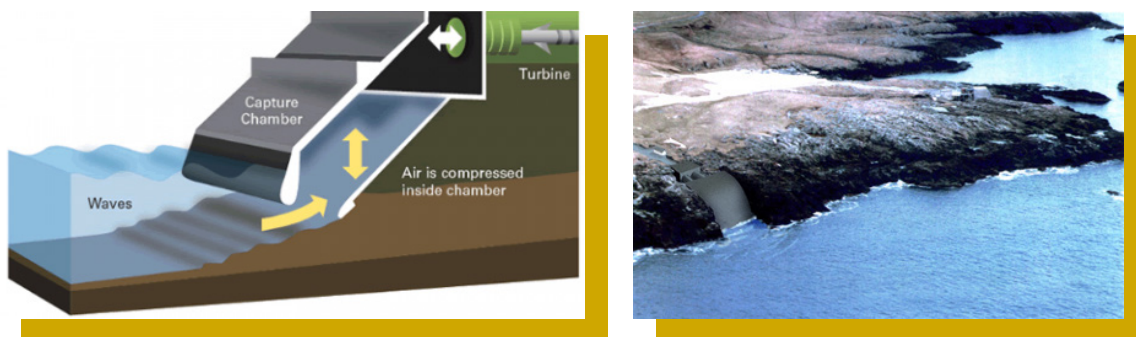


Figura 7. LIMPET, Oscilador de Columna de Onda, Escocia.

Diseños de este tipo permiten colocar las unidades de forma contigua, de manera que no hace falta espacio entre ellas para permitir su operación. La misma compañía también ha incursionado en un proyecto que emplea estructuras artificiales como los diques, Figura 8.

2. El potencial energético de los océanos y el estado del arte de su explotación

En el brazo exterior de un rompeolas de *Mutriku*, en la costa vasca próxima a *Bilbao*, se colocaron 16 pequeños cajones *OWC* de unos 16 kW cada uno. Las unidades se basan en los mismos principios físicos que *LIMPET* y juntas suministran unos 256 kW de electricidad a la red local. Esta planta forma parte de un proyecto de demostración del *Programa Marco 6 de la Unión Europea* coordinado por el *Ente Vasco de la Energía (EVE)* y *Robotiker Technalia*, una de las empresas locales. Es el primer caso experimental significativo sobre un convertidor de energía de las olas en *España*.

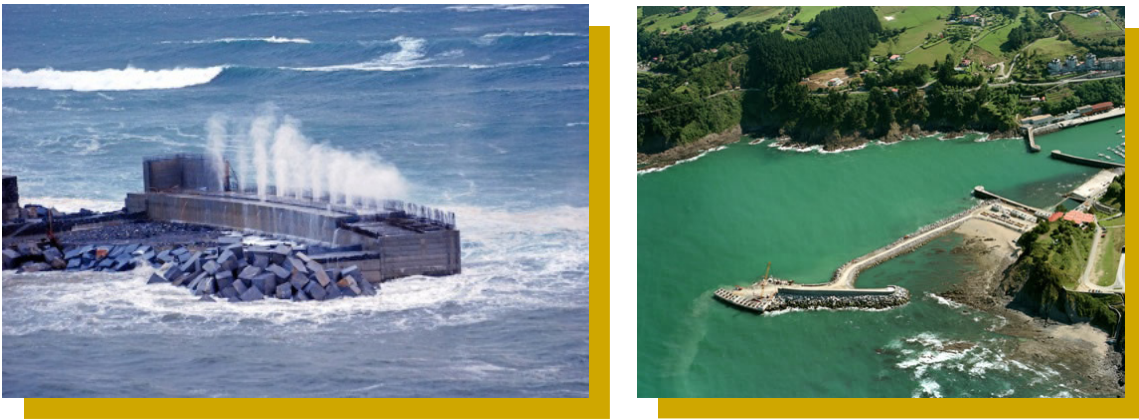


Figura 8. Mutriku, España.

La compañía australiana *Oceanlinx* (*Oceanlinx*, 2013), ha seguido la trayectoria *OWC* pero ha rediseñado radicalmente la estructura, convirtiéndola en una estructura espacial de acero, como se ve en la fotografía de la Figura 9. Los principios físicos de funcionamiento del sistema son los mismos que los de la planta *LIMPET de Voith Hydro Wavegen* instalada en tierra.

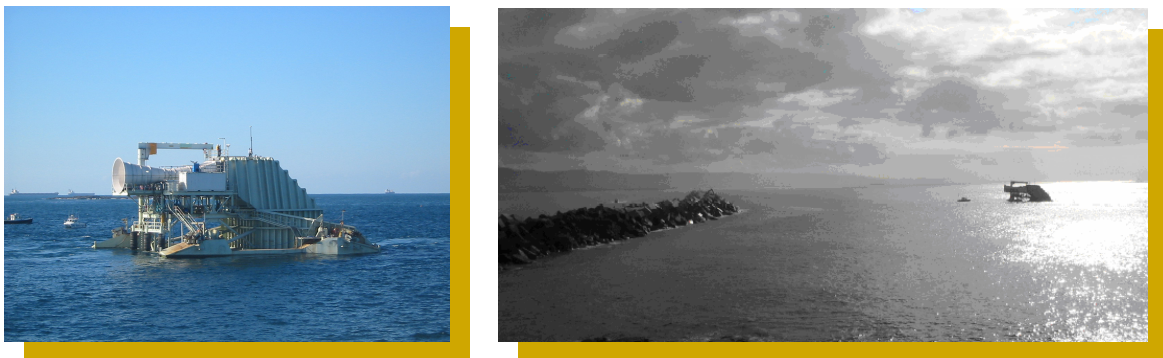


Figura 9. Oceanlinx, Australia.

2. El potencial energético de los océanos y el estado del arte de su explotación

El sistema *Wavestar* (Wavestar, 2013) presenta un concepto diferente de generación de energía de las olas en la zona próxima a la costa. Este concepto pertenece a la categoría de absorbedores puntuales múltiples y emplea una plataforma sujeta al fondo marino que soporta unos brazos reactivos con flotadores hemisféricos que suben y bajan en función de las olas. Este sistema fue concebido como una unidad que pudiera hibridarse con parques eólicos mar adentro, Figura 10.



Figura 10. Wavestar, Dinamarca.

En la Figura 11, se muestra un sistema para la zona de mar adentro conocido como *Pelamis* (UK, 2014). El *Pelamis* es el convertidor de energía de las olas más avanzado para esta zona y se han realizado pruebas en el mar con prototipos de tamaño real.



Figura 11. Pelamis, UK.

2. El potencial energético de los océanos y el estado del arte de su explotación

El dispositivo *CETO* (nombre de una diosa del mar griego), que se muestra en la Figura 12, está siendo desarrollado por *Carnegie Wave Energy Limited* (Carnegie, 2014). Este dispositivo puede utilizarse para bombear agua para la desalación en lugar de la producción de electricidad.

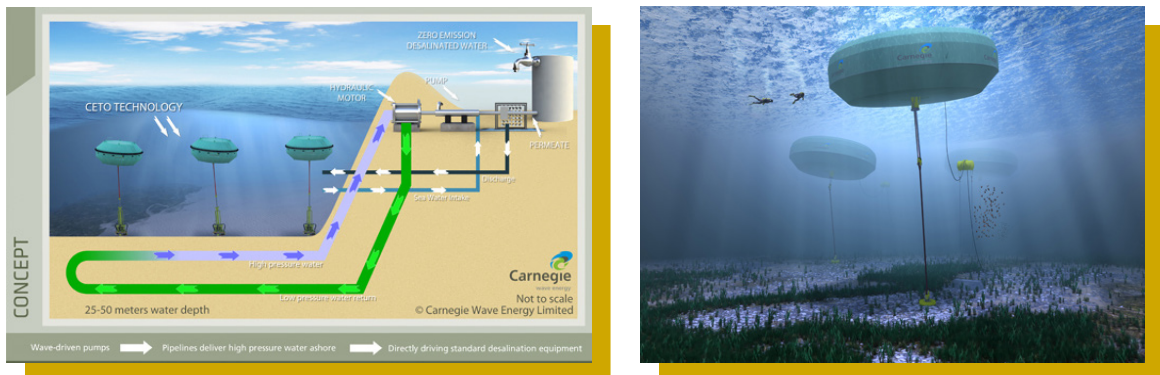


Figura 12. CETO, Australia.

Un reciente desarrollo del absorbedor puntual es la agrupación de pequeñas unidades individuales en un solo casco. El *Fred Olson Buldra* (Olson, 2007) es un ejemplo de este concepto, Figura 13. Este tipo de dispositivo es una versión de las unidades flotantes múltiples con cubierta protectora que se instalan próximas a la costa. Se prevé que una unidad a escala completa produzca entre 500 kW y 1 MW, pero ningún fabricante ha realizado pruebas a escala real hasta la fecha.

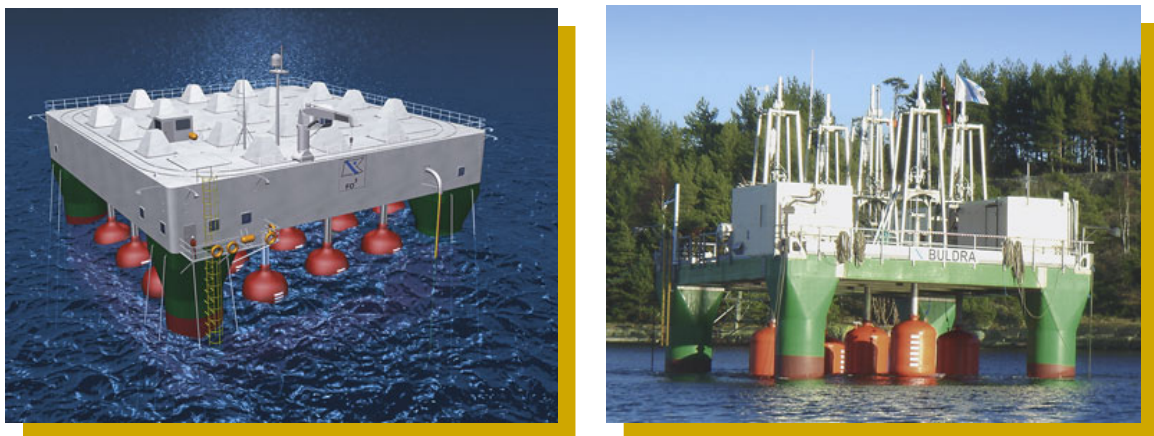


Figura 13. Olson, Noruega.

La mayoría de los conceptos para aguas profundas podrían clasificarse como convertidores de energía de las olas tipo *absorbedor puntual*. Una desventaja evidente de estas unidades es que el agua debe ser más profunda para implantar el sistema, lo que a su vez obliga a instalar el parque de energía de las olas más lejos de la costa. Sin embargo, esto puede compensarse con el hecho de que los diseños pueden ser convertidores energéticos de alta potencia que funcionan con un régimen de olas ligeramente superior. Dos compañías que poseen dispositivos de este tipo son el grupo estadounidense *Ocean Power Technology* (ESB, 2014) y el promotor irlandés *Wavebob* (Olsen, 2007). Aunque son similares en apariencia, cada compañía ha seguido una filosofía algo diferente para activar la capacidad de absorción energética de las máquinas.

2.1.2 ENERGÍA DE LAS CORRIENTES DE MAREAS ASTRONÓMICAS

Las oscilaciones y corrientes asociadas a las mareas astronómicas son producidas por la atracción que se ejerce entre la luna y el sol con la *Tierra*. Las mareas son oscilaciones regulares del nivel del mar en zonas específicas. El máximo nivel se llama pleamar y el mínimo bajamar, la amplitud de las mareas es la diferencia entre pleamar y bajamar. A nivel mundial, las amplitudes más grandes se presentan en las bahías de *Fundy, Canadá* (19 m), estuario de *Severn, Reino Unido* (17 m), *Río Gallegos, Argentina* (18 m), *Bahía Mont Saint Michel, Francia* (15 m), *Bahía Collier, Australia* (14 m), estuario del *Rance, Francia* (13 m), *Puerto de Braunagar, India* (12,5 m), *Corea* (10 m) y *Puerto Peñasco, Sonora México* (8 m).

En 1923 se diseñó la primera mareomotriz en el estuario de *Arranches*, cuya amplitud es de 7 m. El proyecto quedó abandonado hasta la construcción de la central del *Rance* de 220 MW. Fueron 17 años de estudios hidrológicos y oceanográficos, pruebas experimentales, diseños, rediseños, nuevos materiales, perfiles hidrodinámicos, válvulas automáticas y sistemas de control que aseguraran el funcionamiento de sus 24 turbogeneradores movidos a 5 700 rpm, convirtiendo la energía de 20 000 m³/s de agua de mar en electricidad en el momento de máxima altura de la marea. La *Central* francesa fue durante lustros la más grande del mundo, hasta la construcción de la *Central Lake Sihwa* localizada en la provincia de *Gyeonggi, Corea*, de 250 MW (Park, 2007) (Ho Bae, et al., 2010) (Rodríguez, 2014).

Los principios para aprovechar tanto las corrientes provocadas por mareas como las marinas, ver Figura 14 (Alatorre, 2007), se basan en las leyes de conservación de la masa,

momento y energía para el diseño de los diversos convertidores del flujo de fluidos en potencia eléctrica.



Figura 14. Corrientes Oceánicas.

La potencia que se puede explotar de las corrientes marinas es función del diámetro del rotor de las turbinas y de la velocidad de las mismas, siendo su eficiencia promedio del 30% (IEA-OES, 2002-14). Ejemplo de turbinas marinas se muestra en la Figura 15 (Alstom, 2014).



Figura 15. Turbina Alstom.

2.1.3 ENERGÍA DE GRADIENTES TÉRMICOS

En 1881, ya establecidos los fundamentos de la termodinámica, el francés *D'Arsonval* propone la primera aplicación oceánica para aprovechar la diferencia de temperaturas

existentes entre la superficie y el fondo marino para obtener energía útil. Al dispositivo marino capaz de transformar ese pequeño gradiente térmico marino en electricidad se le conoce como *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*. La *Revista Científica* del 17 de septiembre de 1881 informaba: “El señor D’Arsonval sugiere hacer funcionar una máquina térmica con el agua de los océanos. Implantada en los mares tropicales con el fin de beneficiarse de la diferencia de temperatura lo más alta posible, su máquina funcionaría según los principios desarrollados por Carnot. La caldera sería alimentada con las aguas de superficie, el condensador con las aguas profundas. Piensa utilizar el anhídrido sulfuroso como fluido de trabajo. El señor D’Arsonval espera ofrecer así una solución al agotamiento de combustible que, dice, nos amenaza”. Cincuenta años después George Claude recupera las ideas de D’Arsonval aplicándolas en Cuba y desarrollándolas teóricamente en *Mechanical Engineering*. El ingeniero francés afirma que el gradiente de temperaturas entre la superficie del mar horneada por el sol, cuyas temperaturas oscilan entre 75-85°F y, un fondo marino de 3000 ft de 40-43°F, es una diferencia de temperaturas prácticamente constante y por lo tanto una máquina térmica puede operar. Tal operación se lleva a cabo disminuyendo la presión del agua hasta que vaporice precisamente a 75-85°F y con el vapor generado poder mover un turbogenerador, luego el vapor es condensado con el agua del fondo a 40-43°F y volver a iniciar el ciclo que en este caso fue un ciclo abierto (Claude, 1930). La única deficiencia en la propuesta de Claude fue la construcción y los amarres de la tubería. En esa época las tecnologías de tuberías para soportar tempestades que fueron las que destruyeron los tubos de Claude, no existían. En la actualidad el problema está resuelto y el desarrollo de los sistemas OTEC es sobresaliente (Postigo, 1965) (Perrot, 1978) (OTEC, 2013) (NREL, 2014) (Waterorg, 2014) (EU, 2014).

2.1.4 ENERGÍA DE GRADIENTES SALINOS

La propuesta de aplicar el fenómeno de la ósmosis al mundo de la energía ha sido tan atractiva que en Noruega se realizan las primeras pruebas en una planta piloto de 2-4 kW de capacidad, producto de 10 años de investigación y 13 millones de euros de inversión (Levenspiel, 1997) (Norman, 1974) (Levenspiel, 1974) (Statkraft, 2014) (BBC, 2009) (CMC, 2012). Los dos principales obstáculos al desarrollo de las centrales osmo-motrices son la baja eficiencia de sus membranas (3 W/m²) siendo el límite inferior a alcanzar para su competencia industrial del orden de los 5 W/m² y, los costos de su producción. Es evidente considerar otros factores como los ecológicos y de seguridad que deberán tomarse en cuenta antes que las centrales osmo-motrices alcancen los niveles industriales que el Panel

2. El potencial energético de los océanos y el estado del arte de su explotación

Intergubernamental para el Cambio Climático pronostica alcanzar no antes del 2030. Sin embargo las primeras fases están siendo ya recorridas, Figura 16.

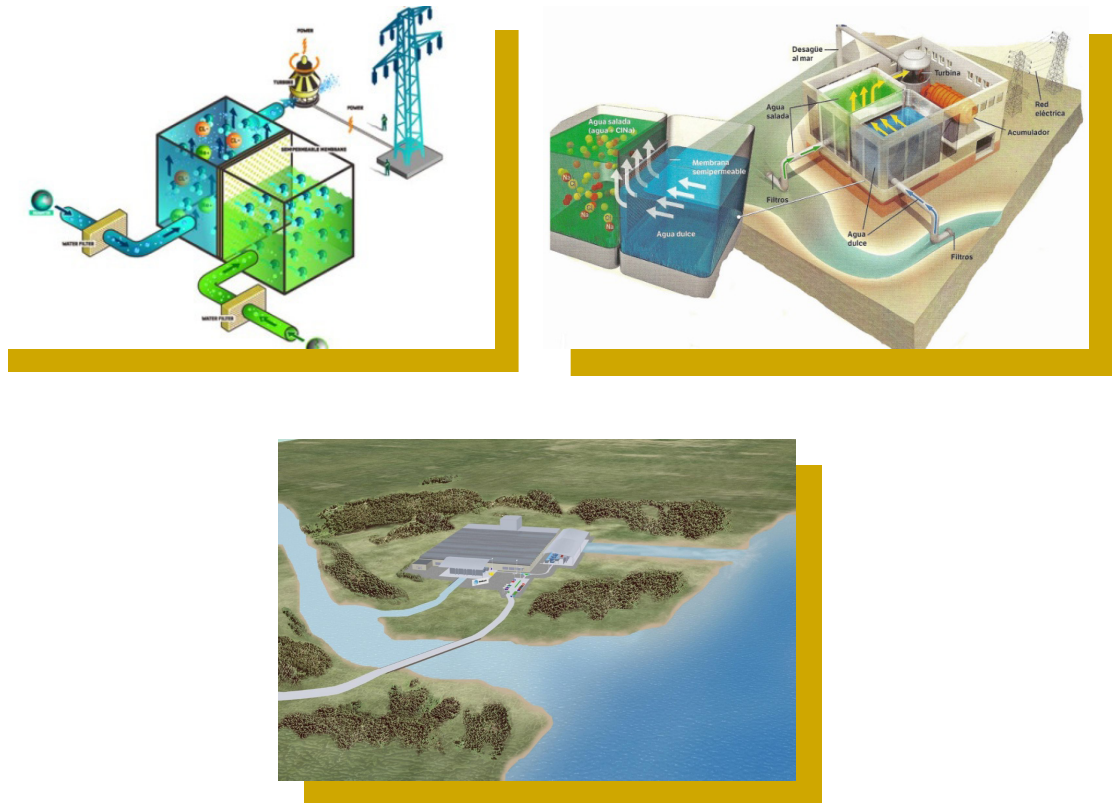


Figura 16. Central Osmomotriz.

2.1.5 CONTRIBUCIONES MEXICANAS

Una estrategia para el desarrollo de las energías oceánicas en *México* se encuentra en proceso de elaboración, pero los antecedentes, el desarrollo de sistemas y la bibliografía generada, se encuentran en promisorio crecimiento. Al respecto existen estudios vinculados al potencial energético de mareas (Hiriart Le Bert, 2009), simulación de roturas del oleaje (Rivillas Ospina, 2012), valoración de la energía de las olas (Pérez Peña, 2013), investigaciones sobre las corrientes marinas (Expósito Díaz, 2009), dispositivos en desarrollo como bombas marinas probadas en *Cancún* (Alatorre Mendieta, 2003), el “sibeo”, una bomba para el impulso de agua marina aplicada en *Ensenada* (Czitrom, et al., 2007), estudios sobre osciladores de columna de agua (Pinedo González, 2014), dispositivos para aprovechar las corrientes oceánicas (López González, 2011), estudios de una central de

olas en *Colima* (Durán San Lázaro & Vázquez Ruiz, 2014) y un *TAPCHAN* de laboratorio (Serrano Navarro, 2008). México tiene una representación a nivel internacional ante la OES (*Ocean Energy System*) de la *Agencia Internacional de Energía*, organismo responsable de fomentar, organizar y difundir las tecnologías para el aprovechamiento de las energías de los océanos (IEA-OES, 2002-14) y también tiene una representación ante el proyecto *Theseus* de la *Unión Europea* para el desarrollo de tecnologías de protección costera ante los efectos del cambio climático (II, 2010) (Theseus, 2014). Finalmente ha sido aprobado el proyecto CEMIE océano cuyas metas son valorar y desarrollar tecnologías para explotar las energías de los mares mexicanos (<https://www.youtube.com/watch?v=Uue7NHQU7ts&feature=youtu.be>). Es en este escenario nacional donde esta tesis se encuentra integrada (II, 2011) y es complemento y continuación del proyecto desarrollado en (Chávez Cárdenas, 2010) (Mendoza Balwin, et al., 2015).

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2

La ingeniosidad de los diversos dispositivos que explotan las energías oceánicas es tal que hasta el momento ninguno destaca por sobre los demás, más bien existe una tendencia a complementarse. Los fundamentos científicos y tecnológicos con los que se sostienen tales dispositivos están en sus primeras fases de desarrollo. Esto ha permitido que en veinte años de difusión e innovación la oceanomotriz empiece a consolidarse como una rama de la ingeniería. Es en este marco de permanente desarrollo tecnológico en donde el *Blowjet* es una contribución que se suma al actual estado del arte. El *Blowjet* y su potencial uso para la explotación de la energía del oleaje y su integración dentro de un proceso para la obtención de hidrógeno y oxígeno, es el objetivo de los siguientes capítulos.

3. DEL *TAPCHAN* Y LA *BUFADORA* AL *BLOWJET* (DE LA ONDA AL CHORRO)



El *Blowjet* transformó olas entre 8 y 20 centímetros de altura en chorros cuyas potencias hidrodinámicas promedio oscilaron entre 9 y 600 Watt. Más que suficientes para romper la molécula del agua y poder concebir otra manera de almacenar la energía de los océanos.

3.1 TAPCHAN

El *TAPCHAN* (*TAP*ered *CHAN*nel) fue uno de los primeros dispositivos océano-motrices que se construyeron en el mundo destacando como la máquina de transformación energética del oleaje sobre el litoral costero más simple y elegante (Duckers, 1995) (Duckers, 2000). Ver Figura 17. Consta de un canal abierto constituido por planos inclinados en estrechamiento a medida que cruza la línea de costa donde en su sección de entrada, más ancha, captura la ola que, a medida que recorre el canal lo rebasa, proyectando al agua marina sobre un reservorio construido a semejanza de una presa situada a una altura mayor a la del nivel del mar. Almacenada, el agua empieza a fluir hacia el océano moviendo una turbina *Pelton* acoplada a un generador eléctrico. En pocas palabras el *TAPCHAN* es un dispositivo que transforma la energía de la ola en energía potencial. El sistema operó en *Noruega* de 1985 a 1990 con una capacidad de 350 kW (Falnes, 1993) (Tjugen, 1993) (Huderdosse & Lyons, 2010) (Spaan, 1993) (UK, 2001) (EMEC, 2015) (Molina, 2010) (Bergens, 2013) (Wordpress, 2013) (Dasaolar, 2010) (Svein, 2012) (Svein, 2010) (Svein, 2011) (Terje, 2011) (Reisbokso, 2009). Actualmente está destruido.

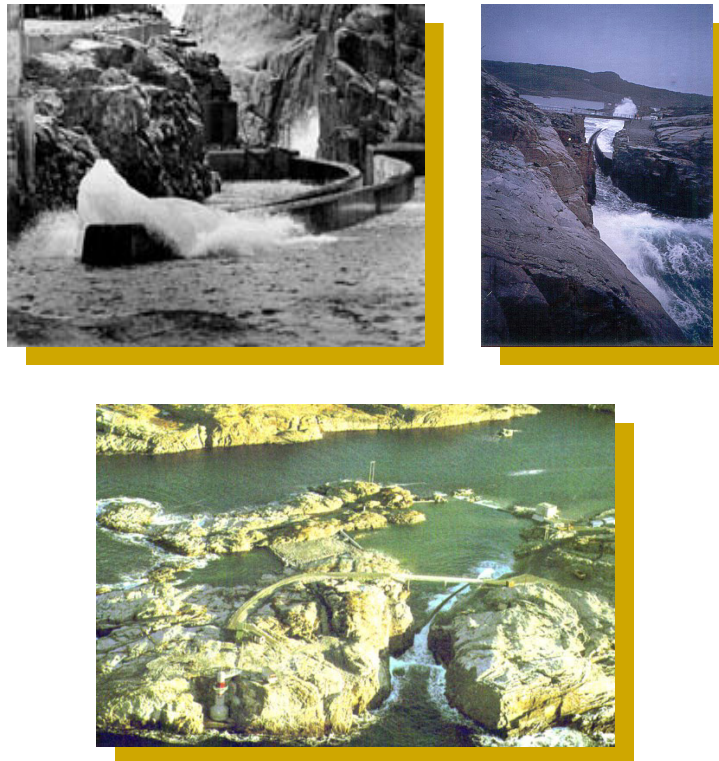


Figura 17. *TAPCHAN*.

Pese a su abandono, el concepto de su construcción sigue siendo válido: la amplificación y remonte del oleaje varios metros sobre el nivel del mar donde el agua marina es almacenada dentro de una infraestructura similar a cualquier central hidroeléctrica para posteriormente regresar al mar moviendo turbogeneradores y generando por consiguiente electricidad. El concepto es bastante sugerente y puede ser mejorado como se verá a continuación.

3.2 LA BUFADORA

Sobre las costas de *Ensenada Baja California* existe una caverna en forma de almeja distorsionada con altura máxima de 5-6 metros y 40-50 metros de longitud mayor. Situada sobre una pendiente de 5-8° y frente a un área marina de unos 200-400 metros cuadrados cuyos fondos oscilan entre los 5 y 30 metros de profundidad, la caverna es sistemáticamente inundada por el mar. Al resonar con olas cuya altura es menor a los 50 centímetros y periodos entre 13 y 17 segundos (Velasco Fuentes, 2013), la caverna expelle ráfagas y chorros de agua y aire que se levantan a veinte y hasta treinta metros sobre el nivel del mar en forma de un geiser, al que se la ha dado en llamar “*La Bufadora*”. Este fenómeno es explotado por la industria turística. *La Bufadora* entonces, es un dispositivo natural que transforma la energía de la ola en la energía cinética de un chorro de agua que se eleva varios metros sobre el nivel del mar, ver Figura 18.



Figura 18. *La Bufadora*, Ensenada, Baja California, México.

Poco se conoce sobre *La Bufadora* y pese a que el fenómeno ha sido descrito muy someramente por la bibliografía especializada (Velasco Fuentes, 2013) (Bascom, 1980) (Schwartz, 2005), sugiere otra forma de explotar la energía del oleaje. Si el TAPCHAN hace uso de planos inclinados cuya separación se va estrechando para elevar el agua marina y *La Bufadora* emite ráfagas de agua de alta potencia hidrodinámica, puede pensarse que un perfil curvo en estrechamiento que oponga la menor resistencia al paso de la ola hasta lograr transformarla en un chorro de agua, haría posible otra forma de controlar la energía del oleaje. Este es el concepto central del nuevo dispositivo llamado *Blowjet*. El fenómeno de *La Bufadora* no ha sido estudiado teóricamente. Aquí se expondrán algunas ideas con el propósito de iniciar tal estudio teórico de manera cualitativa: el fenómeno de interacción *Onda-Blowjet* tiene su símil con la interacción de las ondas electromagnéticas y los aparatos de recepción de las mismas como la radio. Cuando se capta una frecuencia específica para escuchar una estación determinada se dice que la interacción *Onda-Radio* se encuentra en sintonía. Desde la perspectiva energética la sintonía sería la conversión de la energía electromagnética a energía acústica con el mínimo de ruido, o sea, máxima eficiencia. Tenemos así para cada estación que emite en una frecuencia específica un receptor que transforma la energía electromagnética en los sonidos de su programación, que sintoniza, en rigurosa palabra. La teoría y la técnica electrónica tienen resuelto el problema de la sintonización siendo uno de los pilares de la moderna revolución de las comunicaciones. Si se trasladan estas imágenes, sin abusar de las mismas, al funcionamiento de *La Bufadora*, se tendría que de todo el espectro de frecuencias de las ondas marinas *La Bufadora* no sólo “sintoniza” con unas cuantas sino que las “amplifica” emitiendo un chorro: *La Bufadora* así se comporta como una auténtica antena marina, generando una especie de láser molecular constituido por el chorro de agua. El límite ideal es una *Bufadora* que emita el chorro con el menor “ruido” (pérdidas de energía) posible al “sintonizar” con un *Estado del Mar* fijo, esto es, a una sola frecuencia y altura de la onda. Si la *Ingeniería Electrónica* lo ha hecho realidad en el *Campo Electromagnético* esta tesis afirma la posibilidad de que la *Ingeniería Hidrodinámica Marina* pueda repetir la proeza. Esta sería la imagen física: *La Bufadora* concebida como una antena que permite sintonizar y amplificar ciertas frecuencias del entorno marino siendo el límite ideal el que sólo operara a un *Estado del Mar* fijo donde la energía cinética del chorro fuera un máximo. Estas son las imágenes físicas que ayudarán al lector a entender un poco la diversidad de datos de la siguiente sección dedicada al *Blowjet*. El *Blowjet* es un dispositivo que pretende ser el modelo en busca de esa singular *Bufadora-Receptora* de espectros delimitados del *Estado del Mar* dentro de una costa determinada y que permita la conversión, con el menor ruido posible, de la *Potencia* del

Oleaje a *Potencia Cinética* de un chorro de agua. Esto es, dada una costa y su *Estado del Mar* que la caracterice, el objetivo es tener la capacidad de calcular y construir un *Blowjet* que sintonice y amplifique una cierta frecuencia marina para convertirla a un potente chorro de agua, ver anexo 1. Como se verá a continuación la tarea no fue ni es nada sencilla y, aunque la meta es cada vez más nítida, el trayecto para alcanzarla sigue estando lleno de dudas e incertidumbres.

3.3 BLOWJET

El *Blowjet* está concebido para reproducir en el laboratorio el chorro de *La Bufadora* pero de una manera regular y controlada con el propósito de que “sintonice y amplifique” con diversos *Estados del Mar* a escala de laboratorio. El *Blowjet* es un dispositivo que transforma la energía del oleaje en energía cinética del chorro. Su ventaja sobre el *TAPCHAN* es que no requiere ser construida la onerosa presa de almacenamiento sino que, directamente, pueda poner en operación un turbogenerador y el agua utilizada volver al mar sin ningún obstáculo. Su geometría se inspira en los instrumentos de viento, particularmente “la tuba” con el fin de disminuir las pérdidas que existen cuando un fluido se desliza sobre una superficie sólida. El perfil interno del *Blowjet* se determinó, considerando la mínima resistencia que ofrece una curva sólida al flujo de fluidos, ver Figura 19.

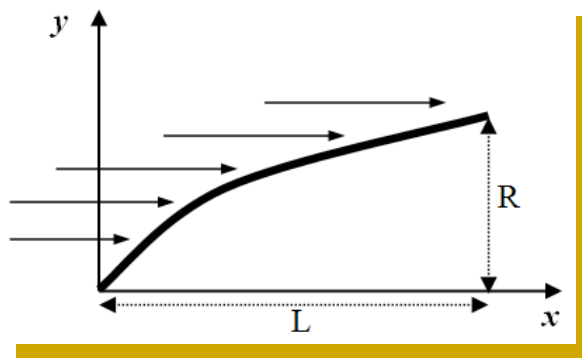


Figura 19. Perfil de Mínima Resistencia al Flujo.

Encontrar el perfil $y(x)$ con mínima resistencia a un flujo, es un problema del cálculo variacional (Krasnov, et al., 1976), cuya solución se puede expresar a través de la funcional:

$$F = 4\pi\rho v^2 \int_0^1 y^3 y dx$$

3. Del TAPCHAN y La Bufadora al Blowjet (de la onda al chorro)

Donde:

F = Fuerza de resistencia [N]

ρ = Densidad del fluido [kg/m^3]

v = Velocidad del fluido respecto del sólido [m/s]

Con las condiciones de contorno siguientes:

$$y(0) = 0$$

$$y(L) = R$$

La ecuación de *Euler* para la funcional F tiene la forma:

$$y'^3 - 3 \frac{dy y'^2}{dx} = 0$$

Cuya solución es:

$$y = R \left(\frac{x}{L} \right)^{\frac{3}{4}}$$

La expresión exponencial resultante marca un perfil parabólico, ver Figura 20.

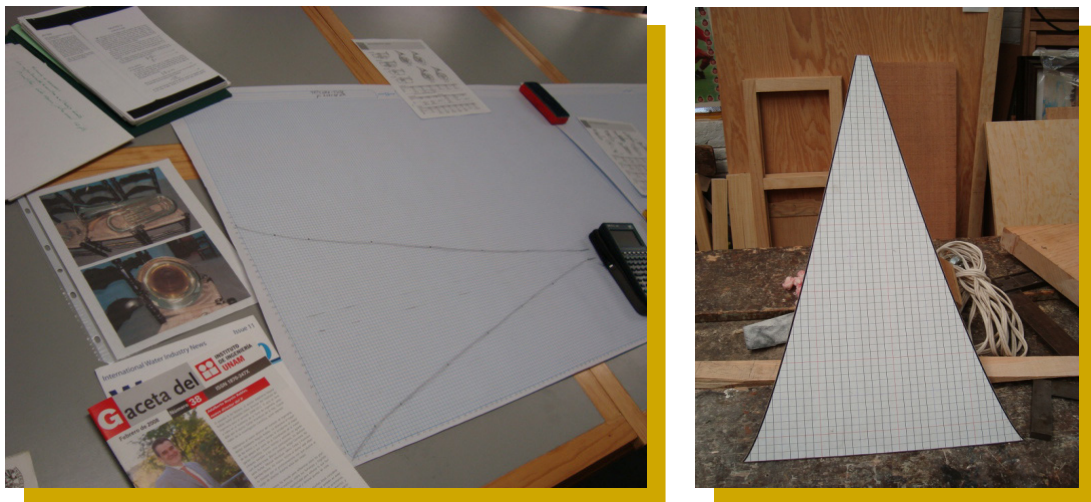


Figura 20. Perfil Parabólico del *Blowjet*.

Con tal perfil los primeros moldes se construyeron tallando madera, ver Figura 21.

3. Del TAPCHAN y La Bufadora al Blowjet (de la onda al chorro)



Figura 21. Construcción del *Blowjet*.

Los moldes se vaciaron de acrílico y se obtuvo el primer *Blowjet* ver Figura 22.



Figura 22. Primer *Blowjet* de Acrílico.

La dificultad del tallado para elaborar los moldes de madera y las imprecisiones del vaciado dieron un primer *Blowjet* lleno de imperfecciones por lo que se decidió descartar esta metodología de construcción y mandarlo a fabricar por fuera con material de fibra de vidrio sacrificando la posibilidad de tener observaciones visuales directas, Figura 23.

3. Del TAPCHAN y La Bufadora al Blowjet (de la onda al chorro)



Figura 23. *Blowjet*.

Desde los primeros ensayos el dispositivo empezó a operar de manera significativa. *La Bufadora* resultó un fenómeno generosamente reproducible a escala del laboratorio, ver Figura 24.



Figura 24. Primeros Ensayos con el *Blowjet*.

Se decidió diseñar y construir un exoesqueleto para soportarlo e iniciar de manera sistemática las pruebas, ver Figura 25.

3. Del TAPCHAN y La Bufadora al Blowjet (de la onda al chorro)



Figura 25. Soportería del *Blowjet*.

El dispositivo en acción se muestra en la Figura 26.



Figura 26. *Blowjet* en Acción.

El esquema general de las pruebas a las que se sometió el dispositivo se ilustra en la Figura 27.

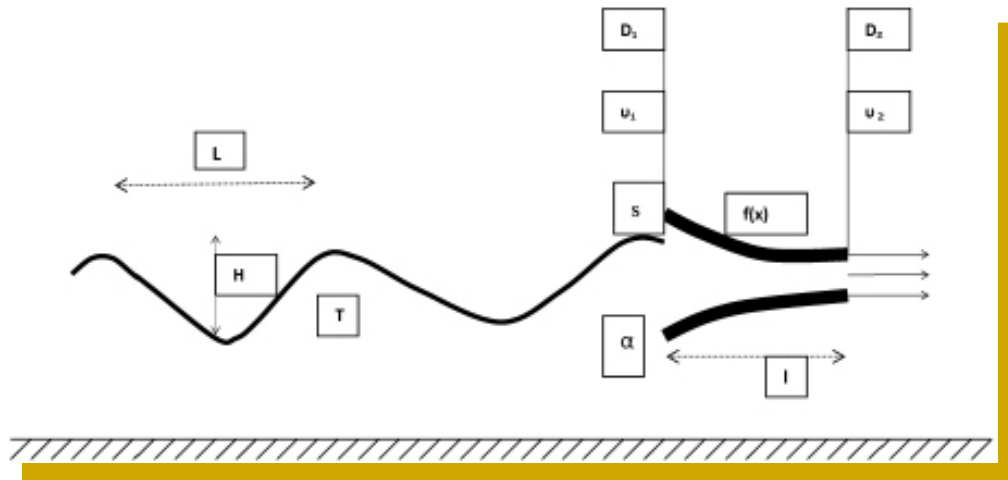


Figura 27. Esquema Experimental del *Blowjet*.

Donde:

Estado del Mar:

T = Periodo [s]

$L=1.56T^2=$ Longitud de onda [m]

H = Altura de la onda [m]

Variables del *Blowjet*:

$f(x)$ = Perfil geométrico

I = Longitud del dispositivo [m]

D_1 = Diámetro a la entrada [m]

D_2 = Diámetro a la salida [m]

α = Pendiente respecto al nivel del mar

S = Fracción sumergida

Variables dinámicas:

u_1 = Velocidad a la entrada [m/s]

u_2 = Velocidad a la salida [m/s]

$v_{m\acute{a}x.}$ = Velocidad máxima a la salida [m/s]

\bar{U}_e = Velocidad promedio a la entrada [m/s]

\bar{U}_s = Velocidad promedio a la salida [m/s]

F.A. = \bar{U}_s / \bar{U}_e = Factor de amplificación de velocidad

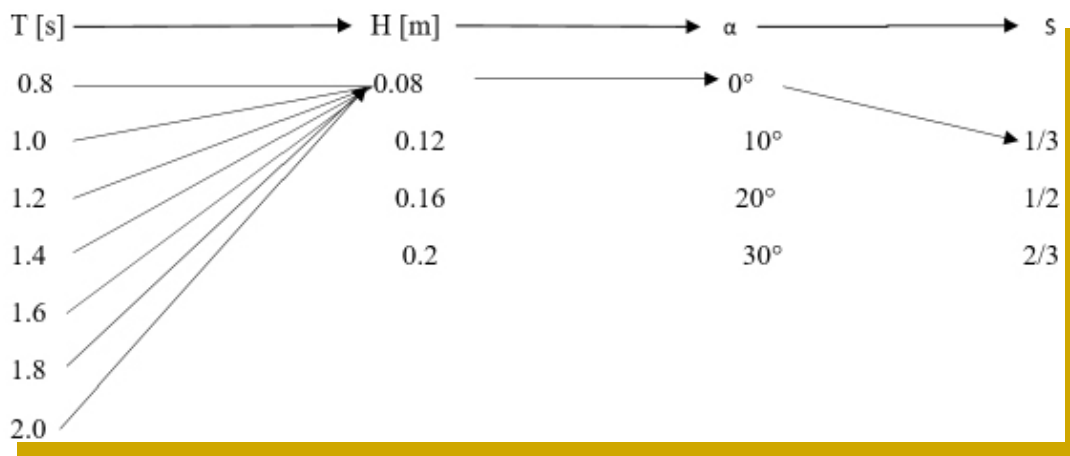
Variables energéticas

$P_H = \frac{1}{2} \eta \rho A v^3$ = Potencia hidrodinámica a la salida del *Blowjet* [W]

$P_O = 1000 D_1 H^2 T$ = Potencia de la onda lejos de costa [W]

FAP=Factor de Amplificación de Potencia= P_H / P_O

La secuencia ideal de los ensayos experimentales sería establecer el *Estado del Mar*, fijar la fracción de sumergimiento y probar diferentes *Blowjet* pero, al inicio del proyecto, se carecía de un método de construcción fácil y económico de los mismos por lo que se decidió proceder en sentido contrario: establecer las variables del *Blowjet* fijo, fijar la fracción de sumergimiento y manipular el *Estado del Mar*, ver (Chávez Cárdenas, et al., 2010) (Mendoza Balwin, et al., 2010). La secuencia de los ensayos siguió la siguiente pauta:



En total se realizaron 336 ensayos en trabajo experimental sistemático y un gran número indeterminado de manera inicial e informal para “jugar” con el *Blowjet* (Chávez Cárdenas, et al., 2010). La meta fue determinar los rangos del estado del mar (H y T) dentro de los cuales el jet se producía de manera regular y fuera significativo energéticamente. Un ejemplo de velocidades generadas en el transcurso del tiempo lo da la Figura 28.

3. Del TAPCHAN y La Bufadora al Blowjet (de la onda al chorro)

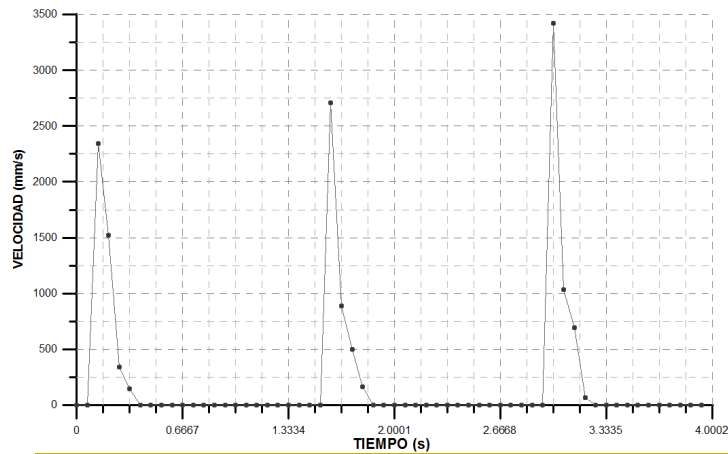


Figura 28. Perfil de Velocidades en el Tiempo.

Tales datos permiten determinar las velocidades máximas, velocidades promedio de entrada y salida, el factor de amplificación de velocidades, la potencia hidrodinámica del jet y la potencia de la onda lejos de costa. El resumen de todos los resultados se muestra en la Figura 29.

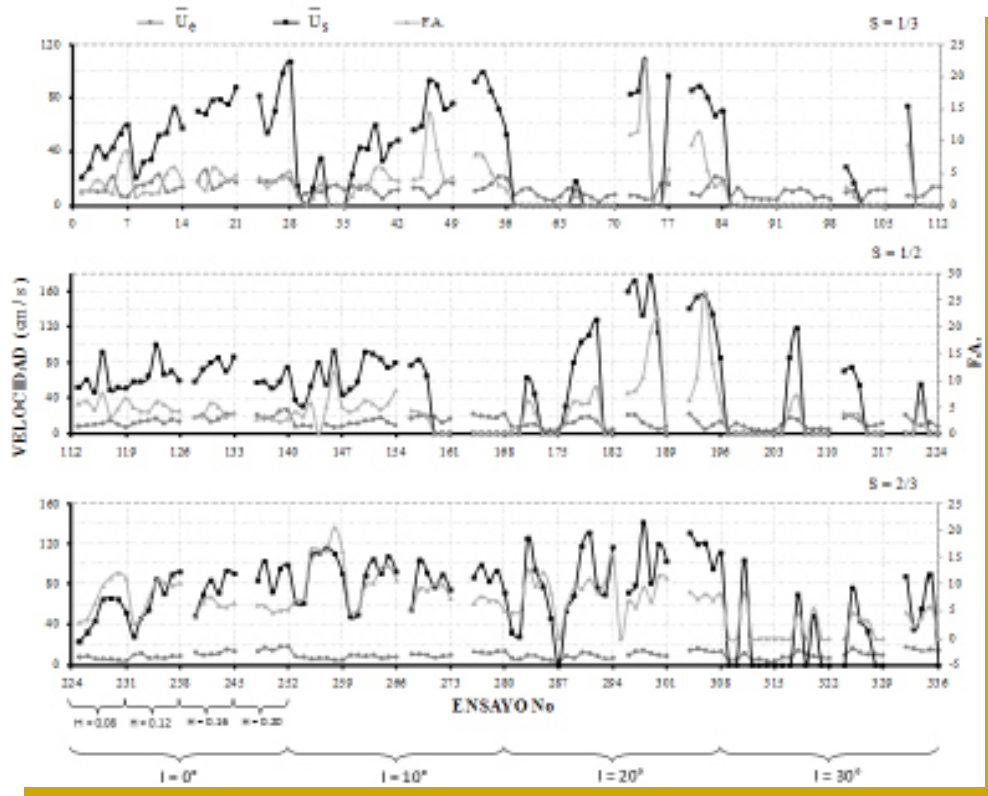


Figura 29. Velocidades Promedio y Factores de Amplificación.

3. Del TAPCHAN y La Bufadora al Blowjet (de la onda al chorro)

Para la segunda fase de análisis fueron descartadas las pruebas de los ángulos de 20° y 30° toda vez que la inclinación del eje incrementaba la disipación de energía formando turbulencias y haciendo que los chorros fueran irregulares o inexistentes. Con el resto de las pruebas se procedió a evaluar las magnitudes energéticamente significativas y para ello se organizaron los datos según la tabla 2 a), b), c) y d), donde se tabulan las velocidades máximas de salida y debajo, entre paréntesis, las velocidades promedio en cm/s.

Tabla 2 a, b,c,d y e. Velocidades de Chorros “Sintónicos” en cm/s.

a) $S = 1/3, \alpha = 10^\circ$					b) $S = 1/2, \alpha = 0^\circ$				
H[m] → T[s] ↓	0.08	0.12	0.16	0.20	H[m] → T[s] ↓	0.08	0.12	0.16	0.20
0.8		348 (235)			0.8	1289 (520)	1529 (586)		
1.0		1533 (423)			1.0	2134 (612)		2270 (587)	
1.2					1.2	1633 (474)			
1.4				3119 (992)	1.4	2600 (918)			

c) $S = 1/2, \alpha = 10^\circ$					d) $S = 2/3, \alpha = 0^\circ$				
H[m] → T[s] ↓	0.08	0.12	0.16	0.2	H[m] → T[s] ↓	0.08	0.12	0.16	0.20
0.8	1300 (381)	1099 (497)			0.8	468 (239)			
1.0		1615 (586)	2112 (770)		1.0	916 (319)	1118 (457)	1218 (478)	
1.2					1.2				
1.4					1.4				

e) $S = 2/3, \alpha = 10^\circ$				
H[m] → T[s] ↓	0.08	0.12	0.16	0.20
0.8	1321 (612)	1005 (467)		
1.0	1276 (601)		1088 (542)	
1.2				
1.4				

El criterio para elegir los datos tabulados en la tabla 2, consistió en la generación del chorro con la forma y consistencia (o similares) de la Figura 30. A tales chorros de aquí en adelante los denominaremos “sintónicos”.

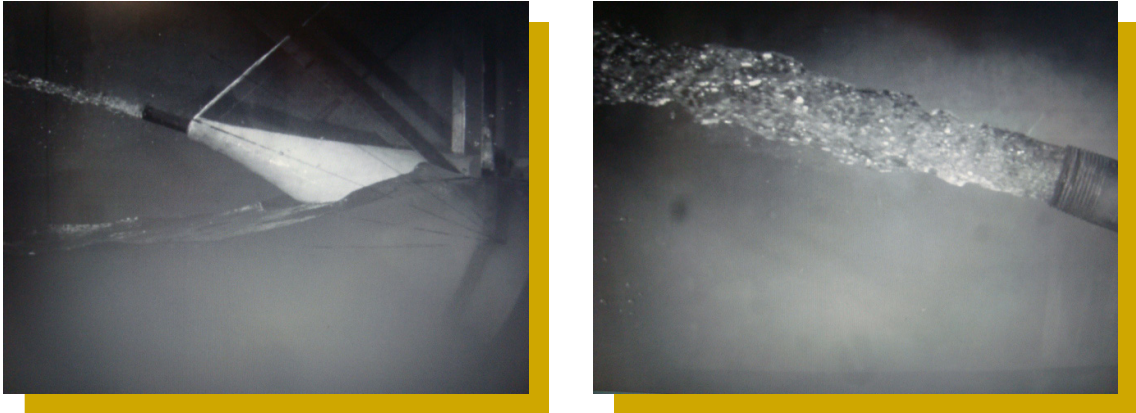


Figura 30. Jet Energéticamente Significativo (*sintónico*).

¿Podría hallarse un *Blowjet* exclusivo para sintonizar “perfectamente” con un *Estado del Mar* determinado? Teóricamente sí, pero sería demasiado oneroso y sin ninguna utilidad salvo la de demostrar alguna teoría formal que aún se desconoce si es que pueda existir. Como no es objetivo de esta tesis sino de algún trabajo futuro y centrando la discusión en el uso de los chorros sintónicos obtenidos, se puede afirmar que la velocidad máxima obtenida de los experimentos sería la base para el cálculo de un turbogenerador aún por diseñar de manera rigurosa. Estos datos puntuales de velocidad máxima son los que se van a utilizar para los balances de energía del dispositivo en el último capítulo. Antes, con los datos disponibles es posible determinar rangos estadísticos de comportamiento de este *Blowjet* según diversos *Estados del Mar*.

Para determinar el espectro general del comportamiento hidrodinámico del *Blowjet*, esto es, las velocidades máximas y velocidades promedio obtenidas en función de la altura de la ola y su longitud de onda, así como abrir la alternativa de su escalamiento, se procedió a aplicar las metodologías de la teoría de *Similitud o Semejanza*, que afirma que dos sistemas de diferente magnitud son “similares o semejantes” siempre y cuando sean iguales sus variables adimensionales básicas. Con esta base se procedió a adimensionalizar todas las variables hidrodinámicas implicadas en el fenómeno. Así, se normalizaron las variables hidrodinámicas de la siguiente forma:

3. Del TAPCHAN y La Bufadora al Blowjet (de la onda al chorro)

Altura de la onda adimensional = H/S

Longitud de onda adimensional = L/l

Velocidad máxima adimensional = $v_{\text{máx}}/(gH)^{1/2}$

Velocidad media adimensional = $v_{\text{med}}/(gH)^{1/2}$

Los resultados se muestran en la Figura 31, ver (Sánchez Dirzo, et al., 2014), donde la velocidad máxima es función de la longitud de onda normalizada y la fracción de sumergimiento relativo para a) $\alpha=0^\circ$ y $S=1/3$, b) $\alpha=10^\circ$ y $S=1/3$, c) $\alpha=0^\circ$ y $S=1/2$, d) $\alpha=10^\circ$ y $S=1/2$, e) $\alpha=0^\circ$ y $S=2/3$ y f) $\alpha=10^\circ$ y $S=2/3$.

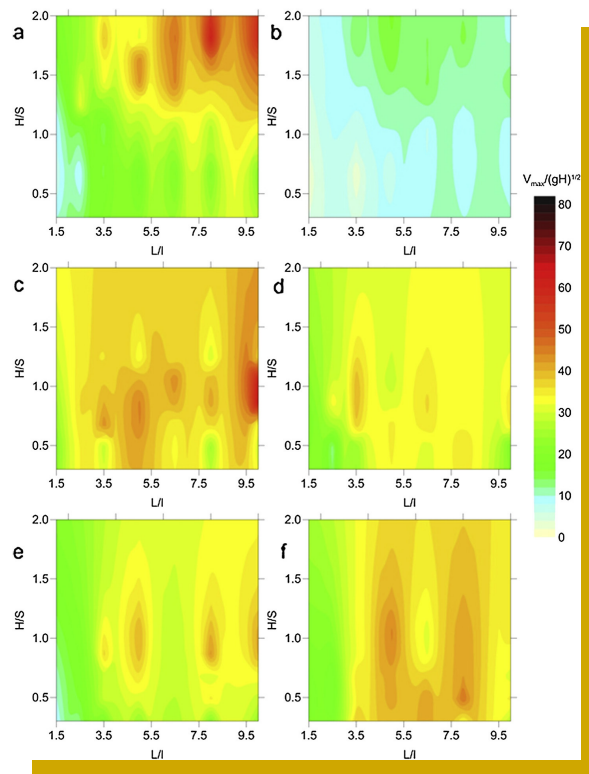


Figura 31. Velocidad Máxima Adimensional.

Y la Figura 32 donde la velocidad media es función de la longitud de onda normalizada y la fracción de sumergimiento relativo para a) $\alpha=0^\circ$ y $S=1/3$, b) $\alpha=10^\circ$ y $S=1/3$, c) $\alpha=0^\circ$ y $S=1/2$, d) $\alpha=10^\circ$ y $S=1/2$, e) $\alpha=0^\circ$ y $S=2/3$ y f) $\alpha=10^\circ$ y $S=2/3$.

3. Del TAPCHAN y La Bufadora al Blowjet (de la onda al chorro)

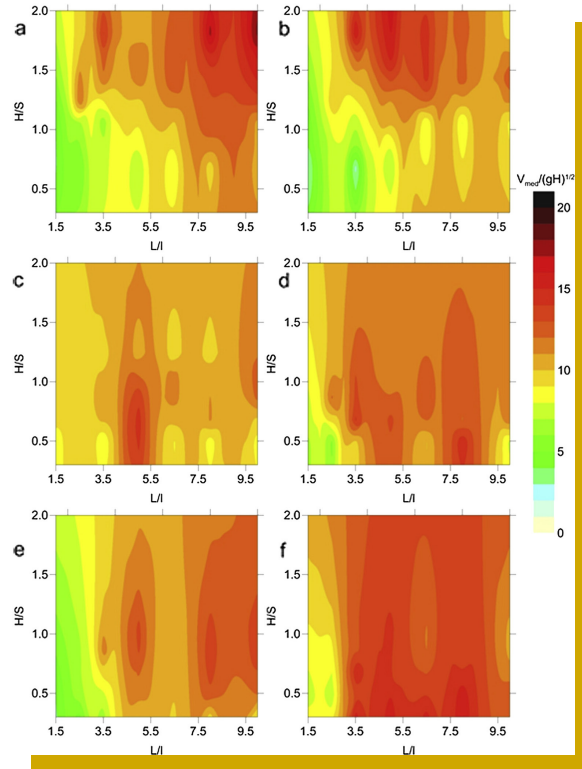


Figura 32. Velocidad Media Adimensional.

Esta información permite vincular la geometría del *Blowjet* con el *Estado del Mar* para predecir el comportamiento regular y energéticamente significativo del mismo, esto es, para la obtención de chorros sintónicos. Se puede afirmar con razonable certidumbre que la mejor posición del dispositivo no debe ser mayor a los 10° tendiendo a 0° de inclinación, que debe estar sumergido entre $1/3$ tendiendo a $1/2$ de su diámetro y por consiguiente que éste, el diámetro, debe ser igual al doble de la altura de la ola que entra tendiendo a ser un poco más grande y finalmente, que la longitud de onda se sitúe en dos posibles rangos respecto a la longitud del *Blowjet*: entre 4 y 5 o entre 8 y 9.

Calculando la potencia hidrodinámica máxima y mínima para obtener el rango energético obtenido para las velocidades promedio de los chorros sintónicos de la tabla 2, fijando por tanto las magnitudes del esquema experimental de la Figura 27, se obtienen los siguientes resultados:

Potencia máxima, tabla 2 a):

$$f(x) = 1.37178 x^{3/4}$$

$$L = 0.63 \text{ m}$$

$$D_1 = 0.021 \text{ m}$$

$$D_2 = 0.366 \text{ m}$$

$$S = 1/3$$

$$\alpha = 10^\circ$$

$$H = 0.2 \text{ m}$$

$$T = 1.4 \text{ s}$$

$$v = 992 \text{ cm/s}$$

$$P_{\text{máx.}} = \frac{1}{2}\rho A v^3 = 0.5 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 3.1416 \cdot (0.021 \text{ m}/2)^2 \cdot (9.92 \text{ m/s})^3$$

$$P_{\text{máx.}} = 676 \text{ W}$$

Potencia mínima, tabla 2 d):

$$f(x) = 1.37178 x^{3/4}$$

$$L = 0.63 \text{ m}$$

$$D_1 = 0.021 \text{ m}$$

$$D_2 = 0.366 \text{ m}$$

$$S = 2/3$$

$$\alpha = 0^\circ$$

$$H = 0.08 \text{ m}$$

$$T = 0.8 \text{ s}$$

$$v = 239 \text{ cm/s}$$

$$P_{\text{mín.}} = \frac{1}{2}\rho A v^3 = 0.5 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 3.1416 \cdot (0.021 \text{ m}/2)^2 \cdot (2.39 \text{ m/s})^3$$

$$P_{\text{mín.}} = 9.46 \text{ W}$$

Estos rasgos del *Estado del Mar* reproducidos en el laboratorio y que provocan la aparición de los chorros sintónicos se consideran con la suficiente potencia para romper la molécula del agua por medio de la electrólisis y por tanto sugiere otra forma de almacenar la energía de los océanos no contemplada hasta el momento por la ingeniería océano-motriz. Esta idea es desarrollada en el capítulo cuatro.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3

La complejidad de los trenes de ondas durante el desplazamiento de la energía sobre la superficie marina puede ser reducida a la simplicidad de la hidrodinámica del chorro cuya potencia es directamente proporcional al cubo de su velocidad. Esto se logra con el más sencillo de los dispositivos concebido y construido hasta el momento: el *Blowjet*. El *Blowjet* pretende simular a su vez el fenómeno de *La Bufadora*. El *Blowjet*, por tanto, sintoniza captando rangos específicos de frecuencias del *Estado del Mar* y los amplifica generando potentes chorros de agua que se denominaron *chorros sintónicos*. El fenómeno de *La Bufadora* ha resultado generosamente reproducible en el laboratorio y se espera lo sea en los litorales bajo condiciones artificiales un poco diferentes a las cavernas que dan sustento a las *Bufadoras* y otros géiseres marinos distribuidos a lo largo de las costas de *México*, *Australia*, *Hawaii* y otros litorales donde han sido observados aunque sin ningún estudio científico localizable en la bibliografía consultada salvo Velasco Fuentes (2013): tal vez este trabajo pueda motivar a los geofísicos marinos a iniciar una investigación seria de cómo y por qué *La Bufadora* es como es. Los datos indican que el *Blowjet* puede operar a diversas condiciones de periodo y altura de la onda marina pudiendo ser especificado su diseño según el *Estado del Mar* en algún litoral.

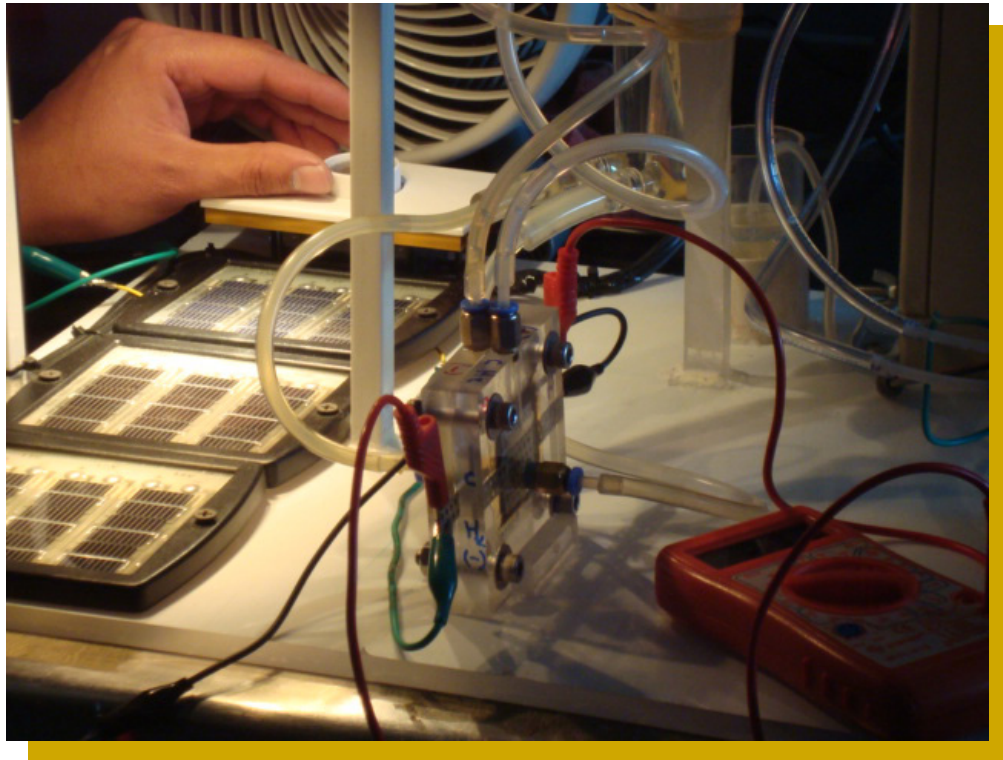
Existen *Estados del Mar* donde el *Blowjet* genera chorros regulares y enérgicos en los intervalos deseados para su diseño y aplicación específica: tales intervalos se encuentran cuando el dispositivo está en fracciones de sumergimiento de $\frac{1}{3}$ tendientes a $\frac{1}{2}$, ángulos de inclinación hasta 10° tendientes a 0° , diámetros de entrada doble y tendiente a ser mayor a la altura de la onda que capta y, longitudes de onda en intervalos que van de 4-5 y 8-9 la longitud del dispositivo. En estos rangos fueron alcanzados intervalos de velocidades promedio, correspondientes a un rango entre 9 y 676 watts de potencia hidrodinámica; más que suficiente para romper la molécula del agua como se analizará en el capítulo final. Si esto se logra con ondas de 8 a 20 centímetros de altura es evidente la obtención de mayor potencia con olas reales, sean cual fuera su tamaño. *La Bufadora* también da idea de la inmensa energía transportada por el oleaje: los videos obtenidos de la misma muestran que, incluso, en condiciones de calma aparente, *La Bufadora* puede expeler chorros de más de veinte metros de altura: se estiman escalas de mega watts de potencia.

Una inmensa potencia energética que podría ser controlada por medio de un sencillo dispositivo como el *Blowjet* y almacenada con las modernas tecnologías de la electroquímica

3. Del *TAPCHAN* y *La Bufadora* al *Blowjet* (de la onda al chorro)

en forma de hidrógeno, sería un proyecto atractivo a mediano plazo. Otras posibles aplicaciones del *Blowjet* integrado a diques multipropósitos, puede ser consultada en (Bustos Lira, et al., 2010) (Charlier, et al., 2005) (Mendoza Baldwin, et al., 2014) (Abanades, et al., 2014).

4. DEL JET AL HIDRÓGENO



La descomposición del agua en sus componentes fue realizada por medio de celdas de electrólisis de membrana conductora de protones diseñadas y construidas en el Instituto Politécnico Nacional. La ruptura de la molécula del agua puede ser llevada a cabo con la energía de las olas concentrada por el *Blowjet*.

4.1 LAS CENTRALES DE ELECTRÓLISIS

Las plantas de electrólisis no sólo son una tecnología madura y comercial sino que sus innovaciones como plantas de proceso se equiparan a las de la industria petroquímica e incluso, las superan por la expectativa futura que se ha depositado en ellas. Estas plantas se diseñan y construyen desde escala de laboratorio, pasando por planta piloto hasta niveles industriales ya que su diseño es versátil y modular. Por desgracia en *México* no existen empresas dedicadas a su innovación, diseño, construcción, operación y mantenimiento: en el futuro esto va a ser muy costoso ya que se tendrán que importar como actualmente se importan las plantas petroquímicas. Las centrales de electrólisis modernas son capaces de trabajar con agua en fase vapor lo que incrementa su eficiencia (Yingsheng & Yichun, 1994) (Kreuter & Hofmann, 1998) (Mansilla, et al., 2007), ver Figura 33 (Wendt, 1990); puede ser simulado su comportamiento como planta de proceso (Vanhanen, et al., 1994) (Rzayeva, et al., 2001) y, se reportan permanentes mejoras en su operación (FCH, 2014).

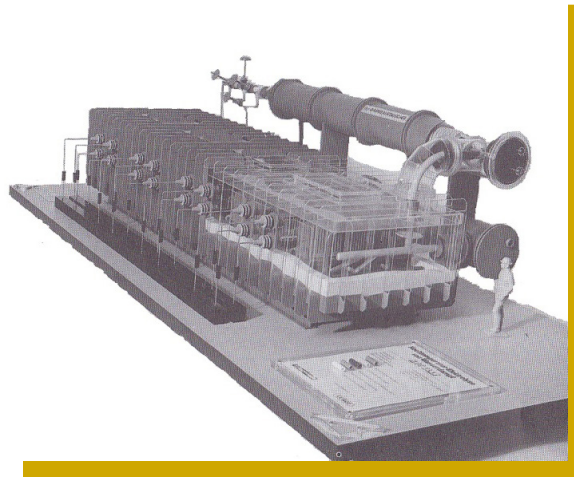


Figura 33. Electrolizador de Vapor de Agua.

La innovación de las plantas de electrólisis es aceptable, pero actualmente el suministro de electricidad que las pone en funcionamiento hasta la fecha proviene de la red eléctrica que quema hidrocarburos: el 96% de las 65 millones de toneladas al año de hidrógeno, equivalente a 8 EJ (8×10^{18} J), menor que el 2% del suministro total de energía primaria en el mundo, se obtiene de la reformación del metano y petróleo así como de la gasificación del carbón (IEA, 2015). El papel de combustible que puede jugar en el transcurso del siglo XXI hace necesario que el proceso de electrólisis empiece a buscar las llamadas economías de

escala. Si bien la electrólisis es una tecnología madura y comercial se enfrenta al complejo problema de requerir electricidad que no provenga de la quema de los hidrocarburos sino de la generada por las energías renovables: sol, vientos y mares. El reto de transformar las oscilaciones marinas, el flujo de fotones solares y las corrientes de aire en la electricidad que alimente a las centrales de electrólisis es un reto con muchas expectativas. Esto se debe a que las *Centrales de Electrólisis* son versátiles a diferentes calidades de la corriente directa que las alimentan, esto es, si se entiende por calidad de la electricidad el voltaje y amperaje dentro de rangos que la tecnología actual es capaz de proporcionar, resulta que el rango de voltaje al que puede trabajarse va desde los 1.7 a los 3 V por celda unitaria y el rango de amperaje va desde los 50 mA a miles de *amperes* dependiendo de la capacidad del electrolizador (Sánchez Dirzo, et al., 2014) (González Huerta, et al., 2009) (González Huerta, 2009). Esta versatilidad para responder a múltiples condiciones de operación es una ventaja que sólo las centrales de electrólisis poseen dentro del amplio espectro de las modernas *Plantas de Proceso* y si bien los electrolizadores alcalinos, ver Figura 34 (NEL, 2014) (AJW, 2014), siguen predominando en el mercado, una intensa investigación tecnológica se encuentra en curso para hacer competitivos a los electrolizadores de membrana polimérica y a los electrolizadores de óxidos sólidos de alta temperatura (Yuda, 1995) (SMH, 2010) (Sorensen, 2005).



Figura 34. Electrolizador Alcalino de 2 MW.

Que las centrales de electrólisis puedan operar con la electricidad proveniente de las fuentes renovables constituye uno de los retos más trascendentes de la ingeniería moderna. De hecho a escala de laboratorio y pequeñas plantas piloto ha sido posible conectar electrolizadores a celdas fotovoltaicas (Koukouvinos, et al., 1982) (Stahl, et al., 1995) (Abaoud & Steeb,

1998) (Meurer, et al., 2000) y aerogeneradores (Bechrakis, et al., 2006). El acoplamiento de dispositivos oceanomotrices con plantas de electrólisis apenas empieza a investigarse con prototipos de tipo flotante (Temeev, et al., 2006) y esta tesis se integra a esta novel rama de la ingeniería desarrollando el acoplamiento del *Blowjet* con una celda de electrólisis como una tecnología para almacenar químicamente la energía del oleaje.

4.2 TERMODINÁMICA DEL ROMPIMIENTO DE LA MOLÉCULA DEL AGUA

Una celda electroquímica es un dispositivo que puede producir trabajo eléctrico hacia el exterior como es el caso de las celdas de combustible [$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \mathbf{W}_{\text{eléc}}$] o puede transferírsele trabajo eléctrico desde el exterior como es el caso de las celdas de electrólisis [$\text{H}_2\text{O} + \mathbf{W}_{\text{eléc}} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$] donde la molécula del agua se rompe.

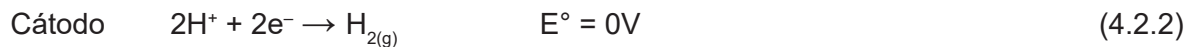
Para llevar a cabo la electrólisis en estos últimos dispositivos se les alimenta de corriente directa, a través de dos electrodos (ánodo y cátodo), los cuales están en contacto con el electrolito, que en el caso de los electrolizadores tipo *PEM (Polymer Electrolyte Membrane)*, es una membrana polimérica que genera movilidad protónica. Al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos, una molécula de agua se oxida en el ánodo, formando átomos de oxígeno, protones y electrones. El oxígeno atómico se encuentra quimi-adsorbido en el electrocatalizador anódico donde se combina con otro átomo de oxígeno para formar el oxígeno molecular, O_2 , energéticamente más estable. Así de manera general se produce la evolución de oxígeno gaseoso que se observa en forma de burbujas que se desprenden del ánodo. Los protones (o iones hidronios, H_3O^+) son atraídos hacia el electrodo negativo, o cátodo, a través de la membrana polimérica, los protones cruzan la membrana estableciendo un flujo constante de los mismos. El electrolito no sólo conduce la carga iónica entre los electrodos sino que también, cierra el circuito eléctrico. En el cátodo los protones que arriban en conjunción con los electrones forman moléculas de hidrógeno, lo que se conoce como evolución o producción de hidrógeno en forma de burbujas que se desprenden del cátodo, ver Figura 35. De manera general se llevan a cabo las siguientes reacciones:

En el ánodo (+) se alimenta agua la cual se descompone y se lleva a cabo una reacción de oxidación con la liberación de oxígeno sobre el electrodo, los electrones circulan del ánodo al cátodo por el circuito externo, dejando iones de carga positiva, los cuales se difunden a través de la membrana de intercambio protónico.

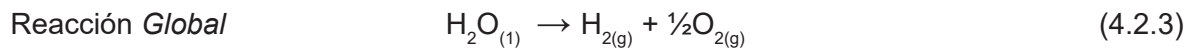


El potencial reversible de reducción (E°) para esta semi-reacción es 1.23V.

En el cátodo (-) se lleva a cabo la reacción de reducción del protón, que en presencia de los electrones, forman el hidrógeno molecular en forma gaseosa que es liberado en este electrodo.



Para esta semi-reacción el potencial estándar es el del electrodo de hidrógeno, 0V. La reacción global en una celda de electrólisis con membrana de intercambio protónico es la correspondiente a la reacción (4.2.3).



El potencial estándar termodinámico de la celda queda:

$$E_{\text{celda}}^0 = E_{\text{C}}^0 - E_{\text{A}}^0 = 0\text{V} - 1.23\text{V} = -1.23\text{V}$$

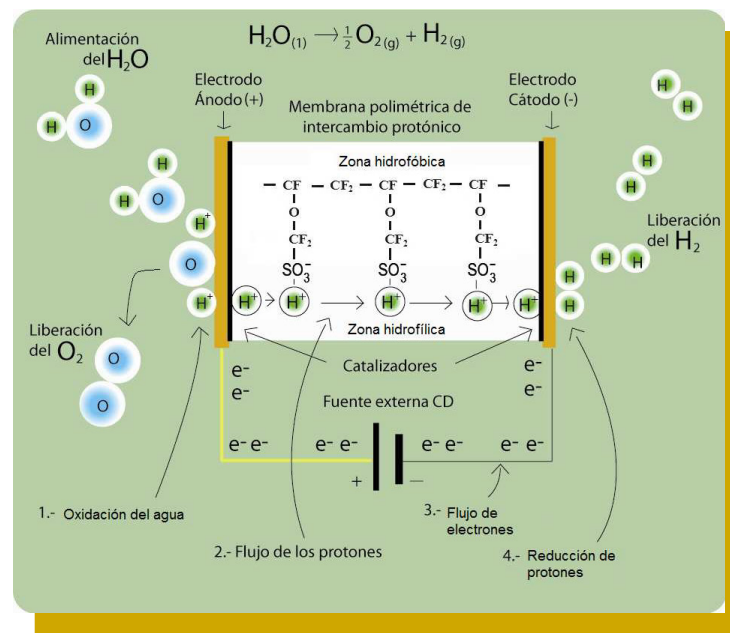


Figura 35. Principio de Funcionamiento del Electrolizador PEM.

La energía teórica para romper la molécula de agua es igual a su entalpía de formación a condiciones estándar: $\Delta H^\circ = -286 \text{ kJ/mol}$. Esta energía está relacionada con el voltaje termoneutral de la celda (V_{tn}°) de electrólisis por la ecuación 4.2.5:

$$V_{tn}^\circ = -\Delta H/nF \quad (4.2.5)$$

Siendo F igual a $96\,494 \text{ C/electrón}$ conocida como constante de *Faraday* y n el número de electrones de valencia ($n = 2$ en el caso de la electrólisis del agua), lo que da:

$$V_{tn}^\circ = 1.48 \text{ V} \quad (4.2.6)$$

Que es el voltaje teórico mínimo para romper la molécula del agua, pero las irreversibilidades propias del proceso hacen que en la práctica tal voltaje se eleve arriba de los 1.7 Volt hasta los 3 Volt . El voltaje termoneutral es el voltaje de referencia el cual se considerará al calcular la eficiencia del proceso de electrólisis. Tal eficiencia se define como lo establece la ecuación (4.2.7):

$$\eta_{tn} = \frac{1.48}{V_{exp}} * \eta_i \quad (4.2.7)$$

Donde V_{EXP} es el voltaje experimental aplicado y η_i es la eficiencia de la corriente definida según la ecuación (4.2.8) (González Huerta, 2009).

$$\eta_i = \frac{\left(\frac{V_{NI}^\circ}{\text{hr}}\right) \left(\frac{96\,484 \text{ As}}{\text{eq}}\right) (2_{eq})}{(I) \left(\frac{36 \text{ s}}{\text{hr}}\right) (24.4_{NI})} \% \quad (4.2.8)$$

I es la corriente eléctrica aplicada a la electrólisis en *Amperes* y V° es el flujo volumétrico de hidrógeno producido en NI/h (litros normales por hora) a condiciones estándar de 25°C y 1 atm , el cual es dado por la ecuación (4.2.9):

$$V^\circ = \frac{13.769 \cdot V_{exp}}{(273.15 + T) \cdot t_{exp}} \quad (4.2.9)$$

Donde T es la temperatura local del experimento en $^\circ\text{C}$, V_{exp} el volumen experimental de hidrógeno en mililitros generado en el tiempo t_{exp} en minutos.

Como ha sido mencionado, el valor de V_{tn}° de la ecuación (4.2.6) no tiene valor práctico, ya que un voltaje $\Delta V > V_{tn}^{\circ}$ debe ser aplicado para obtener una cantidad práctica de los gases de electrólisis. Esto significa que parte de la energía eléctrica suministrada es utilizada para vencer una serie de resistencias del sistema. De esta manera, la diferencia de potencial aplicada puede ser expresada como una suma de términos de potenciales termodinámicos y de disipación cuya suma es descrita por la ecuación (4.2.10):

$$\Delta V = V_{tn}^{\circ} + \eta_c(i) + \eta_a(i) + IR_{sol+cir} + \Delta V_t \quad (4.2.10)$$

Donde $\eta_c(i)$ y $\eta_a(i)$ son los sobrepotenciales catódico y anódico, debido a las velocidades finitas de las reacciones electródicas. El término $IR_{sol+cir}$ crece linealmente con la corriente (i) y corresponde a las pérdidas debidas a la caída óhmica en el electrolito, electrodos y en las conexiones del circuito eléctrico interno y externo, así como otros factores relacionados a la ingeniería del diseño de la celda. El término ΔV_t toma en cuenta el aspecto fenomenológico de inestabilidad que implica el aumento en el voltaje en función del tiempo debido a la degradación y pérdida de actividad de los materiales electródicos y de construcción del sistema, ver Figura 36.

El punto óptimo de desempeño de un electrolizador es al inicio del sobrepotencial por caída óhmica, una vez que sea vencida la zona de sobrepotencial por activación. El potencial se debe limitar por razones prácticas a 3 V por ensamble, ya que un mayor voltaje de operación se promueve procesos de corrosión. Esto trae consigo la necesidad de utilizar materiales resistentes con características especiales. La corriente y el voltaje deben incrementarse progresivamente a medida que se aumenta el número de celdas electrolíticas individuales, dependiendo si el arreglo es en serie o en paralelo. Las ecuaciones de esta sección serán usadas en los cálculos para integrar el electrolizador a la energía generada por el oleaje, basado precisamente en los voltajes y amperajes generados por el *Blowjet* entre los 1.5 y 1.8 voltios y 2 a 200 miliamperios respectivamente.

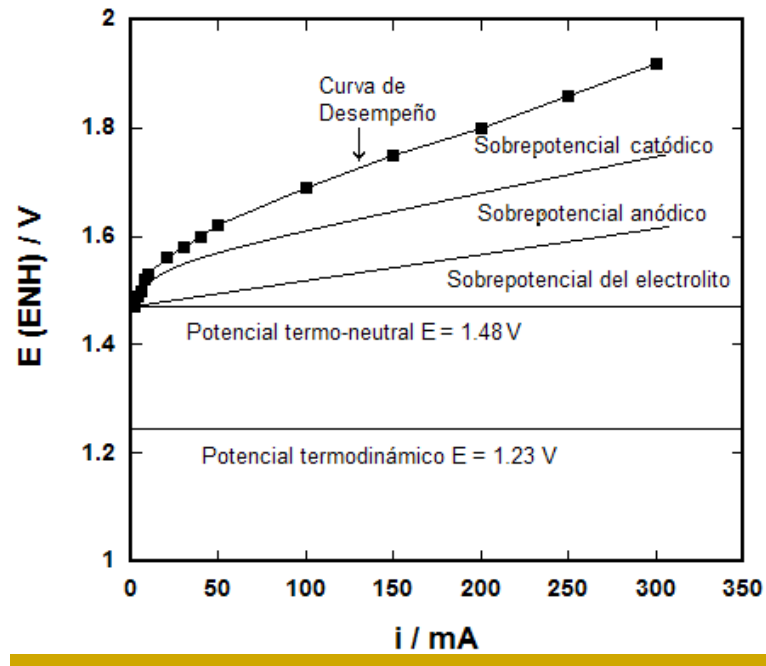


Figura 36. Desempeño del Electrolizador PEM a 25 °C.

4.3 PROCESO *BLOWJET*-ELECTRÓLISIS

Esta tesis resuelve a nivel laboratorio el problema de romper la molécula del agua por medio del jet obtenido de las olas. Termodinámicamente hablando el problema planteado es la ruptura de la molécula del agua con la energía de las olas transformada en energía de chorro: el movimiento del agua puede romper a la molécula del agua. Con ello un nuevo proceso para la obtención de hidrógeno y oxígeno es propuesto y el diagrama básico que lo ilustra se muestra en la Figura 37 (Sánchez Dirzo, et al., 2014).

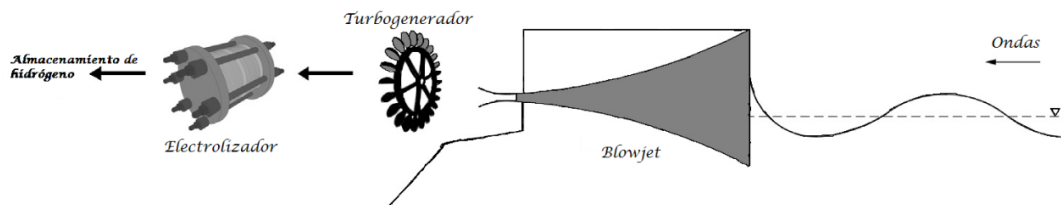


Figura 37. Proceso *Blowjet*-Electrólisis.

La transformación de un chorro de agua en electricidad se lleva a cabo mediante dispositivos conocidos como turbogeneradores que son el acoplamiento de una turbina y un generador. Las turbinas en general se clasifican en tipo *Pelton*, *Kaplan* y *Francis*. Se decidió por una *Pelton* sin descartar las otras en un futuro proyecto. Históricamente el desarrollo de los turbogeneradores ha sido simultáneo y representan el par de máquinas más utilizadas para producir energía eléctrica. El problema que se confrontó es que todos los turbogeneradores están diseñados para operar con chorros continuos, incluso a escala de pequeños laboratorios. El otro obstáculo fue económico, se pretendió adquirir una *Pelton* pequeña pero se corría el riesgo de no servir. Se tomó la decisión de diseñar y construir un turbogenerador completamente casero lo que permitiría desarrollar una tecnología propia y específica para la naturaleza intermitente del chorro de oleajes. Aunque el problema aún se encuentra lejos de una solución satisfactoria los primeros prototipos y ensayos respondieron de manera positiva a los chorros intermitentes, generándose la suficiente potencia para producir electricidad de baja calidad. El diseño de las *Pelton* se guía por medio de la potencia máxima que puede recibir la turbina de un chorro, ecuación (4.3.1):

$$P_{\text{máx.}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4.3.1)$$

Que es precisamente la potencia hidrodinámica del jet. Como las irreversibilidades siempre están presentes, la potencia es menor, ecuación (4.3.2), donde η_{TG} es la eficiencia del turbogenerador:

$$P_{\text{T}} = \frac{1}{2} \eta_{\text{TG}} \rho A v^3 \quad (4.3.2)$$

El número de cangilones se calculó con base en consideraciones geométricas y de la escala experimental del *Blowjet*, y resultó de nueve (Bustos Lira, et al., 2010) para un primer prototipo y ocho para un segundo (Bustos Lira, et al., 2012). Para obtener los cangilones se cortaron cabezas de cucharas soperas de mesa y se integraron a un eje de acrílico para el primer caso y se elaboraron redondos anillos para el segundo prototipo. Finalmente, las turbinas *Pelton* caseras fueron acopladas a una sencilla dinamo al que se le integró un elemental display digital para realizar las lecturas “a ojo”. Dos etapas de construcción se muestran en la Figura 38.



Figura 38. Turbogenerador Construido Exprofeso.

Corridas de cinco minutos (300 segundos) para chorros sintónicos del *Blowjet* (ver capítulo 3) y medidas del voltaje y amperaje, dieron intervalos entre 1.5 a 1.8 voltios y entre 2 a 200 mili-Amperes. Una imagen del *Blowjet* acoplado con el turbogenerador se muestra en la Figura 39.



Figura 39. *Blowjet*-Turbogenerador.

El cálculo de la potencia eléctrica se realiza por medio de la ecuación (4.3.3).

$$P_e = VI \quad (4.3.3)$$

Donde:

P_e = Potencia eléctrica [W]

$V =$ Voltaje [$V=J/C$]

$I =$ Amperaje [$A=C/s$]

La mínima potencia eléctrica obtenida fue:

$$Pe_{\min.} = 0.002 \text{ C/s} * 1.5 \text{ J/C} = 0.003 \text{ W}$$

Y la máxima:

$$Pe_{\max.} = 0.2 \text{ C/s} * 1.8 \text{ J/C} = 0.36 \text{ W}$$

Comparando las potencias eléctricas obtenidas con las potencias hidrodinámicas del capítulo 3, se concluye la baja eficiencia del turbogenerador casero construido expreso que en el mejor de los casos fue del 5% pero que también sugiere el gran potencial eléctrico con el que se dispone si se logra diseñar un turbogenerador que responda a la naturaleza intermitente del *Blowjet*. Algunas ideas ya se tienen y ésta es una de las tareas pendientes a realizar si es que el proceso defendido en esta tesis logra capturar la atención y el financiamiento requerido para el desarrollo de su segunda fase. Con todas sus limitaciones el pequeño turbogenerador cumplió las metas de transformar hasta el 5% de la potencia del *Blowjet*. Suficiente para romper la molécula del agua.

Existen dos tipos de celdas de electrólisis fundamentalmente: las alcalinas y las de intercambio protónico. Las primeras operan hasta tres voltios y como el turbogenerador casero no pasó de los dos voltios quedaron descartadas en esta primera fase pero siguen siendo consideradas en la segunda fase, iniciándose pruebas de caracterización en tal dirección (Moreno Antonio, et al., 2015). Se decidió entonces por una celda de electrólisis de intercambio protónico que además de operar con menores rangos de voltaje poseen adicionales ventajas: son más eficientes, responden rápidamente a impulsos intermitentes de corriente eléctrica o sea pueden ser acopladas a la naturaleza intermitente de los chorros del *Blowjet*, y se hace uso de tecnologías desarrolladas en la *ESIQIE IPN* (Corona Guinto, 2013) para el diseño y construcción de celdas de electrólisis de membranas de intercambio protónico (*PENWE*, siglas en inglés de *Proton Exchange Membrane Water Electrolyser*) de baja potencia. El dispositivo se muestra en la Figura 40.

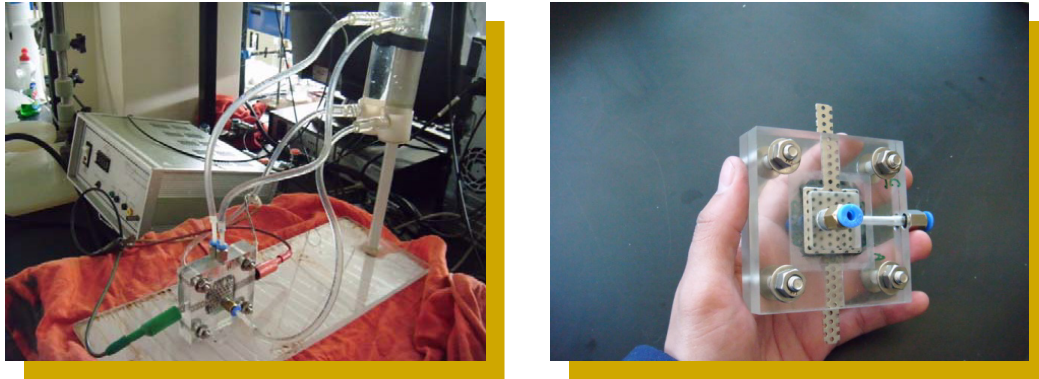


Figura 40. Pruebas a la Celda Electrolytica PEM.

Los electrolizadores *PENWE* a diferencia de los alcalinos usan un electrólito sólido que transporta a los protones, lo que permite que su operación sea sencilla y su respuesta más rápida. Al no manejar electrolitos líquidos los gases hidrógeno y oxígeno se generan con alta pureza química (arriba del 99.999%). La estructura central de un *PENWE* es el ensamble membrana-electrodos (*MEA* por sus siglas en inglés, *Membrane Electrodo Assembly*) es aquí donde el hidrógeno y el oxígeno se forman electroquímicamente a partir del agua y una potencia eléctrica. Un modelo que describe la estructura general de un *PENWE* lo proporciona la Figura 41.

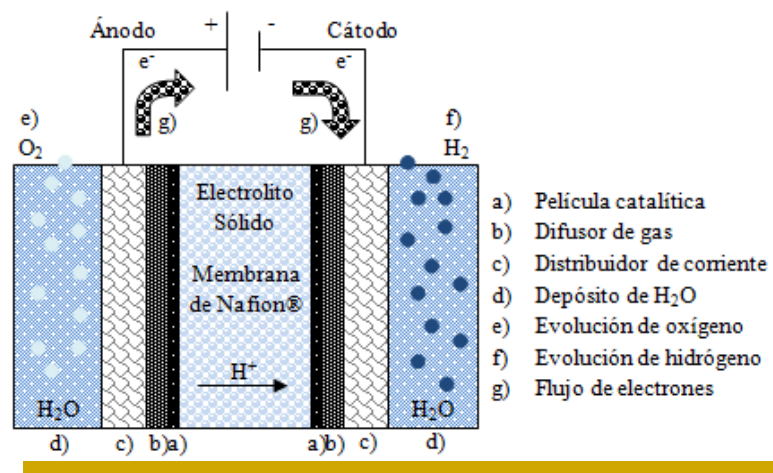


Figura 41. Estructura del Electrolizador PEM.

Los intervalos de voltaje y amperaje aplicados fueron, 1.5-1.8 V y 2-200 mA, utilizando la técnica de cronopotenciometría. Esta técnica se ejecuta, utilizando un galvanostato, el cual

es un dispositivo que permite generar pulsos eléctricos a diferentes amperajes a tiempos específicos, dando como resultado un potencial con el objetivo de caracterizar las celdas de electrólisis y con ello mostrar sus intervalos de estabilidad y óptima operación. Es importante destacar que la técnica galvanostática se aplica para garantizar que el tiempo aplicado para cada pulso de corriente debe registrar un potencial constante al menos en los primeros 10 s, si esto no se observa se debe dar un tiempo mayor al pulso de corriente hasta observar un potencial constante, esta respuesta indica la estabilidad de los electrodos y el adecuado desempeño del sistema, si no se logra un potencial constante en un tiempo de 60 s, se requiere cambiar el ensamble membrana electrodo. De la respuesta *Voltaje vs. tiempo*, ver Figura 42, con los pulsos de corriente aplicada se obtiene la curva característica *Corriente vs. Voltaje*, ver Figura 43. En este caso el galvanostato operó como un simulador de un generador eléctrico para establecer las bases de diseño de la celda de electrólisis que se podría acoplar al *Blowjet*.

El comportamiento potenciométrico de una celda es una medida de la estabilidad eléctrica de la celda ante diversas magnitudes de amperaje aplicado, dando una respuesta de voltaje contra tiempo. Se ha dicho que una ventaja del proceso de electrólisis es que se puede llevar a cabo tanto con corrientes eléctricas intermitentes o continuas; la segunda ventaja definitiva es que opera a bajos voltaje: en otras palabras, la corriente eléctrica requerida para mantener el proceso de electrólisis de agua no tiene que ser de alta calidad. Los voltajes y amperajes obtenidos del turbogenerador casero fueron aplicados con el galvanostato para caracterizar la celda de electrólisis para adaptarla a la naturaleza intermitente del *Blowjet*, el comportamiento obtenido de la misma se muestra en la Figura 42. Una variable importante es el tiempo del pulso de corriente: para que se pueda llevar a cabo la electrólisis se debe observar un voltaje estable a un determinado tiempo, esto determina el tiempo mínimo que debe durar el pulso de corriente para que se lleve a cabo el proceso de electrólisis. En la Figura 42 se muestra la respuesta *Voltaje vs. tiempo* del electrolizador, se puede observar que presentan voltajes constantes después de 10 segundos, en el inserto de esta figura se muestra la respuesta de los 10 primeros segundos, se puede ver que a bajas intensidades de corriente aplicada el tiempo requerido para obtener un potencial constante, por lo que se puede concluir que se requieren pulsos de corriente de al menos 10 segundos.

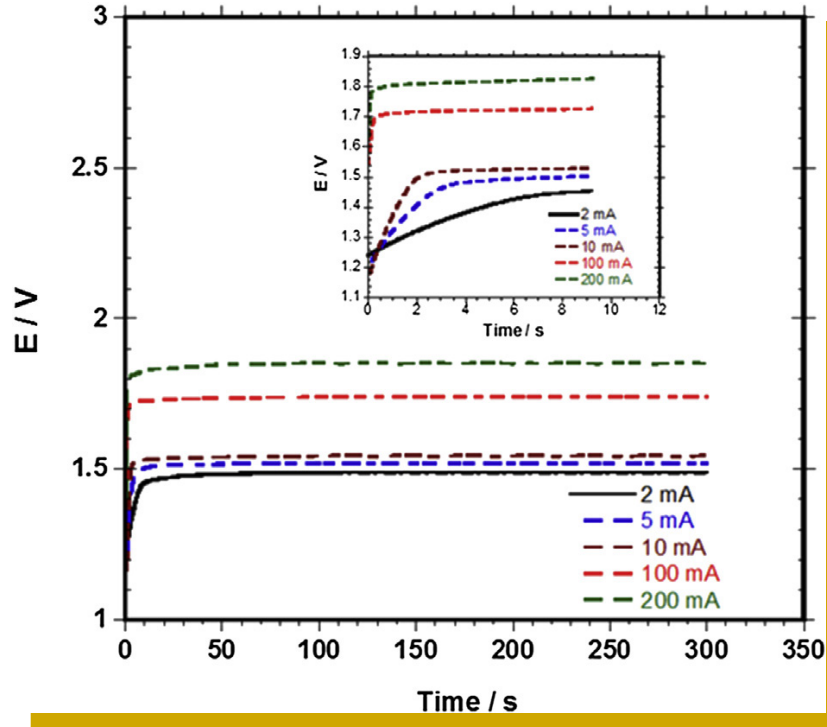


Figura 42. Respuesta del Electrolizador a la Corriente del *Blowjet*.

De la Figura 42 se obtiene la curva característica del electrolizador, Figura 43, en esta curva se pueden ver dos zonas características, la primera se observa a bajas densidades de corriente, en un intervalo de 5 a 30 mA, donde se muestra un comportamiento no lineal del voltaje respecto a la corriente, esta zona está controlada por la velocidad de las reacciones electroquímicas, anódica y catódica y tiene que ver con el material de los electrodos. A densidades de corriente mayores de 30 mA, se observa una relación lineal del *voltaje vs corriente*, a la cual se le denomina zona óhmica, y es en esta zona donde se debe operar un electrolizador para obtener una cantidad de hidrógeno razonable.

Las figuras 42 y 43, muestran que los mejores intervalos de operación de la celda de electrólisis unitaria son los situados entre 50 y 200 mA y entre un voltaje de 1.65 y 1.9 V.

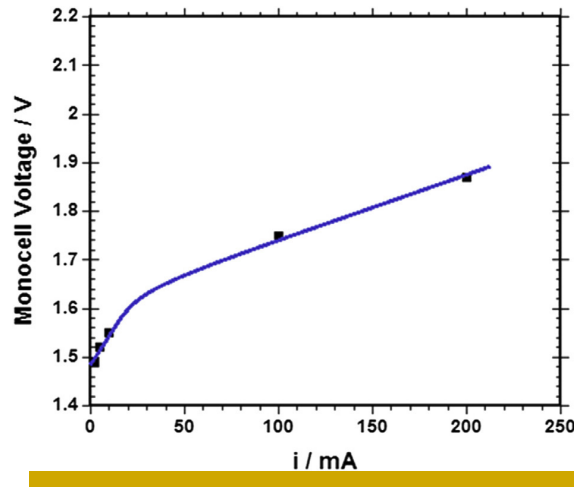


Figura 43. Curva de Desempeño del Electrolizador PEM.

Para determinar la eficiencia se midió el hidrógeno generado a 100 mA (0.1 A) y 1.7 V, y se obtuvieron 5 ml de hidrógeno en 5.7 minutos de operación, esto nos da un flujo volumétrico de $5\text{ml}/5.7\text{min} = 0.877\text{ml}/\text{min}$ a las condiciones del laboratorio. Tal flujo a condiciones normales que permiten estandarizar la información es, utilizando la ecuación (4.2.9) para V° de $\sim 0.04\text{NI}/\text{h}$. A 200 mA y 1.9 V, haciendo el mismo procedimiento: el volumen a condiciones normales es $V^\circ \sim 0.08\text{NI}/\text{h}$. Esto da una eficiencia en corriente para la primera medición de 88.99% y para la segunda de 90.58% según la ecuación 4.2.8. Finalmente utilizando la ecuación (4.2.7) calculamos la eficiencia energética que es para el voltaje experimental de 1.7V de $\eta_{\text{tn}} = \frac{1.48}{1.7} \times 88.99\% = 75.85\%$ y la eficiencia energética para el voltaje experimental de 1.8 de $\eta_{\text{tn}} = \frac{1.48}{1.8} \times 90.58\% = 74.48\%$, que a escala industrial y utilizando electrolizadores convencionales alcalinos caerían a menos del 70% (Yuda, 1995).

4.4 EFICIENCIA DEL PROCESO

De la Figura 5 se obtiene la Figura 44 con los datos actualizados de este párrafo.

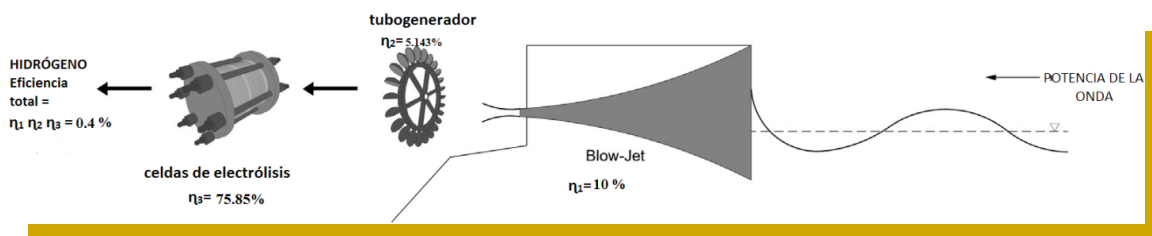


Figura 44. Eficiencia de Cada Componente del Proceso.

El análisis energético etapa por etapa es el siguiente:

A) Eficiencia del *Blowjet*. Existen dos puntos de vista:

El primero, desarrollado cuantitativamente en (Chávez Cárdenas, 2010) calcula la eficiencia con base en el cálculo de la energía que entra al dispositivo y la energía que sale del mismo. Hasta aquí no hay problema ya que la eficiencia es el cociente del último término entre el primero. Es una eficiencia energética. Los cálculos sitúan un promedio del 8% que por razones prácticas aquí se redondea a 10%.

El segundo, desarrollado aquí, parte del hecho de que, del *Blowjet*, no nos interesa la energía del chorro que genera sino la energía que transporta en la unidad de tiempo, o sea la potencia del mismo. Se acepta universalmente la poca disipación que la energía de la onda sufre en su recorrido por los océanos hasta su llegada a las costas, es evidente entonces la enorme cantidad de *joules* de energía captada por *La Bufadora* o un *Blowjet* costero comparada con la energía que podrían emitir, las bajas eficiencias del primer cálculo por tanto se muestran razonables. Cosa diferente sucede con la *Potencia*: la teoría lineal predice una potencia de $\sim 1000H^2T$ W/m en aguas profundas, lejos de las costas. La teoría no lineal de *Stokes* introduce un factor de corrección que predice un incremento de la potencia a medida que subimos por la costa, esto es, se produce una *Amplificación* o sea un incremento de la *Potencia de Onda* entonces, *La Bufadora* y los resultados del comportamiento del *Blowjet* han resultado una corroboración cualitativa a predicciones de teorías aceptadas. Esto sustenta el hecho de que la valoración termodinámica del *Blowjet* para su aplicación en ingeniería no debe buscarse en su eficiencia energética sino en su capacidad de *Amplificación* que puede ser cuantificada por medio del *Factor de Amplificación de Potencia* (FAP) definido como:

$$FAP = \frac{P_H}{P_o} = \frac{\frac{1}{2}\rho A v^3}{1000DH^2T}$$

Donde:

P_H = Potencia Hidrodinámica del jet [W]

P_o = Potencia de onda lejos de costa [W]

ρ = Densidad del agua [kg/m³]

A = Área de salida del *Blowjet* [m²]

v = Velocidad del jet [m/s]

D = Diámetro de entrada del *Blowjet* [m]

H = Altura de onda [m]

T = Periodo de onda [s]

Esta definición tiene una ventaja adicional: la comparación de *Amplificación* se realiza respecto al *Estado del Mar* lejos de costa, esto es, evita involucrar las complejidades del tren de ondas en el momento en que la onda “siente” el fondo marino. La futura investigación del *Blowjet* por tanto no requerirá mediciones en su entrada inmediata, no será necesario. Lo único que se necesitará será medir su velocidad de salida y con ella su *Potencia Cinética*. Aplicar esta práctica y sencilla definición para calcular el FAP a los resultados de la tabla 2, genera los siguientes resultados, tabla 3:

Tabla 3. Factores de Amplificación de Potencia del *Blowjet*.

S	α [°]	H [m]	T [s]	$v_{\text{máx}}$ [m/s]	P_o	P_H	FAP
1/3	10	0.12	0.8	3.48	3.87	29.08	7.5
1/3	10	0.12	1.0	15.33	4.84	2485.85	513.78
1/3	10	0.2	1.4	31.19	18.82	20936	1112.67
1/2	0	0.08	0.8	12.89	1.72	1477.77	859
1/2	0	0.08	1.0	21.34	2.15	6705.52	3118.27
1/2	0	0.08	1.2	16.33	2.58	3004.75	1164.41
1/2	0	0.08	1.4	26.00	3.01	12127.4	4028.3
1/2	0	0.12	0.8	15.29	3.87	2466.45	637.21
1/2	0	0.16	1.0	22.70	8.60	8070.99	938.31
1/2	10	0.08	0.8	13.00	1.72	1515.03	881.19
1/2	10	0.12	1.0	16.15	4.84	2906.48	600.71
1/2	10	0.16	1.0	21.12	8.60	6500.26	755.7
2/3	0	0.08	0.8	4.68	1.72	70.73	41.11
2/3	0	0.08	1.0	9.16	2.15	530.32	246.61
2/3	0	0.12	1.0	11.18	4.84	964.22	199.28
2/3	0	0.16	1.0	12.18	8.6	1246.78	144.95
2/3	10	0.08	0.8	13.21	1.72	1590.60	924.59
2/3	10	0.08	1.0	12.76	2.15	1433.51	666.63
2/3	10	0.12	0.8	10.05	6.88	700.4	101.78
2/3	10	0.16	1.0	10.88	8.60	888.66	103.30

B) Eficiencia del Turbogenerador

La mejor respuesta del turbogenerador se encontró generando 0.2 A y 1.8 V siendo la eficiencia calculada del balance de energía en el turbogenerador, $\eta_{TG} = P_e/P_{CH}$:

$$\eta_{TG} = VI/(1/8) \pi \rho d^2 v^3 = 0.2 \cdot 1.8 / 7 = 5.143\%$$

En mejorar el diseño del turbogenerador se encuentra el mayor porcentaje de mejora del proceso.

C) Eficiencia de la celda de electrólisis

Como quedó establecido en el último párrafo de 4.3, la mejor eficiencia energética de la celda de electrólisis fue del 75.85%

La eficiencia total del proceso considerando críticamente la eficiencia energética del *Blowjet* es: $\eta = \eta_b \eta_{TG} \eta_{CE}$ se estimó, bajo tal *Estado del Mar*, en:

$$\eta = (0.1)(0.05143)(0.7585)$$

$$\eta = 0.4 \%$$

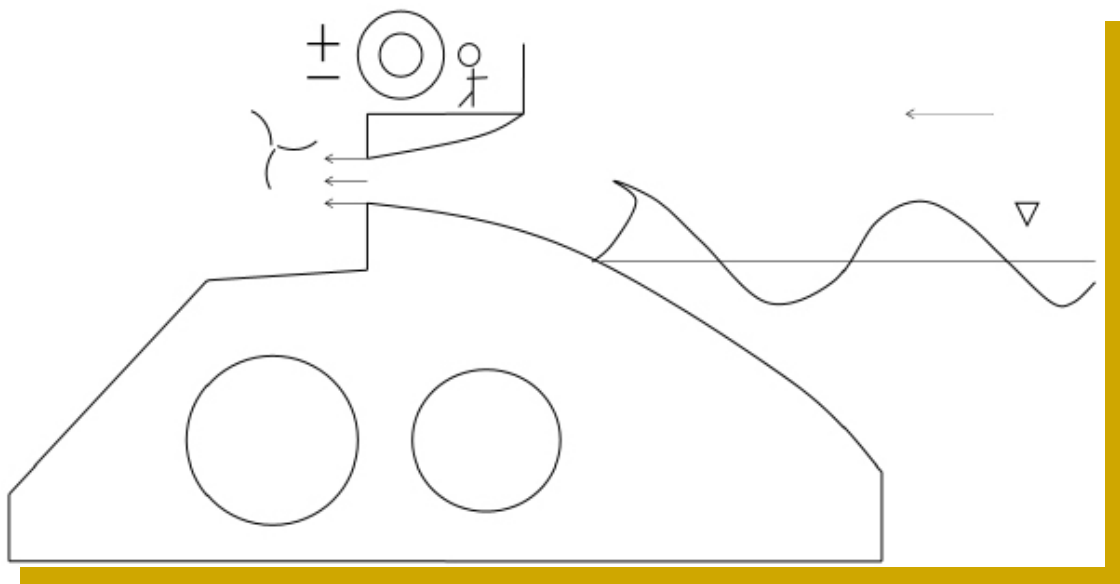
Es evidente que el sistema puede ser mejorado en sus tres etapas de transformación energética. En particular se requiere un diseño diferente para que el turbogenerador opere bajo el régimen intermitente del oleaje.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4

En el capítulo 1 dimos un intervalo de eficiencias del 1 a los 18%, basados en estimaciones y cálculos bibliográficos para caracterizar termodinámicamente el proceso, de las ondas al hidrógeno, defendido en esta tesis. Tal intervalo indica claramente el amplio espectro que puede ser mejorado. Las mejoras abarcan desde el rediseño del *Blowjet* para acercarnos al ideal “sintónico” y con ello alcanzar la máxima potencia cinética del chorro, pasando por el rediseño del turbogenerador, hecho caseramente y no contemplado en el proyecto original, hasta terminar con el rediseño de la celda de electrólisis para que adquiera mayor capacidad de generación de hidrógeno adicionando la construcción de sistemas de almacenamiento tanto para éste como para el oxígeno. Es importante insistir en que la

valoración del *Blowjet* debe incluir los valores de *Factores de Amplificación de Potencia*, como criterios de desempeño mucho más adecuados que la valoración de sus eficiencias energéticas. El modelo para escalar a un sistema a escala piloto, considerando estas mejoras, se encuentra por tanto establecido.

CONCLUSIONES GENERALES, APORTACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN



“Sólo tiene sentido ocuparse del futuro si es para diseñarlo” (Reséndiz Núñez, 2013).

“En este estudio no se pretende llegar a utópicas exactitudes teóricas, sino, más modestamente, a aceptables aproximaciones prácticas” (Iribarren Canavilles & Nogales y Olano, 1954).

El desarrollo de tecnologías para aprovechar las energías marinas ha pasado, y seguirá haciéndolo todavía, por un sinnúmero de ensayos que empiezan a mostrar diversos resultados positivos, incluso, sobresalientes. Esta tesis concluye una primera etapa (un poco dispersa por diversas causas provenientes de la ignorancia ante cómo enfrentar un nuevo reto tecnológico), que tuvo como meta vincular el fenómeno de *La Bufadora* con el más elemental dispositivo para su reproducción y control: el *Blowjet*. Este aparato hidrodinámico de sintonización y amplificación de ondas marinas generó chorros de agua que al ser dirigidos contra sencillos turbogeneradores tipo *Pelton* produjeron corrientes eléctricas continuas de baja calidad, con menos de dos voltios en un intervalo de amperajes entre 2 y 200 mA. Con estas bajas corrientes eléctricas es posible romper la molécula del agua en sus componentes hidrógeno y oxígeno dentro de celdas de electrólisis de membrana protónica. Este resultado es fundamental si se reflexiona que en la actualidad, la producción industrial de hidrógeno proviene del metano y, el oxígeno, se obtiene de la condensación del aire: mientras el primer proceso es relativamente económico no deja de involucrar a los hidrocarburos y, el segundo proceso, es complicado y caro vinculado a bajas temperaturas y etapas de destilación. Ambos procesos integran un mayor número de etapas significativas para alcanzar sus fines que el proceso defendido en esta tesis. El obtener ambos elementos de un solo proceso elemental que integra fuentes de energía renovable como lo es la energía del oleaje con técnicas modernas de electrólisis, constituye una novedosa propuesta a escala de laboratorio digna de tomarse en cuenta para un posible escalamiento a nivel de planta piloto.

De hecho, en el mercado, no existen ni *blowjet's*, ni turbogeneradores que respondan de manera eficiente al potente pero intermitente chorro que genera éste y, tampoco existen, celdas de electrólisis (ni poliméricas ni alcalinas) que completen el nuevo proceso. Integrar un nuevo proceso es bastante complicado pese a la sencillez que podría aparentar su resultado final. El proceso propuesto es lo suficientemente sencillo como para que un bachiller pueda comprenderlo pero lo suficientemente complejo para sugerir mayor investigación tecnológica con la meta de escalarlo y ponerlo a prueba en mar abierto.

Los resultados obtenidos en esta primera fase del proyecto permiten el rediseño de todo el proceso desde la construcción económica del *Blowjet* hasta el rediseño de la capacidad de generación de los electrolizadores pasando por el rediseño del turbogenerador. La construcción del *Blowjet* puede ser realizada utilizando materiales como la arcilla, yeso o concreto. Pueden ser utilizados nuevos materiales porosos y de baja densidad o plásticos

recicladados y tratados como los usados para construir las nuevas barcasas de *Xochimilco*. Conociendo que el perfil parabólico es el que menor resistencia opone al movimiento del fluido y que el *Blowjet* puede ser adaptado a un elemental bloque unitario, el vaciado en concreto parece ser la opción más atractiva como se muestra en la Figura A.

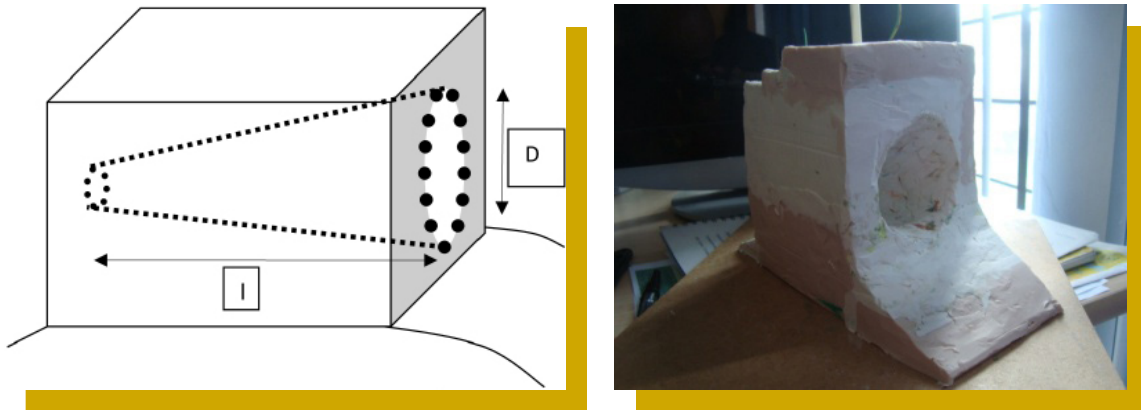


Figura A. *Blowjet* Formando Parte de un Bloque Unitario.

Aplicando, con todas sus limitaciones predictivas, la regla establecida en el capítulo tres en el sentido de que el mejor comportamiento del *Blowjet* es cuando 1.- Su eje se coloca horizontal con el nivel del agua marina $\alpha=0$, 2.- El mejor porcentaje de sumergimiento es $S/D=5/12$, 3.- La mejor relación H/S es la unidad y 4.- La mejor relación L/l es 5.

Siguiendo esta regla y aplicándola a un *Estado del Mar* fijo por ejemplo de longitud de onda $L=5.6$ metros y una altura de $H=0.1$ metro (que corresponden al oleaje observado en *Puerto Morelos*, ver (Alatorre Mendieta, 2003, pág. 44), las dimensiones geométricas de un *Blowjet* para capturar tal ola serían: $l=5.6/5=1.12$ m de longitud y $D= 12*H/5=0.24$ m de diámetro de entrada. Los resultados son razonables si los comparamos con los datos de laboratorio.

Otra cosa puede suceder si predecimos las dimensiones de otro *Blowjet* para un *Estado del Mar* superior, por ejemplo, de una longitud de onda de 39 m y una altura de 0.5 metro (un mar “tranquilo” de *Ensenada*, ver (Pérez Peña, 2013), las dimensiones del *Blowjet* serían siguiendo el mismo método: $l=39/5=7.8$ m de longitud y $D= 12*0.5/5=1.2$ m de diámetro de entrada. Ambas dimensiones son razonables y accesibles para la construcción de prototipos que enfrenten el mar abierto. Sólo con pruebas reales podremos afinar el modelo generado en esta tesis.

Resumiendo, para mejorar el proceso sustentado en esta tesis debe pasar por las siguientes etapas: 1.- Un estudio científico completo del fenómeno de *La Bufadora*, abarcando las condiciones meteorológicas donde se asienta, el perfil de la caverna, sus entradas y salidas, la velocidad de sus chorros y su posible dependencia con las estaciones del año, su comportamiento ante tormentas y ciclones, los *Estados del Mar* en el año, la batimetría del litoral, su historia geofísica y el impacto social, económico, ecológico y cultural sobre las sociedades que se han asentado a sus alrededores en el transcurso del tiempo. Toda esta información permitiría perfeccionar las bases para el diseño y construcción de los futuros *Blowjet*, 2.- Construir el *Blowjet* de materiales comunes como el concreto, esto disminuiría ostensiblemente los costos, 3.- Diseñar y construir turbogeneradores específicos para aprovechar al máximo el energético chorro intermitente del *Blowjet*: un diseño diferente a los actuales generadores integrando ruedas magnéticas de inercia permitiría movimientos permanentes para generar corriente continua de bajo voltaje, pese a la intermitencia del chorro, 4.- Diseñar y construir celdas de electrólisis para su armado modular tanto de tecnología *PEM* como convencionales alcalinas, esto permitiría una fácil aplicación para obtener hidrógeno y oxígeno, a cualquier escala industrial y, finalmente, 5.- Iniciar el desarrollo para el almacenamiento de los gases hidrógeno y oxígeno siendo las tecnologías de compresión, las más baratas y conocidas, esta propuesta es ampliada en el último párrafo.

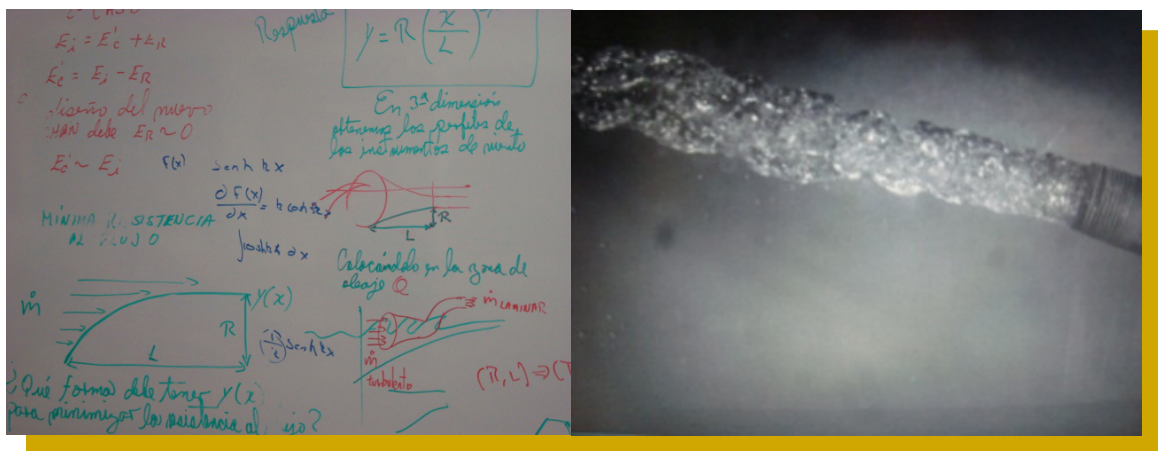
A través de la historia, el requerimiento de protección marítima portuaria fue más fácil solucionarlo con infraestructura disipadora de la energía del mar que la alternativa de concentrar y aprovechar tales recursos. Los intentos por usar la energía de los océanos surgieron de manera independiente al desarrollo de los diques de protección disipadores de la energía del oleaje y, mientras los conceptos y diseños de ingeniería de estos últimos se han mantenido de manera conservadora en los últimos dos mil años, las innovaciones e ideas para desarrollar a los primeros durante los últimos 40 años se encuentran entre las áreas más dinámicas de la actual revolución científica-técnica. El concepto *Blowjet* sugiere una manera de fusionar las milenarias tecnologías de construcción de los diques rompeolas con las modernas tecnologías que permitirían concebir tales diques como la base de novedosas *Plantas de Proceso, Centrales de Energía de Fuentes Renovables y Sistemas de Almacenamiento de Insumos Químicos* que es lo que intenta significar el dibujo presentado al inicio de estas conclusiones. Cada bloque del nuevo concepto de dique es unitario y modular: se puede reproducir en serie y contiene todo el proceso de transformación de la ola al jet y todo el proceso de transformar el jet en hidrógeno y

oxígeno, consecuencia de romper la molécula del agua. El diseño modular de las plantas de electrólisis también permite armarlas bloque tras bloque a lo largo de lo que sería la longitud del dique, de tal manera que, cada uno de los monolitos, además del *Blowjet* y el turbogenerador, sostiene una planta de electrólisis unitaria que, dependiendo de la longitud del dique final y del *Estado del Mar*, que son las variables que condicionan la energía del oleaje a ser capturada, determinarían por consiguiente la capacidad de producción de la planta de electrólisis, pero hay más: por sus características de monolito, cuando los bloques unitarios son unidos, tal ensamble sugiere una novedosa manera de almacenamiento como gases a presión de los elementos obtenidos por la ruptura del agua, el hidrógeno y el oxígeno: el dique también tendría la función de operar como sistema de almacenamiento (de aquí los círculos en la base del monolito del dibujo en cuestión que representan los recipientes de almacenamiento). Un dique *Blowjet* de eficiencia total del 10% (de la onda al hidrógeno), con una longitud de 10 000 metros sobre el litoral de *Ensenada* cuya potencia por metro de frente de ola es estimada en 10 kW/m, con longitudes de onda de 56 m y alturas promedio de 0.5 metros, ver (Pérez Peña, 2013), equivale a estar generando 72 toneladas de hidrógeno y 576 toneladas de oxígeno por día. Las actuales técnicas de almacenamiento de gases a presión hacen posible por consiguiente concebir sistemas de almacenamiento dentro del mismo dique. Las dimensiones del *Blowjet* para estas condiciones del mar serían, como ya vimos párrafos arriba: **$l=7.8\text{m}$** de longitud y su diámetro de entrada de **$D= 1.2\text{m}$** . Si los cilindros de almacenamiento interno tuvieran el diámetro de un metro, podrían almacenar alrededor de 560 toneladas de hidrógeno y 4500 toneladas de oxígeno a 700 atmósferas que es una presión que la moderna tecnología es capaz de proporcionar. Estamos hablando de cantidades industriales de insumos químicos almacenados en menos de dos meses de operación considerando un factor de planta del 10%, muy por debajo de las potencialidades de una *Central-Blowjet*, listos para su uso inmediato en todas las *Plantas de Proceso* donde el hidrógeno y el oxígeno son insumos básicos: desulfuradoras de gasolinas, sintetizadoras de amoníaco, productoras de fertilizantes, desalinizadoras marinas, productoras de sodio, cloro, potasio y ácido clorhídrico y centrales eléctricas, entre otras industrias clásicas, levantadas sobre el litoral, precisamente junto a ese gran dique multipropósito (Mendoza Baldwin, et al., 2014) (Abanades, et al., 2014): se puede así concebir un conglomerado de diversas empresas tradicionales alimentadas con la energía de las olas que trabajando en conjunto, abatirían los costos, elevarían la eficiencia de sus procesos y disminuirían el impacto sobre la naturaleza que operando por separado, como actualmente lo hacen. Estos resultados son “conservadores” toda vez que en el ejemplo, se han considerado pequeñas eficiencias totales con *Estados del Mar* “suaves” y muy bajos

factores de planta. Evidentemente el modelo mejoraría si se hibridara con el resto de las renovables en particular la energía del viento, solar y resto de las energías marinas, que en las costas se encuentran en abundancia.

Siguiendo estas futuras líneas de investigación se observa que las anteriores propuestas no sólo se aplican a los diques como fundamentales obras de la ingeniería universal sino a esas inmensas moles de roca que interaccionan con las olas y las cuales se denominan *acantilados*. Los *acantilados* reúnen las condiciones idóneas para su transformación en la infraestructura básica para sostener novedosas *Centrales de Potencia* basadas en las energías renovables que a su vez alimentan de energía e insumos a las ya mencionadas *Empresas* tradicionales. Estos conceptos serán desarrollados como parte de las tareas a realizar en el futuro próximo.

ANEXOS



No existen explicaciones científicas ni históricas satisfactorias al magnífico fenómeno de *La Bufadora*, apenas aproximaciones que permitieron modelarla a través del *Blowjet*. Por analogías a su naturaleza resonante onda-partículas en chorro, podría ser descrita como una notable antena marina pero también posee la coherencia observada en el láser. Su historia natural no es menos apasionante y se desconoce. Los apéndices que siguen sondean investigaciones futuras en ambos aspectos.

NATURALEZA, ENERGÍA Y POTENCIA DE LAS OLAS (y su relación con el fenómeno de *La Bufadora*)

La zona costera es el límite entre la superficie terrestre y la del cuerpo de agua oceánico. Esta interfase se compone de múltiples y diversos fenómenos entre los que predomina el ir y venir del movimiento oscilatorio conocido como oleaje. Las ondas marinas estudiadas aquí y las que futuras innovaciones del *Blowjet* deberán ajustarlo a las mismas, son producidas por el movimiento del viento sobre la superficie del agua dentro de un área de generación alejada de la costa conocida como *Fetch* (pista de arranque). La energía de las olas es adquirida mediante la transferencia energética proveniente del viento cuya intensidad es función del tiempo que dura tal transferencia y el área del *Fetch*. Es una energía que proviene originariamente del sol, se transfiere al viento y finalmente se almacena en el oleaje, esto es, las ondas marinas son la forma terciaria de la energía solar pero con una característica sobresaliente: su densidad energética es la mayor entre todas las energías llamadas renovables: así la intensidad de la energía solar directa sobre la superficie terrestre es de un promedio de 100-200 W/m², la del viento 400-600 W/m² y la de la onda marina, 2000-3000 W/m², diez veces mayor (Falnes, 1993). Las ondas pueden viajar miles de kilómetros sin disipar su energía y al acercarse a las costas adquieren su conocida forma sinusoidal o armónica, siendo ésta el modelo más simple para su descripción aunque en la realidad se trata de un fenómeno complejo, aleatorio y estocástico que sólo puede ser estudiado mediante la aplicación del modelo de los procesos estacionarios y ergódicos, esto es, considerando un tiempo el cual las fuerzas que generan las ondas se mantienen en equilibrio con las fuerzas que intentan restaurarlas, tal intervalo de tiempo define un *Estado del Mar* en las variables de periodo **T** y altura de la onda **H** que pueden considerarse “estables” dentro del lapso temporal de su estudio (Silva Casarín, 2005). Así, las ondas armónicas se caracterizan por su *periodo T* que es el tiempo en que una onda se completa, su *frecuencia $\nu=1/T$* que es el número de ondas completas por segundo, su *longitud de onda λ* que es la distancia entre las crestas de la onda, su altura **H** que es el doble de la amplitud **A** de la onda y, su celeridad **c** que es la velocidad a la que las ondas viajan y que depende de su lejanía o cercanía a las costas como se estudiará más adelante. A estas ondas que se originan del *Fetch* se les llama olas *Snell* (que provienen de lejos), su forma sinusoidal es bastante familiar a cualquier observador. Después de un largo viaje las ondas entran a una zona conocida como *Surf* donde finalmente terminan rompiendo sobre las playas en un espectáculo acústico, visual y espumeante no por conocido menos

asombroso. El rompimiento del oleaje depende del *Estado del Mar*, la batimetría y forma de la costa, específicamente de su ángulo de inclinación o pendiente que aquí simbolizaremos como β , este fenómeno ha podido modelarse mediante un factor conocido como número de Iribarren o *Parámetro de Similitud Surf* simbolizado como ζ que es una relación específica de cada costa y es definido como $\zeta = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_b}{\lambda_0}}}$ donde β como ya se estableció, es la pendiente de la playa, H_b la altura de la ola que rompe y λ_0 la longitud de onda en agua profunda. Este modelo describe tres formas de rompimiento del oleaje dentro de un rango $1/20 < \tan \beta < 1/5$ ($3^\circ < \beta < 11^\circ$): a) Rompimiento *Surging* (oscilación reflejante de la ola en pendientes pronunciadas) cuando $\zeta > 2$; b) Rompimiento *Plunging* (voluta en picada en pendientes intermedias) cuando $0.4 \leq \zeta \leq 2$ y c) Rompimiento *Spilling* (descretamiento de la ola en pendientes pequeñas) cuando $\zeta < 0.4$ (Mayilvahanan Alagan, et al., 2015) (Cokelet, 1977). El oleaje real se sitúa en múltiples posiciones intermedias dentro de esos límites estadísticos que son criterios auxiliares para su estudio. Físicamente el rompimiento significa la igualdad de la componente horizontal de las velocidades moleculares máximas situadas en la cresta de la ola con la celeridad de la onda ($c = \mathcal{V}_H$), o sea, la velocidad del movimiento molecular se iguala a la velocidad de la onda creándose una corriente de agua que finalmente es la que alcanza la zona de máxima altura dentro de la playa para posteriormente regresar y volverse a repetir el fenómeno (Kirgoz & Sami, 2005)(Iribarren Canavilles & Nogales y Olano, 1954), ver *Figura A.1*.

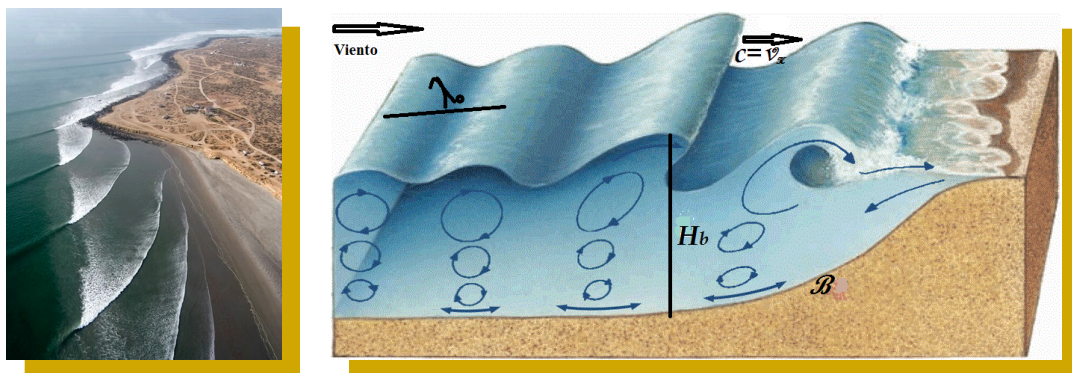


Figura A.1. Olas Snell Rompiendo Sobre la Línea de Costas.

Los vientos generan ondas con rangos de periodo entre 1 y 30 segundos con periodos dominantes durante las tormentas de 5 a 15 segundos. Los buques generan ondas de periodo corto entre 1 y 3 segundos. Los sismos generan tsunamis de periodos largos de

5 a 60 minutos y el sol y la luna generan ondas de mareas de 12 a 24 horas. Las ondas de viento tienen una altura típica de 4 metros que pueden exceder los 7 metros durante las tormentas. Las ondas de buque raramente pasan el metro de altura. La altura de los tsunamis alcanza 70 centímetros lejos de costas y al aproximarse a las mismas se elevan a los 4 metros. La altura de las mareas puede alcanzar más de 12 metros. Las ondas de los vientos son extremadamente complejas y son el producto de la superposición de innumerables ondas de diferentes alturas y periodos.

La investigación de las ondas marinas tiene una larga historia como corresponde a un fenómeno universal (Craik, 2004) (Johnson, 2007), los primeros estudiosos fueron *Aristóteles, Arquímedes, Herón, Plinio el Viejo, Leonardo Da Vinci, Newton, Laplace, Lagrange, D'Alembert, Bernoulli, Euler y Benjamin Franklin*, hasta el siglo XVIII. Iniciando el siglo XIX (1802) un checo desconocido llamado *Franz Joseph von Gerstner* propone la primera solución a la teoría lineal de baja amplitud en aguas profundas sobre las ondas de agua, conocida como *Teoría Trocoidal* por la forma de trocoide en que su modelo describe al movimiento ondulatorio marino (Gerstner, 1802) (Henry, 2008), ver *Figura A.2*.

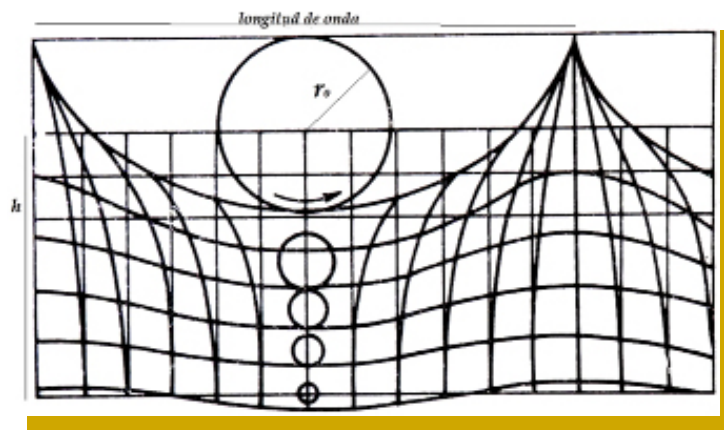


Figura A.2. Ondas Trocoidales de Gerstner, 1802.

El modelo trocoidal de *Gerstner* describe una trayectoria circular de las moléculas cuyo radio disminuye con el fondo según la relación exponencial $r = r_0 e^{-\frac{2\pi h}{\lambda}}$ donde h es la profundidad, λ la longitud de onda y r_0 el radio superior. Este modelo predice que cuando $h = \frac{\lambda}{2}$ la “influencia” de la onda sobre el fondo es despreciable, esto es, el movimiento molecular desaparece. De aquí que la condición $h > \frac{\lambda}{2}$ es suficiente para definir al mar “profundo” lejos de las costas y la condición contraria $h < \frac{\lambda}{2}$ define al mar somero, cerca de

las costas. También permite clasificar a las ondas según el perfil dado por la pendiente $\frac{H}{\lambda}$ siendo H la altura de la onda: Si $\frac{H}{\lambda} < 1/50$ corresponde a las ondas secas y a las mareas, si $1/7 < \frac{H}{\lambda} < 1/50$ corresponde a las ondas trocoidales y cuando $\frac{H}{\lambda} = 1/7$ la ola rompe.

Durante el siglo XIX el modelo fue desarrollada por *Poisson, Cauchy, Brémontier, Challis, Young, Fourier* y *Airy* quien en 1845, describió el modelo más simple para describir las ondas lejos de costas suponiéndolo monocromático (una frecuencia), en dos dimensiones y de pequeña amplitud llamado posteriormente *Teoría Lineal de Ondas*, ver la *Figura A.3.*, que proviene directamente del artículo original (Airy, 1845), de ahí su poca legibilidad pero da idea del gran avance conceptual propuesto por *Airy*.

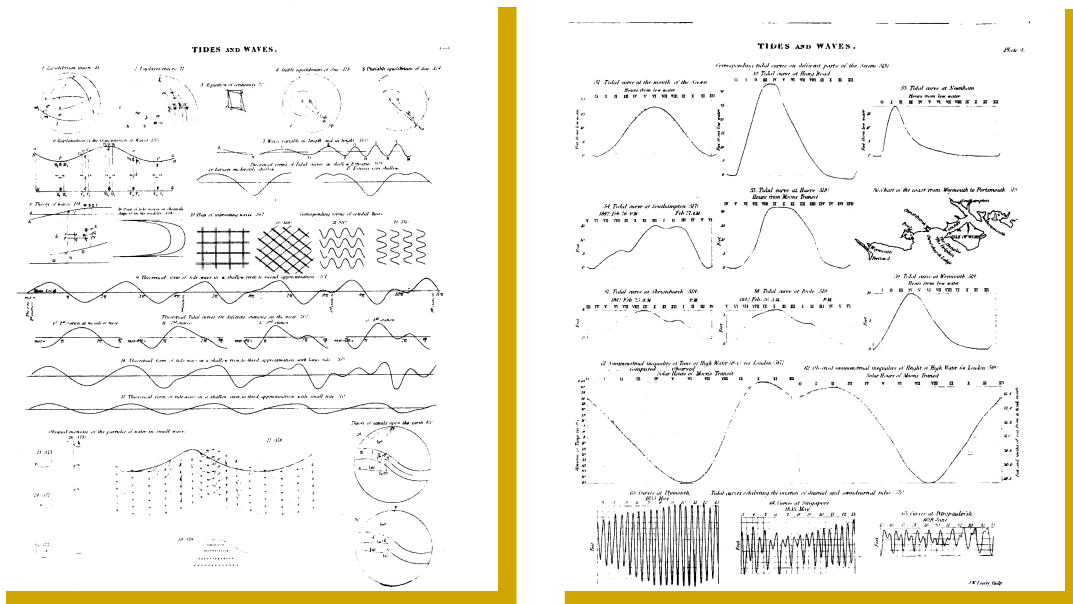


Figura A.3. Ondas Monocromáticas Bidimensionales de Pequeña Amplitud de Airy, 1845.

Los trabajos de *Stokes, Russell, Green, Webers, Navier, Kelland, Lamb, Raleigh, Rankine, Kelvin, Boussinesq* y otros, ampliaron la *Teoría Lineal* abarcando los fenómenos cercanos a las costas desarrollando con ello la llamada *Teoría no Lineal de Ondas* y la *Teoría de la Onda Solitaria* en el transcurso del siglo XIX. La *Figura A.4* da una idea del desarrollo de la teoría en ese siglo, buscando modelar en dos dimensiones el fenómeno ondulatorio marino lejos de costas (Komen, 2013). Cada modelo satisface necesidades particulares pese a que en la realidad las ondas marinas adquieren perfiles de las más variadas formas:

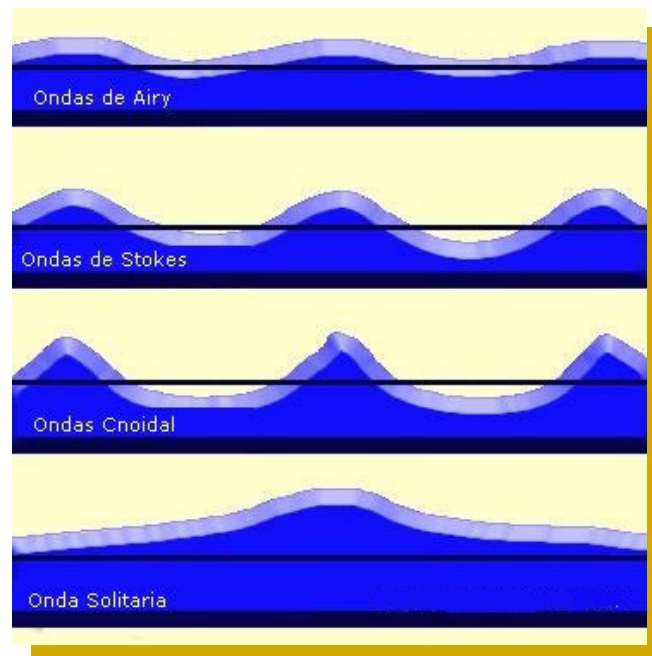


Figura A.4. Contraste Entre los Modelos de Ondas.

En el siglo XX e inicios del XXI, centenas de estudiosos, *Congresos Nacionales e Internacionales* y *Journals* especializados junto al uso del moderno software, hardware y métodos numéricos, hacen de la oceanografía y oceanomotriz, dos ramas de la ciencia y la ingeniería de lo más promisorias para el bienestar de la vida en general, solucionar la pobreza y combatir el cambio climático pese a que distorsiones en las prioridades básicas han hecho que conozcamos más del planeta *Marte* que de los océanos del planeta *Tierra*. En particular, en la actualidad es posible modelar las ondas en tercera dimensión tanto lejos como cerca de las costas así como su interacción con los más diversos obstáculos (Komen, 2013), ver *Figura A.5*.

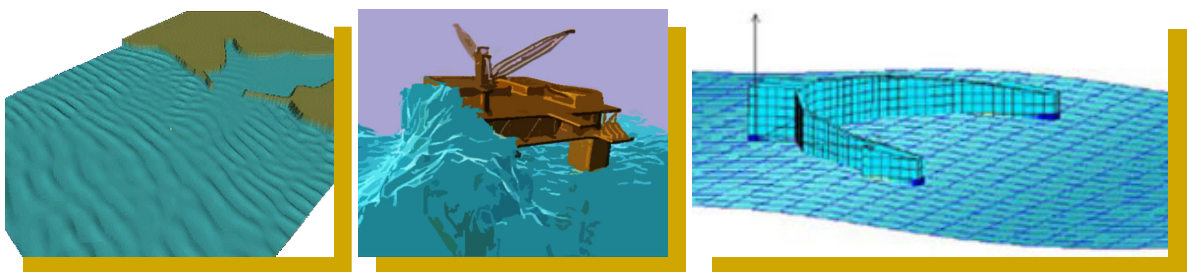


Figura A.5. Modelado Moderno del Fenómeno Ondulatorio.

Considerando, como ya se dijo, el modelo más simple y de amplia aplicación consistente en el movimiento ondulatorio de dos dimensiones y de amplitud pequeña debida a *Airy*, entre otros, tenemos el siguiente planteamiento teórico:

Sea la *Figura A.6* el esquema geométrico y sus símbolos que guiarán los resultados posteriores (Sorensen, 2006): Sean los ejes cartesianos x y z respecto a los cuales la onda sinusoidal se mueve en el eje positivo de x con la celeridad C sobre un fondo situado a una profundidad de $z = -h$. Su longitud de onda es λ , su altura H y su periodo T . Mientras la onda de agua se mueve linealmente en la dirección de x sus moléculas describen órbitas circulares cuyas componentes de velocidad horizontales son u y verticales w , siendo sus coordenadas respecto al centro del círculo de ε y ζ respectivamente a los ejes x y z . El perfil de la curva en la superficie es $\eta(x,t)$ donde η depende del eje x y el tiempo t . La celeridad es $C = \lambda/T$ y la molécula es localizada a una distancia $h+z$ del fondo. Magnitudes definidas de las anteriores con amplia aplicación son: pendiente de la onda $\frac{H}{\lambda}$, profundidad relativa $\frac{h}{\lambda}$, número de onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y frecuencia angular de la onda $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

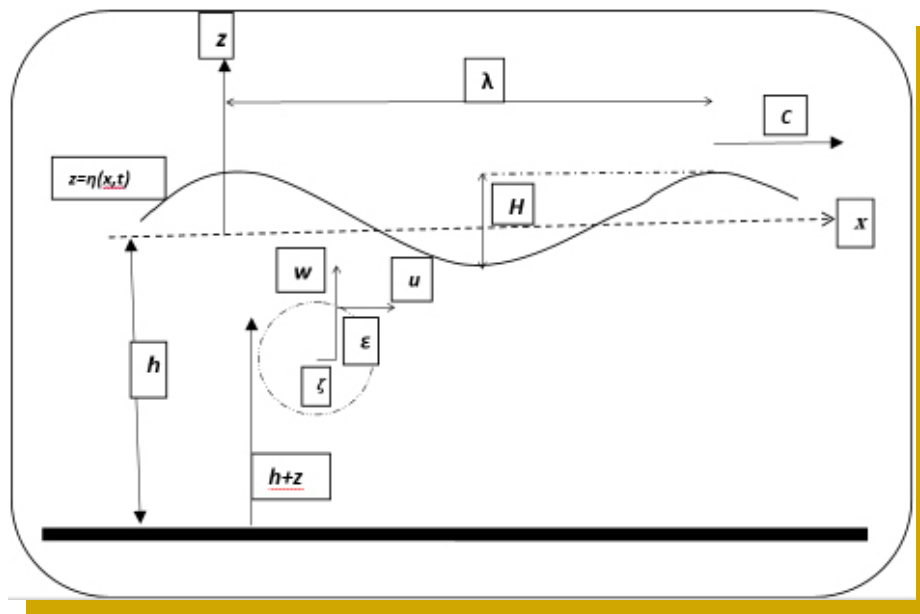


Figura A.6. Onda Armónica, Bidimensional y Monocromática.

Varias condiciones tiene que satisfacer este sencillo modelo:

1. El agua es homogénea $\rho = 0$, incompresible $\nabla \cdot \mathcal{P} = 0$, y sus fuerzas de tensión superficial $\tau \rightarrow 0$, son despreciables.

2. El flujo es irrotacional ($\nabla \times \mathbf{v} = \mathbf{0}$), no hay esfuerzos cortantes en la interfase aire-agua ni en la interfase fondo-agua. Con esto el potencial de velocidad ϕ cumple con la ecuación de Laplace: $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$.
3. El fondo es impermeable, horizontal y estacionario. No hay intercambio de masa, energía y momentum, en particular no hay flujos verticales en el fondo lo que satisface la condición límite: $w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$ a $z = -h$.
4. La presión a lo largo de la interfase aire-agua es constante. Satisface la condición: $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$.
5. La altura de la onda es pequeña comparada con su longitud de onda y el fondo marino.
6. Cuando $z = \eta$ la componente vertical de la velocidad w satisface la ecuación de movimiento: $\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = w$ y la ecuación de Bernoulli: $\frac{1}{2}(u^2 + w^2) + gz + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$.
7. En la superficie cuando $z = 0$, la ecuación de movimiento y la de Bernoulli al ser linealizadas adquieren la forma: $w = \frac{\partial \eta}{\partial t}$ y $g\eta + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$, respectivamente.

Bajo estas condiciones, la solución general para el potencial ϕ tiene la forma:

$$\phi = \frac{gH \cosh k(h+z)}{2\omega \cosh kh} \sin(kx - \omega t)$$

El perfil de la onda $\eta(x,t)$ en la superficie se determina con la condición 7 cuando ϕ se calcula a $z = 0$, siendo su forma:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

Que puede ser escrita con las definiciones de k y ω como:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

A $z = 0$ el potencial ϕ satisface la ecuación:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$$

Al derivar parcialmente el potencial ϕ y sustituir en dicha ecuación obtenemos la expresión:

$$-\omega^2 + gk \tanh kh = 0$$

Despejando la frecuencia angular de onda:

$$\omega^2 = gk \tanh kh$$

Este resultado permite calcular la celeridad de la onda:

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh}$$

o

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}}$$

La celeridad de las ondas de amplitud pequeña es independiente de su altura pero depende de su longitud de onda. De $\lambda = cT$ obtenemos:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}$$

y

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}$$

Las variables que mejor pueden conocerse en el mar son la profundidad h , la altura H y el periodo T entonces, la longitud de onda λ podrá calcularse por tablas, ensayo y error o cualquier otro método matemático mediante la última ecuación, con lo cual, el *Estado del Mar* quedaría determinado. Para un grupo de ondas que se desplazan por el océano, aquellas ondas cuya frecuencia es menor, se desplazarán con mayor celeridad que otras con mayor periodo o al revés: las ondas con mayor longitud se mueven más rápido que las que tienen menor longitud de onda. Durante el desplazamiento de aguas profundas a las costas el periodo es la única magnitud que se conserva constante, el resto: longitud de onda, altura, el perfil de la superficie, la velocidad y la aceleración de las moléculas, el perfil de presión la energía y la potencia cambiarán a medida que la onda se acerca a las costas, esto es, son variables que dependerán de la profundidad relativa $\frac{h}{\lambda}$. Esta magnitud permite clasificar, como antes se dijo, a las ondas según su distancia a las

costas. Así cuando $\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$, en aguas profundas, entonces la relación $\mathbf{tgh} = \frac{2\pi h}{\lambda}$ tiende a uno y la celeridad es: $\mathbf{C}_0 = \frac{gT}{2\pi} = \sqrt{\frac{g\lambda_0}{2\pi}}$ y $\lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$. Otra relación útil se obtiene dividiendo $\frac{C}{C_0} = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \mathbf{tgh} \frac{2\pi h}{\lambda}$. Las ondas que se propagan dentro de un rango de profundidades relativas entre 0.5 y 0.05 son llamadas ondas en transición. Cuando la profundidad relativa es menor a 0.05 la relación $\mathbf{tgh} \frac{2\pi h}{\lambda} = \frac{2\pi h}{\lambda}$ entonces la celeridad es $\mathbf{C} = \sqrt{gh}$ y $\lambda = T\sqrt{gh}$. Estas ondas son llamadas ondas de aguas someras, cercanas a las costas.

Los campos de presión que la onda genera a su paso se obtienen del potencial de velocidad y la ecuación de Bernoulli dando como resultado:

$$P = -pgz + \frac{pgH \cosh k(h+z)}{2 \cosh kh} \cos(kx - \omega t)$$

El primer término calcula la variación de la presión estática y el segundo la variación de la presión dinámica.

Ya que las ondas son portadoras de energía. La energía total de una onda es la suma de su energía cinética y potencial: $\mathbf{E} = \mathbf{E}_c + \mathbf{E}_p$.

La energía cinética se calcula con:

$$E_c = \frac{\rho}{2} \int_0^\lambda \int_{-h}^0 (u^2 + w^2) dx dz$$

$$E_c = \frac{pgH^2 \lambda}{16}$$

Y la energía potencial:

$$E_p = \int_0^\lambda pg(h + \eta) \frac{h + \eta}{2} dx - pg\lambda h \left(\frac{h}{2}\right)$$

$$E_p = \frac{pgH^2 \lambda}{16}$$

La energía total por longitud de frente de la ola es:

$$E_l = \frac{\rho g H^2 \lambda}{8} \left[\frac{J}{m} \right]$$

Cuando $\lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$, aguas profundas:

$$E_l = \frac{\rho g^2 T^2 H^2}{16\pi}$$

Cuando $\lambda = T\sqrt{gh}$, aguas poco profundas:

$$E_l = \frac{\rho g H^2}{8} T\sqrt{gh}$$

Y la energía promedio por unidad de superficie conocida como energía específica de la onda o densidad energética de la misma es:

$$E_\lambda = \frac{E_l}{\lambda} = \frac{\rho g H^2}{8} \left[\frac{J}{m^2} \right]$$

Estas ecuaciones son válidas tanto lejos como cerca de las costas siempre y cuando la altura de las ondas sea relativamente pequeña.

La potencia de la onda es la energía en la unidad de tiempo propagada en la dirección del movimiento de la onda. Se define también como el producto de la fuerza sobre un plano perpendicular al movimiento de la onda por la velocidad del flujo que atraviesa tal plano. La fuerza proviene de la presión dinámica y la velocidad del flujo es la componente horizontal de la velocidad de las moléculas.

Así la potencia por longitud de frente de ola es:

$$P_l = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-h}^0 (p + \rho g z) u dz dt \left[\frac{W}{m} \right]$$

Entonces:

$$P_l = \frac{\rho g H^2 \lambda}{16T} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

$$P_i = \frac{E_i}{2T} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

$$P_i = \frac{\eta_b E_i}{T}$$

Donde a η_b se le define como:

$$\eta_b = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) = \frac{C_g}{C} = \frac{\text{celeridad del grupo de ondas}}{\text{celeridad de onda}}$$

En aguas profundas $h \rightarrow \infty$, $\frac{2kh}{\sinh 2kh} \rightarrow 0$ y por tanto $\eta_b \rightarrow \frac{1}{2}$ entonces $C = 2C_g$.

En aguas poco profundas $h \rightarrow 0$, $\frac{2kh}{\sinh 2kh} \rightarrow 1$ y por tanto $\eta_b \rightarrow 1$ entonces $C = C_g$.

Físicamente η_b es la fracción de potencia que las ondas individuales le transfieren al grupo de ondas para que se desplacen a lo largo del océano creándose, al inicio del grupo que avanza, nuevas ondas que al final desaparecen, al acercarse a las costas todas las ondas se superponen (ondas *swell*) y la celeridad del grupo se iguala a la única onda final superpuesta.

Entonces lejos de costa en aguas profundas, la potencia por longitud de frente de ola es:

$$P_i = \frac{\eta_b E_i}{T} = \frac{\rho g^2 T H^2}{32\pi} = 957 T H^2 \sim 1000 T H^2 \left(\frac{W}{m} \right)$$

Y la potencia por longitud de frente de ola, cerca de costa es:

$$P_i = \frac{\eta_b E_i}{T} = \frac{\rho g H^2}{8} \sqrt{gh} = 3841 H^2 \sqrt{h} \left(\frac{W}{m} \right)$$

La teoría lineal predice el cambio de potencia a medida que la onda se acerca a la costa, disminuye el fondo marino y aumenta su altura. Esta teoría sólo aplica a ondas de pequeña amplitud. Esta predicción se vuelve más explícita con la Teoría No Lineal de Stokes cuya expresión para su potencia P_i^s es:

$$P_i^s = P_i \left(1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 h^6} \right) = \frac{\rho g H^2}{8} \sqrt{gh} \left(1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 h^6} \right)$$

Ya que la longitud de onda es idénticas a la teoría lineal $\lambda = T \sqrt{gh}$, sustituyendo en P_i^s , para tener la potencia sólo en función del fondo h , la altura H y el periodo T obtenemos (Fernández Díez, 2005):

$$P_i^s = \frac{\rho g H^2}{8} \sqrt{gh} \left(1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{\left(\frac{2\pi}{T \sqrt{gh}}\right)^4 h^6} \right)$$

El modelo predice que a un *Estado del Mar* determinado para una costa, la potencia de onda se incrementa a medida que la onda avanza por la playa, disminuye el fondo marino y aumenta la altura, alcanzando un máximo cuando la ola rompe. El fenómeno de *La Bufadora* y el *Blowjet*, muestran que si se permite que la onda siga subiendo, tal potencia seguirá aumentando hasta alcanzar otra potencia máxima que corresponde al chorro de agua que generan. De aquí se sostiene la aseveración del capítulo tres que describió tanto a *La Bufadora* como al *Blowjet*, como dispositivos que cumplen funciones tanto de “antenas marinas” como de “sintonizadores” que se “conectan” de manera preponderante sólo con un intervalo de frecuencias específicas de las ondas marinas: esto permite construir otra explicación a este fenómeno marino. La explicación más extendida conjetura la formación de bolsas de aire al interior de las cavernas que al ser aplastadas por las olas, éstas son rebotadas con mayor intensidad y en el rebote provocan los intensos chorros de agua. La observación del comportamiento de *La Bufadora* no puede sostener tal conjetura. En momentos de tranquilidad marina donde el oleaje es inexistente, *La Bufadora* emite potentes chorros. Esto sólo puede ser explicado con la teoría de las antenas y los sintonizadores nacida de la teoría electromagnética de *Maxwell* aplicada a la teoría de las ondas de agua. Son precisamente las ondas largas con las que la caverna de *La Bufadora* puede “sintonizar y amplificar” hasta convertirlas en los potentes chorros observados sin necesidad de generar gran oleaje. El *Blowjet* demostró que no sólo son las ondas largas las que pueden generar tal fenómeno sino que cualquier onda de cualquier frecuencia lo puede hacer siempre y cuando se pueda construir la “antena y sintonizador” adecuados. Esta perspectiva también fundamenta el hecho de que para valorar un dispositivo como el *Blowjet* es suficiente considerar su *Factor de Amplificación de Potencia* (FAP) más que

su eficiencia energética y que el FAP puede ser calculado respecto a un *Estado del Mar* específico de la costa donde el *Blowjet* fuera instalado y que, para tal cálculo, basta medir las velocidades de salida del *Blowjet* para determinar la potencia hidrodinámica y, la altura de la onda y su periodo en mar profundo, lejos de tal costa, para determinar la potencia del mar en cuestión a ser sintonizada y luego, amplificada.

Hasta el momento esta tesis ha defendido la función de *La Bufadora* y el *Blowjet* como dispositivos energéticos, esto es, transformadores de la energía del oleaje en energía química del hidrógeno, pero este breve análisis teórico fundamenta el hecho de que *La Bufadora* y el *Blowjet* podrían ser considerados como herramientas experimentales para corroborar, ajustar o refutar las diversas teorías que sobre las ondas de agua actualmente existen o mejor, ser el fundamento de creación de nuevas teorías: ¿hasta qué punto esta conjetura es válida? La respuesta es promisoría y vale la pena considerarla en las futuras investigaciones.

¿EXISTEN NARRACIONES DE LOS PRIMEROS POBLADORES SOBRE LA BUFADORA? ¿EXISTEN PALABRAS EN SU LENGUA QUE LA NOMBREN?

Al parecer, nadie esperaba que un fenómeno tan espectacular como *La Bufadora* pasara desapercibido para ninguna cultura. Fueron diversos los pueblos que estuvieron asentados en *Baja California*, en particular en los alrededores de *Ensenada* (Estrada Ramírez & Farldow Espinoza, 2007) (Mixco, 1983). Por esos lares han sido reconocidas al menos cuatro etnias: *Pai pai*, *Kiliwa*, *Cucapá* y *Kumiai* (Piñera Ramírez, 1985) (Noboru & González, 2011) (Ochoa Zazueta, 1978). Por desgracia las recientes investigaciones etnográficas, filológicas y lingüísticas, se encuentran registrando, de hecho, la extinción de tales culturas en particular su lengua (Mixco, 1983) (Álvarez de William, 1975). De las modernas poblaciones de *Baja California*, *Ensenada* es la más antigua. La bahía donde se asienta fue descubierta el 17 de septiembre de 1542 por el capitán *Juan Rodríguez Cabrillo* y en 1602, el navegante *Sebastián Viscaíno*, bautizó a la bahía como *Ensenada de Todos Santos* por haber arribado a inicios del mes de noviembre. En 1804 el gobernador de *Baja California*, *Joaquín de Arrillaga*, adjudicó el paraje de *Ensenada* a *José Manuel Ruiz*, recompensándolo por sus servicios de comandante de la frontera (UNAM, 1982). En 1842, *Ruiz* traspasó el paraje a su yerno *Francisco Gastélum*, que a su vez lo heredó a su hijo *Pedro Gastélum Ruiz* que finalmente la vendió a la compañía norteamericana *International Company of Mexico* quien inicia en 1886 trabajos de urbanización a gran escala, que la prensa de *San Diego* publicaba como el “proyecto de colonización más grande del mundo” pero las inversiones sólo se concentraron en *Ensenada* cuyo trazo urbano lo elaboró el ingeniero *Richard J. Stephens*, catalizando masivamente su papel de puerto marítimo. Hasta aquí una breve historia política de *Ensenada*. Respecto a su historia natural, ninguna referencia escrita (del Barco, 1973) (del Río, 2000) (del Río & Atable Fernández, 2005) y consulta a algunos expertos ha sido exitosa en la búsqueda de respuestas a las preguntas de este anexo. Dos hipótesis se desprenden de esta primera odisea por la historia de *La Bufadora*: la primera es que el fenómeno de *La Bufadora* no impresionaba a los primeros pobladores y posteriormente, tampoco impresionó a los pobladores hispanos y estadounidenses. Se daban el lujo de ignorar tan fascinante fenómeno. Habría que explicar entonces por qué sí impresionó a los pobladores contemporáneos que en la década de los sesentas levantaron la actual infraestructura donde se observa el fenómeno y en los últimos años se planea todo un *Centro Cultural* para su “veneración comercial”. La segunda conclusión es más

audaz: el fenómeno no existió hasta entrado el siglo XX y aquí, el por qué, sería más interesante contestarlo. La conclusión de este anexo es: otra investigación adicional y de mayor profundidad debe realizarse. Finalmente se dejará constancia de dos entrevistas realizadas a dos especialistas vinculados al tema: la primera al doctor *Mike Wilken* y la segunda a la lingüista *Blanca Roldán* (comun. personal). Las breves entrevistas se dejan tal cual se intercambiaron por internet sin ningún tipo de corrección:

Hola de nuevo Mike!

Me olvidé de preguntarte si acaso sabes si existe alguna historia, leyenda, mito o explicación indígena sobre la existencia de *La Bufadora*, esta consulta se debe a Ana María Escofet (Mona) quien me solicita esta información (que a su vez el autor de esta tesis la solicitó a la doctora).

Saludos de nuevo y gracias de antemano:

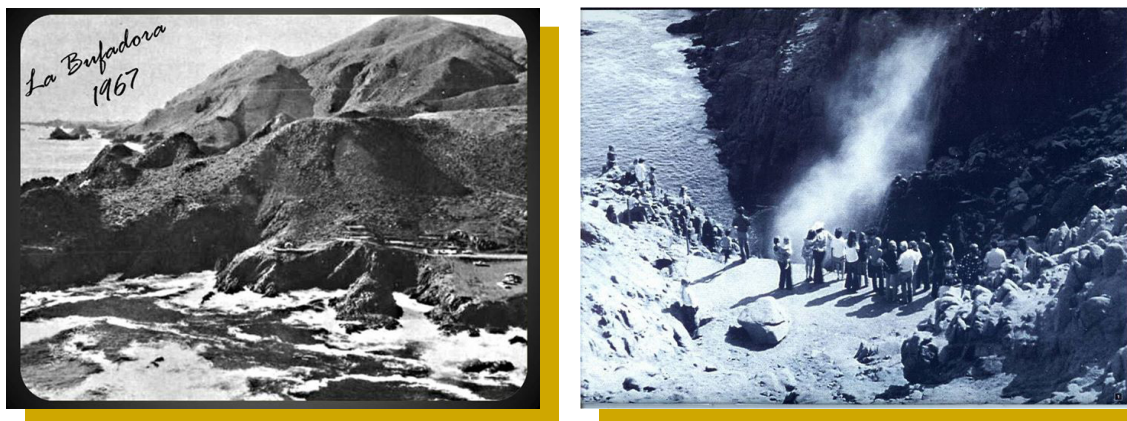
Moises Santos Mena.

Hi Moi:

I wish I could tell you yes, that I know of some oral tradition, but I can't think of any that I have heard. Unfortunately as you know, no one documented our indigenous storytellers 50 or 100 years ago when there might have still been elders or even grandchildren of elders who remembered back to the time when they were still able to live along the coasts. The only story about the coast that I know of was one that Benito told but it related to Colonet. I wish I had access to my files, because I think there might have been something about Punta Banda in a paper that Eriberto Regland wrote many years ago. Here's something from the book "Tipai Ethnographic Notes" by William D. Hohenthal, Jr.: "To the north the Paipai ranged along the Pacific Coast as far north as Punta Banda (*Kat'ikal učipačə* 'where there are abalones'); the Pacific Ocean was called *Ha'sit*, 'salt water'. Punta Banda was a natural landmark and has archaeological evidence of heavy occupation. Beyond this point was the Bahia de Todos Santos (*Ha'kubetečə* 'big water').

Hohenthal also mentions that he camped at Punta Banda but does not mention gathering any useful ethnographic material there, except that the Kumiai consultant with him showed him how he could make fiber string from Agave Shawii fiber. Hohenthal also mentions that the Tipai also said that Tipai people had lived on Punta Banda. I think that it was probably an area that was more Tipai but that Paipai who were on good terms with the Tipai could go and gather shellfish there.

Michael Wilken-Robertson



A.7. La Bufadora, 1967 (Ensenada, 2011).

Hola Rafa:

Como ya te había platicado no tengo internet en casa y los ciber que hay por el barrio son pocos y deficientes a pesar de tener buena pinta. Por otra parte, la telefonía celular falla bastante y a veces no envía los mensajes, o no tengo crédito. Así que tengo que hacer algunas piruetas para poder enviarte los datos. El libro de Baja California de León Portilla es una verdadera mina de información. Entre muchos otros datos, está la referencia bibliográfica que te mandé de Ellen C. Barret que reúne casi 5000 títulos de literatura científica como antropología, historia, geología, geografía, historia natural, etc., de toda la península de Baja California, norte, sur, e islas adyacentes. Hay también un sumario bibliográfico de Joaquín Díaz Mercado y fragmentos traducidos del trabajo antropológico de Mauricio Mixco. León Portilla inició y dirigió las tesis del Dr. Ignacio del Río Chávez, quien se especializó en toda el área de Baja California Sur –como recordarás había una exposición de su trabajo en el pasillo de la biblioteca del Instituto de Investigaciones Históricas de la UNAM. León Portilla también dirigió la tesis de maestría de David Piñera Ramírez, quien se especializó e interesó a su vez, a León Portilla en el área Norte. Ellos dos fundaron el Instituto de Investigaciones Históricas de la Universidad Autónoma de Baja California con sede en Tecate. Además de todo eso, León Portilla cuenta que Baja California es una mina de oro, plata y muchos y variados minerales. Una extraordinaria riqueza natural, flora y fauna única en el mundo; y que fue dueña también de una enorme riqueza étnica y lingüística, de la cual ya tienes vagos barruntos de cómo ha sido casi exterminada. Te dije que es una historia larga y sorprendente porque hay mucha más información de la que nos habíamos imaginado, y en su historia, empezando por México, que ha tratado de negar su existencia, ha habido muchos países que han tratado de adueñarse de la península, empezando por

Estados Unidos, Japón, Francia, etc. Así que fueron ellos quienes, al principio, patrocinaron la enorme cantidad de investigaciones que se han hecho. Por lo que si quisiéramos tener acceso directo a la información, tendríamos que buscar en las bibliotecas de Estados Unidos, etc., aun si se trata de investigadores mexicanos, como es el caso de una parte de la bibliografía de Mixco. Pero si mal no recuerdo, la idea no es profundizar tanto en el conocimiento de Baja California, sino más bien responder algunas preguntas:

1) ¿Cómo es *La Bufadora* por dentro? ¿Cuáles son sus características morfológicas?

Aunque no se trata de *La Bufadora* de Baja California, me parece que sí responde a las preguntas, pero no sé cómo lo veas tú. Bufón (geología).

De Wikipedia, la enciclopedia libre:

El bufón es una formación geológica propia de zonas costeras. Se trata, básicamente, de una chimenea natural abierta normalmente en un acantilado, que está comunicado con simas marinas.

Cuando la mar está en pleamar, el agua choca con fuerza contra los acantilados y sube a través d estas chimeneas, saliendo despedida hacia arriba por el hueco a modo de géiser y produciendo un sonido característico.

Origen del nombre

El término bufón deriva de bufido, ruido extraño que produce un animal cuando está enojado. Y es que el agua al salir parece soltar una especie de resoplido que se puede llegar a oír a varios kilómetros de distancia.

Formación y morfología

Los bufones se forman por la erosión constante del agua del mar sobre los relieves cársticos, especialmente sobre los acantilados marinos de caliza. El agua penetra por esas zonas de debilidad y va disolviendo la caliza, oradando el acantilado por su parte baja y formando cuevas marinas y pequeñas galerías, que pueden llegar a adentrarse hasta cerca de 100 metros en el interior. Esas conducciones, al alcanzar las dolinas, las captura y produce hundimientos, creando una auténtica red de conducciones.

Cuando las olas, por el influjo de las mareas, rompen con fuerza en el acantilado, el agua penetra a presión por los agujeros y se desplaza por canales o tuberías naturales, saliendo entonces por las chimeneas que ha abierto en el acantilado. De este modo, brota agua pulverizada que forma un surtidor, el cual puede llegar a medir entre 20 y 40 metros. Estas formaciones no se crean de manera solitaria, sino que forman generalmente campos con varios bufones, de diversa potencia cada uno. Son típicas de la costa oriental asturiana, en donde las características geológicas son las adecuadas (materiales calizos del paleozoico, afectados por diaclasas y fracturas perpendiculares al mar), destacando los de Pría, Arenillas y Santiuste. Algunos de estos bufones están catalogados como Monumento Natural. Obtenido de «[http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bufón_\(geología\)&oldid=74466247](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bufón_(geología)&oldid=74466247)»

La otra pregunta es:

2) ¿Qué leyenda(s), mito(s) se han creado por los indígenas de esas tierras?

Si no me equivoco, *La Bufadora* se localiza en un lugar que se llama Ejido Coronel Esteban Cantú, cuyos habitantes hoy en día, son en su mayoría mestizos, aunque quedan algunos indígenas originarios de la etnia kumiai. El mito que conoces parece ser original, es decir, recogido de la tradición oral de la etnia, porque parece ser bastante antiguo, sin embargo, sería necesario corroborar el origen, en las fuentes.

3) ¿De dónde su nombre *Bufadora*?

El vocablo se refiere al fenómeno estudiado por la geología marina, pero Alberto Tapia Landeros de la Universidad Autónoma de Baja California en su trabajo *Algunos geosímbolos de Baja California Identidad y memoria colectiva de la ruralidad*, dice: “La punta sur de la Bahía de Todos Santos, sobre la costa del Océano Pacífico, es el complejo serrano al sur de Ensenada. En su conjunto es conocida como la Sierra de Punta Banda o Sierra de la Bufadora. Esta cordillera es visible desde mar adentro. Los navegantes que llegan desde el sur a la Ensenada de Todos Santos tuvieron y tienen actualmente, sobre todo quienes navegan sin tecnología, un faro indicador de la proximidad de Maneadero y Ensenada. En el siglo diecinueve significaba llegar a la pequeña colonia de Punta Banda, donde se abrió un balneario de aguas termales. “El sitio contiene un raro, salado y sulfuroso manantial caliente, un hotel, y un baño fue construido y abierto para negocio en 1888” (Golbaum, 1971: 49). Este autor ignoraba que Punta Banda señala el inicio de la Falla de Agua Blanca,

que corta la península diagonalmente y se detiene en San Matías, al borde del desierto de San Felipe (Minch, 1998: 29). A ello se debe la descripción de “sulfuroso” y “caliente”. De este complejo sobresale por su mayor altitud, 22 kilómetros hacia el sureste de la Punta Banda propiamente dicha, el Cerro de la Soledad (1 373 msnm). Desde el norte se ve primero el Cerro de Las Ánimas (1 04 msnm). Por el norte, sur y el Océano Pacífico, este complejo serrano representaba la civilización; hoy, servicios y comercio. Para los botánicos de ahora significa un tesoro de plantas endémicas; para los geólogos, la punta oeste de la Falla de Agua Blanca; los arqueólogos lo ven como una fuente muy importante en sus monumentales “concheros”. Para el explorador mexicano Fernando Jordán significó “el lugar más altivo del litoral bajacaliforniano” (Jordán, 1997: 63). El complejo está cubierto por vegetación de chaparral, así como de matorral costero vecino. Para la geología, Punta Banda significa el lugar donde fue descubierto el rudista *Coralliochama orcutii*, “primer fósil de Baja California descrito científicamente por White en 1885” (Téllez, en Velásquez, 2000: 21). Geosímbolo de “razones” culturales totalmente, incluyendo la científica. 4 Sitio arqueológico donde humanos antiguos acumularon conchas de moluscos.” Recordarás que Miguel del Barco (de las copias que sacamos en Históricas) hace referencia a estas montañas de conchas.

La cuarta pregunta:

4) ¿Por qué no hay información? o ¿debería ser una afirmación?: ¡no hay nada!

Quizás pueda responderse así:

Al contrario de tal afirmación, sí hay muchísimos datos de todo tipo pero no es fácil tener acceso a ellos. A México poco o nada le ha interesado investigar, sólo crear condiciones para las concesiones e inversión extranjera y es muy grande, por ejemplo en la explotación minera. Baja California actualmente está poblada por gente mestiza no originaria, que quizás estaba más atenta en colonizar y legalizar las tierras que en la historia u otras cuestiones, aunque recientemente se han promovido muchos estudios por parte de la UABC. Los pueblos originarios, han muerto en la resistencia, o han quedado reducidos a la abyección. Es muy posible que haya un buen estudio de geología marina que contemple detalladamente la Bufadora Baja Californiana, pero hay que buscarlo primero en las bibliografías sumarias, seleccionar los títulos, buscar en las bibliotecas de Estados Unidos, entre otras, aspirando al préstamo de un ejemplar en versión electrónica y finalmente traducirlo.

Espero que esta información te sirva. Me hubiera gustado llegar a los estudios geológicos y lingüísticos antropológicos puntuales. Si necesitas más datos, históricos, etnográficos, mapas antropológicos, lingüísticos, etc., tengo muchos, me avisas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abanades, J., Greaves, D. & Iglesias, G., 2014. Coastal defence through wave farms. *Coastal Engineering*, 91(septiembre), pp. 299-307.
- Abaoud, H. & Steeb, H., 1998. The german-saudi hysolar program. *Int J Hydrogen Energy*, 23(6), pp. 445-449.
- Airy, G. B., 1845. *Tides and Waves*. s.l.: Encyclopedia Metropolitana.
- AJW, 2014. *AJW*. [En línea] Available at: <http://ajw.asahi.com/tag/hydrogen> [Último acceso: octubre 2015].
- Alatorre Mendieta, M. Á., 2003. *Sistema de bombeo de agua marina utilizando la energía del oleaje y marea*. Tesis de Doctorado: UNAM.
- Alatorre, M. Á., 2007. *Corrientes oceánicas en el golfo de México*. México, UNAM.
- Alstom, 2014. *Turbinas*. [En línea] Available at: <http://www.alstom.com/press-centre/2013/7/alstoms-tidal-turbine-reaches-1mw-in-offshore-conditions/> [Último acceso: octubre 2015].
- Álvarez de William, A., 1975. *Los primeros pobladores de Baja California*. s.l.: Gobierno de Baja California.
- AMIP, 2009. *amip*. [En línea] Available at: <http://www.amip.org.mx/inicio/> [Último acceso: abril 2015].
- Bascom, W., 1980. *Waves and Beaches: the dynamics of the ocean surface*. New York: Anchor/Press.
- BBC, 2009. *BBC*. [En línea] Available at: http://www.bbc.com/mundo/ciencia_tecnologia/2009/11/091124_energia_osmotica_men.shtml [Último acceso: octubre 2015].
- Bechrakis, D. A., Mckeogh, E. J. & Gallagher, P. D., 2006. Simulation and operational assesment for a small autonomous wind-hydrogen energy system. *Energy Conversion and Management*. Volumen 47, núm. 1, pp. 46-59.
- Bergens, 2013. *Bergens*. [En línea] Available at: <http://www.bgfweb.no/moter/tidligere-moeter/2013/28may2013waves-artenergyandhistory-post> [Último acceso: octubre 2015].
- Bigg, G. R., Jickels, T. D., Liss, P. S. & Osborn, T. J., 2003. The role of oceans in climate. *Int. J of Climatology*. Volumen 23, pp. 1127-1159.
- Boake, C.B. , T.J.T. & Folley, M., 2002. *Overview and initial operational experience of the LIMPET wave energy plant*. *Proceedings of The Twelfth International Offshore and*

- Polar Engineering Conference Kitakyushu*. Japan, May 26–31, 2002.
- Brandwein, P. F., Stollberg, R. & Burnett R, W., 1968. *Energy, its forms and changes*. New York : Harcourt, Brace & World.
- Bustos Lira, A., Pinedo González, J. A., Mendoza Baldwin, E. & Silva Casarín, R., 2010. *Aprovechamiento del oleaje marino para la generación de energía eléctrica en costas mexicanas*, Jalisco: XXI Congreso Nacional de Hidráulica.
- Bustos Lira, A., Pinedo González, J. A., Mendoza Baldwin, E. & Silva Casarín, R., 2012. *Aprovechamiento de la energía del mar en las costas mexicanas: sistema blowjet, turbina, celda de combustible*. Acapulco: XXII Congreso Nacional de Hidráulica.
- Campbell C, J., 2013. The Oil Age in Perspective. *Energy Exploration and Exploitation*, 31(2), pp. 149-165.
- Campbell, C.J. & Laherrère, J.H., 1998. The End of Cheap Oil. *Scientific American*, Issue 3, pp. 78-83.
- Carnegie, 2014. *Carnegie*. [En línea] Available at: <http://www.carnegiewave.com/> [Último acceso: septiembre 2015].
- CEMIE Océano, 2015. *CEMIE Océano*. [En línea] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=Uue7NHQU7ts&feature=youtu.be> [Último acceso: diciembre 2015].
- Cenit-del-Petróleo. s.f. *Cenit-del-petroleo.com* [En línea] Available at: <http://www.cenit-del-petroleo.com/> [Último acceso: diciembre 2015].
- Charlier, R.H., Chaineux, M.C.P. & Morcos, S., 2005. Panorama of the history of coastal research. *Journal of Coastal Research*, 87(1), pp. 70-111.
- Chávez Cárdenas, X., Mendoza Baldwin, E., Sánchez Dirzo, R. & Silva Casarín, R., 2010. *Diseño hidrodinámico y evaluación de un dispositivo marítimo energético, blowjet*, Jalisco: Proceeding XXI Congreso Nacional de Hidráulica.
- Chávez Cárdenas, X., 2010. *Blowjet: tecnología oceanomotriz de la conversión de la energía del oleaje*. Tesis de Maestría: UNAM.
- Chávez Cárdenas, X. y otros, 2010. *Blowjet: enlace entre la energía undimotriz y la electrólisis*. Uruguay: Proceedings XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Claude, G., 1930. Power from the tropical seas. *Mechanical Engineering*, 52(12), pp. 1039-1044.
- CMC, 2012. *CMC*. [En línea] Available at: http://cmcblog7.blogspot.mx/2012_01_01_archive.html [Último acceso: octubre 2015].
- Cokelet, E. D., 1977. Breaking waves. *NATURE*, 267(junio), pp. 769-774.
- Corona Guinto, J. L., 2013. *Diseño y manufactura de un electrolizador con membrana de intercambio protónico para la generación de hidrógeno como vector energético*, IPN:

- Tesis de Maestría.
- Craik, A. D. D., 2004. The origins of water wave theory. *Annu Rev Fluid Mech*, Volumen 36, pp. 1-28.
- Culp, A. W., 1991. *Principles of Energy Conversion*. s.l.:Mc Graw Hill.
- Czitrom, S. P., Coronado, C. & Nuñez, I., 2007. Flushing of the port of Ensenada using a SIBEO wave-driven seawater pump. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(8), pp. 1459-1469.
- Dasaolar, 2010. *Dasolar*. [En línea] Available at: <http://www.dasolar.com/alternative-energy/wave-power> [Último acceso: octubre 2015].
- del Barco, M., 1973. *Historia natural y crónica de la antigua Baja California. Siglo XVII*. México: UNAM.
- del Río, I., 2000. *Crónicas jesuíticas de la antigua California*. México: UNAM.
- del Río, I. & Atable Fernández, M. E., 2005. *Baja California Sur: historia breve*. México: UNAM.
- Duckers, L., 1995. Water power-wave, tidal and low-head hydro technologies. *Power Engineering Journal*, 9(4), pp. 164-172.
- Duckers, L., 2000. Wave Power. *Engineering Science and Education Journal*, Issue June, pp. 113-122.
- Duncan, R. C., 2005-06. The Olduvai Theory: Energy, Population and Industrial Civilization. *The Social Contract*, Issue winter, pp. 1-12.
- Duncan, R., 2001. Word Energy Production, Population Grow and the Road to the Olduvai Gorge. *Population and Environment*, 22(5), pp. 1-26.
- Durán San Lázaro, A. & Vázquez Ruiz, E., 2014. *Generación de energía eléctrica a través de la energía cinética y potencial de las olas en una central undimotriz localizada en Pascuales, Colima México*. Tesis de licenciatura: IPN.
- EMEC, 2015. *EMEC*. [En línea] Available at: <http://www.emec.org.uk/about-us/media-centre/downloads/> [Último acceso: octubre 2015].
- England, 2008. *Renovables*. [En línea] Available at: [6. http://www.renewables-atlas.info/downloads/documents/Renewable_Atlas_Pages_A4_April08.pdf](http://www.renewables-atlas.info/downloads/documents/Renewable_Atlas_Pages_A4_April08.pdf) [Último acceso: abril 2015].
- England, 2010. *Renewables*. [En línea] Available at: [11. http://vision.abpmer.net/renewables/map_default.phtml?config=wave&reset=session=groups,resultlayers](http://vision.abpmer.net/renewables/map_default.phtml?config=wave&reset=session=groups,resultlayers) [Último acceso: mayo 2015].
- ESB, 2014. *Ocean energy*. [En línea] Available at: <http://www.westwave.ie/technologies/> [Último acceso: septiembre 2015].

- Ensenada, 2011. *La Bufadora* [En línea] Available at: <https://twitter.com/search?f=image&vertical=default&q=la%20bufadora&src=typd> [Último acceso: diciembre 2015].
- Estrada Ramírez, A. & Farldow Espinoza, L., 2007. *Diccionario práctico de la lengua Ki-liwa*. México: INALI.
- Estrategia Nacional de Energía 2013-2027. Secretaría de Energía, México. [En línea] Available at: <http://energiaadebate.com/wp-content/uploads/2013/02/ENE2013-2027.pdf> [Último acceso: diciembre 2015].
- EU, 2014. *Hawaii*. [En línea] Available at: <http://nelha.hawaii.gov/> [Último acceso: octubre 2015].
- Expósito Díaz, G., 2009. Corrientes inerciales en el sur del Golfo de México. *Ciencias Marinas*, 35(3), pp. 287-296.
- Falnes, J., 1993. *Review of wave energy research in Norway*. EUR, Wave Energy.
- FCH, 2014. *FCH*. [En línea] Available at: <http://www.fch.europa.eu/publications> [Último acceso: octubre 2013].
- Fernández Díez, P., 2005. *Energía de las olas*, s.l.: Universidad de Cantabria.
- Geografía-UNAM, 2007. *Atlas*. [En línea] Available at: http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/f_var_marinas.html. [Último acceso: abril 2015].
- Gerstner, F., 1802. *Theorie der wellen*. s.l.:Abd.d.k.bohm Ges.d.Wiss.
- González Huerta, R., 2009. Capítulo 5 Electrólisis. En: *Hidrógeno: Introducción a la Energía Limpia*. s.l.:Universidad Autónoma de la Ciudad de México.
- González Huerta, R. G., López Chávez, E. & Velásquez Morales, B., 2009. *Hidrógeno: introducción a la energía limpia*. Primera edición ed. México: UAEM.
- Heinberg, R., 2014. *El final del crecimiento*. s.l.: El viejo topo.
- Henry, D., 2008. On Gerstner's water wave. *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*, 15(2), pp. 87-95.
- Hiriart Le Bert, G., 2009. Potencial energético del alto Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(1), pp. 143-146.
- Ho Bae, Y., Ok Kim, K. & Ho Choi, B., 2010. Lake Shiwa tidal power plant proyect. *Ocean Engineering*, 37(5-6), pp. 454-463.
- Hubbert, M. K., 1949. Energy from fossil fuel. *Science*, 109(4), pp. 103-109.
- Hubbert, M. K., 1956. Nuclear Energy and the Fossil Fuels. *Shell Development Company*, Issue 95, pp. 1-40.
- Hunerdosse, R. & Lyons, J., 2010. *Tapered Channel Wave Energy*. [En línea] Available

- at: <http://taperedchannelwaveenergy.weebly.com/index.html> [Último acceso: octubre 2015].
- IEA, 2015. *IEA*. [En línea] Available at: <https://www.iea.org/> [Último acceso: octubre 2015].
- IEA, s.f. *IEA*. [En línea] Available at: [13. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA_EnergyEfficiencyIndicatorsFundamentalsStatistics.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA_EnergyEfficiencyIndicatorsFundamentalsStatistics.pdf) [Último acceso: 2015].
- IEA-OES, 2002-14. *Informes*. [En línea] Available at: www.iea-ocean.org [Último acceso: julio 2015].
- II, 2010. *II*. [En línea] Available at: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Investigacion/Proyectos/Lists/Proyectos/DispForm.aspx?ID=123&Source=http%3A%2F%2Fwww%2Eiingen%2Eunam%2Emx%2Fes-mx%2FInvestigacion%2FProyectos%2FPaginas%2Fdefault%2Easpx> [Último acceso: octubre 2015].
- II, 2011. *II*. [En línea] Available at: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Investigacion/Proyectos/Lists/Proyectos/DispForm.aspx?ID=132&Source=http%3A%2F%2Fwww%20w%2Eiingen%2Eunam%2Emx%2Fes-mx%2FInvestigacion%2FProyectos%2FPaginas%2Fdefault%2Easpx> [Último acceso: octubre 2015].
- IPCC, 2014. *Panel Intergubernamental para el Cambio Climático*. [En línea] Available at: <http://www.ipcc.ch/> [Último acceso: marzo 2015].
- Iribarren Canavilles, R. & Nogales y Olano, C., 1954. *Obras marítimas: oleajes y diques*. Madrid: DOSSAT.
- Johnson, R. S., 2007. Edge waves: theories past and present. *Philosophical Transactions: mathematical, physical and engineering sciences*, Issue sep, pp. 2359-2376.
- Kirgoz, S. & Sami, A., 2005. Geometrical properties of perfect breaking waves on composite breakwaters. *Ocean Engineering*, Volumen 32, pp. 1994-2006.
- Komen, G. J., 2013. *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Koukouvinos, A., Lygerov, V. & Koumoutsos, N., 1982. Design of a system for solar energy storage via water electrolysis. *Int J Hydrogen Energy*, 7(8), pp. 645-650.
- Krasnov, M.L., Makarenko, G. I. & Kiseliyov, A. I., 1976. *Cálculo Variacional*. Ed. MIR. Moscú.
- Kreuter, K. & Hofmann, H., 1998. Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy. *Int J Hydrogen Energy*, 23(8), pp. 661-666.
- Levenspiel, O., 1974. The osmotic pump. *Science*, 183(4121), pp. 157-160.
- Levenspiel, O., 1997. *Fundamentos de Termodinámica*. s.l.:Prentice Hall.
- Li, Z. X., 2000. Thermodynamic Air-Sea Interactions and Tropical Atlantic SST Dipole Pattern. *Phys Chem Earth (B)*, 26(2), pp. 155-157.

- López González, J., 2011. *Desarrollo de un dispositivo de conversión de la energía de las corrientes marinas*. Tesis de Doctorado: UNAM.
- López González, J., Hiriart Le Bert, G. & Silva Casarín, R., 2010. Tidal Power Plant Energy Estimation. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 11(2), pp. 233-245.
- Mayilvahanan Alagan, C., Bihs, H., Myrhaug, D. & Muskulus, M., 2015. Breaking characteristics and geometric properties of spilling breakers over slopes. *Coastal Engineering*, 05(1), pp. 4-19.
- Mansilla, C. C., Sigurvinsson, J., Bontemps, A., Maréchal, A. & Werhoff, F., 2007. Heat management for hydrogen production by high temperature steam electrolysis. *Energy*, Volumen 32, pp. 423-430.
- Meadows, D. & Randers, J., 2006. *Los límites del crecimiento: 30 años después*. s.l.:Galaxia Gutemberg.
- Mendoza Baldwin, E. y otros, 2014. Beach response to wave energy converter farms acting as coastal defence. *Coast Eng*, 87(1), pp. 97-111.
- Mendoza Balwin, E., Chávez Cárdenas, X., Alcerreca Huerta, J. C. & Silva Casarín, R., 2015. Hydrodynamic behavior of a new wave energy convertor: the Blowjet. *Ocean Engineering*, 106(15 September), pp. 252-260.
- Mendoza Balwin, E., Silva Casarín, R., Sánchez Dirzo, R. & Cháves Cárdenas, X., 2010. *Wave energy conversion using a Blowjet systems*, China: Proceedings 32nd Conference on Coastal Engineering .
- Meurer, C., Barthels, H., Brocke, W. A., Emonts, B. & Groehn, H. G., 2000. Phoebus-an autonomous supply system with renewable energy: six year of operational experience and advanced concepts. *Solar Energy*, 67(1-3), pp. 131-138.
- Mixco, M., 1983. *Kiliwa text: when i have donned my crest of stars, salt lake city*, s.l.: University of Utah.
- Molina, C. M., 2010. *Centro Mario Molina*. [En línea] Available at: <http://www.energia.gob.mx/res/1576/Feb2010/CAP%20VI.pdf> [Último acceso: octubre 2015].
- NASA, 2015. [En línea] Available at: <http://www.earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/> [Último acceso: marzo 2015].
- NEL, 2014. *NEL*. [En línea] Available at: <http://www.nel-hydrogen.com/> [Último acceso: octubre 2015].
- Noboru, T. & González, A., 2011. *Auka: visitando los pueblos Pai pai, Cucapá, Kumiai y Kiliwa*. México: UNAM.
- Norman, S. R., 1974. Water salination: a source of energy. *Science*, 186(4161), pp. 350-352.
- NREL, 2014. *NREL*. [En línea] Available at: <http://www.nrel.gov/> [Último acceso: octubre

- 2015].
- Oceanlinx, 2013. *Oceanlinx*. [En línea] Available at: <http://oceanlinx.com/> [Último acceso: julio 2015].
- Ochoa Zazueta, J. Á., 1978. *Los Kiliwa*. s.l.:Instituto Nacional Indigenista.
- OES, 2012. *publicaciones*. [En línea] Available at: http://www.seai.ie/Renewables/Ocean_Energy/Ocean_Energy_Information_Research/Ocean_Energy_Publications/ [Último acceso: junio 2015].
- OES, 2014. *Informes*. [En línea] Available at: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf> [Último acceso: julio 2015].
- OES, 2014. *Ocean Energy Systems*. [En línea] Available at: <http://www.ocean-energy-systems.org/> [Último acceso: abril 2015].
- Olsen, 2007. *wave*. [En línea] Available at: https://www.engineersireland.ie/EngineersIreland/media/SiteMedia/groups/Divisions/new-energy/Wavebob-Development_of_a_Wave_Energy_Converter.pdf?ext=.pdf [Último acceso: septiembre 2015].
- Olson, 2007. *Olson*. [En línea] Available at: http://www.ivt.ntnu.no/docs/marine/marintekniskedager/mtd07ntnu_buldra_foxbox_gulli_olsen.pdf [Último acceso: septiembre 2015].
- OTEC, 2013. *OTEC*. [En línea] Available at: <http://www.otecorporation.com/> [Último acceso: septiembre 2015].
- Padilla, I., 2011. *La isla de las tribus perdidas*. Primera edición ed. s.l.:Debate.
- Park, 2007. *Tidal power plant*. [En línea] Available at: http://www.eer.wustl.edu/McDonnellMayWorkshop/Presentation_files/Saturday/Saturday/Park.pdf [Último acceso: octubre 2015].
- Pellicer, C., 2007. *revista de la UNAM*. [En línea] Available at: <http://www.revistadelauniversidad.unam.mx/4007/pdfs/24-30.pdf> [Último acceso: marzo 2015].
- Pérez Peña, A. I., 2013. *Estimación del clima marítimo y la energía del oleaje disponible en las costas mexicanas*. Tesis de maestría: UNAM.
- Perrot, J., 1978. *El mar al servicio del hombre*. s.l.:Everest.
- Pinedo González, J. A., 2014. *Estudio experimental y analítico del diseño del OWC para el aprovechamiento de la energía del oleaje*. Tesis de maestría: UNAM.
- Piñera Ramírez, D., 1985. *Panorama histórico de Baja California*. México: UNAM.
- Postigo, L., 1965. *El mundo de la energía*. Primera edición ed. Barcelona: Ramon Sopena.
- Quirin Schiermeier, J., Scully, T., Witze, A. & Morton, O., 2008. Electricity without carbon. *NATURE*, 454(14), pp. 816-823.
- Reisbokso, 2009. *Storm*. [En línea] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=PmMzf>

- Ng7TI [Último acceso: octubre 2015].
- Reséndiz Núñez, D., 2013. Ingeniería. En: *Hacia dónde va la ciencia en México?*. México: Conacyt, p. volumen 4.
- Rivillas Ospina, G. D., 2012. *Modelo de simulación numérica de rotura del oleaje*. Tesis de Doctorado: UNAM.
- Rodríguez, E., 2014. *Las plantas más grandes del mundo*. [En línea] Available at: <http://www.fierasdelaingenieria.com/las-plantas-de-energia-mareomotriz-mas-grandes-del-mundo/> [Último acceso: octubre 2015].
- RU, 2008. *Atlas*. [En línea] Available at: [6. http://www.renewables-atlas.info/downloads/documents/Renewable_Atlas_Pages_A4_April08.pdf](http://www.renewables-atlas.info/downloads/documents/Renewable_Atlas_Pages_A4_April08.pdf) [Último acceso: Abril 2015].
- Rzayeva, M. P., Salamov, O. M. & Kerimov, M. K., 2001. Modeling to get hydrogen and oxygen by solar water electrolysis. *Int J Hydrogen Energy*, Volumen 26, pp. 195-201.
- Sánchez Dirzo, R., González Huerta, R. G., Mendoza, E., Silva, R. & Sandoval Pineda, J. M., 2014. From Wave and From Jet to Hydrogen. *International Journal Hydrogen Energy*, 39(29), pp. 16628-16636.
- Schwartz, L. M., 2005. *Encyclopedia of Coastal Science*. s.l.:Springer.
- Serrano Navarro, H. A., 2008. *Diseño geométrico de un dispositivo para el aprovechamiento del oleaje en zonas costeras*. Tesis de Licenciatura: UNAM.
- Silva Casarín, R., 2005. *Análisis y descripción estadística del oleaje*. México: UNAM.
- SMH, 2010. *SMH*. [En línea] Available at: <http://www.smh.org.mx/index.html> [Último acceso: octubre 2015].
- Sorensen, B., 2005. *Hydrogen ad fuel cell*. Primera edición ed. s.l.:Elsevier.
- Sorensen, R., 2006. *Basic Coastal Engineering*. s.l.:Springer.
- Spaan, J. W., 1993. *TuDelf*. [En línea] Available at: <http://repository.tudelft.nl/search/ir/?q=subject%3A%22wave%20energy%22> [Último acceso: octubre 2015].
- Stahl, W., Voss, K. & Goetzberger, A., 1995. The self-sufficient solar house freiburg. *Applied Solar Energy*, 31(1).
- Statkraft, 2014. *Statkraft*. [En línea] Available at: <http://www.statkraft.com/> [Último acceso: octubre 2015].
- Steffen, W., 2015. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), pp. 736-746.
- Svein, 2010. *Coastal*. [En línea] Available at: http://www.tunliweb.no/SM/alb_havet.htm [Último acceso: octubre 2015].
- Svein, 2011. *Huge waves*. [En línea] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=TN3DTTKX91s> [Último acceso: octubre 2015].

- Svein, 2012. *Ocean wave*. [En línea] Available at: https://www.youtube.com/watch?v=vG6R_R2YyAo [Último acceso: octubre 2015].
- Temeev, A., Belokopytov, V. & Temeev, S., 2006. An integred system of the floating wave energy converter and electrolytic hydrogen producer. *Renewables Energy*, Volumen 31, pp. 225-239.
- Terge, 2011. *Oygarden*. [En línea] Available at: https://www.youtube.com/watch?v=CLFwQ9Ch2_c [Último acceso: octubre 2015].
- Theseus, 2014. *Theseus*. [En línea] Available at: <http://www.theseusproject.eu/> [Último acceso: octubre 2015].
- Tjugen, K, J., 1993. *TAPCHAN ocean energy project*. Edinburgh, Proceedings of European.
- Trainer, T., 2007. *Renewable Energy Can not Sustain a Consumer Society*. s.l.:Springer.
- UE, 2013. *atlas*. [En línea] Available at: <http://data.marine.ie/Dataset/Details/20929>. [Último acceso: julio 2015].
- UE, 2014. *Tethys*. [En línea] Available at: <http://mhk.pnnl.gov/> [Último acceso: abril 2015].
- UK, 2001. *Parliament*. [En línea] Available at: <http://www.parliament.the-stationery-office.co.uk/pa/cm200001/cmselect/cmsctech/291/291ap27.htm> [Último acceso: octubre 2015].
- UK, 2011. *Renovables*. [En línea] Available at: <http://www.reuk.co.uk/index.htm> [Último acceso: mayo 2015].
- UK, 2014. *Pelamis*. [En línea] Available at: <http://www.pelamiswave.com/> [Último acceso: septiembre 2015].
- UNAM, 1982. *El Progresista de Ensenada 1903-1904*. s.l.:UNAM.
- UNAM, 2007. *Atlas*. [En línea] Available at: <http://www.igeograf.unam.mx/sigg/publicaciones/atlas/anm-2007/anm-2007.php> [Último acceso: abril 2015].
- Vanhanen, J. P., Kauranen, P. S., Lund, P. D. & Manninen, L. M., 1994. Simulation of solar hydrogen energy systems. *Solar Energy*, 53(3), pp. 267-278.
- Velasco Fuentes, O., 2013. The activity of La Bufadora, a natural marine spout in Northwestern Mexico. En: *Fluid Dynamics in Physics*. s.l.:Springer, pp. 353-360.
- VOITH, 2014. *Ocean energy*. [En línea] Available at: <http://voith.com/en/products-services/hydro-power/ocean-energies/wave-power-plants-590.html> [Último acceso: julio 2015].
- Waterorg, 2014. *waterorg*. [En línea] Available at: <http://water.org/> [Último acceso: octubre 2015].
- Wavestar, 2013. *wavestar*. [En línea] Available at: <http://wavestarenergy.com/> [Último acceso: agosto 2015].
- Wendt, H., 1990. *Electrochemical Hydrogen Technologies*. primera edición ed. s.l.:Elsevier.

Wikipedia. [En línea] Available at: [http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bufón_\(geología\)&oldid=74466247](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bufón_(geología)&oldid=74466247) [Último acceso: diciembre 2015].

Wordpress, 2013. *Wordpress*. [En línea] Available at: <https://esalen.wordpress.com/2009/09/06/bølgekraftverket-pa-toftestallen-sotra/> [Último acceso: octubre 2015].

WWF, 2012-14. *Planeta Vivo*. [En línea] Available at: www.livingplanetindex.org [Último acceso: marzo 2015].

Yingsheng, Z. & Yichun, T., 1994. The conception of high-temperature electrolyzer fuel cell cycle to produce hydrogen. *Applied Solar Energy*, 30(1).

Yuda, Y., 1995. *Hydrogen Energy System*. Primera edición ed. s.l.:Kluwer.



rafaelsanchezdirzo@yahoo.com.mx





NOTAS



NOTAS