



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA CIVIL – HIDRÁULICA

*“ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANÁLITICO DEL DISEÑO DE OWC
PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE”*

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

JESUS ABRAHAM PINEDO GONZÁLEZ

TUTOR

Dr. Edgar Mendoza Baldwin

COMITÉ TUTOR

Dr. Rodolfo Silva Casarín, Instituto de Ingeniería
Dr. Carlos A. Escalante Sandoval, Facultad de Ingeniería
M.I. Víctor Franco, Facultad de Ingeniería
Dra. Lilia Reyes Chávez, Facultad de Ingeniería

MÉXICO, D. F. ENERO 2014

Presidente: Dr. Escalante Sandoval Carlos A.
Secretario: Dr. Silva Casarín Rodolfo
Vocal: Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo
1 er. Suplente: M.I. Franco Víctor
2 d o. Suplente: Dra. Reyes Chávez Lilia

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria
Delegación Coyoacán, C.P. 04510
México, Distrito Federal

TUTOR DE TESIS:

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

FIRMA

A mi esposa DORIS

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer a CONACYT, por el apoyo económico brindado a lo largo de mis 2 años de maestría.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín y al Dr. Edgar Mendoza Baldwin por abrirme las puertas del Instituto de Ingeniería y permitirme formar parte del grupo de Ingenieros de Costas y puertos, y más aún cuando no era estudiante de la UNAM. Gracias por su apoyo y confianza a lo largo de los 4 años que llevo en esta institución.

Agradezco a la Dra. Lilia Reyes Chávez, al Dr. Carlos Escalante y al M.I. Víctor Franco, a quienes sin pedirles su autorización los elegí como jurado para mi examen de grado.

Agradezco al IINGEN UNAM, porque mi estancia no solo me ha servido para mejorar mi desempeño como ingeniero, si no que me ha brindado la oportunidad de estudiar una segunda carrera en Administración.

Sin duda lo mejor de mi estancia a lo largo de estos 4 años, ha sido conocer a personas muy valiosas, amigos que aprecio, con quien compartí tantos días en el Laboratorio y a quienes deseo el mayor de los éxitos en sus vidas profesionales y personales. Y que por obvias razones no podía omitirlos en estas líneas, a toda la banda del laboratorio y empezaré por orden de añejamiento (jeje) en el laboratorio: a Xavi, Oso, Chucho UNAM, José Joil, Iván, Mijo (Carlitos), Prolegumeno, Nely, Cesia, Candy y Ericka, a todos gracias por su amistad, por sus consejos y enseñanzas, son y seguirán siendo como de mi familia. A Don Modesto de la carpintería, por todos los regaños que me dió, pero de los cuales aprendí mucho.

A mi Papá y a mi Mamá, los pilares de mi vida y a quienes les debo la persona que soy. Gracias por todo su amor, consejos, regaños, gracias por hacer de mi infancia una vida maravillosa, GRACIAS POR DARME LA VIDA, los amo con todo mi corazón.

A mis hermanas, a mi suegra la Dra. Dora a quien quiero y respeto mucho, y desde que me conoció me cuida como su propio hijo, y a mis minions (sobrinos) favoritos: Amaya, Chucha, Azul, Aarón y Beto, porque cada uno de ustedes han sido parte de este sueño y de alguna y otra forma me han apoyado a alcanzarlo.

Hace unos años empecé un camino a lado de una gran mujer, inicio siendo mi compañera de clase y nunca imaginé que se convertiría en la compañera de toda mi vida. Gracias **Doris Sosa** mi encantadora esposa por todo tu amor, has sido parte fundamental de este logro, has caminado a mi lado y me has apoyado aún en los momentos más difíciles y en los cuales dudaba de este logro académico, siempre estuviste conmigo para apoyarme y juntos superar todos los obstáculos. Sé que trabajaremos para formar la familia que tanto hemos soñado, apoyándonos en el amor que sentimos, **TE AMO.....**

“El creyente peca de ignorante, se complace con atribuir todo al poder celestial sin imaginar su complejidad, por su parte, el científico carece de fe y se jacta por encontrar una explicación que considera lógica y racional a los fenómenos que nos rodea. Ambos desconocen que la ciencia y el creador son las caras de la misma moneda. Se necesita mucho conocimiento y una fe inquebrantable para comprender que las leyes que rigen nuestro universo no son obra de la casualidad..... y nuestra propia existencia lo demuestra” **Jesus Pinedo**

Resumen

En la actualidad, el uso de recursos fósiles (petróleo, carbón y gas) empleados en la generación de energía eléctrica, representan más del 80 % de la producción de electricidad a nivel mundial. Sin embargo, la dependencia de éstos recursos se está viendo afectada por diversos motivos, entre ellos: la reducción en las reservas mundiales de petróleo, los efectos nocivos al medio ambiente y el aumento en la demanda energética de las ciudades.

Para contrarrestar los efectos ambientales negativos ocasionados por la quema de combustibles, se han creado en las últimas décadas, tecnologías que generan energía eléctrica sin altos daños al medio ambiente. Entre estas tecnologías se encuentran: undimotriz (oleaje), hidroeléctrica, biomasa, solar y eólica que se vislumbran como la base energética global a mediano y largo plazo, aunque de momento podrían ser rentables en usos específicos o como sistemas multi-propósito. La energía undimotriz, objeto de este trabajo, se augura como una posibilidad para fortalecer y cubrir las demandas eléctricas, mediante sistemas que aprovechen y maximicen la energía latente en los océanos del mundo, los cuales cubren el 71 % de la superficie del globo. México, con aproximadamente 11 600 km de litoral, cuenta con grandes zonas donde estos sistemas podrían ser utilizados como fuente de generación.

Es así, como el esfuerzo realizado en este trabajo, está enfocado en el estudio experimental y analítico para el diseño de uno de estos sistemas sustentables, capaz de transformar la energía undimotriz en energía eléctrica. Este sistema conocido como OWC (*Oscillating Water Column*) por sus siglas en inglés, actualmente es utilizado para generación eléctrica a gran escala en países como Portugal, sin embargo el objetivo de esta tesis es proponer relaciones entre las variables de diseño necesarios para la optimizar la conversión.

En primera instancia se realizó un modelo matemático que representa el comportamiento del sistema OWC. En la segunda etapa de este trabajo, se construyó un modelo físico a escala, el cual fue sometido a experimentación en el canal de olas del Instituto de Ingeniería UNAM. Se compararon los datos obtenidos en las pruebas para validar el modelo, y se propusieron valores de diseño óptimo. Los datos obtenidos, mostraron alta eficiencia energética en determinadas condiciones físicas. Esta amplia gama de posibilidades de diseño, son propicias para ser llevadas a cabo en futuros proyectos para el aprovechamiento de la energía del oleaje.

Abstract

The use of fossil fuels (oil, coal and gas) in electrical power generation, account for over 80 % of the electricity production worldwide. However, this dependence is being affected for various reasons, including: the reduction in global oil reserves, the harmful effects to the environment and the rising of energy demand in large cities.

To counter the negative environmental effects caused by burning fuels technologies new technologies for the generation of electricity without high environmental impact have been developed recently. These technologies include the use of sources as: waves, hydroelectric, biomass, solar energy and wind which are envisaged as capable of covering the energy demand in the medium and long term. Although actually they can only be profitable in specific uses or as multipurpose systems. Wave energy is the main subject of this thesis, this source has been considered as a promising possibility to cover the electrical demands through systems that catch and convert the latent energy contained in the world's oceans, which cover 71 % of the earth's surface. Mexico, with approximately 11 600 km of coastline, has large areas where these systems could be used as a source of generation.

Thus, the effort made in this thesis is focused an experimental and analytical study for the optimal design of these systems, Specifically, the effort is devoted to the system known as OWC (Oscillating Water Column), currently used for power generation on a large scale in countries like Portugal, the aim of the thesis is to propose the relations between the design variables in order to maximize the conversion efficiency.

First, we performed a mathematical model to represent the behavior of the OWC. Then, in the second stage of this work, a physical small scale model was built, which was experimentally tested in the wave flume at the Engineering Institute of UNAM. We compared the data obtained in the tests to validate the model, and optimal values were found. The data obtained showed high efficiency under certain physical conditions. This wide range of design options are right to be carried out in some future projects for harnessing energy from waves.

Índice General

| | |
|--|--------------|
| Resumen | XI |
| Abstract | XIII |
| Índice General | XV |
| Índice Figuras | XVII |
| Índice Tablas | XX |
| Lista de Símbolos | XXI |
| Objetivos | XXIII |
| Motivación | XXIV |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 ESTRUCTURA DEL TRABAJO | 3 |
| 2. EI OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA | 5 |
| 2.1 ORIGEN | 6 |
| 2.2 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE (ENERGÍA UNDIMOTRIZ) | 7 |
| 2.3 POTENCIAL ENERGÉTICO EN EL MUNDO | 8 |
| 2.4 POTENCIAL ENERGÉTICO EN MÉXICO | 10 |
| 2.5 VENTAJAS DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ | 12 |
| 2.6 OLEAJE | 13 |
| 2.6.1 Características básicas | 13 |
| 2.6.2 Clasificación de las ondas oceánicas | 16 |
| 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA | 17 |
| 3.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS | 18 |
| 3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS | 21 |
| 3.3 CENTRALES DE GENERACIÓN ACTUALES | 23 |
| 3.4 IMPACTO AMBIENTAL | 26 |
| 4. MODELO NUMÉRICO OWC | 28 |
| 4.1 INTRODUCCIÓN | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 29 |
| 4.3 SOLUCIÓN | 31 |
| 4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS | 33 |
| 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL | 37 |
| 5.1 OBJETIVO DE LA EXPERIMENTACIÓN | 38 |
| 5.2 CANAL DE OLEAJE..... | 38 |
| 5.2.1 Estructura | 38 |
| 5.2.2 Instrumentos de medición..... | 38 |
| 5.2.3 Software..... | 39 |
| 5.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO (OWC) | 40 |
| 5.4 DETERMINACIÓN DE ENSAYOS | 41 |
| 5.5 ESQUEMA EXPERIMENTAL | 42 |
| 5.6 PROCESAMIENTO DE DATOS..... | 42 |
| 5.7 NOMOGRAMA OWC | 54 |
| 5.8 OTROS DISEÑOS DE SISTEMAS OWC | 59 |
| 6. COMPARACIÓN | 63 |
| 6.1 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO | 64 |
| 7. CONCLUSIONES | 67 |
| 7.1 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN..... | 69 |
| 8. Bibliografía | 71 |

Índice Figuras

Capítulo 2

- Figura 2.1 Potencia en kW / m en las costas del mundo en aguas profundas . . 10
- Figura 2.2 Potencial energético del oleaje, en las costas de México [Pérez, 2012] 11
- Figura 2.3 Parámetro básico de una ola regular 14
- Figura 2.4 Propiedades ingenieriles de la teoría lineal [Manual de Diseño de Obras Civiles CFE]. 15
- Figura 2.5 Gráfica Periodo-Energía de los tipos de ondas oceánicas [Kinsman, 1965] 16

Capítulo 3

- Figura 3.1 Estación Ocean Groove 18
- Figura 3.2 Dispositivo “Mormotor” [Barrufet, 1885] 19
- Figura 3.3 Esquema del sistema OWC [Brooke, 2003]. 19
- Figura 3.4 Stephen Salter (derecha) [Falcão AFO, 2010] 20
- Figura 3.5 Esquema de prototipo “pato” de Salter [Falcão AFO, 2010] 20
- Figura 3.6 Boya construida por Wells y Wittaker [Cifuentes, 2003] 21
- Figura 3.7 Columna de agua Oscilante [Rodriguez, 2010] 22
- Figura 3.8 Sistema “WaveDragon” en las costas de Dinamarca [Rodriguez, 2010]. 22
- Figura 3.9 Sistema Pelamis [Rodriguez, 2010] 22
- Figura 3.10 Dispositivo AquaBuoy [Winkler, 2008]. 23
- Figura 3.11 El puerto de la localidad vasca de Mutriku con la central instalada en la parte exterior del dique [Ortubia, 2008] 24
- Figura 3.12 Vista aérea del sistema OWC en Pico, Portugal [Brito, 2010] 24
- Figura 3.13 Sistema OWC en las costas de Australia [Falcão AFO, 2010] 25
- Figura 3.14 Planta undomotriz en la localidad de Pecem, Brasil [Bautista, 2013] . 26

Capítulo 4

| | |
|---|----|
| Figura 4.1 Definición del problema. | 29 |
| Figura 4.2 Regiones del OWC. | 31 |
| Figura 4.3 Resultados teóricos con $kh = 0.5$ | 34 |
| Figura 4.4 Resultados teóricos con $kh = 1$ | 34 |
| Figura 4.5 Resultados teóricos con $kh = 1.5$ | 35 |
| Figura 4.6 Resultados teóricos con $kh = 2$ | 35 |

Capítulo 5

| | |
|---|----|
| Figura 5.1 Canal de Oleaje del IINGEN, UNAM | 38 |
| Figura 5.2 Sensor resistivo de nivel | 39 |
| Figura 5.3 HR Wavemaker, para las condiciones de oleaje | 39 |
| Figura 5.4 Interfaz OWC | 40 |
| Figura 5.5 Diseño OWC dentro del canal de oleaje | 41 |
| Figura 5.6 Arreglo de sensores dentro del canal de oleaje | 42 |
| Figura 5.7 Caracterización del fenómeno | 44 |
| Figura 5.8 Pruebas 1 a 11 | 45 |
| Figura 5.9 Pruebas 12 a 22 | 45 |
| Figura 5.10 Pruebas 23 a 33 | 46 |
| Figura 5.11 Pruebas 34 a 44 | 46 |
| Figura 5.12 Pruebas 45 a 55 | 47 |
| Figura 5.13 Pruebas 56 a 66 | 47 |
| Figura 5.14 Pruebas 67 a 77 | 48 |
| Figura 5.15 Pruebas 78 a 88. | 48 |
| Figura 5.16 Pruebas 89 a 99 | 49 |
| Figura 5.17 Pruebas 100 a 110 | 49 |
| Figura 5.18 Pruebas 111 a 121. | 50 |
| Figura 5.19 Pruebas 122 a 132 | 50 |
| Figura 5.20 Pruebas 133 a 143 | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.21 Pruebas 144 a 154 | 51 |
| Figura 5.22 Pruebas 155 a 165 | 52 |
| Figura 5.23 Pruebas 166 a 176 | 52 |
| Figura 5.24 Pruebas 177 a 187 | 53 |
| Figura 5.25 Pruebas 188 a 198 | 53 |
| Figura 5.26 Nomograma OWC | 55 |
| Figura 5.27 Gráfica de la función del coeficiente a | 57 |
| Figura 5.28 Gráfica de la función del coeficiente b | 57 |
| Figura 5.29 Esquema de sistema OWC de Falcão | 60 |
| Figura 5.30 Resultados oleaje regular | 60 |
| Figura 5.31 Resultados oleaje irregular | 60 |
| Figura 5.32 Cámara OWC prototipo | 61 |
| Figura 5.33 Primer esquema de diseño .. | 62 |
| Figura 5.34 Segundo esquema de diseño .. | 62 |

Capítulo 6

| | |
|---|----|
| Figura 6.1 Comparación de resultados $kh = 0.5$ | 65 |
| Figura 6.2 Comparación de resultados $kh = 1$ | 65 |
| Figura 6.3 Comparación de resultados $kh = 1.5$ | 66 |
| Figura 6.4 Comparación de resultados $kh = 2$ | 66 |

Índice Tablas

Capítulo 2

Tabla 2.1 Estimación de la producción de energía eléctrica [IEA-DES, 2006]. . . . 9

Capítulo 5

Tabla 5.1 Parámetros de las pruebas experimentales41

Tabla 5.2 Intervalos de mayor eficiencia del dispositivo OWC54

Tabla 5.3 Coeficientes de ajuste de funciones exponenciales56

Tabla 5.4 Resultados con mayor eficiencia 61

Lista de Símbolos

| | |
|--------------|--|
| a | Amplitud |
| A | Amplitud de ola incidente en el interior del OWC |
| an | Sumergencia de pared vertical |
| b | Coeficiente de ajuste de recta |
| b1 | Coeficiente de ajuste de recta |
| B | Amplitud de ola reflejada en el interior del OWC |
| c | Distancia horizontal entre paredes |
| d | Coeficiente de ajuste de curva |
| f | Coeficiente de ajuste de curva |
| g | Constante de gravedad |
| h | Profundidad |
| H | Altura de ola |
| Hi | Altura de ola incidente |
| Howc | Altura de ola en el interior de la cámara OWC |
| Hz | Hertz |
| i | Parte imaginaria |
| I (z) | Ecuación de dependencia con la profundidad |
| j | Coeficiente de ajuste de curva |
| J | Ortogonalidad de función cosh (h+z) |
| k | Número de onda |
| l | Coeficiente de ajuste de curva |

| | |
|----------------------------|---------------------------------|
| L | Longitud de onda |
| m | Coeficiente de ajuste de curva |
| n | Número de términos evanescentes |
| o | Coeficiente de ajuste de curva |
| p | Coeficiente de ajuste de curva |
| q | Coeficiente de ajuste de curva |
| R | Coeficientes de reflexión |
| T | Periodo de ola |
| x | Coordenada horizontal |
| z | Coordenada vertical |
| σ | Frecuencia angular |
| Φ | Potencial de velocidades |

Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es analizar experimental y analíticamente un sistema OWC (Oscillating Water Column), para el aprovechamiento de energía undimotriz (oleaje).

Los objetivos particulares son:

- Generar un modelo matemático del fenómeno en estudio.
- Evaluar experimentalmente el modelo a escala, construido en el canal de olas del Instituto de Ingeniería.
- Validar el modelo matemático con los resultados obtenidos en la experimentación.
- Proporcionar una herramienta de diseño, para el mayor aprovechamiento energético del sistema OWC.
- Fomentar el uso de sistemas OWC, en nuestro país.

De esta manera se pretende contribuir con el desarrollo de tecnologías alternas en nuestro país, así como en otras partes del mundo.

Motivación

El océano, como fuente de energía producida por el oleaje, es un vasto y complejo mecanismo capaz de brindar tan ansiado recurso renovable con una alta densidad, pero su manejo no es trivial. Hasta el momento existen en el mundo diversos sistemas, que pretenden obtener este recurso, necesario para el desarrollo industrial y por ende el de la sociedad. Diversos países han optado por introducir estas tecnologías, sin embargo y de manera global, la producción de energía eléctrica por este medio aún no se realiza de forma masiva.

Por tanto, esta investigación pretende contribuir con los esfuerzos de impulsar una de las llamadas “energías limpias” y que a su vez contribuya a la reducción de los gases de efecto invernadero.

Aunque este trabajo no proporciona una metodología de construcción para los sistemas de generación OWC, ofrece una base sólida de los factores de diseño esenciales, que permitan obtener los mayores valores de eficiencia posibles.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

“Las estructuras esenciales de la vida, como las estrellas o el proceso de producción de carbono dependen de una asombrosa secuencia de accidentes consecutivos. Por tanto se convierte en un problema filosófico de suprema magnitud, la cuestión de la intencionalidad del universo” **Die Gottesformel (La fórmula de dios)**

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial de LA sociedad, tal como se conoce hoy en día, no podría ser concebido sin la coexistencia de dos elementos tan importantes como la vida misma, el carbono y el hidrógeno. Esta herencia geológica, causado por la descomposición de materia orgánica, durante un proceso de cientos de miles de años, sumada a su finita existencia, hace del petróleo un recurso altamente valioso. El ser humano ha sabido de su existencia hace un par de miles de años, se dice en Génesis 11:3 que el petróleo fue utilizado para pegar los ladrillos de la torre de Babel. Los indígenas de la época precolombina y la cultura china son ejemplos de culturas que utilizaron el petróleo como fuente de energía. Sin embargo, fue hasta 1859 cuando el coronel Edwin L. Drake perforó el primer pozo en Estados Unidos, así se iniciaría su larga carrera de comercialización mundial, sirviendo de palanca para el desarrollo industrial.

Hoy a más de 150 años de este hecho, un lapso tan efímero en la historia de la Tierra, se ha notado las consecuencias del uso irracional de los hidrocarburos. Aunado a los cambios geológicos naturales, el petróleo ha contribuido a la alteración del equilibrio del medio ambiente, necesario e indispensable para la vida humana.

A pesar del panorama negativo que muchos científicos vislumbran para las décadas siguientes, en los últimos lustros se han creado medios diferentes que contribuyen a solventar las necesidades energéticas del mundo industrial y de las sociedades. Como consecuencia, han surgido las llamadas “fuentes alternas” de energía.

Entre estas opciones se encuentran los sistemas undimotrices, en otras palabras la energía latente en las ondas oceánicas. Las olas son el resultado del efecto del viento soplando a lo largo de cientos o miles de kilómetros en mar abierto, lo que origina una transferencia de energía hacia la superficie del océano. Son, por tanto, una forma de energía cinética y potencial a la que se puede acceder usando diversos mecanismos armónicos que responden al movimiento de las olas, captando parte de su energía. En definitiva, la energía undimotriz consiste en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial del oleaje para la producción de electricidad.

El oleaje se entiende desde un punto de vista de la ingeniería como un derivado terciario de la energía solar. El calentamiento desigual de la atmósfera terrestre genera viento, y el viento genera olas. Únicamente el 0.01 % del flujo de la energía solar se transforma en energía de las olas. Una de las propiedades características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias con bajos niveles de pérdida de energía. Por ello, la energía generada en cualquier parte del océano acaba en el borde continental, de esta manera, su energía se concentra

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

en las costas.

La energía contenida en las olas varía de un sitio a otro pero, en general, cuanto más alejadas del ecuador estén, más energía contendrán. Condiciones locales, tales como, tipo de costa, lugar donde se generen y profundidad del océano, tienen una gran importancia en la definición de la cantidad de energía.

Existe un gran número de dispositivos pensados para el aprovechamiento de este tipo de energía, en claro contraste con cualquier otro tipo de aprovechamiento de energía renovable. A pesar de que hay más de 1000 patentes mundiales de generadores energéticos de olas WEC (*Wave Energy Converter*) por sus siglas en inglés, son pocos los conceptos que actualmente generan electricidad a gran escala, entre estos resaltan los casos de Portugal, Escocia, Inglaterra entre otros [Falcão AFO, 2010].

Dentro de estos dispositivos se encuentran la tecnología OWC, creada por Yoshio Masuda, su funcionamiento básico consta de una cámara presurizada sumergida, su interacción con el oleaje genera una oscilación de agua en su interior y ésta comprime y desplaza el aire en su interior, el cual impulsa una turbina conectada a un generador.

El trabajo presentado en esta tesis, pretende describir el fenómeno y plantear un modelo matemático validado de manera experimental, para determinar las variables físicas de diseño de una columna de agua oscilante, que permitan la mayor oscilación de agua posible en su interior. Al mejorar esta oscilación en el interior de la cámara, la cantidad de aire desplazado se incrementa y por consecuencia aumenta la generación de corriente eléctrica en el generador.

A su vez se pretende contribuir con el desarrollo tecnológico de México en este rubro, aprovechando la riqueza natural que existe en las costas.

1.1 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Los primeros 3 capítulos de esta tesis, tienen la finalidad de transmitir al lector un panorama general del estado del arte de este tema, los cuales son los siguientes:

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.

Capítulo 2: El océano como fuente de energía, una descripción del génesis de la energía latente en los océanos.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Capítulo 3: Sistemas conversores de energía, enmarca el estado del arte de este tipo de sistemas.

El Capítulo 4: Modelo numérico OWC, describe y plantea el modelo matemático utilizado para describir el fenómeno presente en los dispositivos OWC.

El Capítulo 5: Análisis experimental, describe el modelo físico construido en el canal de olas y la selección de parámetros de oleaje necesarios para su experimentación.

Los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio de dispositivo, fueron procesados y analizados, para su posterior comparación con los resultados obtenidos en el modelo numérico. La comparación y su análisis se presentan en los Capítulos 6: Comparación.

En el Capítulo 7, se plantean las conclusiones finales del trabajo y se proponen las nuevas líneas de investigación que complementen este trabajo.

CAPÍTULO 2

EI OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

“¿Azar? No creo que Dios juega a los dados” A. Einstein

CAPÍTULO 2. EL OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

2.1 ORIGEN

Todo tipo de oscilación en la superficie de agua que sea periódica se le denomina ola. Las olas de los océanos son originadas por diversas causas. Entre estas causas se pueden señalar: el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol sobre las masas oceánicas, los maremotos, las tormentas, etc. Sin embargo, de todas ellas, el viento constituye el agente que genera las olas más comunes y de mayor contenido energético. Por ello, se suele decir que la energía que poseen las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar, ya que el viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el Sol produce en la superficie terrestre, y el viento, al actuar sobre el agua del mar le transmite energía y la pone en movimiento, produciendo ondulaciones en las capas superficiales que constituyen el oleaje que se observa en todas las aguas de los océanos y que golpean las costas de los continentes.

Los mecanismos que intervienen en la interacción entre el viento y la superficie del mar son complejos y aún no se explican en su totalidad. En principio, el proceso puede resumirse de la forma siguiente:

En la fase inicial de generación de oleaje por viento, la fluctuación turbulenta de la presión atmosférica induce olas pequeñas, de forma casi regular, llamadas ondas capilares. Estas ondas son generalmente inestables y se atenúan, debido a la tensión superficial, cuando el viento está en calma. Cuando aumenta la velocidad del viento, las olas crecen y las fuerzas de gravedad son suficientes para apoyar el movimiento ondulatorio. El crecimiento de la ola no es infinito, cuando las olas llegan a su pendiente límite (alrededor de 1/7 en aguas profundas), inicia el proceso de rotura de la misma.

El oleaje generado en la zona donde sopla el viento es caótico, de tal manera, que no es posible definir una longitud de onda predominante y una dirección del mismo. Sin embargo, conforme el oleaje se aleja de la zona de generación y avanzan hacia la costa, las olas de mayor longitud de onda absorben a aquellas ondas de longitudes menores, debido a que las primeras presentan una mayor celeridad.

Este oleaje puede desplazarse cientos de kilómetros sin perder energía cinética, pero cuando el oleaje viaja en aguas someras, la fricción con el fondo interactúa con este y modifica la altura y longitud de ola, hasta el punto donde se produce la rotura del oleaje en 4 diferentes maneras: voluta, descrestamiento, colapso y oscilación, los cuales están definidos por la batimetría de la costa.

2.2 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE (ENERGÍA UNDIMOTRIZ)

Un mundo altamente industrializado, con una población en crecimiento exponencial y la reducción en la producción de petróleo, el abastecimiento de energía eléctrica se convertirá en un tema de suma importancia para la sociedad. Es menester pensar que las fuentes tradicionales de energía como el carbón, petróleo, en un par de décadas no podrán cubrir la demanda energética mundial, por tanto la utilización de nuevas fuentes alternativas como medios complementarios de generación permitirán, no solo subsanar esta carencia, sino que también coadyuvarán al cuidado del Medio Ambiente.

En los estudios de fuentes de energías renovables, los océanos han sido foco de análisis para aprovechar su poder. El mar es un extraordinario vector energético por su capacidad de acumulación y transporte de la energía. Esto, lleva a considerarlo como una de las fuentes de mayor potencial [Duckers, 2000], que supera a cualquier otro medio existente. Sabemos que las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta están cubiertas por el mar; por lo tanto, los mares se transforman en un vasto universo de energía potencial. Por tanto, a toda aquella manifestación de la energía del oleaje, se le denomina undimotriz.

Si bien desde épocas remotas los navegantes y pescadores han dependido del conocimiento del comportamiento del oleaje, las afirmaciones que se realizaron durante el siglo XVIII respecto a las mismas reflejaban el gran desconocimiento que de ellas se tenía. En realidad el estudio riguroso de las olas es muy reciente, ya que se inicia después de la II Guerra Mundial.

En 1925 se publicaron las primeras ideas acerca del proceso de formación de las olas. En 1957, Phillips y Miles, propusieron las teorías de formación de las olas que actualmente prevalecen. La teoría de Phillips decía que: “las fluctuaciones de presión del viento sobre la superficie del agua producen fluctuaciones en la superficie del agua y es lo que le da la rugosidad”. Miles complementó esta teoría diciendo: “las fluctuaciones del agua producen fluctuaciones en el aire y que estas fluctuaciones se ponen en fase, haciendo crecer más las olas”.

En 1967, Hasselmann, añadió un concepto que constituye la teoría que actualmente se acepta. Según Hasselmann, las olas interactúan entre sí y comparten la energía. Por ello era posible el transporte de energía dentro del espectro entre algunas frecuencias determinadas, lo que explicaba el crecimiento al principio de la formación de las olas.

Actualmente se han logrado grandes progresos en el estudio de las olas,

CAPÍTULO 2. EL OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

facilitándose pronósticos útiles que permiten desde impedir tragedias, hasta el aprovechamiento del oleaje como fuente de energía. A ello ha colaborado el diseño de nuevos aparatos, donde se construyen modelos artificiales a escala; los nuevos métodos de observación del oleaje en las boyas y plataformas flotantes, y el empleo de satélites que permiten recoger datos en unos 40000 lugares de la atmósfera y del océano cada día.

El trabajo presentado en esta tesis está centrado en una de las manifestaciones de la energía oceánica, el oleaje. Este tiene características propias que no deben confundirse con las otras energías oceánicas como la energía mareomotriz o la energía de las corrientes marinas, cuyas particularidades se describirán en temas siguientes.

En definitiva, la energía undimotriz representa una alternativa renovable y limpia, que está a la espera de ser aprovechada por nosotros y para nuestro beneficio.

2.3 POTENCIAL ENERGÉTICO EN EL MUNDO

Como ya se ha hablado anteriormente, el recurso potencial en el mar es vasto, sin embargo, su disponibilidad depende fuertemente de diversas variables: de la ubicación geográfica, de la plataforma continental, de las condiciones meteorológicas y del fetch local. En otras palabras, la disponibilidad de energía del oleaje tiene una fuerte componente local y debe ser analizado como tal.

Existen en la literatura estudios para determinar la cantidad de energía que puede ser aprovechada, sin embargo la mayoría son desde la óptica del oleaje generado en aguas profundas, lo que si bien, ofrece una muy importante perspectiva, no considera las condiciones morfológicas y climáticas locales que pueden ser determinantes en la amplificación o pérdida de la energía que viaja con las ondas hacia la costa.

La UNESCO en el año 2005 realizó un estudio para cuantificar la energía disponible en los océanos del mundo, los resultados arrojaron un panorama muy prometedor, determinaron que este recurso supera los 2 000 GW. Aunque existen otros estudios en la literatura que contemplan una potencia de más de 1000 TW.

La Agencia Internacional de Energía [IEA-OES, 2008], estimó en el año 2006, que la producción anual en el mundo estaría en los 17.4 TW/H, el reporte se muestra en la Tabla 2.1.

CAPÍTULO 2. EL OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

| | Recursos Estimados TW/Año | Producción Global de Electricidad TW/Año |
|--------------------|------------------------------|---|
| Mareas | 300 | 17.4 |
| Oleaje | 80 | |
| Corrientes marinas | 800 | |
| Gradiente Térmico | 10 | |
| Otras fuentes | 2 | |

Tabla 2.1 *Estimación de la producción de energía eléctrica en los océanos [IEA-DES, 2006]*

La empresa finlandesa AW-ENERGY OY, y una de las más avanzadas en el ramo de la energía undimotriz, generó un mapa global para determinar grosso modo el potencial en aguas profundas (Figura 2.1)

Los datos que obtuvieron corresponden al valor energético por metro de frente de ola, es posible apreciar que las mayores áreas potenciales de generación se encuentran en las zonas más alejadas al ecuador [Boud, 2003]. Sin embargo, las condiciones necesarias para la generación de energía no están limitadas por la condición geográfica. Se tiene una gran disponibilidad del recurso, lo complejo radica en la construcción de dispositivos que sean capaces de lograr eficiencias suficientes, que permitan utilizar este recurso como medio masivo de generación. La lista de los países que han invertido para estudiar y llevar a la práctica los dispositivos undimotrices va a la alza, por ejemplo: Portugal, Noruega, Brasil, Finlandia, España, Escocia, Australia entre otras [Falcão AFO, 2010].

La tendencia en futuros años, marca un incremento en el uso y aprovechamiento de estas tecnologías no solo en países considerados desarrollados, sino que también se vislumbran como una herramienta de crecimiento para países en vías de desarrollo como México.

CAPÍTULO 2. EL OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

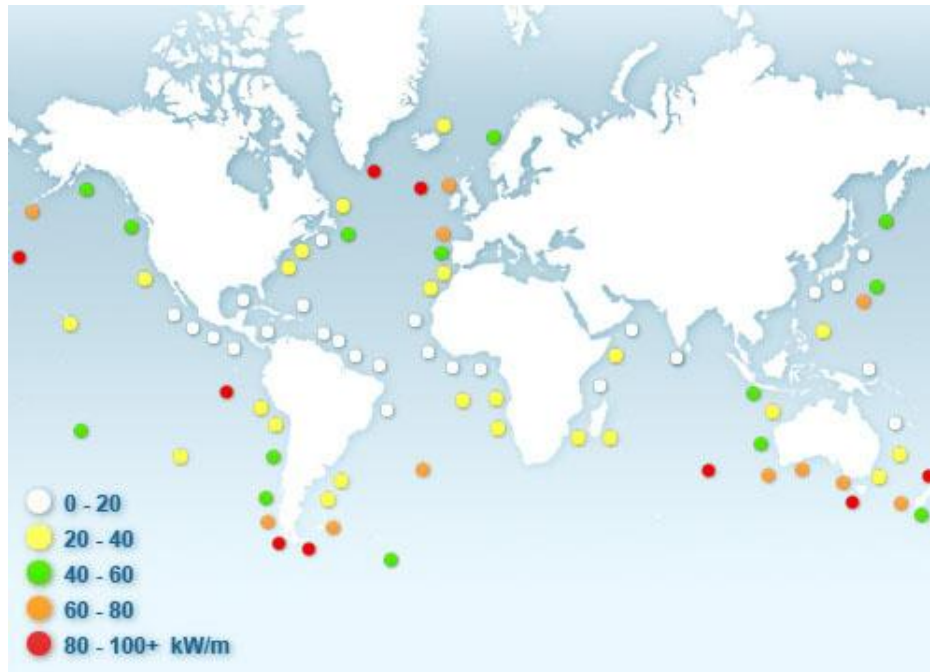


Figura 2.1 Potencia en kW / m en las costas del mundo en aguas profundas [AW Energy oY, 2009]

2.4 POTENCIAL ENERGÉTICO EN MÉXICO

Existe en la literatura algunos estudios para determinar la cantidad de energía que puede ser aprovechada, sin embargo, estos estudios han sido desarrollos y obtenidos de manera generalizada alrededor del mundo. En el caso de México, son escasos los trabajos referentes al potencial energético del oleaje, en primera instancia se encuentra el proyecto IMPLUSA IV del Instituto de Ingeniería, UNAM [Hiriart, 2009] cuyo trabajo presenta una evaluación preliminar de lo que idealmente se podría obtener en energía eléctrica si se aprovechara la energía oceánica en el litoral del Golfo de California. El CICESE, realizó una investigación para determinar el potencial que existen en las costas de Baja California, para esto se planea llevar a cabo un riguroso estudio con metodología donde se incluya, observaciones directas, simulaciones numéricas, validación de modelos con datos obtenidos en sitios, estadísticas de largo plazo, y caracterización del clima marítimo de toda la Península [Ocampo, 2009], entre otras.

Por otro lado el Instituto de Ingeniería, realizó un trabajo que estima la energía del oleaje así como el clima marítimo, a lo largo del territorio marítimo mexicano [Pérez, 2012]. Con base en la ecuación del espectro Pierson Moskowitz y datos de oleaje en aguas profundas. Los resultados de este trabajo de investigación se muestran en la Figura 2.2.

CAPÍTULO 2. EL OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

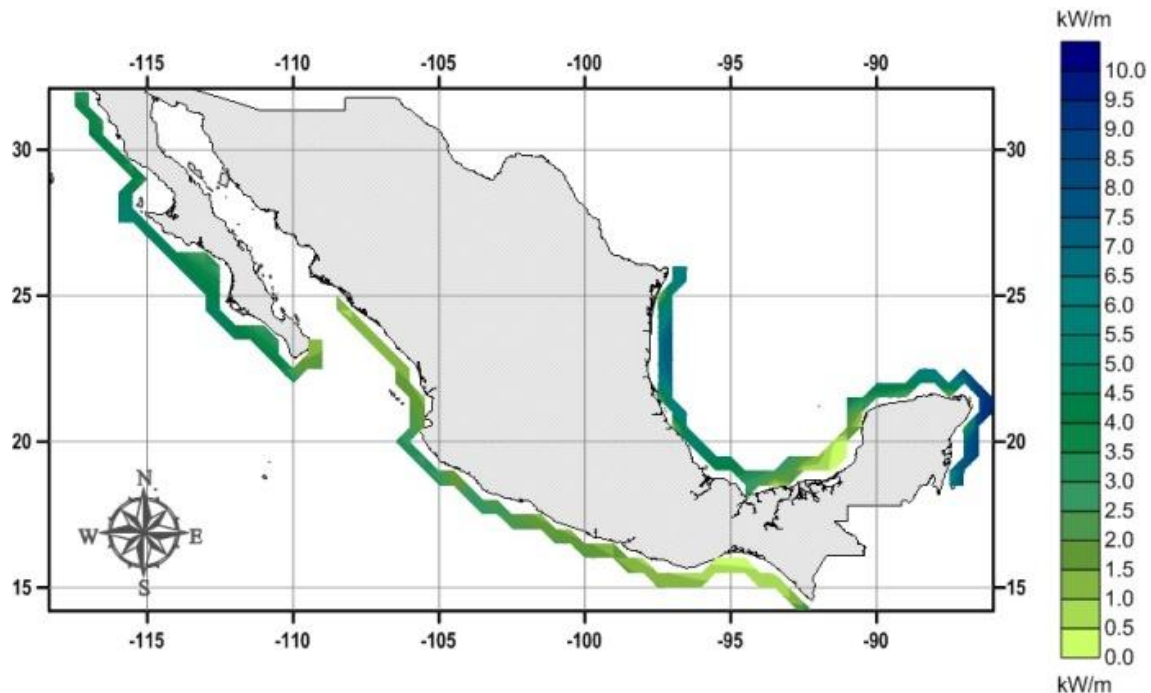


Figura 2.2 Potencial energético del oleaje, en las costas de México [Pérez, 2012]

Los valores mostrados representan el potencial expresado en kW por cada metro de frente de ola, correspondiente a la altura de ola media y su periodo asociado. A lo largo del litoral, se pueden apreciar claramente tres zonas que presentan los mayores rangos de energía.

Estas zonas son: la Península de Yucatán con valores que van desde 7 hasta 9 kW/m, estos valores son muy altos debido a que el análisis presentado en la Figura 2.2, incluye tormentas y huracanes. El norte del Golfo de México cerca de la costa de Tamaulipas es la segunda zona donde resalta el potencial con valores que rondan los 5-7 kW/m. La tercer zona, perteneciente al Pacífico, se encuentra en la Península de Baja California sus valores se encuentran entre los 4 y 6 kW/m. Por su parte, el área del golfo de Tehuantepec es la zona con menor potencia teniendo intervalos de 0.5 a 2 kW/m.

Aunque las costas mexicanas no figuran entre los países con más altos índices de energía, se cuenta con una extensa línea de costa (más de 11 500 km) para la instalación de tecnologías undimotrices, gracias a su clima favorable que facilita su implementación y mantenimiento, a poca distancia de la costa.

2.5 VENTAJAS DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ

Este tipo de energía solo es una línea, que alza la voz para responder al llamado del cuidado del medio ambiente, sin duda, otras formas de generación como la solar, eólica, hidráulica, biomasa, nuclear proporcionan beneficios particulares, sin embargo es importante resaltar que la undimotriz en sí, es mucho más estable, por ejemplo en el tiempo que la eólica, o la hidráulica.

Algunos de los aspectos positivos del aprovechamiento del oleaje son principalmente los siguientes:

- El oleaje puede desplazarse desde un punto de origen (oleaje sea) durante largas distancias sin perder energía (oleaje swell).
- Es un recurso predecible si se conocen, entre otros factores, el viento en alta mar, las tormentas y las corrientes atmosféricas, gracias a su propiedad de propagación a lo largo de cientos de kilómetros sin que se degrade su energía
- Es un recurso cercano a grandes consumidores.
- Ofrece alta disponibilidad ya que es un recurso abundante y con flujos de energía elevada.
- El desarrollo de esta energía impulsará el suministro eléctrico a regiones remotas, cercanas a zonas costeras, en donde los costos de tendido eléctrico son muy elevados, igual que ocurre con otras energías renovables.
- Puede ser utilizada con fines multipropósito, como generadores de energía y sistemas de protección de playas.
- Es una energía limpia, no emite gases contaminantes a la atmósfera.
- Permite usos alternativos a la conversión eléctrica de la energía obtenida, como la producción de combustibles secundarios o la obtención de agua potable del mar.
- La energía cinética de las olas (función de la altura de la ola al cuadrado) es 1000 veces superior a la del viento (función al cubo de la velocidad del aire), lo que permite utilizar aparatos más pequeños para producir la misma cantidad de energía.
- El impacto visual es mucho menor que el de los aerogeneradores; además, los dispositivos pueden estar situados bajo la superficie del mar, en rompeolas o alejados de la costa.

CAPÍTULO 2. EL OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

2.6 OLEAJE

Como se explicó anteriormente, el oleaje es el resultado de la interacción de la atmósfera con la superficie del mar, con ello se genera un movimiento de la superficie libre del mar y varía con el tiempo y con el espacio. En general, la propagación de oleaje en un fluido es un proceso no lineal, sin embargo se puede simplificar su análisis físico y matemático con algunas consideraciones de acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles, de la Comisión Federal Electricidad. A continuación se listan las más importantes:

- Las fuerzas principales responsables del movimiento ondulatorio son las de gravedad y las producidas por las diferencias de presión.
- Fluido no viscoso. En virtud que los efectos viscosos sólo son significativos en las proximidades de los contornos, y para el movimiento oscilatorio el espesor de la capa límite es del orden de milímetros, por lo que se puede aceptar que la viscosidad es propiamente nula y no hay tensiones tangenciales.
- El movimiento oscilatorio puede suponerse irrotacional.
- Fluido incompresible y homogéneo. El agua puede tratarse como un fluido casi incompresible.
- La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- No existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino.
- El efecto de Coriolis.
- El fondo se tomará fijo e impermeable.
- Amplitud de onda pequeña respecto a la profundidad e invariable en tiempo y espacio.
- Ondas de gran longitud respecto a su amplitud.
- El período es constante.

2.6.1 Características básicas

Para describir el fenómeno del oleaje se han desarrollado diversas teorías, pero en la práctica es comúnmente utilizada la teoría descrita por Airy, también conocida como teoría de ondas de pequeña amplitud, Stokes de primer orden o simplemente teoría lineal. Esta teoría tiene como finalidad describir las propiedades para un ciclo de ola y son invariables a lo largo de éste, posee tres parámetros principales:

- El período (T), definido como el tiempo que transcurre entre el paso sucesivo de dos crestas de ola por un punto estacionario.
- Altura de ola (H), distancia vertical entre la cresta y el valle de la ola.

CAPÍTULO 2. EL OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

- Profundidad (h), distancia vertical entre el nivel de agua significativa y el fondo.

También se manejan otros parámetros, no menos importantes los cuales se describen a continuación:

- La longitud de onda (L), distancia horizontal entre dos crestas sucesivas de la onda, o la distancia entre dos pasos ascendentes o descendentes por su nivel medio, o alternativamente la distancia entre dos valles.
- La celeridad o velocidad de fase (C), la cual representa la velocidad de propagación de la forma de onda y puede calcularse $C = L/T$.
- Frecuencia angular (ω), el tiempo que tarda una partícula de agua en cumplir un ciclo.
- Superficie libre o elevación de ola (η), representa la elevación instantánea del agua respecto al nivel de agua en reposo, $\eta = 2\pi/T$.
- Velocidad horizontal y vertical de la partícula de agua.
- Aceleración horizontal y vertical de la partícula de agua.

Los parámetros anteriores y otros complementarios pueden ser determinados teóricamente a través de sus formulaciones. En la figura 2.3 se muestra un esquema de los parámetros básicos de una ola.

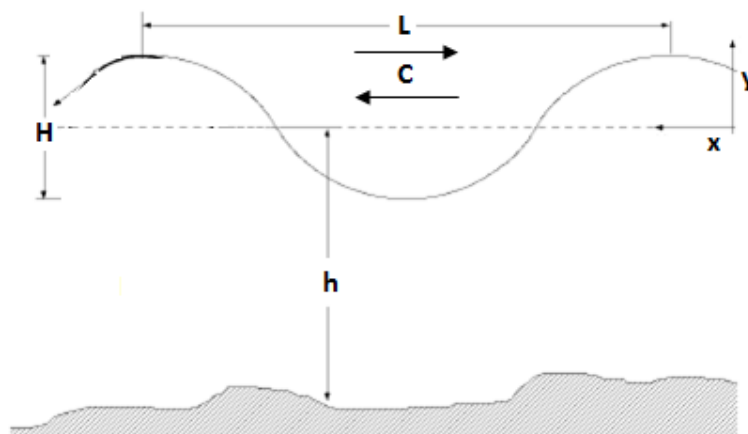


Figura 2.3 Parámetros básicos de una ola regular

CAPÍTULO 2. EL OCÉANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

| | Aguas someras $kh < \pi/10$ | Aguas de transición $\pi/10 < kh < \pi$ | Aguas profundas $kh > \pi$ |
|----------------------------------|---|--|---|
| Longitud de onda | $L = T \sqrt{gh}$ | $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh)$ | $L = \frac{gT^2}{2\pi}$ |
| Celeridad | $C = \frac{L}{T} = \sqrt{gh}$ | $C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{k} \tanh(kh)$ | $C = \frac{gT}{2\pi}$ |
| Celeridad de grupo | $C_g = C = \sqrt{gh}$ | $C_g = nC = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$ | $C_g = \frac{C}{2}$ |
| Velocidad de las partículas | Horizontal | $u = a \sqrt{\frac{g}{h}} \cos(kx - \sigma t)$ | $u = a \sigma e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$ |
| | Vertical | $w = a \sigma \left(1 + \frac{z}{h} \right) \sin(kx - \sigma t)$ | $w = a \sigma e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$ |
| Aceleración de las partículas | Horizontal | $a_x = a \sigma \sqrt{\frac{g}{h}} \sin(kx - \sigma t)$ | $a_x = a \sigma^2 e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$ |
| | Vertical | $a_z = -a \sigma^2 \left(1 + \frac{z}{h} \right) \cos(kx - \sigma t)$ | $a_z = -a \sigma^2 e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$ |
| Desplazamiento de las partículas | Horizontal | $\zeta_x = -a \sigma \sqrt{\frac{g}{h}} \sin(kx - \sigma t)$ | $\zeta_x = -a e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$ |
| | Vertical | $\zeta_z = a \left(1 + \frac{z}{h} \right) \cos(kx - \sigma t)$ | $\zeta_z = a e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$ |
| Presión total | $p = -\rho g z + \rho g \eta$ | $p = -\rho g z + \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$ | $p = -\rho g z + \rho g \eta e^{kz}$ |
| Flujo de energía | $\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \sqrt{gh}$ | $\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{\sigma}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right]$ | $\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{1}{2} C$ |

Figura 2.4 Propiedades ingenieriles de la teoría lineal [Manual de Diseño de Obras Civiles CFE]

CAPÍTULO 2. EL OCEANO COMO FUENTE DE ENERGÍA

2.6.2 Clasificación de las ondas oceánicas

En el océano existen muchos tipos de ondas, no solamente las originadas por el viento. Cada tipo tiene su origen y sus particularidades. Un análisis de acuerdo al periodo, a la fuerza generadora y la cantidad de energía permite distinguir los tipos de ondas, los cuales se muestran en la figura 2.5.

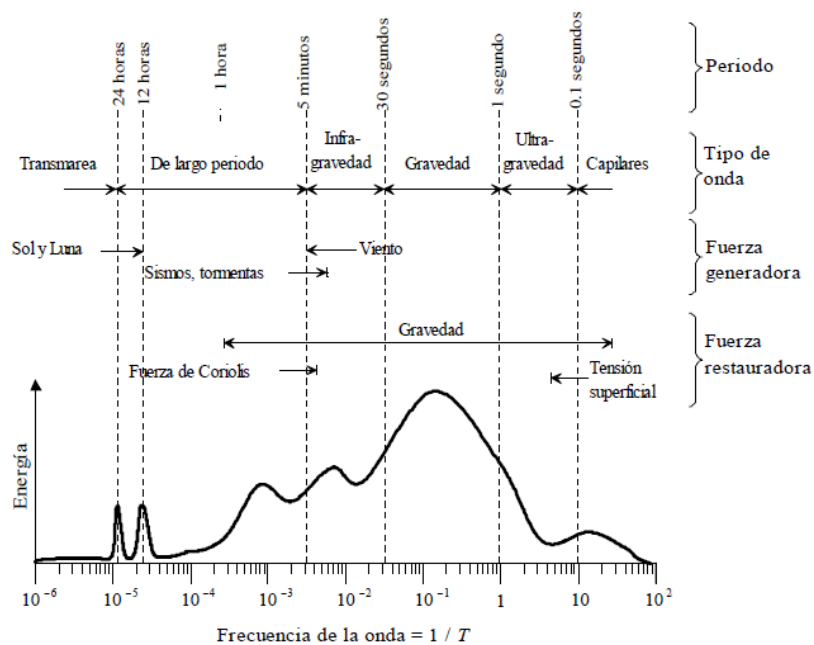


Figura 2.5 Gráfica Periodo - Energía de los tipos de ondas oceánicas [Kinsman, 1965]

CAPÍTULO 3

SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA

“La energía es la integral de la potencia en el tiempo, eso significa que es importante tener cierta potencia, pero más importante aún es tenerla durante un periodo de tiempo largo” Mats Leijon

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA

3.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Desde tiempos remotos el mar ha sido fuente de inspiración, motivo de mitos, leyendas y ha fomentado la curiosidad del hombre por aprovechar sus grandes recursos. Desde los primeros intentos, hasta las tecnologías más avanzadas, los procesos de conversión de energía undimotriz en electricidad son: la variación del nivel del agua, las oscilaciones longitudinales del oleaje, la variación de la inclinación de la superficie libre del mar, la variación de las presiones hidrodinámica e hidrostática, las fuerzas de inercia, efecto piezoeléctrico, las oscilaciones forzadas y los métodos neumáticos e hidráulicos.

Se recoge en la literatura que uno de los primeros dispositivos empleados para el aprovechamiento de las olas fue ideado por los hermanos Gerard, de origen francés, que consistió en recuperar y almacenar el agua de mar a determinada altura y este se utilizó posteriormente en numerosas villas de Inglaterra.

En las primeras décadas del siglo XIX (1799) el ingeniero M. Fursenot puso en práctica en las costas de Argelia un dispositivo que transformaba las oscilaciones de las olas empleando un juego de levas y engranajes. En 1899, en “Ocean Grove” a 110 km al sur de Nueva York, se construyó una instalación que utilizaba la energía de las olas por medio de una placa receptora (Fig. 3.1), que al estar unida a los vástagos de unas bombas elevaba el agua a un grupo de tanques.

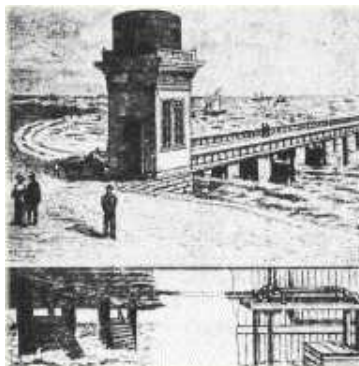


Figura 3.1 Estación Ocean Grove

En 1885 D. José Barrufet y Veciana patentó un ingenioso dispositivo (Figura 3.2), denominado “Marmotor”[Barrufet, 1885], para obtener energía eléctrica de las olas del mar, e intentó la construcción de un prototipo funcional en Barcelona sobre la

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA

playa llamada de la Mar Vieja.

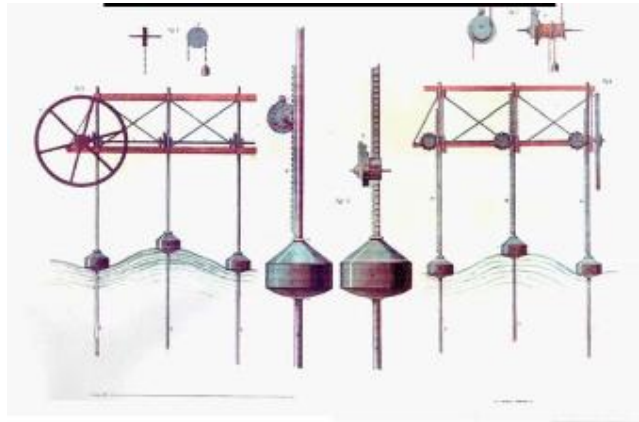


Figura 3.2 Dispositivo "Marmotor" [Barrufet, 1885]

Fue hasta 1940, cuando se retomaron los estudios en la creación de sistemas de aprovechamiento marino. La columna de agua oscilante es un tipo de convertidor de energía, su creador Yoshio Masuda a bordo del buque KAIMEI (1970), comenzó el desarrollo de una boya de navegación impulsado por este dispositivo. Se compone de una cámara neumática abierta en la parte inferior el agua de mar y en la parte superior de la atmósfera a través de una turbina de aire (Fig. 3.3). El movimiento oscilante de la columna de agua que actúa sobre él, dichas ondas producen un flujo bidireccional a través de la turbina que acciona un generador eléctrico.

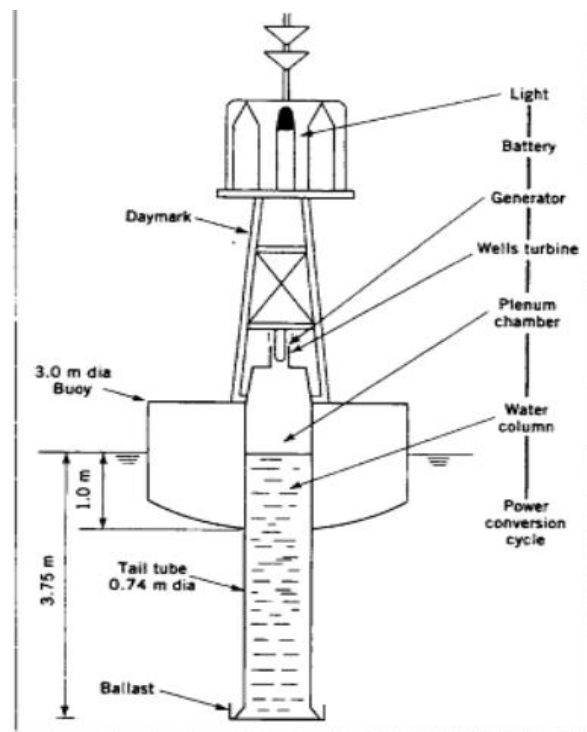


Figura 3.3 Esquema del sistema OWC [Brooke, 2003]

El decremento del petróleo en los años setenta provocó que el uso de la energía del mar fuera más tentativo. Se presentaron cuatro proyectos que fueron analizados por el departamento de energía del Gobierno Inglés, y entre 1976 y

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA

1981 se asignaron trece millones de libras esterlinas para las investigaciones en esta esfera. El ingeniero Stephen Salter, de la Universidad de Edimburgo, presentó un proyecto conocido como el «pato» de Salter, en 1973 (Fig. 3.4). Este es un tipo de estructura cuya sección transversal tiene forma de leva, asemejándose a un pato flotando en el agua. La zona de mayor diámetro permanece dentro del agua, opera como pivote frente al embate del mar y en ella se ubica un grupo de bombas que impulsan el agua a máquinas hidráulicas que están unidas a generadores eléctricos.

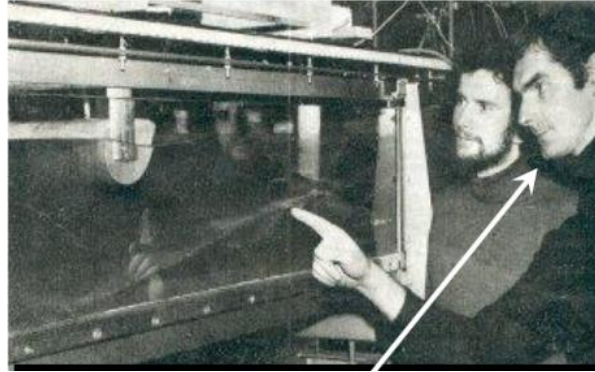


Figura 3.4 Stephen Salter (derecha) [Falcão AFO, 2010]

Este diseño implica el uso de un grupo de estos patos, que se articulan por medio de una espina dorsal apoyada en sus extremos en grandes boyas, y se fijan al fondo del mar. Este eje se construyó con 15 m de diámetro para soportar la potencia máxima de las olas, pese a ello su resistencia y estabilidad fueron cuestionadas por ser su principal defecto. En las referencias consultadas no se exponen los materiales empleados en su construcción, pero se plantea que ubicados en posición paralela al oleaje puede aprovechar hasta 90 % de las olas.

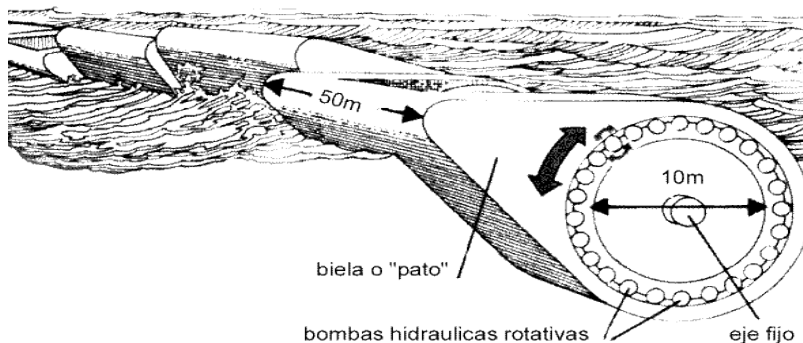


Figura 3.5 Esquema de prototipo «pato» de Salter [Falcão AFO, 2010]

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA

En 1977, en la Real Universidad de Irlanda del Norte, Allan A. Wells y Wittaker construyeron una boya que convertía la energía de las olas en energía eléctrica utilizando convertidores neumáticos de 45 kW de potencia (Fig. 3.5). El convertidor se sujetó a una boya de 4 m de diámetro y pese a su flotabilidad el equipo trabajó durante un año, ya que sufrió importantes averías a causa de una tormenta. Actualmente, existen cientos de boyas de navegación que emplean convertidores neumáticos con potencia entre 2 y 30 W.



Figura 3.6 *Boya construida por Wells y Wittaker [Cifuentes, 2003]*

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Existen un gran número de dispositivos pensados para el aprovechamiento de este tipo de energía, en claro contraste con cualquier otro tipo de aprovechamiento de energía renovable, en la literatura hay diversas clasificaciones de estos y varían de acuerdo al concepto de diseño, sin embargo y para efectos prácticos se presenta la clasificación general siguiente:

- I. **Columna oscilante de agua:** consiste en la oscilación del agua dentro de una cámara semisumergida y abierta por debajo del nivel del mar. El oleaje incide en la cámara interior y desplaza el aire produciendo un movimiento circular en una turbina conectada en el extremo.

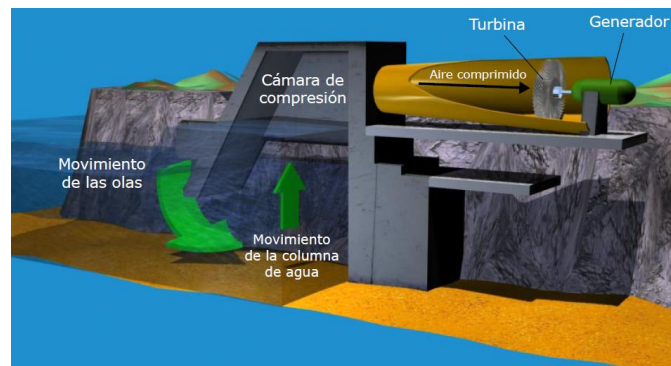


Figura 3.7 *Columna de agua Oscilante [Rodriguez, 2010]*

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA

- II. **Sistemas totalizadores:** pueden ser flotantes o fijos a la orilla. Atrapan la ola incidente, almacenando el agua en una presa elevada. Esta agua se hace pasar por unas turbinas al liberarla. Este tipo de sistemas son también denominadas “tap chan”, ejemplos de ellos se tiene: Wave Dragón, y Wave Plane entre otros.



Figura 3.8 Sistema “WaveDragon” en las costas de Dinamarca [Rodríguez, 2010]

- III. **Sistemas atenuadores:** pueden ser tanto flotantes como sumergidos. El movimiento de balanceo se convierte a través de un sistema hidráulico o mecánico en movimiento lineal o rotacional para el generador eléctrico. Uno de los dispositivos que más ha destacado en esta clasificación, es el denominado sistema “Pelamis”(Fig. 3.8), está compuesto por una serie de segmentos cilíndricos conectados por uniones articuladas. En este aparato los segmentos cilíndricos se mueven unos respecto a otros cuando las olas recorren, por debajo, la longitud del dispositivo. Entonces émbolos hidráulicos situados en las uniones bombean aceite para accionar un motor hidráulico que se acopla a un generador eléctrico.



Figura 3.9 Sistema Pelamis [Rodríguez, 2010]

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA

- IV. **Sistemas puntuales:** Son estructuras pequeñas en comparación con la ola incidente. Suelen ser cilíndricas y, por tanto, independientes de la dirección de la ola. Generalmente, se colocan agrupados formando una línea. Su principio de aprovechamiento y transformación de la energía proveniente de las olas se basa o bien en sistemas de bombeo o en sistemas hidráulicos. Como muestra está el sistema **AquaBuoy**, desarrollado por la empresa canadiense Finavera Renewables (anteriormente Aqua Energy Group). Este dispositivo consiste en una estructura flotante que convierte la energía cinética asociada al movimiento vertical de la ola incidente en electricidad.

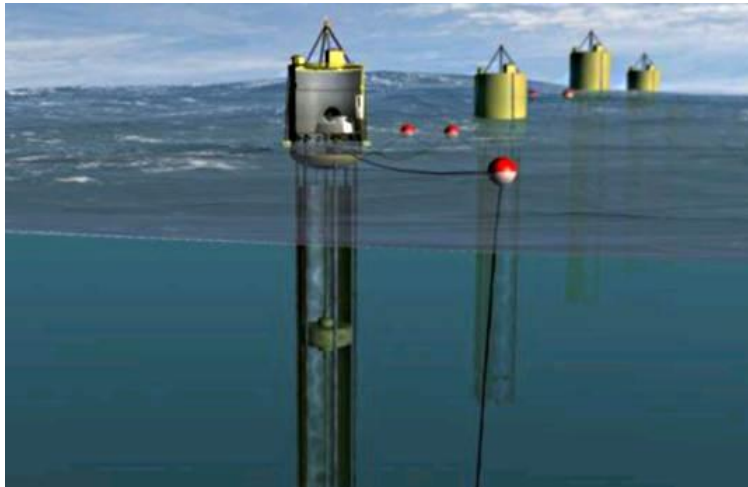


Figura 3.10 Dispositivo AquaBuoy [Winkler, 2008]

3.3 CENTRALES DE GENERACIÓN ACTUALES

Los dispositivos undimotrices han tenido un avance tecnológico en las últimas décadas, hoy en día son más los países que se suman al desarrollo y mejoramiento de esta tecnología. Con el objetivo de introducir la generación eléctrica a las redes nacionales, los proyectos a gran escala de plantas generadoras han ganado terreno contra los medios tradicionales de producción. Algunos de los casos de mayor éxito se presentan a continuación.

En la localidad vasca de Mutriku existe una central de generación de energía undimotriz, que se terminó de construir en 2011 con una potencia instalada de 300 kW y 16 turbinas, con un costo de 2.3 millones de euros financiados por el gobierno vasco. Esta planta está ubicada en el puerto de Mutriku y utiliza la tecnología denominada Columna de Agua Oscilante (OWC, Oscilating Water Column).

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA



Figura 3.11 *El puerto de la localidad vasca de Mutriku con la central instalada en la parte exterior del dique [Ortubia, 2008]*

Con tecnología de columna de agua oscilante (OWC), se tiene la planta ya funcionando de 400 kW en la isla Pico, de Las Azores (Portugal), la cual se encuentra en la propia roca, próxima al mar. Su construcción concluyó en 1999.



Figura 3.12 *Vista aérea del sistema OWC en Pico , Portugal [Brito, 2010]*

Durante el año 2011 la prioridad del proyecto es la elaboración de la estructura de la planta para dar cabida a una segunda plataforma para llevar a cabo las pruebas de las turbinas. La planta está lista para dar cabida a dos conductos de turbina de igual tamaño (adecuado para el equipo de prueba entre 100 kW y 700 kW), y en el pasado, sólo se utilizó uno de estos conductos, equivalente a la mitad del espacio disponible en la planta.

En Port Kembla (Australia), el proyecto que lleva el nombre del municipio donde se instaló, tiene una potencia total de 300 kW. La estructura que capta las olas es de forma parabólica, con 40 metros de ancho, 20 metros de largo y una distancia

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA

focal de 5 metros. La central, que está apoyada sobre el fondo del mar, se encuentra unida a un rompeolas y puede producir la electricidad suficiente para satisfacer las necesidades de un total de 50 viviendas de la zona. Este mismo sistema al instalado en Port Kembla, se podría instalar en aguas profundas, y la única diferencia sería que la estructura debería flotar sobre la superficie del mar y el anclaje de ésta se debería realizar en el fondo del mar.



Figura 3.13 Sistema OWC en las costas de Australia [Falcão AFO, 2010]

En América Brasil es pionero en la implementación de sistemas en esta índole. Se trata de la estación de energía undimotriz en el Puerto de Pecem (a 60 km de Fortaleza, en el norte de Brasil), la cual se inauguró oficialmente durante el evento internacional de Rio +20, que se celebró en el mes de julio de 2012.

El diseño fue desarrollado por Instituto Alberto Luiz Coimbra de Posgrado e Investigación en Ingeniería (COPPE), vinculado a la Universidad de Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) y financiado por Tractebel Engineering, contando además con el apoyo del gobierno del estado de Ceara. El proyecto está basado en experiencias similares puestas en marcha en otros países, como Portugal, Holanda, Japón y Reino Unido.

El sistema funciona con unos brazos mecánicos de 22 metros, que están en contacto con agua de mar terminando en un aro flotador con un diámetro de 10 m. Con el continuo golpeteo de las olas del mar en la estructura se consiguen movimientos de ascenso y descenso en las extremidades, lo que comprime agua dulce en un sistema de alta presión.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA



Figura 3.14 *Planta undomotriz en la localidad de Pecem, Brasil [Bautista, 2013]*

Esta agua comprimida se transmite y almacena en el sistema formado por un acumulador hidroneumático y una cámara hiperbárica,. De esta forma se acciona una turbina Pelton, que finalmente es la que genera la energía eléctrica.

3.4 IMPACTO AMBIENTAL

Si bien, los sistemas de aprovechamiento de la energía de las olas han demostrado ser una alternativa viable para resolver los problemas de Medio Ambiente y al mismo tiempo mantener la producción actual de energía eléctrica, es importante resaltar que su uso, puede generar consecuencias ambientales, en las zonas de implementación. Estas consecuencias deben ser previstas y analizadas para definir el costo-beneficio de su utilización. Entre los impactos negativos pueden señalarse los siguientes:

Impacto visual. El impacto visual depende del tipo de aparato y de su distancia de la línea de costa. En general, un sistema de boya flotante o una plataforma situada mar a dentro o un sistema sumergido, probablemente no presente mucho impacto visual. Sin embargo, cuando un área depende del turismo, la obstrucción visual es crítica.

Ruido. Los sistemas de conversión de la energía de las olas producen ruido, aunque los niveles suelen ser menores que los ruidos de un barco. Cuando operan a plena carga, no se espera que sean más ruidosos que el viento o las olas, además, estos sistemas pueden ser contruidos con un buen material aislador de ruidos. El ruido generado puede viajar largas distancias debajo del agua y pueden afectar a ciertos animales, tales como las ballenas, las focas, etc. Se precisan más investigaciones para determinar si existen impactos en la vida de los mamíferos debido al ruido de estos aparatos.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGÍA

Afectaciones y destrucción de la vida marina. Los aparatos de captación de la energía de las olas pueden tener una variedad de efectos en el comportamiento del oleaje. Esto podría influir en las áreas de línea de costa y en las plantas y animales que viven en ella. Los sistemas ubicados en tierra requieren importantes modificaciones que afectan al impacto ambiental. Los impactos potenciales incluyen las molestias o destrucción de vida marina (incluyendo cambios en la distribución y tipos de vida marina cerca de la costa).

La instalación de estructuras soporte y colocación de cables pueden interrumpir temporalmente la vida marina. Sin embargo, la ecología, probablemente, se recuperará. Los efectos de los aparatos alejados de la costa, probablemente, son pequeños (aunque grandes aparatos podrían tener efectos notables) Al absorber la energía de las olas, estos aparatos crean aguas en calma a su abrigo produciendo áreas válidas para actividades marinas, comerciales o recreativas.

Las estructuras marinas en el océano proporcionan superficies apropiadas para que se desarrollen variedad de algas e invertebrados, que podrán colonizar los dispositivos. Por tanto, desde el punto de vista de la conservación de estos dispositivos, es necesario tomar medidas correctoras (inyección directa de bióxidos, utilización de productos anti-incrustaciones, chorros a presión que desprendan a estos organismos de las estructuras, etc.) que eviten la destrucción de los mismos.

Sin embargo, a menos que sean adecuadamente aplicados, estas medidas anti-incrustaciones pueden tener un impacto adverso sobre la vida marina.

Conflictos con la navegación. Una vez instalados, los sistemas de captación de la energía del oleaje podrían ser un peligroso obstáculo para cualquier embarcación que no pueda verlos o detectarlos por radar. Para la mayoría de los aparatos, esto podría superarse con técnicas convencionales (por ejemplo, luces, pinturas, reflectores, etc.)

Interferencia con otras actividades recreativas. Los sistemas de captación de la energía de las olas, si no están adecuadamente situados, pueden interferir con otros usos de las áreas de costa tales como surfing, paseos en barco, y usos de la playa.

CAPÍTULO 4

MODELO NUMÉRICO OWC

“Sí todo sale mal, estás haciendo mal las cuentas” A. Einstein

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS NUMÉRICO

4.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas OWC, son utilizados como medios de generación de energía eléctrica por medio de la conversión de energía del oleaje. La caracterización de estos sistemas es compleja, sin embargo, en la literatura hay trabajos que analizan sus características hidráulicas [Evans, 1995] y el control de estos sistemas [Falcão, 2002].

En este trabajo se presenta un análisis teórico, realizado en conjunto entre el Instituto de Ingeniería UNAM y el Instituto de Hidroingeniería de la Academia Polaca de Ciencias, basado en los desarrollos teóricos del Wojciech Sulisz [Sulisz, 1998].

4.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Consideremos la interacción de un tren de ondas con una estructura que consta de dos paredes impermeables, una sumergida y otra semisumergida, cuya separación C , genera una cámara de oscilación en su interior, como muestra la Figura 4.1. Parte de la energía es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida al interior de la cámara.

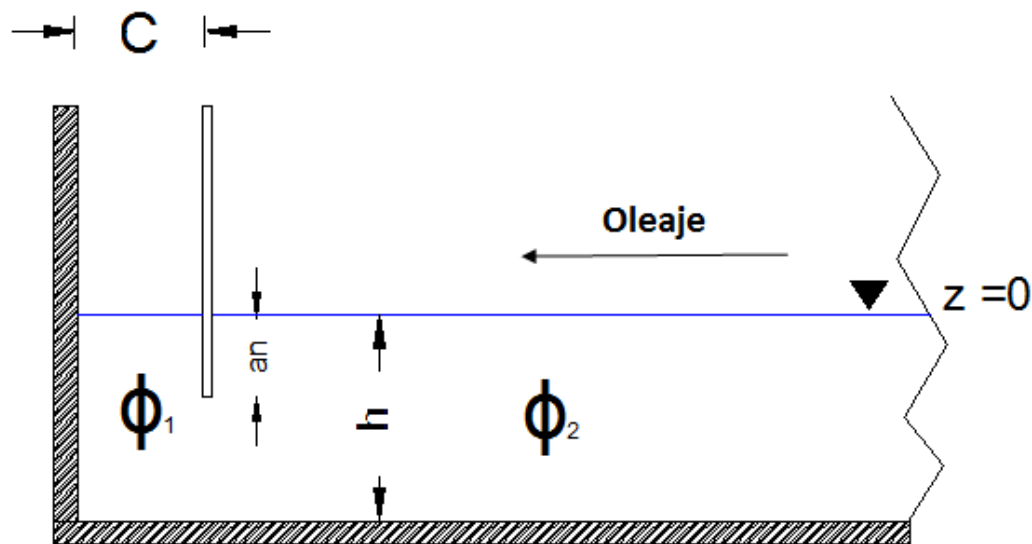


Figura 4.1 Definición del problema

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS NUMÉRICO

Dónde:

Z nivel medio del mar

h profundidad

ϕ_1 potencial de velocidades en la región 1.

ϕ_2 potencial de velocidades en la región 2.

an sumergencia de pared vertical.

C separación entre paredes.

Las condiciones en las superficies de transición entre las diferentes regiones se expresan en términos de la presión y el flujo de masa, con el fin de asegurar la continuidad en las regiones adyacentes. La expresión matemática de las condiciones de compatibilidad que deben ser satisfechas son:

En $x = 0$:

$$\phi_{1X} = \phi_{2X} \quad -h < z < (h - an) \quad (1)$$

$$\phi_{1X} = 0 \quad -(h - an) < z = 0 \quad (2)$$

$$\phi_1 = \phi_2 \quad -h < z < -(h - an) \quad (3)$$

$$\phi_{2X} = 0 \quad -(h - an) < z < 0 \quad (4)$$

En $x = C$

$$\phi_{2X} = 0 \quad -h < z < 0 \quad (5)$$

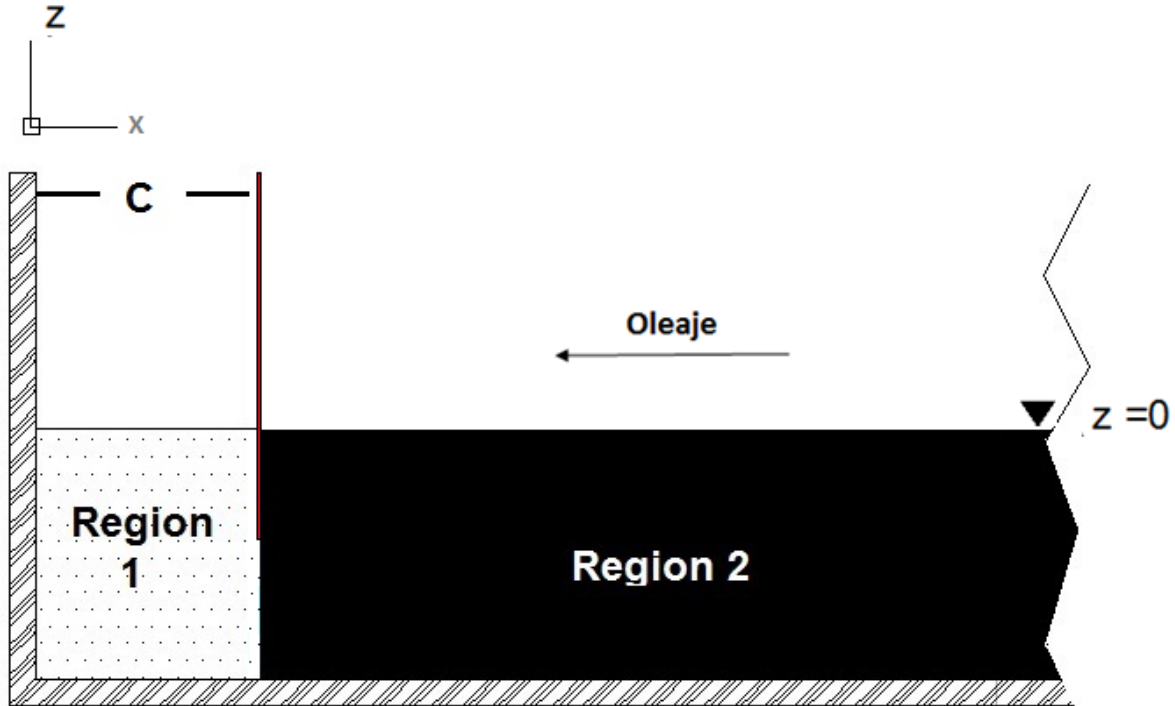


Figura 4.2 Regiones del OWC

4.3 SOLUCIÓN

En la región 1 el potencial ϕ_1 , se expresa de la manera siguiente:

$$\phi_1 = a I(z) e^{-ikx} + \sum_{n=1}^N I(z) R_n e^{ikn x} \quad (6)$$

El subíndice 1 hace referencia al modo progresivo, los n modos evanescentes se disipan muy rápidamente a medida que se van alejando de la estructura y se caracterizan por un número infinito de raíces imaginarias de la ecuación de la dispersión.

$$\frac{\sigma^2 h}{g} = (k_n h) \tanh(k_n h) \quad (7)$$

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS NUMÉRICO

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (8)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (9)$$

donde

g aceleración de la gravedad.

k número de onda

L longitud de onda

T periodo

La dependencia con la profundidad $I(z)$, viene dada por la siguiente expresión:

$$I(z) = \frac{ig \cosh k_n(h+z)}{\sigma \cosh k_n h} \quad n = 1,2,3 \dots \quad (10)$$

Es conocida que la serie de autofunciones $\cosh k_n(h+z)$, ($n = 1,2,3 \dots$) es una serie ortogonal completa con:

$$\int_{-h}^0 \cosh k_n(h+z) \cosh k_m(h+z) \quad (11)$$

En la región 2 el potencial se puede expresar de la siguiente forma:

$$\phi_2 = A I(z) e^{-ikx} + B I(z) e^{ik(x-b)} + \sum_{n=1}^N A_n I(z) e^{-ik_n x} + B_n I(z) e^{ik_n(x-c)} \quad (12)$$

A y B son las amplitudes complejas de las ondas en el interior de la cámara OWC. Con el fin de satisfacer las condiciones de compatibilidad en la interfaces ($x = 0$ y $x = C$), se sustituyen los potenciales ϕ_1, ϕ_2 en las ecuaciones (1) a (5), Con ello se obtienen un sistema de ecuaciones cuyas incógnitas son: R, R_n, A, A_o, B, B_o .

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS NUMÉRICO

$$D(a + R) + \sum_{n=1}^N MR_n - D(A + Be^{-ikC}) - \sum_{n=1}^N M(A_n + B_n e^{-ik_n C}) = 0 \quad (13)$$

$$J(-ika + ikR) + \sum_{n=1}^N Jik_n R_n - J(-ikA + ikB e^{-ikC}) - \sum_{n=1}^N J(-ik_n A_n + ik_n B_n e^{-ik_n C}) = 0 \quad (14)$$

$$J(-ikA e^{-ikC} + ikB) + \sum_{n=1}^N J(-ik_n A_n e^{-ik_n C} + ik_n B_n) = 0 \quad (15)$$

Dónde:

$$D = \frac{ig}{\sigma} \frac{1}{\cosh kh} \quad (17)$$

$$M = \frac{ig}{\sigma} \frac{1}{\cosh k_n h} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (18)$$

$$J = \frac{ig}{\sigma} \frac{1}{\cosh kh} \int_{-h}^{-(h-an)} [\cosh k_n (h + z)]^2 \quad (19)$$

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la obtención de un sistema de ecuaciones finito, es necesario fijar los valores de n , que corresponden al número de modos evanescentes en el agua. La elección de éstos valores se realizó utilizando la recomendación $n \leq 20$ [McIver, 1986], de tal manera que se tiene un sistema de ecuaciones de 63×63 .

Este modelo contempla la variación de la altura de ola y del periodo de ola, manteniendo constantes la distancia entre las paredes $C = 0.4$ m, la sumergencia $an = 0.10$ m y profundidad $h = 0.4$ m en la configuración del dispositivo OWC. Como resultado de este modelo, se obtendrán los valores teóricos de la superficie libre en la cámara OWC.

Con los datos anteriores, se realizaron las simulaciones correspondientes. Los resultados se presentan gráficamente, comparando la superficie libre calculada de la cámara OWC, con respecto a la variación de la altura de ola, para cada uno de los 4 periodos utilizados. Dando como resultados 4 gráficas, que esquematizan el comportamiento de la superficie libre al modificar el periodo de ola. Las figuras 4.2 a 4.5, muestran dichos resultados.

□

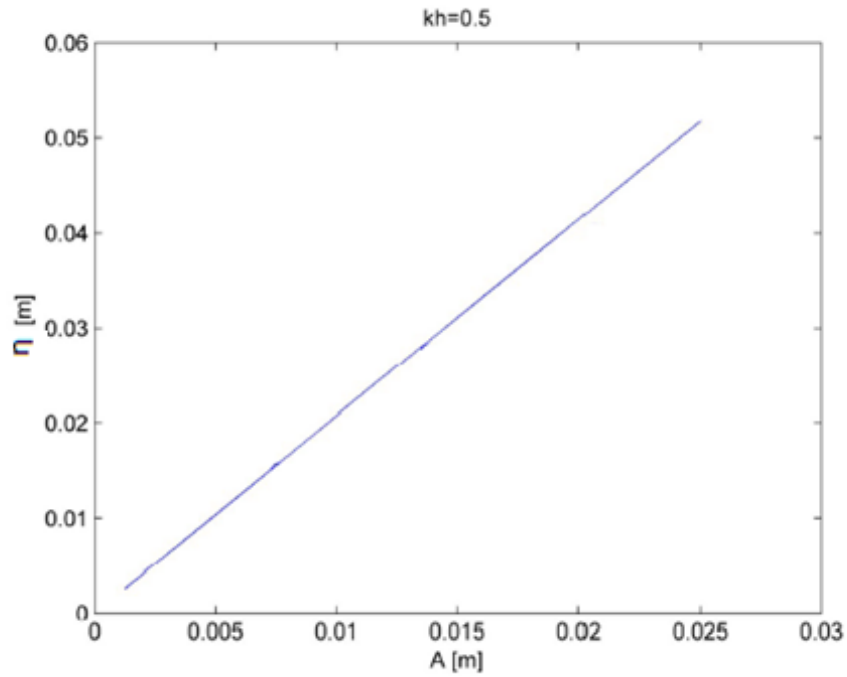


Figura 4.3 Resultados teóricos con $kh=0.5$

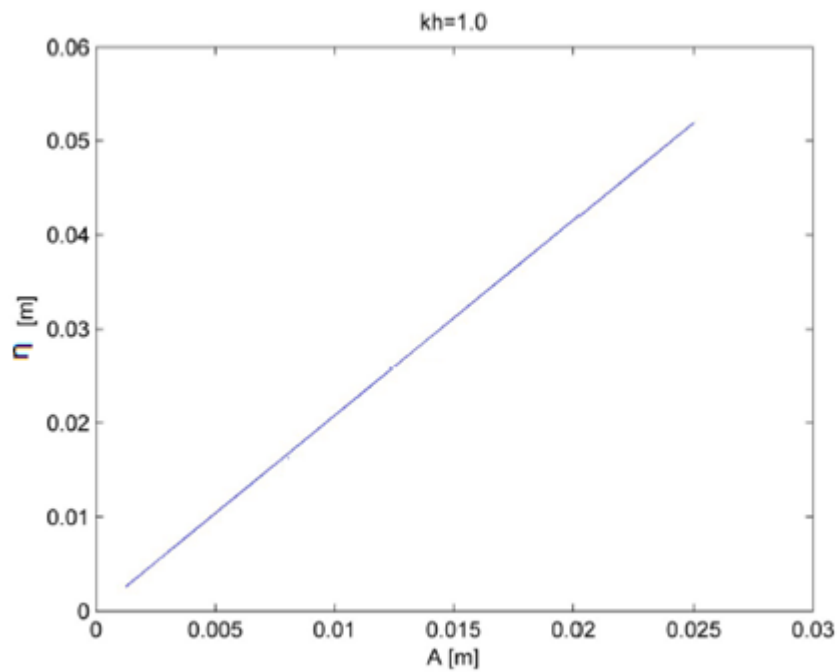


Figura 4.4 Resultados teóricos con $kh=1$

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS NUMÉRICO

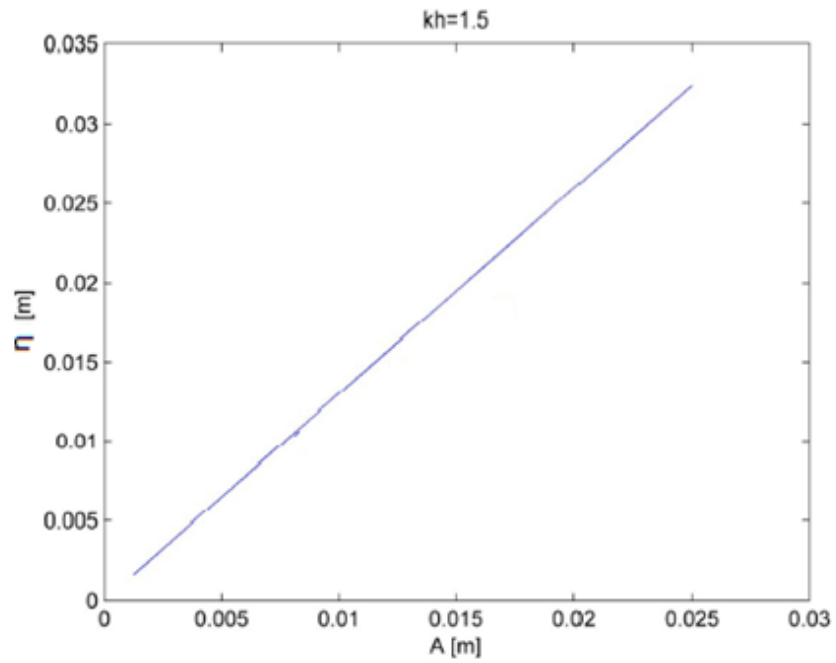


Figura 4.5 Resultados teóricos con $kh=1.5$

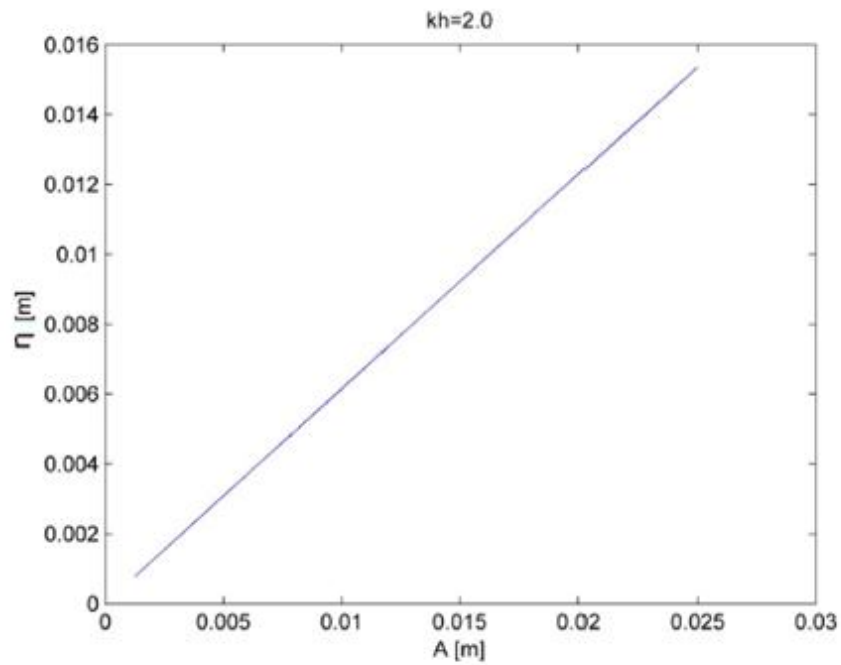


Figura 4.6 Resultados teóricos con $kh=2$

Las gráficas anteriores muestran los resultados teóricos del modelo numérico

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS NUMÉRICO

planteado, en los cuales se utilizaron 4 diferentes periodos de onda, así como un rango de alturas de olas de 1 a 5 cm.

Los resultados describen que la altura de la ola tiene efecto significativo sobre la amplitud de las oscilaciones de la superficie libre, es decir, se manifiesta un comportamiento lineal del fenómeno. Por tanto es evidente que la amplitud de las oscilaciones de la superficie libre aumenta al incrementar la altura de la ola.

Nótese que en los gráficas con valores de $kh = 0.5$ y 1 , los resultados en la altura de ola dentro de la cámara OWC son prácticamente las mismas. Sin embargo para periodos mayores, es decir, $kh = 1.5$ el resultado de la superficie libre es significativamente mayores.

A primera instancia, este tipo de caracterización de los sistemas OWC refleja su gran capacidad energética, siendo equipos capaces de multiplicar la energía del oleaje, lo cual los coloca en una posición privilegiada, para ser llevados a cabo a gran escala.

En el capítulo siguiente se plantea los ensayos realizados en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, con la finalidad de comprobar y validar este modelo.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS EXPERIMENTAL

“la libertad es una condena, en virtud de que estamos condenados a elegir pues hasta decidir no hacerlo constituye una elección” Sartre

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

5.1 OBJETIVO DE LA EXPERIMENTACIÓN

La experimentación realizada para el desarrollo del presente trabajo, se llevó a cabo en el canal de olas del Instituto de Ingeniería, UNAM, con la finalidad de validar los resultados teóricos del modelo no lineal planteado en el capítulo anterior así como obtener la caracterización de modelo físico OWC. La descripción de esta experimentación se presenta en los subtemas siguientes.

5.2 CANAL DE OLEAJE

5.2.1 Estructura

El canal de oleaje del Instituto de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México fue utilizado para llevar a cabo las pruebas experimentales del modelo físico OWC a escala construido. Las características físicas del canal son: 35m de largo, 0.8 m de ancho y 1.2m de altura (Fig. 5.1). El oleaje es generado por un sistema mecánico HR Wallingford, colocado en un extremo, que consta de una placa de acero unida a una cremallera, accionado por un servomotor, el avance y retroceso de la placa de acero genera oleaje tanto regular como irregular. Para generar la altura de ola y periodo deseados, este sistema es controlado por el software HR Wavemaker.



Figura 5.1 Canal de Oleaje del IINGEN, UNAM

5.2.2 Instrumentos de medición

Los instrumentos utilizados para medir las alturas de ola en el canal, son sensores resistivos, que se colocan sobre soportes fijos al canal (Fig. 5.2). Los

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

sensores constan de 2 segmentos metálicos de perfil circular, unidas en su parte inferior por una pieza aislante. Ambos perfiles conforman un circuito eléctrico y están unidos a través de cable a una consola central. Utilizando la ley de Ohm, ($V=RI$) en el circuito, la resistencia variará de acuerdo con el nivel de agua en el interior del canal, de esta manera se obtienen mediciones en voltios que posteriormente se procesarán para convertir a alturas de ola. .

Previo al inicio de toda sesión experimental, es necesario realizar la calibración de los sensores de nivel, usando el archivo CALIB.EXE. Esta calibración requiere que los sensores sean colocados en 3 posiciones, la primera corresponde al nivel de reposo del agua la cual fungirá como nivel 0, la segunda y la tercera corresponden a valores positivo y negativo idénticos (de acuerdo al nivel de reposo) que formen un rango de alturas aptos para medir las alturas de olas que se generarán en el interior del canal. Se considera una calibración adecuada, si el archivo de resultado (*.Calib) muestra un resultado de 0.999 como mínimo para cada sensor. Para la experimentación se eligieron las posiciones 2 y 3 en -8 cm. y 8 cm. respectivamente.



Figura 5.2 Sensor resistivo de nivel

5.2.3 Software

El software utilizado, en la generación de oleaje y para la obtención de datos de los sensores de nivel, lo constituyen, HR WaveMaker y Wave Data Collector (WDC) respectivamente.

El software HR Wavemaker (Fig. 5.3) es el encargado de generar el estado de mar que se requiera en la experimentación, para ello requiere de 3 variables; la frecuencia (F), la altura de ola (H) y la profundidad (h).

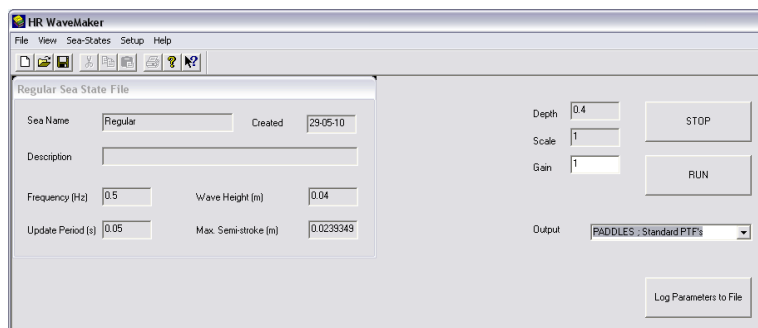


Figura 5.3 HR Wavemaker, para las condiciones de oleaje



Figura 5.4 Interfaz OWC

La interfaz Wave Data Collector, que utiliza la plataforma MatLab, es necesaria para la obtención de los datos de los sensores de nivel en un tiempo determinado, se requiere indicar: el número de sensores, la frecuencia de la toma de datos y el número total de datos expresado en Hz (con la restricción de ser un valor múltiplo de 512). Para las pruebas se utilizaron los valores: $F = 80$ Hz y un tiempo de 5 minutos para cada prueba, lo que corresponde a 24064 datos.

5.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO (OWC)

El modelo físico del sistema OWC, se construyó dentro del canal de olas, utilizando su propia arquitectura para obtener el diseño más práctico, con la finalidad de reproducir las condiciones de oleaje en el interior de la cámara. El diseño consta de 2 placas de aluminio, de dimensiones proporcionales al ancho y alto del canal 89 cm y 140 cm respectivamente.

La primera de ellas se encuentra sumergida completamente, sujeta al canal para evitar la transmisión del oleaje. La segunda placa, es también una placa de aluminio con las mismas dimensiones colocada a diferentes distancias (C) de la primera y semisumergida con respecto al fondo del canal y en diferentes alturas (an), y sujeta a la parte superior del canal para evitar un momento de flexión debido a la interacción con el oleaje. Ambas placas forman una cámara rectangular, para mantener la distancia entre ellas se emplearon perfiles circulares de acero y tuercas, Ver Fig. 5.5.



Figura 5.5 *Diseño OWC dentro del canal de oleaje*

5.4 DETERMINACIÓN DE ENSAYOS

Para realizar la experimentación y obtener la caracterización del fenómeno se determinó realizar una serie de pruebas, que consistieron en modificar dos dimensiones de la cámara OWC: distancia entre palas (C), sumergencia de la segunda pala (an), así como variar el periodo (T) del oleaje incidente. La variable de control fue la altura de ola (H) quedando establecido de 4 cm para todas las pruebas. De esta manera el número de combinaciones posibles para los ensayos consta de 198 pruebas.

| C (m) | an (m) | F (Hz) |
|---------|----------|----------|
| 0.10 | 0.1 | 0.50 |
| 0.20 | 0.15 | 0.55 |
| 0.30 | 0.20 | 0.60 |
| | 0.25 | 0.65 |
| | 0.30 | 0.70 |
| | 0.35 | 0.75 |
| | | 0.80 |
| | | 0.85 |
| | | 0.90 |
| | | 0.95 |
| | | 1.00 |

Tabla 5.1 *Parámetros de las pruebas experimentales*

5.5 ESQUEMA EXPERIMENTAL

Se utilizaron dos arreglos de sensores para las pruebas experimentales (Fig. 5.5). Para las pruebas correspondientes a $C = 0.20$ y 0.30 m. seis sensores (S1-S6), y para los primeros 66 ensayos con valor de $C = 0.10$ m, cinco sensores (S1-S6). El sensor S1, tiene la función de verificar la altura de ola generada por el software *Wavemaker*, los sensores S1, S2 y S3, son utilizados para obtener los valores de altura de ola incidente y reflejada, usando el programa REFLEX (desarrollado por el grupo de costas y puertos), y cuyas separaciones no deben ser múltiplos, además recomienda un rango de distancia entre ellos cuyo intervalo es: $\pi/10 \leq k\Delta x \leq 9\pi/10$. Por tanto las distancias mínima y máxima, quedan determinadas de la siguiente manera:

$$\Delta x_{min} = \frac{\pi}{10k} \quad (20)$$

$$\Delta x_{max} = \frac{9\pi}{10k} \quad (21)$$

Lo anterior, tiene como resultado $x_{min} = 0.185$ m y $x_{max} = 0.65$ m. Los sensores S5 y S6, se emplearon para registrar las alturas de olas dentro de la cámara OWC.

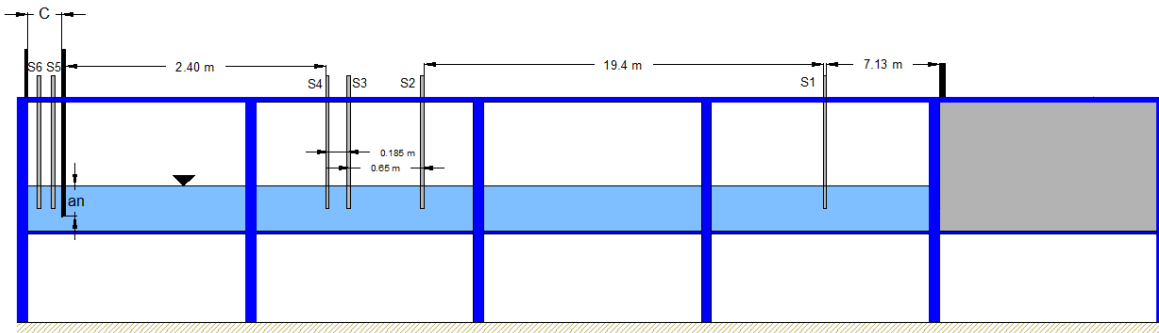


Figura 5.6 Arreglo de sensores dentro del canal de oleaje

5.6 PROCESAMIENTO DE DATOS

Las 198 pruebas experimentales arrojaron datos valiosos del comportamiento del fenómeno analizado, con ellos se realizó la caracterización del mismo. Para obtener este resultado, es menester realizar una metodología para el procesamiento de los datos, y así obtener valores en términos de altura de olas, la

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

metodología es la siguiente:

- a) Se utiliza el archivo ejecutable LEEWDC.exe, para cada archivo de salida (por cada prueba) *.dat con su calibración de sensores correspondientes *.cal. De esta manera se obtienen las series de tiempo, para cada sensor. Los valores de alturas de ola están expresadas en metros.
- b) El análisis de reflexión se realiza mediante el archivo REFLEX.exe, utilizando las series del paso anterior. Es importante mencionar, que únicamente se utilizan las series de tiempo de los sensores colocados en el intervalo expuesto en el tema 5.2.

Como resultado de este análisis se obtiene una tabla con el número total de pruebas, y valores tales como: coeficientes de reflexión total, altura de ola incidente y reflejada en términos de altura significativa (H_s) y altura cuadrática media (H_{rms}), entre otras. El cálculo de estas funciones está en función de las metodologías de Mansard y Goda.

Para esquematizar el fenómeno (Fig. 5.7), las variables seleccionadas fueron: en el eje de las abscisas el número de onda (k) y la sumergencia de la pala (an), en el eje de las ordenadas y en forma adimensional el cociente de altura de ola en el interior de la cámara OWC (H_{owc}) y la altura de ola incidente (H_i).

El eje de las ordenadas representa el factor de ampliación de altura de ola dentro de la cámara, siendo $H_{owc}/H_i = 1$ el límite de eficiencia, en este punto la altura de ola incidente es igual a la generada en la cámara OWC y por tanto no existe ganancia energética. Por su parte el eje de las abscisas está determinado por el número de onda k y la sumergencia de la pala an , este último fue aplicado en las pruebas de laboratorio de $0.12 < an < 0.35$, no con ello se limita su uso a valores fuera del rango.

A simple vista se aprecian familias de curvas con una misma tendencia y convergentes a un mismo punto, los puntos en color azul representan las pruebas con un valor de $C/H = 2.5$, en color verde aquellas pruebas con valor de $C/H = 5$, y en color rojo las datos con valor de $C/H = 7.5$.

Nótese que aquellas pruebas con un valor de $C = 2.5$, conforman las condiciones de mayor amplificación de altura de ola, obteniendo un valor de $H_{owc}/H_i = 2.7$, el cual representa el límite máximo de eficiencia, por encima de este valor no es físicamente posible un incremento. Sin embargo, las otras dos configuraciones ($C = 5$ y 7.5) presentan espectros de amplificaciones aceptables.

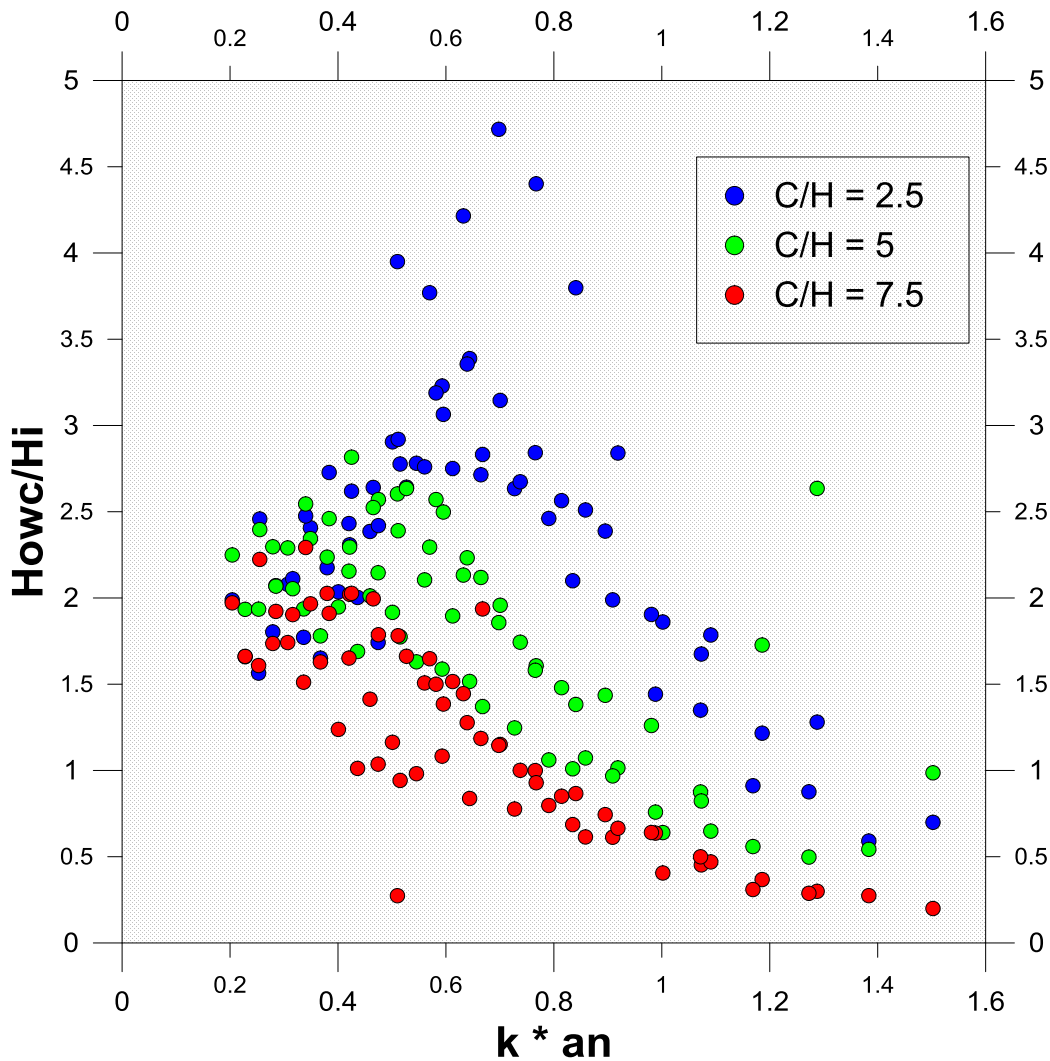


Figura 5.7 *Caracterización del fenómeno*

Con el objetivo de mejorar el análisis experimental se analizaron los datos obtenidos en bloques de 11 pruebas, las cuales comparten la misma configuración física de separación de paredes (C), sumergencia (an) y diferenciadas por un rango de periodos que va de $F = 0.5$ a 1 Hz. Dando un total de 18 gráficas que se presentan a continuación. Es importante mencionar que cada gráfica, está definida por un límite mínimo de eficiencia, marcada con una línea azul ($Howc/Hi=1$), este indica que la ola generada en el interior del OWC es de igual valor a la ola incidente, por lo tanto no existe una ganancia energética.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

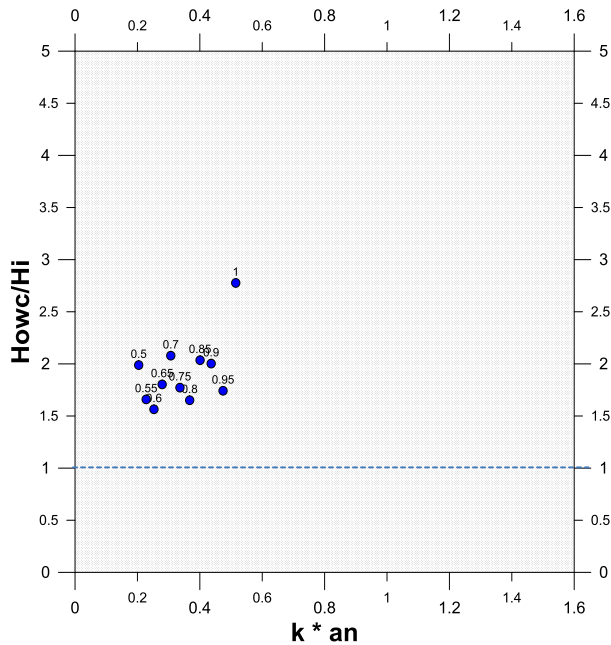


Figura 5.8 Pruebas 1 a 11

La primera serie de 11 pruebas (figura 5.8) corresponde a la configuración de $C = 0.10$ m, $an = 0.12$ a 0.35 m. y $F = 0.5$ a 1 s. Para esta disposición el valor máximo de amplificación se obtuvo con una frecuencia de 1 Hz.

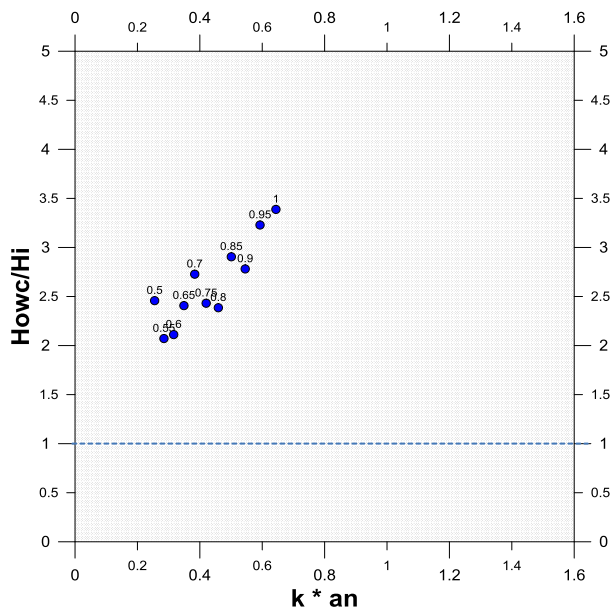


Figura 5.9 Pruebas 12 a 22

Las pruebas 12 al 22 corresponden a los valores de $C = 0.10$ m, $an = 0.15$ m. y $F = 0.5$ a 1 s. En comparación a la primera serie, las amplificaciones son mayores y se distingue una tendencia donde el valor máximo de amplificación es de nuevo la prueba con frecuencia de 1 Hz.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

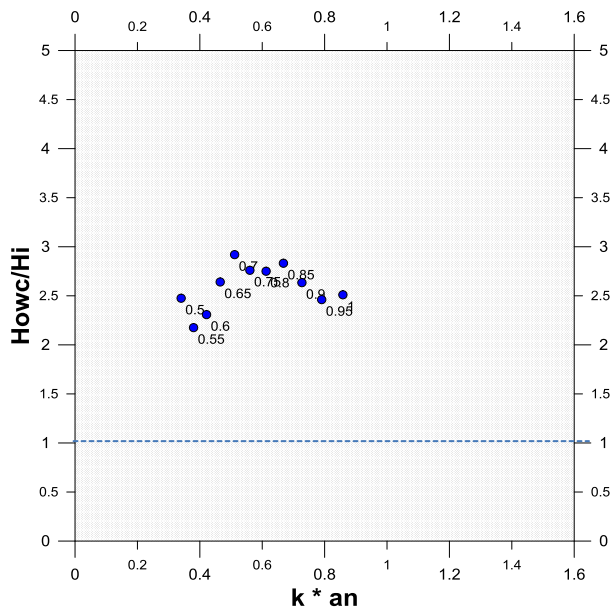


Figura 5.10 Pruebas 23 a 33

Las siguientes 11 pruebas (33 a 43), con valores de $C = 0.10$ m, $an = 0.20$ m. Muestran un incremento en la amplificación conforme aumenta la frecuencia hasta un punto máximo de $F = 0.7$ y después una reducción del mismo.

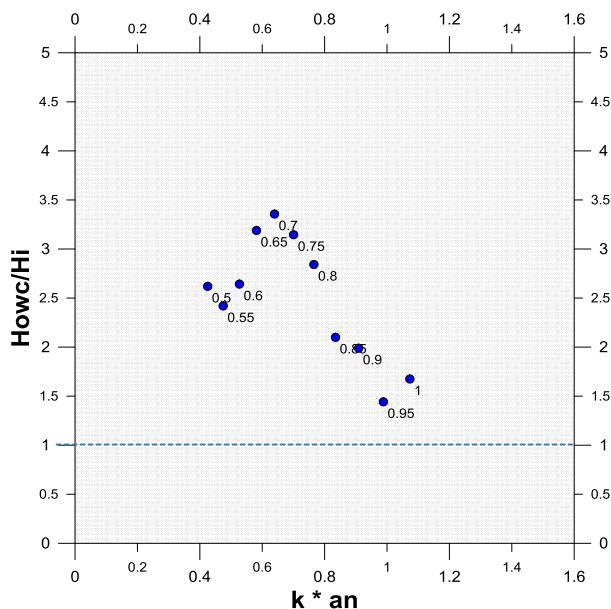


Figura 5.11 Pruebas 34 a 44

En la figura 5.11 se muestran las pruebas 34 a 43, cuyas variables son $C = 0.10$ m, $an = 0.25$ m. Este comportamiento es similar al bloque anterior de pruebas con un máximo con frecuencia de 0.7 Hz. Sin embargo, el rango de amplificación es mayor de 1.4 a 3.4.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

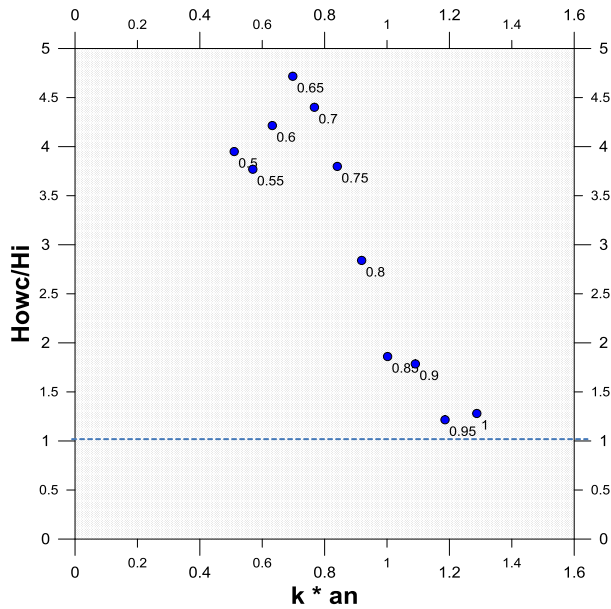


Figura 5.12 Pruebas 45-55

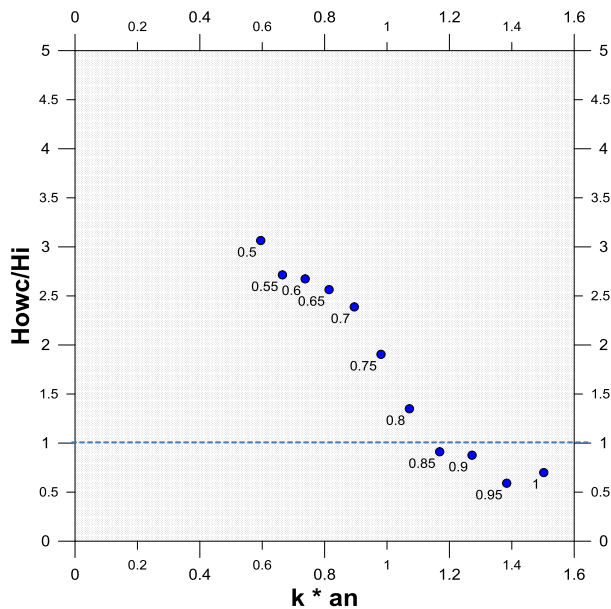


Figura 5.13 Pruebas 56-66

Con las pruebas 45 – 55 cuya configuración es $C = 0.10$ m, $an = 0.30$ m, tenemos la mayor amplificación en la cámara OWC de las 198 pruebas, con un valor de 4.7, y una frecuencia de 0.65 Hz. El comportamiento es parecido al mostrado en la figura 5.11. En este bloque la distancia entre paredes y la distancia de la segunda pala al fondo es la misma 0.10 m.

Las pruebas 56 – 66 con $C = 0.10$ m, $an = 0.35$ m. En este bloque la mayor amplificación corresponde a la prueba con frecuencia de 0.5 Hz y las pruebas con frecuencias de 0.85 a 1 Hz, muestran disminución de la amplitud en lugar de amplificación ($Howc/Hi < 1$).

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Las siguientes 66 pruebas comparten un mismo valor de $c = 0.20$ m.

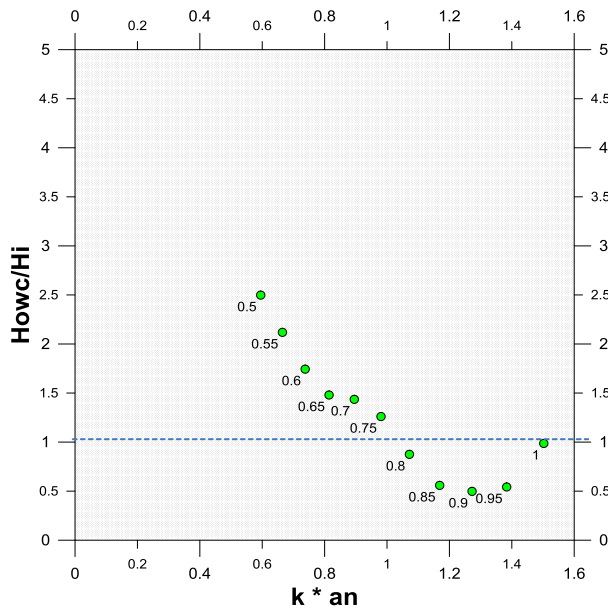


Figura 5.14 Pruebas 67-77

La figura 5.14 muestra las 11 pruebas con $C = 0.20$ m, $an = 0.12$ m. Al aumentar en 0.10 m. la separación de paredes, se obtienen un valor máximo de amplificación de 2.5, con una frecuencia de 0.5 Hz, sin embargo las pruebas con $F > 0.8$ están por debajo del límite de eficiencia.

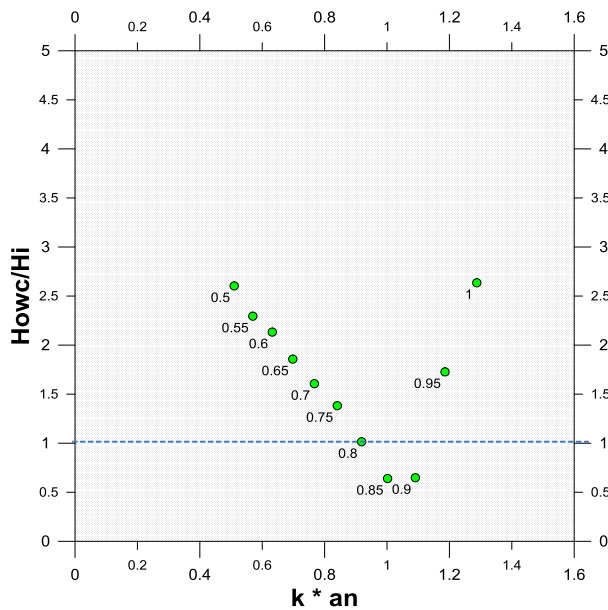


Figura 5.15 Pruebas 78-88

Las siguientes 11 pruebas (figura 5.15) comparten la configuración de $C = 0.20$ m, $an = 0.15$ m. En este bloque la amplificación máxima se da también en la frecuencia de 0.5 Hz, con un $k * an = 0.48$. El comportamiento es muy similar a la gráfica anterior.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

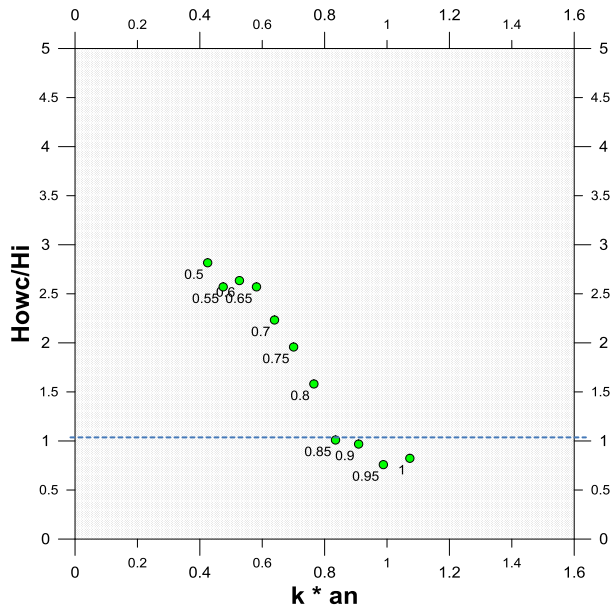


Figura 5.16 Pruebas 89-99

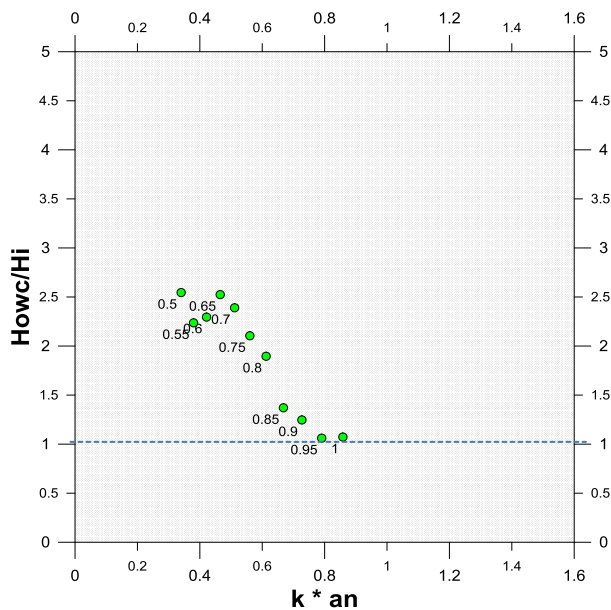


Figura 5.17 100-110

La figura 5.16 muestra los resultados de las pruebas 89 – 99, cuyas variables son $C = 0.20$ m, $an = 0.20$ m. Al igual que en la condición de $C = 0.10$ m. la máxima amplificación se obtiene, cuando la C y $h - an$ son de igual valor. En este caso la amplificación alcanzó 2.7, para una frecuencia de 0.5 Hz. con un $k \cdot an = 0.42$.

Para aquellas pruebas 100 – 110 con $C = 0.20$ m, $an = 0.25$ m. se repite, como en la mayoría de los bloques de pruebas, que la frecuencia de 0.5 Hz representa la mayor amplificación, aun cuando los valores correspondientes de $k \cdot an$ son diferentes, para este caso se tiene un valor de $k \cdot an = 0.35$.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

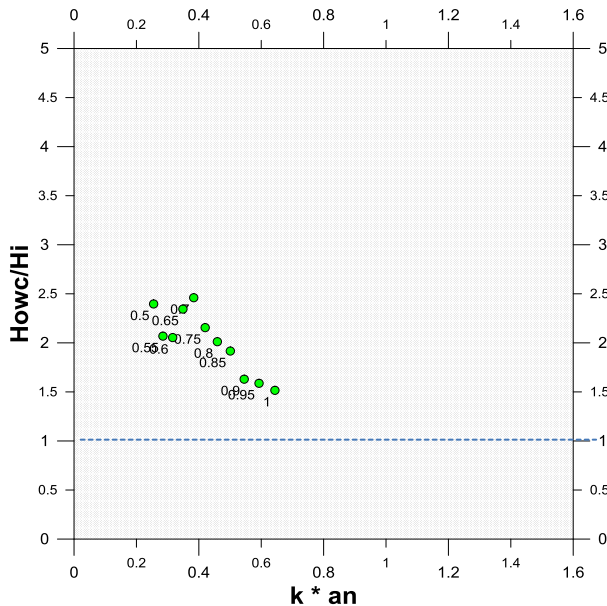


Figura 5.18 111-121

Las pruebas 111 a 121, con $C = 0.20\text{m}$, $an = 0.30\text{ m}$, se muestra en la figura 5.18. Los datos están agrupados en un rango de $0.22 < k \cdot an < 0.67$, aunque las amplificaciones se mantienen por encima del nivel mínimo de eficiencia. La mayor ganancia energética se obtuvo con una frecuencia 0.7 Hz,

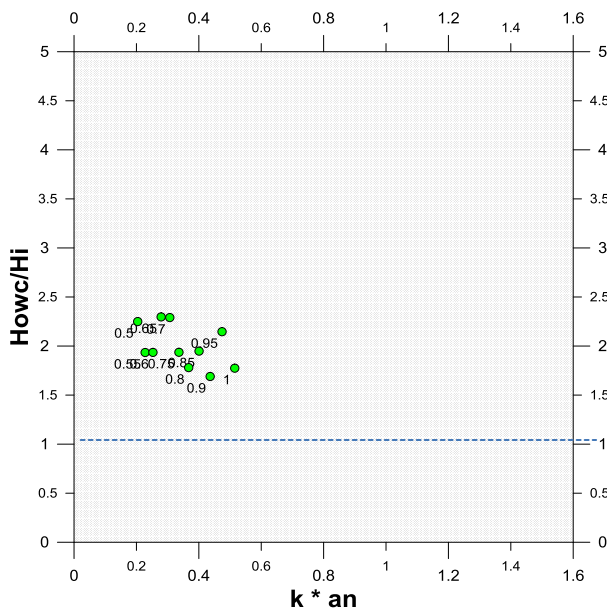


Figura 5.19 122-133

La figura 5.19 contiene los datos de las pruebas 122 a 132, con valores de $C = 0.20\text{ m}$, $an = 0.35\text{ m}$, este último dato representa la sumergencia máxima utilizada en las pruebas. Los datos están agrupados, en un rango de $0.22 < k \cdot an < 0.58$, menor que el grupo que le antecede. La frecuencia de 0.70 Hz. obtuvo el mayor rendimiento de amplificación.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Para las últimas 66 pruebas se aumentó la separación entre paredes en 0.10 m., quedando en $C = 0.30$ m. Los resultados se muestran en las siguientes 6 gráficas.

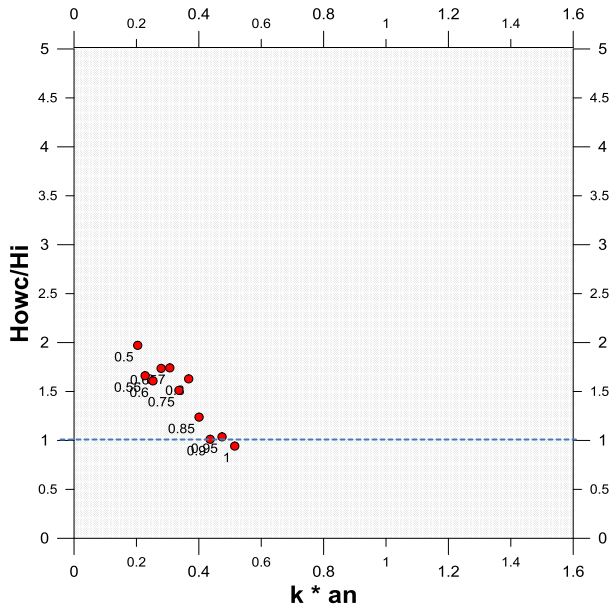


Figura 5.20 134-143

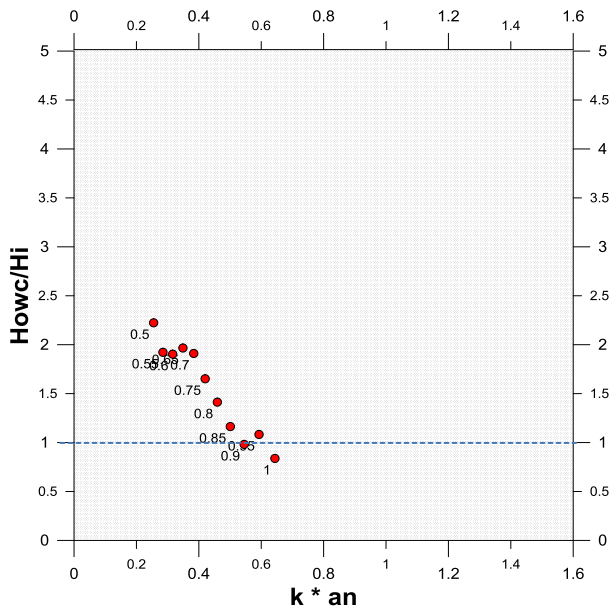


Figura 5.21 144-154

Las pruebas 134 a 143, representadas en la figura 5.20, con $C = 0.30$ m, $an = 0.12$ m. muestran nuevamente que la frecuencia de 0.50 Hz, determina la mayor amplificación posible, sin embargo su valor de amplificación es menor que sus símiles de otros bloques de pruebas. Inclusive, algunas pruebas se localizan por debajo del límite de eficiencia.

A diferencia del bloque anterior las pruebas 144 a 154, con $C = 0.30$ m, $an = 0.15$ m. se encuentran en un rango de $0.23 < k * an < 0.62$, cuya frecuencia 0.50 Hz obtienen una amplificación máxima de 2.25.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

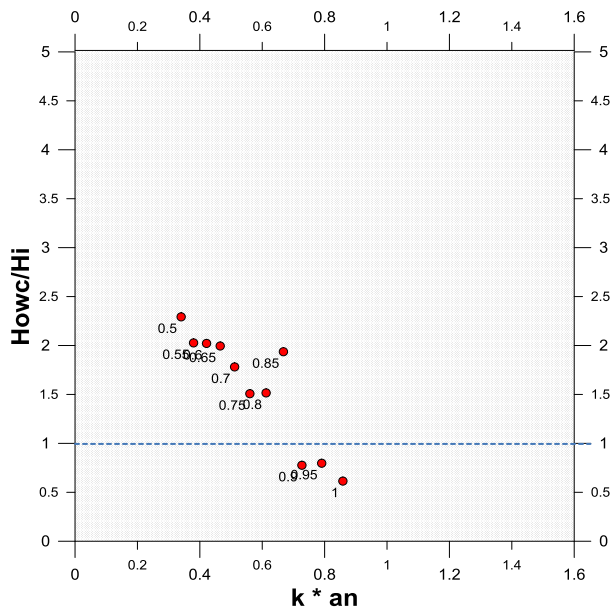


Figura 5.22 155-165

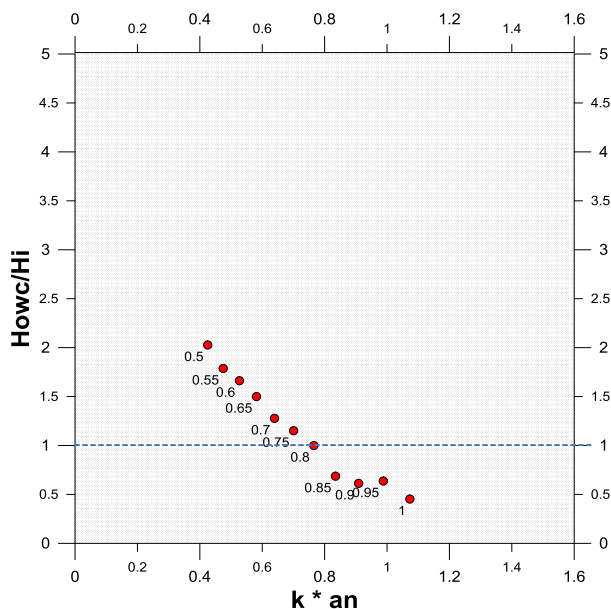


Figura 5.23 166-176

Nuevamente en la figura 5.22, con $C = 0.30$ m, $an = 0.20$ m. la prueba con una frecuencia de 0.50 Hz. obtuvo el valor máximo de amplificación, para todas aquellas pruebas con $C = 0.30$ m.

De igual manera, como ha sido representativo de las pruebas, la figura 5.23 con valores de $C = 0.30$ m, $an = 0.25$ m, indica que la frecuencia 0.5 Hz, optimiza los resultados dentro de la cámara OWC. Es de notar que en esta condición se presentan los valores más desfavorables de la relación $Howc/H_i$.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

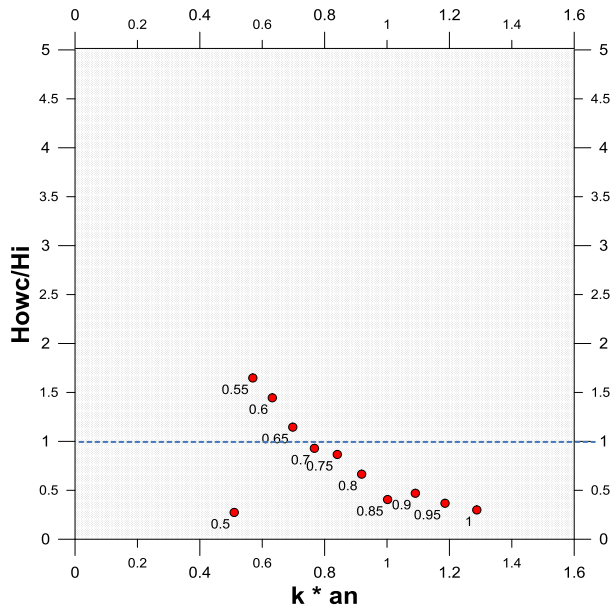


Figura 5.24 177-187

Esta penúltima gráfica (figura 5.24), muestra los pruebas con $C = 0.30$ m, $an = 0.30$ m, con esta configuración los resultados son en su mayoría desfavorables, ya que solo 3 pruebas superan el nivel mínimo de eficiencia.

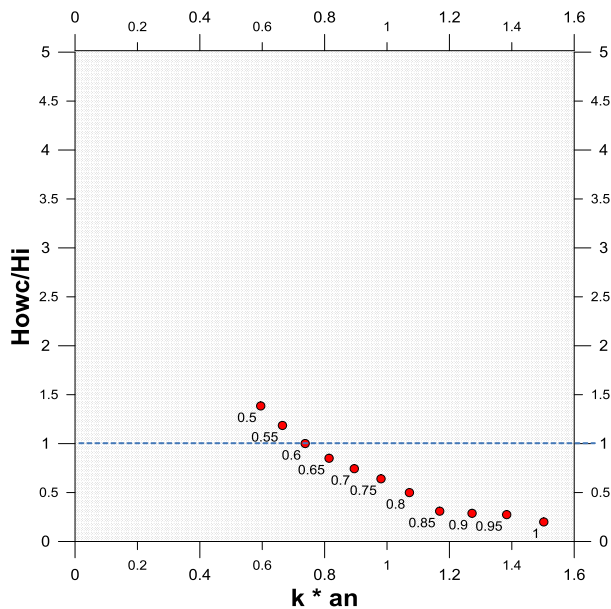


Figura 5.25 188-198

Las últimas 11 pruebas de la experimentación se muestran en la figura 5.25, con valores de $C = 0.30$ m, $an = 0.35$ m, los resultados de esta configuración son completamente negativos, 9 de sus pruebas se comportan como un sistema anti-OWC, es decir, la oscilación incidente es mayor a la generada en el interior de la cámara.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

A manera de resumen, el total de los gráficos demuestra que, la configuración física con mayor ganancia energética, se obtiene con una separación de paredes de 0.10 m. y a una frecuencia de 0.50 Hz, no obstante para los casos de $C = 0.20$, 0.30 m. también existen condiciones óptimas.

Con base en estos resultados, se generó un nomograma, con el fin de servir de herramienta de diseño de un sistema OWC, que garantice las dimensiones físicas necesarias de mayor aprovechamiento energético del mismo. Su configuración se describirá ampliamente en el siguiente tema de esta tesis.

5.7 NOMOGRAMA OWC

La figura 5.26 ejemplifica los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, estos datos muestran la caracterización del fenómeno. Analizando a detalle la gráfica, se observa un comportamiento homogéneo (para cada familia de curvas), las tres curvas visibles corresponden a aquellas pruebas con un $C = 2.5, 5$ y 7.5 , limitadas por una recta que corresponden a los valores máximos de ampliación en la cámara OWC, para cada curva. Usando ese supuesto como herramienta confiable de diseño, se ajustaron los puntos a las ecuaciones que satisfacen las funciones de las curvas y de la recta.

El resultado de este análisis concluyó en la determinación de un nomograma de diseño para la columna de agua oscilante, estudiada en el canal de olas y que se muestra en la figura 5.26.

Haciendo un análisis gráfico, se observan los valores mayores de $H_{owc}/H_i > 1$ del sistema OWC, establecido como el límite mínimo de eficiencia y debajo del cual el comportamiento de la columna de agua oscilante funciona de manera inversa, es decir, la oscilación dentro de la cámara es menor que la amplitud incidente. Por tanto las variables de diseño dentro de un rango de $H_{owc}/H_i < 1$, deben evitarse. De forma práctica, se presenta la tabla 5.2 siguiente que establece los límites de las funciones.

| | | |
|--------------------|-------------|-------------------------|
| C / H = 2.5 | recta | $0.26 < k^* a_n < 0.60$ |
| | exponencial | $0.60 < k^* a_n < 1.40$ |
| C / H = 5 | recta | $0.26 < k^* a_n < 0.60$ |
| | exponencial | $0.33 < k^* a_n < 1.21$ |
| C / H = 7.5 | recta | $0.26 < k^* a_n < 0.60$ |
| | exponencial | $0.25 < k^* a_n < 0.73$ |

Tabla 5.2 Intervalos de mayor eficiencia del dispositivo OWC

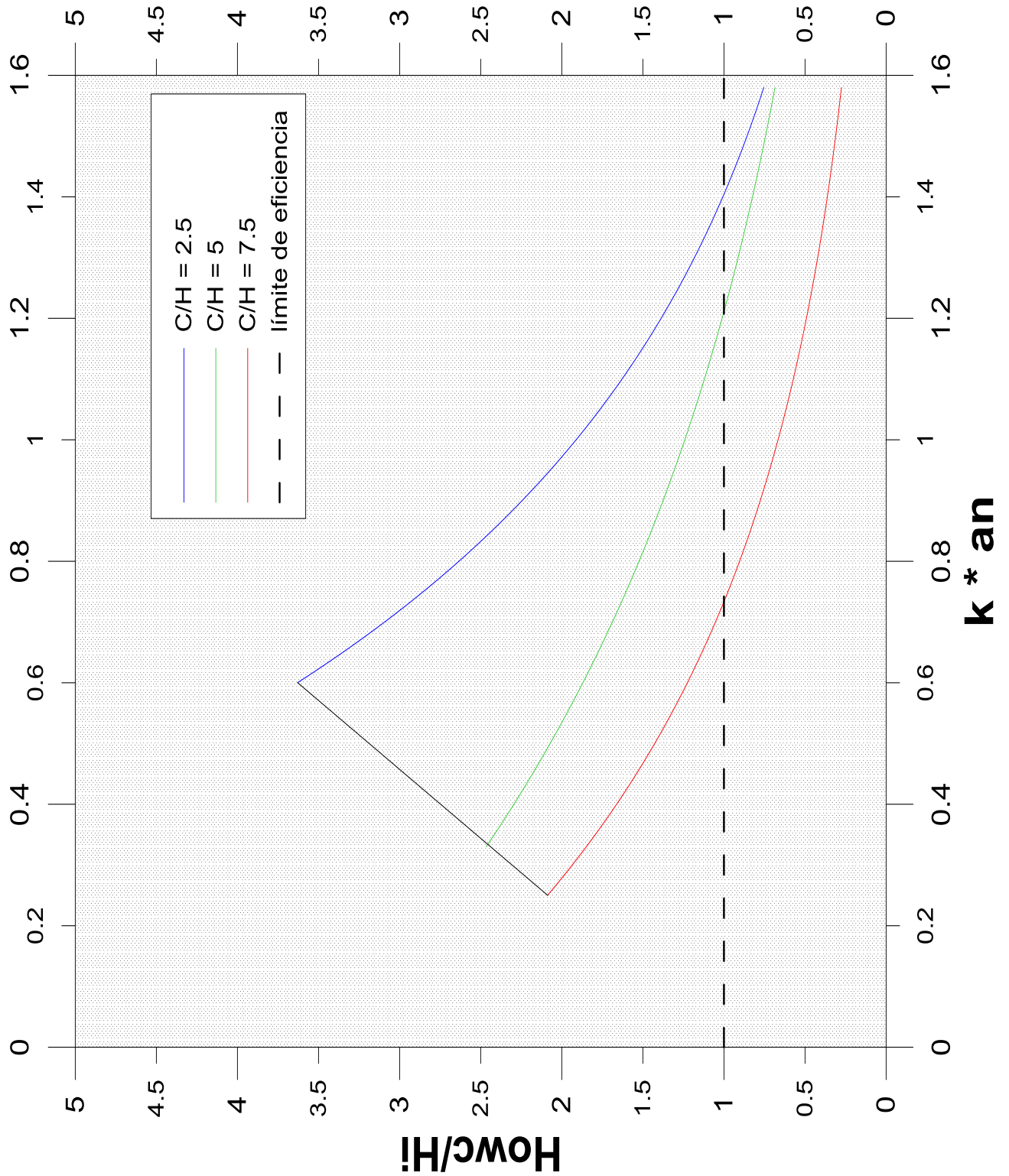


Fig. 5.26 Nomograma OWC

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

La ecuación de la recta, que limita los valores máximos de amplificación, es de la forma siguiente:

$$y = b + b1x \quad (22)$$

$$x = k * an \quad (23)$$

donde:

$$0.12 < an < 0.35$$

$$b = 0.9851 \quad (24)$$

$$b1 = 4.4053 \quad (25)$$

b y $b1$ son los coeficientes de ajuste de la recta.

k número de onda

an sumergencia

De manera análoga se determinó las ecuaciones de las curvas, dando como resultado funciones exponenciales.

$$y = d * e^{fx} \quad (26)$$

$$x = k * an \quad (27)$$

$$y = Howc/H i \quad (28)$$

donde:

d y f : coeficientes de ajuste de las curvas.

Los valores de los coeficientes para cada curva se presentan en la tabla siguiente:

| C/H= 2.5 | | C/H= 5 | | C/H= 7.5 | |
|----------|---------|--------|---------|----------|--------|
| d1 | f1 | d2 | f2 | d3 | f3 |
| 9.4998 | -1.6033 | 3.4578 | -1.0244 | 3.0562 | -1.523 |

Tabla 5.3 Coeficientes de ajuste de funciones exponenciales

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Con la finalidad de mejorar el cálculo de los parámetros de diseño, se dibujaron los datos de los coeficientes con respecto al valor adimensional C/H , con ello se determinaron las ecuaciones que satisfacen a las funciones de d y f . Las figuras 5.27 y 5.28 muestran los resultados.

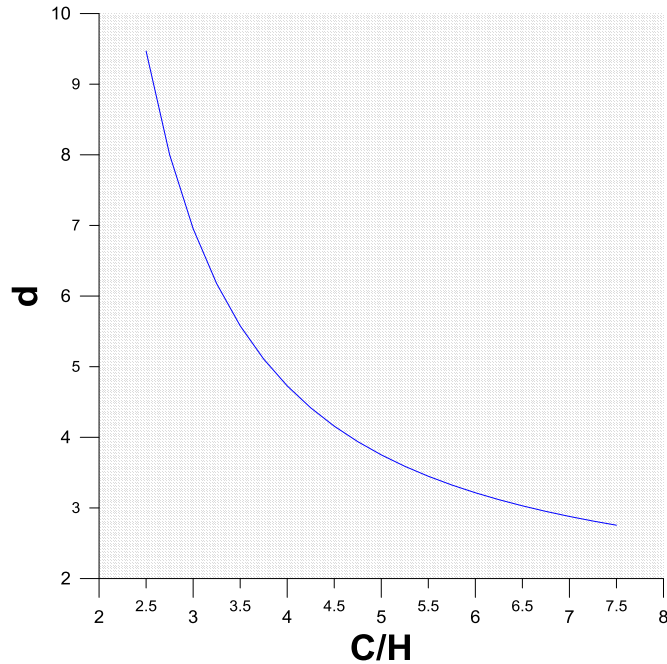


Fig. 5.27 Gráfica de la función del coeficiente a

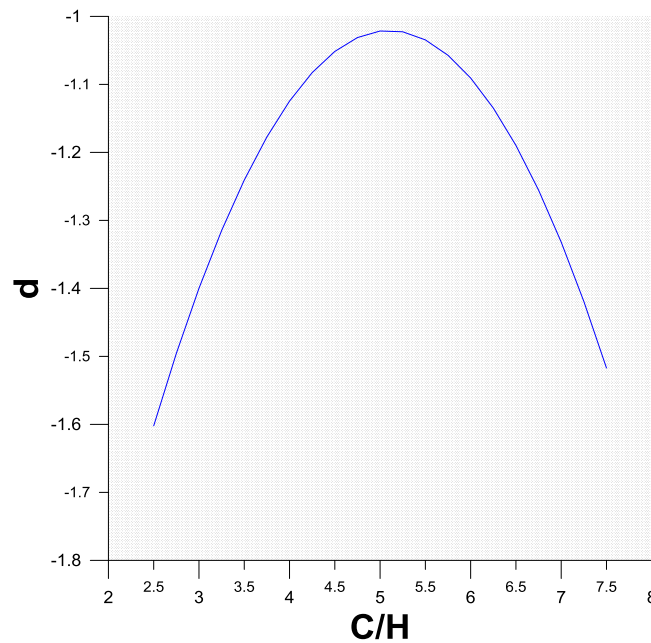


Fig. 5.28 Gráfica de la función del coeficiente b

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

La función del parámetro d está determinada por la ecuación exponencial:

$$d = p * e^{j/x} \quad (29)$$

$$x = C/H \quad (30)$$

$$2.5 < C/H < 7.5$$

$$p = 1.4864 \quad (31)$$

$$j = 4.629 \quad (32)$$

Dónde:

p, j = coeficientes de ajuste

La función del parámetro f está determinada por la ecuación:

$$f = l + mx + ox^2 \quad (33)$$

$$l = -3.259 \quad (34)$$

$$m = 0.878 \quad (35)$$

$$o = -0.0861 \quad (36)$$

Dónde:

l, m, o = coeficientes de ajuste

El objetivo del procedimiento descrito, está enfocado en la formulación de una metodología de diseño, basada en las pruebas de laboratorio realizadas. De forma resumida la metodología es la siguiente:

- Se requiere el estado de mar de una zona costera (H, T).
- Propone un valor de C , con ello se determina C/H .
- Calcular los valores de los coeficientes d y f , según las ecuaciones 29 y 33.
- Sustituir los valores en las ecuaciones 26 a 28, que corresponden a $k * an$ y $Howc/H$ respectivamente.
- Verificar que los datos obtenidos correspondan a los intervalos de la tabla 5.2.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

- Si el intervalo corresponde, las dimensiones seleccionadas garantizan una amplificación de la oscilación dentro del sistema OWC.

Es esencia la tecnología OWC, es una fuente alternativa de energía cercana a grandes consumidores. Sin embargo, desde el punto de vista de la Ingeniería representa un enorme reto tecnológico y teórico, para describir el fenómeno y canalizar la mayor cantidad de energía posible.

El nomograma de diseño de un sistema OWC expuesto, pretende servir como base para la implementación y uso eficiente de este tipo de dispositivos, los cuales son utilizados en diversos países. Si bien, en la literatura se encuentra información de plantas de generación de energía eléctrica utilizando sistemas OWC, las bases teóricas de diseño y por consecuencia la metodología de estos dispositivos son prácticamente nulas. Por tanto, el resultado de este trabajo es de suma importancia, ya que proporciona una primera herramienta de diseño, con base a las pruebas experimentales y verificadas con el desarrollo teórico presentado en el capítulo 4.

5.8 OTROS DISEÑOS DE SISTEMAS OWC

En la actualidad, y como se mostró en el capítulo 3, existen plantas de generación de energía eléctrica basadas en dispositivos OWC, sin embargo las metodologías de diseño bajo las cuales las compañías responsables construyeron dichas plantas, no se encuentran disponibles, evidentemente por motivos de derechos de patentes. Pese a ello, la comunidad científica enfocada en el desarrollo de tecnologías de este tipo, ha desarrollado trabajos relacionados con la optimización de las columnas de agua oscilante, los cuales se encuentran disponibles en la literatura. A continuación se describen algunos trabajos en este tipo.

En el año de 1999 en el departamento de ingeniería Mecánica del Instituto Superior Técnico de Lisboa Portugal [Falcão AFO, 1999], se desarrollo un análisis de un sistema de OWC (Figura 5.29) implementando un sistema de control de aire mediante válvulas, para determinar la mayor eficiencia del dispositivo. Los resultados obtenidos se muestran en las Figura 5.30 y 5.31.

La figura 5.30 muestra las eficiencias utilizando oleaje regular, y la figura 5.31 aquellos resultados con oleaje irregular. Ambas gráficas muestran tres tipos de configuraciones: sin control de aire, con válvula de mariposa con válvula de derivación

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

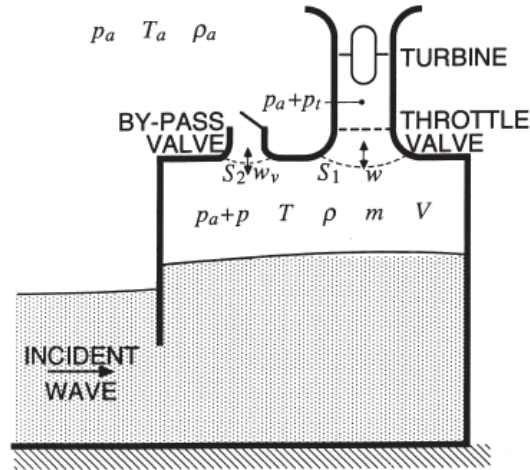


Fig. 5.29 Esquema de sistema OWC [Falcão, 2002].

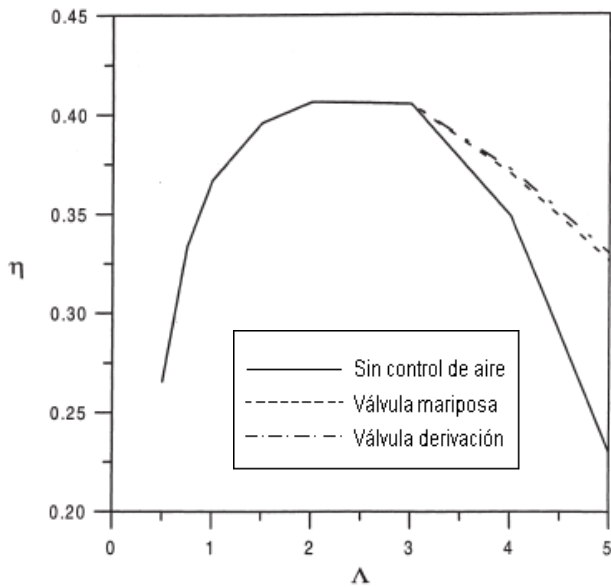


Fig. 5.30 Resultados Oleaje regular

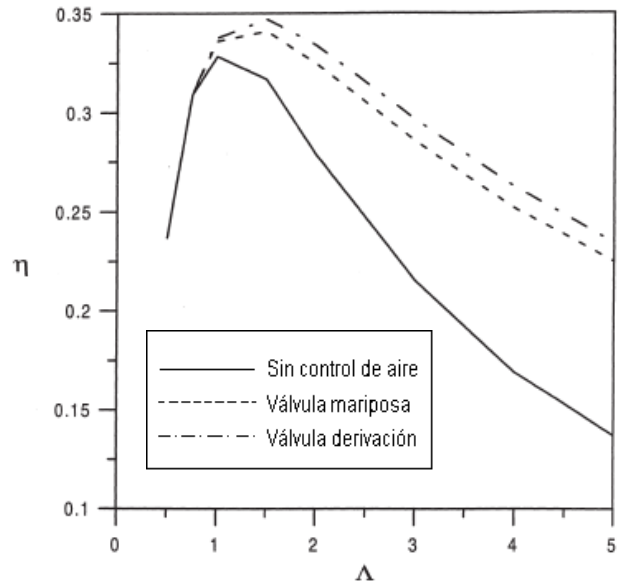


Fig. 5.31 Resultados Oleaje irregular

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En el 2011 Dizadji Nader *et al* [Nader, 2011], del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Teherán, propusieron una metodología para la optimización de un dispositivo OWC, el cual se describe brevemente a continuación.



Fig. 5.32 Cámara OWC prototipo

Se realizaron un total de 15 experimentos, con dos configuraciones geométricas del dispositivo (Figura 5.33 y 5.34), modificando el ángulo de la cámara con respecto a la horizontal, y conservando las condiciones $H=6\text{ cm}$, $T=1:7\text{ s}$.

Con ello se obtuvo la configuración de mayor eficiencia, la cual fue determinada por el flujo de aire obtenido en el extremo del dispositivo OWC, denotado con la nomenclatura Q_{max} , dichos resultados se muestran a continuación.

| Exp | $R_{e\text{ ave}}$ | $R_{e\text{ max}}$ | Q_{ave} (l/s) | Q_{max} (l/s) | ΔP_{ave} (pa) | ΔP_{max} (pa) | θ (°) |
|-----|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 15 | 22691 | 39912 | 10.1 | 17.8 | 70 | 216 | 30 |

Tabla 5.4 Resultados de la sexta serie de experimentos ($b=20\text{ cm}$ y $H=6.8\text{ cm}$)

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

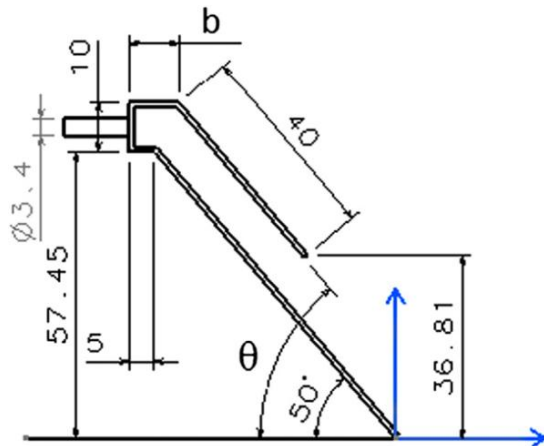


Fig. 5.33 Primer esquema de diseño

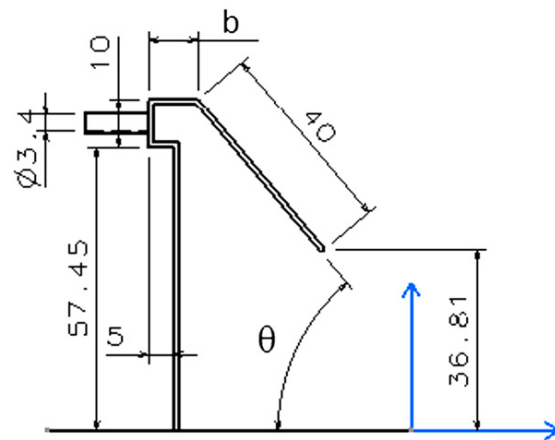


Fig. 5.34 Segundo esquema de diseño

Cada uno de estos trabajos descritos brevemente, están enfocados en obtener la optimización de los sistemas OWC, el primero hace uso de un sistema de control de aire mecanizado, de esta manera se obtienen las presiones necesarias dentro de la cámara, por su parte el segundo dispositivo está enfocado a la variación angular de una de las paredes de la cámara, siendo este el estudio más cercano al presentado en esta tesis. Sin embargo, hasta el momento ambos trabajos carecen de una herramienta que determine las dimensiones factibles de diseño, limitándose a determinar una única geométrica de mayor eficiencia, de acuerdo a sus condiciones físicas empleados, no teniendo la certeza que dicha configuración sea la de mayor eficiencia. Por tanto, el trabajo presentado en esta tesis, obtiene su importancia al proporcionar dicha herramienta, plasmada en un nomograma que enmarca las relaciones de las variables de diseño necesarios para la optimización de la conversión.

CAPÍTULO 6

COMPARACIÓN

“Luchemos por un mundo de la razón, donde la ciencia y el progreso nos conduzca a todos a la felicidad” **Charles Chaplin**

6.1 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

En el capítulo 4 se planteó el desarrollo del método numérico, formulado en el Instituto de Hidroingeniería de la Academia Polaca de Ciencias, en cooperación con el Instituto de Ingeniería UNAM. Con los resultados obtenidos de este planteamiento y el análisis experimental realizado en el canal de olas del Instituto de Ingeniería, se realizó una comparación para validar el dicho modelo. Si bien, ambos trabajos realizados, mantienen una configuración distinta respecto a las condiciones físicas del dispositivo OWC, es decir, por un lado el modelo matemático plantea una variación en la altura de ola como principal variable, mientras que en experimentación se dio más importancia a la variación de la distancia entre placas y la sumergencia de éstas, es posible encontrar el punto de intersección entre ambos con la finalidad de determinar la caracterización de un sistema OWC y que a su vez se valide la formulación.

Como resultado se obtuvieron 4 gráficas (Figura 6.1-6.4), de acuerdo con los valores de $kh = 0.5, 1, 1.5$ y 2 respectivamente. Cada gráfica comprende el rango de altura de ola utilizada en el modelo y planteado en el capítulo 4. En superposición resaltan las pruebas experimentales cuyo valor de periodo corresponden a las variables del modelo.

De manera gráfica se observa un comportamiento variante a la experimentación y los resultados teóricos del modelo matemático del dispositivo OWC, sin embargo esta primera aproximación realizada permite generar certidumbre para continuar con las mejoras al modelo matemático, en otras palabras, los datos plasmados en las gráficas siguientes solo representan una foto instantánea en el estudio de los dispositivos OWC, es menester ampliar esta comparación a las diferentes alturas de olas usadas en el modelo matemático y las variaciones en las condiciones de diseño aplicadas en la experimentación, con ello se obtendrá un esquema con mayor precisión y confianza.

A pesar de las limitaciones en la comparación, el aporte generado en el presente trabajo genera una primera certidumbre para contemplar la validez del modelo numérico y mostrar la caracterización del fenómeno.

CAPÍTULO 6. COMPARACIÓN

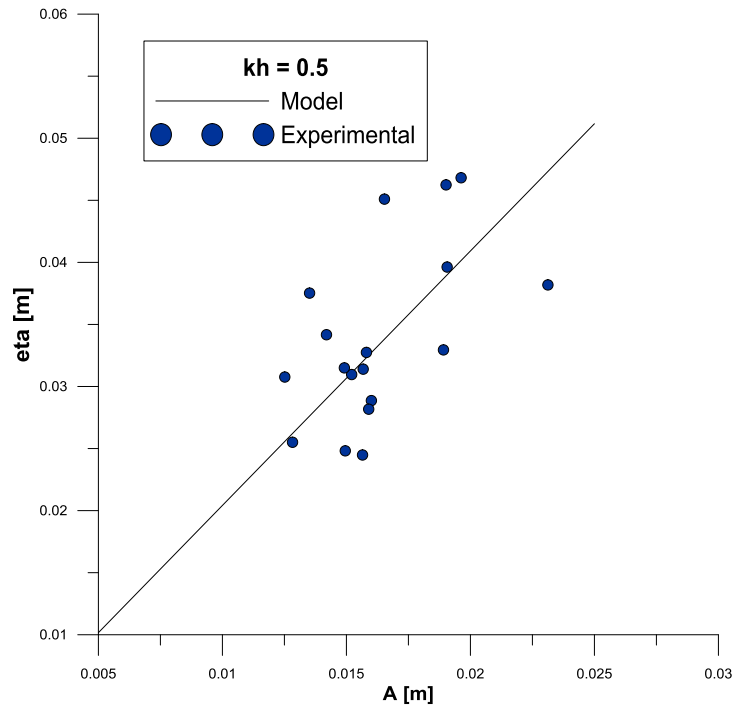


Fig. 6.1 Comparación de resultados $kh = 0.5$

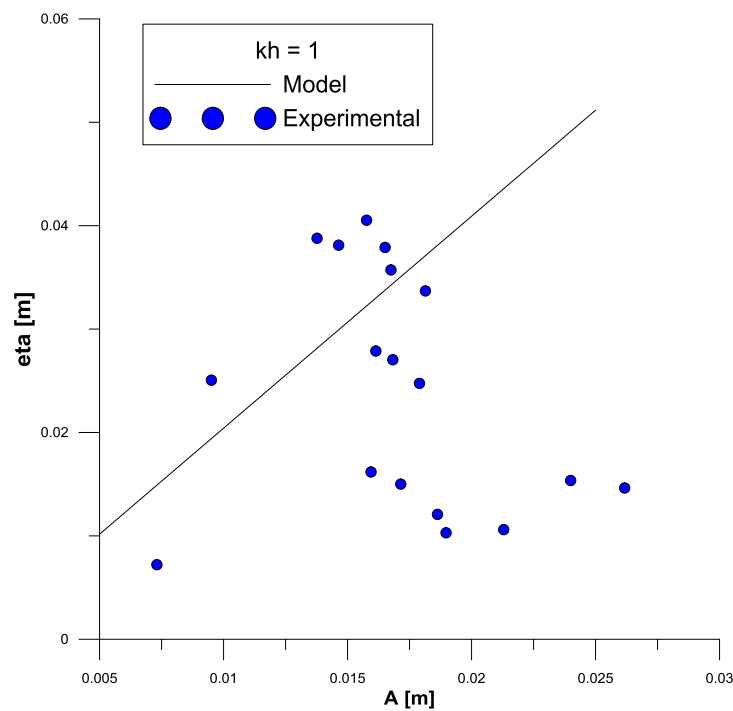


Fig. 6.2 Comparación de resultados $kh = 1$

CAPÍTULO 6. COMPARACIÓN

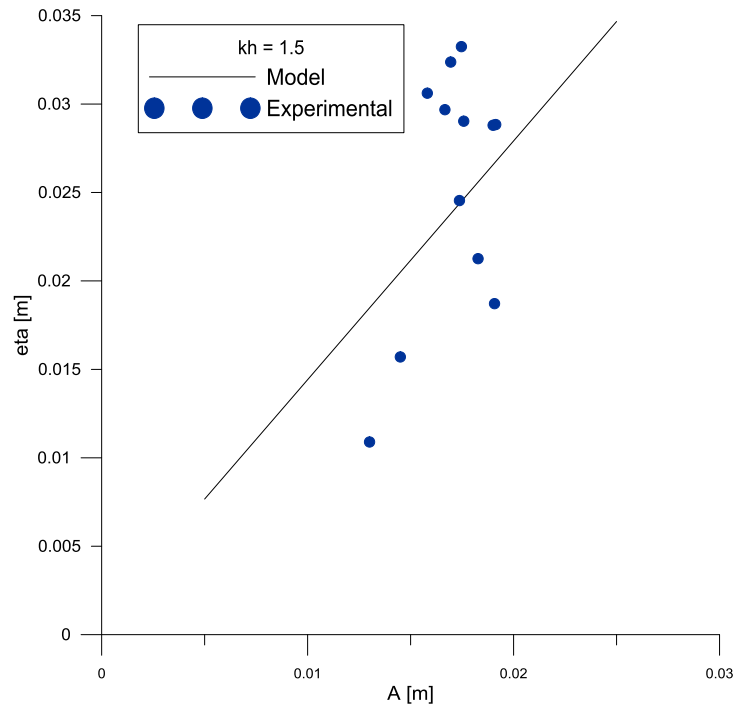


Fig. 6.3 Comparación de resultados $kh = 1.5$

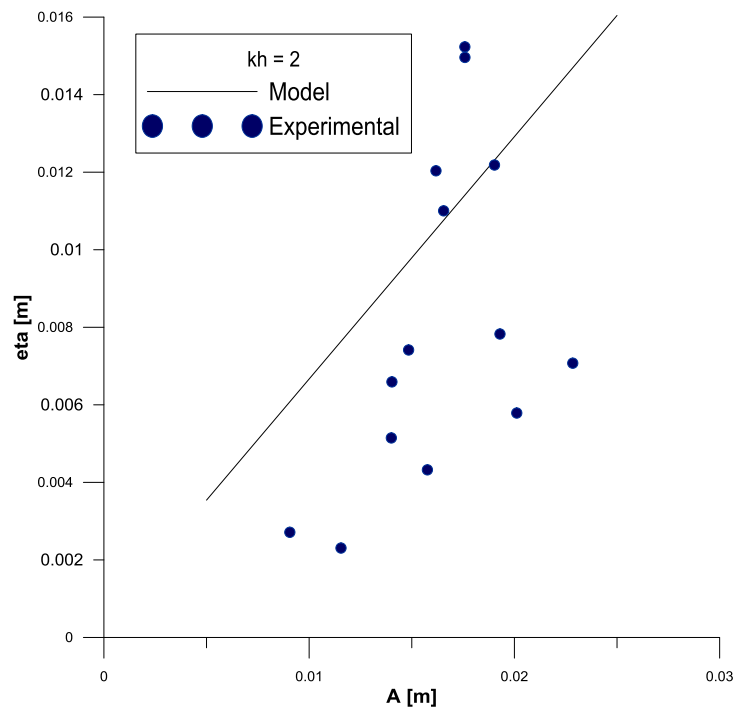


Fig. 6.4 Comparación de resultados $kh = 2$

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

“La obra maestra más fina es la hecha por el creador, según los principios de la mecánica cuántica” **Erwin Schrodinger**

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Las tecnologías alternas que utilizan la energía del mar, se han convertido es un punto importante de estudio para la ingeniería, siendo este medio una rama muy prometedora a mediano y largo plazo para contrastar los problemas energéticos de las sociedades del siglo XXI. Específicamente los sistemas OWC, son mecanismos con altos niveles de captación de energía del mar, comparados con otras tecnologías alternas. Su uso, aunque por el momento es reducido, ha sido llevado a plantas de generación a gran escala, donde las condiciones geográficas son favorables a su instalación y puesta en marcha.

Estos sistemas requieren de un estudio y análisis detallado sobre su comportamiento, ya que dependen directamente del estado de mar, y al ser este un fenómeno complejo en su comportamiento, caracterización también lo es.

Hasta el momento hay pocos trabajos enfocados en los sistemas OWC, y de los existentes en la literatura, muy pocos están vinculados en propuestas de diseño, la mayoría de ellos están relacionados directamente con el análisis de las características hidráulicas.

De las plantas de generación que actualmente están en funcionamiento, las empresas dedicadas a su construcción, no proporcionan una metodología de diseño y las bases sobre las cuales fueron desarrollados los sistemas OWC, esto probablemente se debe a sus propios interés económicos.

De lo anterior radica la importancia que este trabajo conlleva. Siendo este el primer esfuerzo realizado con la finalidad de proporcionar una herramienta de diseño, con un margen de confianza aceptable, estudiada experimentalmente y validada numéricamente que ayude con la implementación de este tipo de sistemas en zonas literales no solo en México sino alrededor del globo.

Por el momento los resultados obtenidos, arrojan niveles elevados de captación de energía y amplificación de la misma. Las pruebas de laboratorios demostraron que en ciertas configuraciones físicas, se alcanzan amplificaciones mayores al 300 % de altura de ola. Por otro lado, se determinó que la variación en la separación de paredes y la sumergencia de las mismas, tienen un efecto directo en la eficiencia del dispositivo, siendo la primera de ellas la característica con mayor efecto en los resultados. El dispositivo OWC, presenta mayor eficiencia con periodos mayores a 1.4 s.

Por otro lado se determinó que el fenómeno no es lineal, si no que presenta un umbral de eficiencia, el cual se debe evitar en para no generar efectos negativos

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

en el cámara del dispositivo OWC, es decir que por encima de este límite el comportamiento del OWC es disipativo, generando un menor rango de oscilaciones en el interior y maximizando el oleaje incidente.

El modelo numérico planteado pudo ser validado con las pruebas experimentales y determinar que es aplicable para un sistema OWC. Sumado a esto, la parte central de esta investigación y el cuál es el nomograma de diseño, arrojo resultados óptimos describiendo un espectro de eficiencias positivas del dispositivo las cuales garantizan en su construcción un comportamiento adecuado, sin embargo, hasta el momento los resultados solo representan una pequeña fotografía dentro de un amplio horizonte energético.

Es necesario continuar con los trabajos de investigación de esta línea, para proporcionar una mayor certidumbre científica del fenómeno y poder trasladar de la mejor manera posible esta tecnología a un uso industrial.

7.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En nuestro país, las tecnologías undimotrices son prácticamente nulas y por consecuencia el estudio de los sistemas de columna de gua oscilante también. Por lo tanto este trabajo se vislumbra como pionero en su ramo. Sin embargo, requiere de una serie de investigación futuras, que mejoren los resultados y maximicen sus alcances. A continuación se enumeran futuras líneas de investigación que se consideran necesarias en la continuación de esta línea de investigación.

- a) Ampliar las pruebas experimentales, contemplando una variación en la altura de ola incidente.
- b) Diseño de la cámara presurizada del dispositivo OWC.
- c) Diseño de turbina bidireccional.
- d) Agregar al análisis experimental y analítico la posibilidad de la variación de la anchura del canal, así como la variación en el ángulo de incidencia del oleaje.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

e) Análisis por fondo variable.

Cada una de las propuestas anteriores requiere de una meticulosa investigación, para ello se requiere generar el interés en el estudio de este dispositivo en la comunidad científica y estudiantil de nuestra universidad en cooperación con otras entidades académicas, que nos permitan avanzar en el entendimiento y aprovechamiento de la energía undimotriz, la cual México posee gracias a sus extensos litorales y muy al alcance de grandes consumidores potenciales.

“No hay nada nuevo bajo el sol” Eclesiastés 1:9

Bibliografía

1. [Airy, 1845] **Airy, G. B. (1845)**. *Tides and waves*. Encycl. Metrop., Art. Vol. 192. pp. 241-396.
2. [Barrufet, 1885] **José Barrufet y Veciana (1885)**, *Las olas del mar. Apuntes que se relacionan con el movimiento de las mismas y su aprovechamiento como fuerza motriz*. Edición original: Imprenta de Redondo y Xumetra, Barcelona (1885). Edición facsimil: Librerías Paris-Valencia (1996).
3. [Bautista, 2013] **Bautista, C. Arnoldo (2013)**. *Solo para Ingenieros: Energía Undimotriz*. Academia Panamericana de Ingeniería.
4. [Brito, 2010] **Brito, Melo Ana (2010)**. *Pico Power Plant: Perspectives for the future*. Published in the Regional Newspaper at azores, Portugal.
5. [Brooke, 2003] **Brooke, John (2003)**. *Wave Energy Conversion*. Elsevier Ocean Engineering Boom Series, Voleme 6. pp 89.
6. [Boud, 2003] **Boud, R. (2003)**. *Wave and Marine Current Energy*. AEA Technology Future
7. [Cifuentes, 2003] **Cifuentes, Lemus et al (2003)**. *El océano y sus recursos, I. Panorama oceánico*. 3ª ed. México, FCE, SEP, CONACyT, 2003.
8. [Duckers,2000] **Duckers L (2000)**. *Wave Power*, Engineering Science and Education Journal, 113-12.
9. [IEA-OES] **IEA-OES (2008)** Annual Report, International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems (IEAOES), edited by A. Brito-Melo and G. Bhuyan, February 2009.
10. [IEA-OES] **IEA-OES (2006)** Policy Report, International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems (IEAOES), edited by P. obatelier.
11. [Evans, 1995] **Evans, D.V, Porter R. (1995)**. *Hydrodynamic Characteristics of n Oscillating Water Column Device*. Applied Ocean Reserch 17:155-64

12. [Evans, 1997] **Evans D.V., Porter R. (1997).** *Efficient calculation of hydrodynamic properties of OWC-type devices.* Journal Of Offshore Mechanics and Arctic Engineering
13. [Falcão AFO, 2010] **Falcão AFO, (2010).** *Wave energy utilization: a review of technologies.* Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14: 899-918.
14. [Falcão, 2002] **Flacão, AFO, 2002.** *Control of an Oscillating-Water-Column Wave Power Plant for maximum Energy Production.* Applied Ocean Reserch, Volume 24, Issue 2, April 2002, Pages 73-82.
15. [Falcão, 2002] **Flacão, AFO, 1999.** *OWC wave energy devices with air flow control.* Ocean Engineering, Volume 26, Issue 12, December 1999, Pages 1275-1295.
16. [Hiriart, 2009] **Hiriart Le Bert, Gerardo (2009)** *Potencial energético en el alto golfo de California.* Proyecto Impulsa IV, Instituto de Ingeniería UNAM.
17. [HR, Wallingford, 2003] **HR. Wallingford Group.** *Wave Generation System.* User Manual. Reino Unido, 2003.
18. [HR, Wallingford, 2003] **HR, Wallingford Group.** *Wave Generation System.* Technical Manual, Reino Unido,
19. [Kinsman, 1965] **Kinsman, B. (1965),** *Wind waves,* Prentice-Hall, Englewood Clifts, Nueva Jersey.
20. *Manual de Diseño de Obras Civiles, Comisión Federal Electricidad (1977).* Capítulo Hidráulica Marítima.
21. [Mclver, 1986] **Mclver, P. (1986).** *Wave forces on adjacent floating bridges.* Appl. Oc. Res. 82 (2), 67-75.
22. [Nader, 2011] **Nader Dizadjil (2011).** *Modeling and optimization of the chamber of OWC system.* Energy, Volume 36, Issue 5, May 2011, Pages 2360-2366.
23. [Ocampo, 2009] **Ocampo, Francisco (2009).** *Determinación del potencial energético en la costa de la península de Baja California (pe-oleajePBC),* CICESE, Ensenada, Baja California.

- 24.[Ortubia, 2008] **Ortubia, I. López et al**, (2008). *Implantación de una central undimotriz en el nuevo dique de abrigo al puerto de Mutriku*. III Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, Barcelona, España.
- 25.[Pérez, 2002] **Pérez, Peña, A.** (2012). *Estimación del clima marítimo y la energía del oleaje disponible en las costas mexicanas*. Tesis de Maestría en Ingeniería. Posgrado en Ingeniería, UNAM. México.
- 26.[Raghunathan, 1995] **Raghunathan, S.** (1995). *The Wells Air turbine Energy Conversion*. Progress Aerospace Science, v. 31, p. 335-386.
- 27.[Rodriguez, 2010]. **Rodriguez, R. Carlos** (2010). *Análisis De viabilidad Económica de una plataforma de Energía Marítima*. Proyecto final de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingeniería., Sevilla España.
- 28.[Utku, 2012] **Utku,Senturk** (2012). *Wave energy extraction by an oscillating water column with a gap on the fully submerged front wall*. Applied Ocean Reserch.
- 29.[Silva, 2005] **Silva, R.C.** (2005). *Análisis y descripción del oleaje*. Serie Docencia, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México D.F. ISBN 970-32-2813-5. Universidad del Valparaíso, Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales, Chile.
- 30.[Sulisz , 1998] **Sulisz , Wojciech** (1998). *Difracction of nonlinear waves by founded horizontal rectangular Cylinder*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.
- 31.[Winckler, 2008] **Winckler, Patricio** (2008). *Energía del oleaje: Resumen de los dispositivos en etapa avanzada de desarrollo*.
- 32.[AW Energy Oy, 2009] *Wave energy*, edición de internet, sección renewable energy, <http://www.aw-energy.com/renewable.html>.



“Por mi raza hablará el espíritu”