

01183

1

1-A



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA MARINA UTILIZANDO
LA ENERGIA DEL OLEAJE Y MAREA.

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERIA

(HIDRAULICA)

P R E S E N T A :

MIGUEL ANGEL ALATORRE MENDIETA



ASESOR DE TESIS: DR. RODOLFO SILVA CASARIN

MEXICO, D. F.

OCTUBRE DE 2003



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS

A mi esposa Lupita la compañera de mi vida.

A mis hijos Miguel Ángel, Paulina y Jerónimo les dedico esta tesis porque los quiero mucho y por haber soportado y apoyado a un papá estudiante de doctorado.

A Francisco y Martín compañeros en la batalla.

A mis padres Roberto Alatorre Padilla y María de los Ángeles Mendieta Bueno que me esperan más allá del horizonte.

A mis hermanos Roberto, Lupe, Alfredo, Margarita y Jesús.

A mis amigos y colegas que me alentaron en todo momento :

David Abundis, Ángel Jiménez, José Luis Fernández Zayas, Joel, Sergio Troyo, Maclovio, Bernardo, Fidel, Laura Sánchez, Natalia, César Flores, Lupita Ponce, Claudia, Joao, Laura Sanvicente, Alejandro Granados, Alma Rosa, Abacuc, Javier Aldeco, Fidel, Pepe González, David Osorno, Rafael, Verónica, Isabel, Christopher, Kate, Patricia, Tatiana, Alex y Juan.

A mis grandes maestros de oceanografía e hidráulica que me han enseñado mucho más de lo que se aprende en una aula: Ingvar Emilsson y Rodolfo Silva.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr Rodolfo Silva Casarín que con su juventud, entusiasmo, capacidad y generosidad tuvo la paciencia de dirigir a un estudiante veterano.

A mis compañeros oceanógrafos Francisco Ruíz y Martín Merino con los que he compartido muchas experiencias en altamar y ahora nos aventuramos en este apasionante mundo de la energía oceánica. Amigos, este tesis es el fruto de nuestro trabajo en equipo considérenla como propia. El proyecto continúa, están en el tintero algunas ideas que tenemos en mente y están por ser experimentadas por lo que espero que la vida nos otorgue la oportunidad de realizar.

Con todo respeto y gratitud a los integrantes del comité doctoral que me orientaron a lo largo de todo el doctorado y que de cada uno aportó elementos muy valiosos para mi formación doctoral:

Dr: Rolando Springall Galindo, Dr. Rodolfo Silva Casarín, Dr. Jesús Gracia Sánchez, Dr. Ingvar Emilsson, Dr, Oscar Fuentes Mariles, Dr. Carlos Escalante Sandoval y Dr, Carlos Cruickshank Villanueva.

A mis maestros en hidráulica por la generosidad propia de quienes comparten sus conocimientos y experiencia profesional:

Dr. Rodolfo Silva Casarín, Dr Gabriel Echávez Aldape, Dr. Gilberto Sotelo Ávila, M en C Victor Franco y Dr. Oscar Fuentes Mariles.

La naturaleza de los experimentos en el mar requieren de la participación, colaboración y apoyo de un grupo muy grande de especialistas en diferentes áreas a todos un reconocimiento muy grande. Es elemental justicia hacer mención a quienes participaron en forma mas intensa:

- Experimentación en Puerto Morelos Q. Roo:

En todas las actividades:

Tito Livio Pérez

Buzos:

M en C Mario Lara† y Dra Claudia Padilla.

Mediciones:

Natalia Schiaffino y Karla Peregrina.

Construcción e Instalación:

Eutimio Sánchez, José M. Rodríguez, Amador Hernández, Felipe Cat y Miguel Ángel Alatorre Ibargüengoitia. Un reconocimiento a todos los estudiantes y trabajadores de la estación de Puerto Morelos del ICMYL que participaron siempre en las complicadas maniobras de instalación y rescate del prototipo.

A las autoridades de la estación por su apoyo en el proyecto.

Dra Patricia Briones y M en C Francisco Escobar.

PAGINACIÓN DISCONTINUA

DEDICATORIAS

A mi esposa Lupita la compañera de mi vida.

A mis hijos Miguel Ángel, Paulina y Jerónimo les dedico esta tesis porque los quiero mucho y por haber soportado y apoyado a un papá estudiante de doctorado.

A Francisco y Martín compañeros en la batalla.

A mis padres Roberto Alatorre Padilla y María de los Ángeles Mendieta Bueno que me esperan más allá del horizonte.

A mis hermanos Roberto, Lupe, Alfredo, Margarita y Jesús.

A mis amigos y colegas que me alentaron en todo momento :

David Abundis, Ángel Jiménez, José Luis Fernández Zayas, Joel, Sergio Troyo, Maclovio, Bernardo, Fidel, Laura Sánchez, Natalia, César Flores, Lupita Ponce, Claudia, Joao, Laura Sanvicente, Alejandro Granados, Alma Rosa, Abacuc, Javier Aldeco, Fidel, Pepe González, David Osorno, Rafael, Verónica, Isabel, Christopher, Kate, Patricia, Tatiana, Alex y Juan.

A mis grandes maestros de oceanografía e hidráulica que me han enseñado mucho más de lo que se aprende en una aula: Ingvar Emilsson y Rodolfo Silva.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr Rodolfo Silva Casarín que con su juventud, entusiasmo, capacidad y generosidad tuvo la paciencia de dirigir a un estudiante veterano.

A mis compañeros oceanógrafos Francisco Ruíz y Martín Merino con los que he compartido muchas experiencias en altamar y ahora nos aventuramos en este apasionante mundo de la energía oceánica. Amigos, este tesis es el fruto de nuestro trabajo en equipo considérenla como propia. El proyecto continúa, están en el tintero algunas ideas que tenemos en mente y están por ser experimentadas por lo que espero que la vida nos otorgue la oportunidad de realizar.

Con todo respeto y gratitud a los integrantes del comité doctoral que me orientaron a lo largo de todo el doctorado y que de cada uno aportó elementos muy valiosos para mi formación doctoral:

Dr: Rolando Springall Galindo, Dr. Rodolfo Silva Casarín, Dr. Jesús Gracia Sánchez, Dr. Ingvar Emilsson, Dr, Oscar Fuentes Mariles, Dr. Carlos Escalante Sandoval y Dr, Carlos Cruickshank Villanueva.

A mis maestros en hidráulica por la generosidad propia de quienes comparten sus conocimientos y experiencia profesional:

Dr. Rodolfo Silva Casarín, Dr Gabriel Echávez Aldape, Dr. Gilberto Sotelo Ávila, M en C Victor Franco y Dr. Oscar Fuentes Mariles.

La naturaleza de los experimentos en el mar requieren de la participación, colaboración y apoyo de un grupo muy grande de especialistas en diferentes áreas a todos un reconocimiento muy grande. Es elemental justicia hacer mención a quienes participaron en forma mas intensa:

- Experimentación en Puerto Morelos Q. Roo:

En todas las actividades:

Tito Livio Pérez

Buzos:

M en C Mario Lara† y Dra Claudia Padilla.

Mediciones:

Natalia Schiaffino y Karla Peregrina.

Construcción e Instalación:

Eutimio Sánchez, José M. Rodríguez, Amador Hernández, Felipe Cat y Miguel Ángel Alatorre Ibargüengoitia. Un reconocimiento a todos los estudiantes y trabajadores de la estación de Puerto Morelos del ICMYL que participaron siempre en las complicadas maniobras de instalación y rescate del prototipo.

A las autoridades de la estación por su apoyo en el proyecto.

Dra Patricia Briones y M en C Francisco Escobar.

- Experimentos en el estanque de olas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Préstamo de Instalaciones y asesoría técnica:

M en C Víctor Franco y Dr. Oscar Fuentes Mariles, Investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Mediciones:

Colega y amigo Steven Czitrom.

- Elaboración y corrección de la tesis:
 - El compañero de estudios a ahora doctor Georges A. Grovaere por su apoyo en la elaboración y revisión de la tesis.
 - Jorge Castro por el diseño de material gráfico principalmente imágenes en 3-D en lo que es el especialista.
 - Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM por su apoyo en los cálculos y elaboración de material gráfico especialmente a Juan Carlos Espinal, Dulce Maria Pérez y Gabriel Díaz.
 - Gerardo Barajas por la corrección de estilo.
 - Mat Ignacio Palomares y Rocio Tafoya del servicio académico de cómputo del ICMYL por el apoyo en la impresión.
 - Dr. Paulo Salles por a revisión e ideas del manuscrito.
 - Christopher Bowes por corrección de estilo en Inglés.

Por la asesoría en estanques de acuicultura: al M en C Alejandro Gómez y al M en C Claudio Padilla.

Al Ing. Rafael Campos por su asesoría en ingeniería de costas.

CONACYT financió parcialmente los experimentos del prototipo en Puerto Morelos con el proyecto 4558-A.

Resumen

En esta tesis se propone un sistema de bombeo de agua de mar con el propósito de favorecer el recambio de agua en una laguna litoral o en estanques de acuicultura. Se utiliza la energía natural del oleaje, que se amplifica por medio de un concentrador de oleaje de paredes convergentes incrementando la carga hidráulica en su interior.

Los aportes de este proyecto son:

- Incidencia en la línea de investigación de aprovechamiento de energía oceánica, que es un tema de investigación incipiente y tiene grandes perspectivas a mediano y largo plazo.
- Una solución matemática formal del comportamiento del oleaje en el concentrador. Con esta solución se puede calcular el gasto en función de los parámetros del oleaje así como de las dimensiones y forma del amplificador y por tanto determinar los parámetros de diseño, dados por un régimen del oleaje real y los requerimientos de caudal.

El proyecto de tesis se desarrolló en dos fases:

-Experimental:

A nivel de laboratorio en un estanque de olas con un modelo de dimensiones 1x1x0.5m y condiciones controladas con oleaje monocromático. Se realizaron diversos experimentos para estudiar el efecto de la variación de cada uno de los parámetros tanto de oleaje como de la estructura en el gasto.

En campo con oleaje real en Puerto Morelos Q.Roo. con un prototipo de dimensiones 5x5x4m en el que se realizaron mediciones en condiciones reales y se identificaron los parámetros más importantes en el funcionamiento y los elementos críticos.

-Teórica:

Se elaboraron diversos modelos matemáticos hasta la obtención de uno satisfactorio. Se ensayaron los siguientes modelos:

Transformación conforme en el plano complejo, modelo numérico con los conceptos fundamentales de la óptica geométrica, la superposición de efectos independientes de la rampa (para la cual ya existe modelo analítico) y de las paredes con un modelo experimental. Estos modelos explican satisfactoriamente la mayoría de los resultados experimentales pero no en su totalidad.

Finalmente, al aplicar la ecuación de continuidad en canales de paredes convergentes con ondas largas (comparadas con el fondo y las dimensiones del amplificador) y con la hipótesis de que el oleaje es armónico, se encontró que la solución explica satisfactoriamente el factor de amplificación del oleaje en el interior de las paredes al compararse con los datos propios y de otros autores. Se complementó la ecuación con coeficientes empíricos para explicar algunos fenómenos no resueltos analíticamente.

Se concluye determinando los alcances y limitaciones de este sistema de bombeo tales como:

El gasto obtenido es del orden de $1\text{m}^3/\text{s}$ para oleajes del orden de 1m de altura. No es uniforme por el efecto de la marea. El acceso hacia la laguna litoral debe encontrarse a una distancia corta de la playa (del orden de 100m). Es conveniente contar con una escollera accesible para la instalación del prototipo. Finalmente, para la conducción del caudal se propone un canal abierto.

Abstract

The main goal of this thesis projects to design and test a sea pump system able to send water from the sea to a coastal lagoon or an aquaculture pond in order to exchange sea water for cleaning purposes. Natural sea wave energy is utilized. The pumping mechanism is obtained increasing the wave height in the interior of converging walls, obtaining a benefit from the resulting hydraulic head.

The objective of this project is :

To make some contributions to the sea energy conversion research. This is a current subject matter with large applications in the near future.

To get a formal mathematic explanation of the behavior of waves in the interior structure of the wave amplifier. With this scheme it is possible to calculate the volume rate that depends on the wave parameters and structure figures of a given real sea environment and volume rate requirements.

The project has two phases:

Experimental:

In an experimental wave pond using an $1 \times 1 \times 0.5 \text{m}^3$ model, with a monochromatic wave pattern. Experiments designed to test individual parameter effects were carried out.

In the field at Puerto Morelos Q.Roo Mexico. With a $5 \times 5 \times 4 \text{m}^3$ prototype tested in a real sea environment. Measurements in several conditions were made and the principal parameters and critical points were identified.

Theoretical:

The following mathematical tools were tested until a satisfactory one was obtained

Conformal mapping in complex plane, numeric model using the optical geometry concepts, superposition of middle slope equation (already solved analytically) with an empirical model of convergent walls. These models explain satisfactorily most of the experimental results, but not completely.

Finally, applying the equation of continuity to convergent walls channels using long wave (the wavelength of the waves in the convergent walls is long relative to the water depth and wall dimension) and with the hypothesis of harmonic waves an analytic formula was obtained that explains the experiment results closely (ours and other authors). This formula is complemented with an empirical factor that explain phenomena that have been not already solved analytically.

The scope and limitations of this pumping system are:

The volume rate obtained is of 1 m³/s for wave high of 1m. The flux is not uniform because of tides. The access to a coastal lagoon must be relatively short (100m or so). The installation must be joined to a breakwater. And an open channel for conduction of the sea water is proposed.

CONTENIDO

DEDICATORIAS.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	IX
CONTENIDO.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XV
LISTA DE FIGURAS.....	XVII
LISTA DE TABLAS.....	XIX
1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 IMPORTANCIA.....	3
1.2 ANTECEDENTES.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	10
1.4 HIPÓTESIS.....	10
1.5 METODOLOGÍA.....	11
1.6 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	12
2 OSCILACIONES MARINAS.....	17
2.1 INTRODUCCIÓN.....	17
2.2 TIPOS DE OLEAJE.....	20
2.3 MECANISMOS DE GENERACIÓN.....	21
2.4 TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE.....	23
3 ANÁLISIS DEL OLEAJE.....	31
3.1 HIPÓTESIS BÁSICAS.....	31
3.2 EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.....	32
3.3 EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	37
3.4 ANÁLISIS DEL OLEAJE POR VIENTO GENERADOR.....	43
4 MODELO ANALÍTICO.....	47
4.1 INTRODUCCIÓN.....	47
4.2 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	47
4.3 OLEAJE EN EL INTERIOR DE LAS PAREDES.....	52
5 EXPERIMENTACIÓN EN LABORATORIO.....	63
5.1 DISEÑO DEL MODELO.....	64
5.2 MEDICIONES.....	66
5.2.1 Gasto en función de la altura del rectificador.....	67
5.2.2 Gasto en función de la longitud del conducto.....	67

5.2.3	<i>Gasto en función del diámetro del conducto.</i>	68
5.2.4	<i>Gasto en función de la longitud de las paredes.</i>	69
5.2.5	<i>Gasto en función del ángulo de abertura de las paredes.</i>	69
5.2.6	<i>Gasto en función de rampa.</i>	70
5.2.7	<i>Experimentos en función del oleaje.</i>	71
5.3	RESULTADOS.....	73
6	EXPERIMENTACIÓN EN CAMPO.....	77
6.1	CONDICIONES AMBIENTALES	80
6.2	DISEÑO DEL PROTOTIPO.	83
6.3	MEDICIONES.....	89
6.4	RESULTADOS.....	95
7	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	99
7.1	EFICIENCIA DEL SISTEMA	99
7.2	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	113
7.3	RESUMEN DE RESULTADOS.....	115
8	MODELO INTEGRAL DE DISEÑO	119
8.1	INTRODUCCIÓN	119
8.2	VALIDACIÓN EN MODELO EN LABORATORIO	122
8.2.1	<i>Variación del gasto en relación con la altura del francobordo.</i>	122
8.2.2	<i>Ángulo de abertura de las paredes.</i>	124
8.2.3	<i>Longitud de las paredes.</i>	125
8.2.4	<i>Ángulo de incidencia del oleaje.</i>	126
8.2.5	<i>Longitud del conducto.</i>	126
8.3	VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO EN EL MAR.....	128
8.4	DISEÑO.....	131
8.4.1	<i>Parámetros generales.</i>	132
8.4.2	<i>Análisis del oleaje.</i>	133
8.4.3	<i>Aplicación del método analítico para la determinación de la distancia longitudinal.</i>	133
8.4.4	<i>Cálculo de los parámetros estructurales.</i>	134
8.4.5	<i>Cálculo del francobordo.</i>	136
8.4.6	<i>Cálculo anual del gasto.</i>	136
8.4.7	<i>Selección de la estructura.</i>	137
8.4.8	<i>Canal de conducción.</i>	138
8.5	Ejemplo de una aplicación práctica del sistema de bombeo.....	139
8.6	Efectos de a aplicación de un sistema de bombeo.....	170
9	RECOMENDACIONES	175
10	CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO	179
	CONCLUSIONES.....	179
	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	179
	APÉNDICE A ECUACIÓN DE MOMENTUM	183
	APÉNDICE B CONDICIONES DE FRONTERA.....	187

APÉNDICE C CONDUCCIÓN EN CONDUCTOS A PRESIÓN	189
APÉNDICE D CONDUCCIÓN EN CANALES ABIERTOS	193
REFERENCIAS	199



LISTA DE SÍMBOLOS

a	amplitud de la onda.
a'	amplitud amplificada de la onda.
A_i	ángulo de incidencia.
A_r	ángulo de refracción.
b	ancho del canal y del vertedor.
b_0	ancho de la entrada del amplificador.
C	celeridad de fase.
C_g	celeridad de grupo.
C_{cr}	velocidad crítica en un canal.
C_r	coeficiente de refracción.
C_x	coeficiente de reflexión.
D	diámetro de una tubo circular.
d, d_0	profundidad del agua a partir del nivel medio del mar.
F	fuerza
F	altura del francobordo o el "fetch".
f	frecuencia.
F_f	número de Froude.
g	aceleración de la gravedad 9.81 m/s ² .
h	profundidad del agua en un momento dado.
H	altura de la ola.
H_{rms}	valor cuadrático medio de la altura de la ola.
k	número de onda $k=2\pi/\lambda$.
L	longitud normal a lo largo del amplificador.
L_p	longitud de las paredes.
M_i	momento i-ésimo.
p	presión dinámica.
P	presión total.
$P()$	Probabilidad.
r	radio o variable libre
R	Run-up de la ola.
Q	rebase o gasto.
s	densidad de energía.
$S, S()$	pendiente hidráulica en un canal.
t	tiempo.
T	periodo de la ola.
T_{rms}	Valor cuadrático medio del periodo de la ola.
U	vector velocidad.
u	componente de la velocidad en el eje x.
v	componente de la velocidad en el eje y.
w	componente de la velocidad en el eje z.
x	distancia a lo largo del eje x.
y	distancia a lo largo del eje y.
z	distancia a lo largo del eje z.
α	ángulo de apertura de las paredes.

β	ángulo de inclinación de la rampa.
ζ	desplazamiento de la superficie libre.
η	amplitud espacial.
θ	ángulo de incidencia.
λ	longitud de onda.
ρ	densidad del agua .
ϕ	potencial de velocidad.
ν	ancho espectral.
ω	frecuencia angular.

Funciones

d/d	derivada.
∂/∂	derivada parcial.
∇	gradiente.
$\nabla \cdot$	divergencia.
$\nabla \times$	rotacional.
∇^2	laplaciano.
$J_n()$	función de Bessel de orden n .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Vista aérea de la planta mareomotriz de La Rance Francia.....	6
Figura 1.2 Instalación del prototipo en Puerto Morelos Q.Roo.....	8
Figura 1.3 Diseño de una planta experimental de obtención de energía eléctrica en Australia.....	8
Figura 1.4 Desarrollo del proyecto de construcción de un sistema de bombeo.....	11
Figura 2.1 Distribución de la energía de las olas según su frecuencia.....	19
Figura 2.2 Contribución capilar y gravitacional en la celeridad de las olas.....	23
Figura 3.1 Parámetros de un registro de Oleaje	33
Figura 3.2 Diagrama de estado de mar Periodo y altura de ola contra rebase en la vertical de Puerto Morelos.....	35
Figura 3.3 Diagrama de probabilidad del oleaje. Distribución de probabilidad de Rayleigh	36
Figura 3.4 Espectro de frecuencia de una serie de oleaje en Cancún Q.Roo.....	42
Figura 3.5 Diagrama tridimensional de altura y periodo en Puerto Morelos.....	42
Figura 4.1 Tensor de esfuerzos en un cubo.....	48
Figura 4.2 Esquema de un vector normal de velocidad	50
Figura 4.3 Esquema del modelo matemático vista en planta	53
Figura 4.4 Comportamiento de las funciones Bessel	55
Figura 4.5 Parte de la ola que se capta en el colector dado una altura del francobordo. ..	57
Figura 5.1a Dibujo del modelo a escala 1:50	63
Figura 5.1b Dibujo del modelo a escala 1:50	64
Figura 5.2 Croquis del estanque de oleaje con el modelo 1:50.....	65
Figura 5.3 Efecto de la altura del colector sobre el gasto.....	67
Figura 5.4 Gasto vs longitud del conducto	68
Figura 5.5 Gasto vs restricción del conducto	69
Figura 5.6 Gasto en función de longitud de las paredes	70
Figura 5.7 Eficiencia del gasto en función del ángulo de las paredes	71
Figura 5.8 Gasto en función de la frecuencia y de la presencia de la rampa	72
Figura 5.9 Eficiencia del rebase en función del ángulo de incidencia del oleaje	73
Figura 6.1a Vistas en perspectiva del amplificador de oleaje sin rampa	787
Figura 6.1b Vistas en perspectiva del amplificador de oleaje con rampa	78
Figura 6.2a Vista frontal. Medidas en m.	79
Figura 6.2b Vista lateral. medidas en m.....	79
Figura 6.2c Vista en planta. Medidas en m.....	80
Figura 6.3 El colector al inicio de la construcción del prototipo	85
Figura 6.4 Tanque de medición	86
Figura 6.5a Vista en perspectiva de la instalación del sistema.	88
Figura 6.5b Acercamiento en perspectiva del amplificador.	89
Figura 6.6 Mediciones del gasto para distintas alturas de olas en el prototipo.....	90
Figura 6.7 Mediciones del gasto en el prototipo con rampa. La línea punteada corresponde a una cota mínima que se emplea como referencia en el análisis	91
Figura 6.8 Oleaje en el mar a 30 metros del prototipo y en la entrada	92
Figura 6.9 Espectro FFT típico del oleaje en Puerto Morelos Q.Roo	92
Figura 6.10 Densidad de energía en tres diferentes estados de mar.....	93
Figura 7.1 Efecto de las paredes en el rebase para diversos casos	102
Figura 7.2 Efecto de la rampa en el rebase para diversos experimentos.....	105
Figura 7.3 Rebase en función del ángulo de inclinación de la rampa aplicando dos modelos matemáticos.....	106

Figura 7.5 Efecto combinado de paredes y rampa en modelo, prototipo y modelo matemático	107
Figura 8.1 Esquema conceptual del modelo de diseño del sistema de bombeo	119
Figura 8.2 Gasto para ola de 0.1m de altura	123
Figura 8.3 Gasto para ola de 0.02m de altura	123
Figura 8.4 Gasto para ola de 0.04m de altura	124
Figura 8.5 Gasto para ola de 0.048 m de altura	124
Figura 8.6 Gasto vs ángulo de las paredes	125
Figura 8.7 Gasto vs longitud de las paredes	126
Figura 8.8 Gasto contra ángulo de incidencia del oleaje	126
Figura 8.9 Gasto contra longitud del conducto	127
Figura 8.10 Comparación del gasto entre el modelo y observaciones en m ³ /s	127
Figura 8.11 Datos de gasto del prototipo en relación con el modelo de Van der Meer y Janssen	128
Figura 8.12 Comparación de datos calculados y observados con fondo constante para variación del francobordo	129
Figura 8.13 Comparación de datos calculados y observados con rampa para variación del francobordo	129
Figura 8.14 Datos Gastos observados y reales fondo constante	130
Figura 8.15 Gastos observados y reales fondo variable	130
Figura 8.16 Diagrama de flujo del diseño	132
Figura 8.17 Gráfica para seleccionar la distancia longitudinal en prototipo en fondo plano	134
Figura 8.18 Gráfica para seleccionar la distancia longitudinal en prototipo con rampa	134
Figura 8.19 Potencia de una bomba para Cancún con los parámetros altura de la ola 0.5m amplificación 3, periodo 5.5s ancho del colector 2m y profundidad 3.5m	136
Figura 8.20 Efecto de la marea en el gasto en un periodo de un día	137
Figura 8.21 Factor de corrección del gasto en función de la dirección del oleaje	137
Figura 8.22 Vista parcial de la instalación del sistema de estanques	145
Figura 8.23 Vista del sistema de estanques	145
Figura 8.24 Altura de la marea en sisigias	147
Figura 8.25 Gasto en función de la marea	147
Figura 8.26 Perfil de cargas piezométricas	151
Figura 8.27 Perfil de cargas piezométricas con escala ampliada	151
Figura 8.28 Detalle de las cotas de los estanques	151
Figura 8.29 Tanque de estabilización y estanques	153
Figura 8.30 Perfil posterior del sistema de estanques	153
Figura 8.31 Elementos de los estanques	155
Figura 8.32 Vista superior de un estanque	157
Figura 8.33 Vista interior de un estanque	157
Figura 8.34 Efecto en el DBO de la laguna Bojórquez después de 2 horas de bombeo de agua de mar	170
Figura 8.35 Efecto del DBO en la laguna Bojórquez después de 25 horas de bombeo de agua de mar	171

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1. Valores característicos del oleaje en Puerto Morelos.....	82
Tabla 7.1. Variación del gasto contra la altura según diversos experimentos.	100
Tabla 7.2 Comportamiento del gasto en función del ángulo de abertura de las paredes.....	103
Tabla 7.3 Comportamiento del gasto en función de la longitud de onda	103
Tabla 7.4 Comportamiento de la rampa en función de la inclinación.....	106
Tabla 7.5 .Efectos del francobordo en los experimentos.....	111
Tabla 7.6. Características de los sistemas de medición empleados.....	114
Parámetros más significativos	115
Tabla 7.7.resumen los resultados más significativos.....	115
Tabla 8.1. Parámetros de estanques de acuicultura para algunos crustáceos...	142



INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia

La obtención de energía del océano es un tema fascinante. El mar influye en forma determinante en el clima del planeta. Se ha calculado que la fracción accesible de la energía del océano que se puede utilizar con la tecnología actual supera las necesidades del consumo mundial de energía.

Su extracción sin embargo, es un tema muy complejo. El mar es un medio muy difícil, su superficie está en movimiento continuo y ocasionalmente la fuerza del oleaje rebasa la resistencia de toda estructura. Con las eventuales crisis petroleras del siglo veinte se ha puesto en la mira la obtención de la energía del océano con diversos enfoques, tales como los siguientes:

Térmico. Aprovechando los gradientes de temperatura entre la capa superficial (con un espesor de 100 m aproximadamente, que es la profundidad media de la termoclina) y las capas frías más profundas.

Mecánico. Con la energía del oleaje, los cambios de nivel producidos por las mareas o la extracción de energía de las corrientes marinas.

Químico. Con la energía hipotética producida por la ósmosis.

Biológico. Con digestores de plantas marinas.

Los éxitos hasta el momento han sido relativos, algunos prototipos ya han sido probados satisfactoriamente como en el caso de las centrales mareomotrices otros están en experimentación, como en el caso del oleaje y muchos otros, a nivel de escritorio como los de ósmosis.

El explorar esta línea de investigación seguramente aportará muchos nuevos conocimientos y técnicas.

El tema en la práctica tiene muchas complejidades como algún autor se refirió a la extracción de la energía del oleaje, "*es un paraíso para el inventor, pero no para el inversionista*".

Las principales dificultades para extraer la energía marina son:

- a) La variabilidad del estado del mar. Aunque hay fenómenos que muestran cierta periodicidad (como las mareas) esto no es la regla, por lo que es necesario idear máquinas que trabajen con una entrada aleatoria de energía. Por ejemplo en el caso de las olas, el régimen es irregular y cambia en dirección e intensidad en cada momento.

- b) Condiciones de tormenta. En estos casos la fuerza del oleaje, viento, descargas de ríos, etc. son tan intensas que para que una estructura marina resista es necesario que sea muy robusta.
- c) Corrosión. La sal del agua de mar se compone de más de 44 substancias en diferentes concentraciones (10 con concentraciones mayores a 0.1% del volumen de agua), por lo que la posibilidad de que se produzcan reacciones químicas es muy grande, generando corrosión en instalaciones marinas. Se ha observado que las estructuras que están en el rango intermareal (las que alternativamente se encuentran sumergidas y expuestas al aire libre) son las más vulnerables.
- d) Crecimiento de organismos marinos, como los "balanos" (crustáceos que se adhieren al casco de los barcos), que aumentan la fricción y disminuyen la velocidad del barco. Los organismos que crecen en el interior de las tuberías crean colonias que bloquean el área transversal afectando el flujo; o bien, los organismos que crecen en las partes móviles y afectan su funcionamiento.

A estos desafíos se enfrenta el ingeniero al construir una obra costera o mar adentro. Estas dificultades son las que han impedido un desarrollo creciente de aprovechamiento de la energía oceánica dado el elevado costo para superarlas. Se han realizado esfuerzos con diferentes grados de éxito en diferentes partes del mundo (en México esta línea de investigación es incipiente) y existen infinidad de ideas- algunas muy brillantes y otras que parecen irrealizables. Sin embargo, a nivel laboratorio se han efectuado pruebas exitosas con modelos en varios países en la extracción de energía del mar.

1.2 Antecedentes

En materia de métodos para la obtención de energía del océano se puede abundar muchísimo, pero dado que una descripción de todas las ideas no es el tema fundamental de esta tesis, sólo se mencionan las más relevantes y de actualidad, (Charlier, 1993) tales como:

Las mareas, que dada su naturaleza periódica y por tanto predecible han podido ser aprovechadas cuando su rango es muy elevado.

La energía térmica es la de mayor potencial.

Con respecto al oleaje hay una inmensa cantidad de ideas, se describen algunas de las que ya han sido puestas en práctica.

Por último se mencionan los conocimientos más recientes del rebase, que es el parámetro generador de energía del sistema de bombeo propuesto en esta tesis.

a) Las mareas:

Sus principales características son el cambio gradual y la periodicidad. Fue la primera energía en ser utilizada desde hace siglos en molinos para triturar granos. El principio de funcionamiento consiste en crear una presa artificial la cual en el momento de máxima elevación de la marea cierra las esclusas y espera a que se genere una diferencia de niveles hasta obtener una carga hidráulica suficiente. En ese momento se abren las compuertas y se permite el flujo del agua aprovechando esta energía mecánica, para mover las aspas de un molino o una turbina (que debe de tener las características de funcionar en ambas direcciones y con muy baja carga hidráulica).

En varios países (como Francia, Rusia y China) se han construido centrales mareomotrices. La precursora fue construida en Francia en La Rance en 1966. Para que sea rentable es imperante que la marea sea excepcionalmente alta, por lo que hay sólo unos pocos lugares en el mundo con estas características. En México no existen tales sitios, a excepción tal vez del extremo norte del Golfo de California donde el rango de las mareas es de 6m pero no hay barreras naturales adecuadas que faciliten la instalación de una planta mareomotriz.

En la figura 1.1 se muestra una fotografía de la planta de La Rance Francia. Esta inició sus operaciones en 1966. Fue la primera y sigue siendo la más grande de su tipo las características principales de esta planta son:

- Número de turbinas: 24.
- Energía obtenida: 225 kw que se incorporan al sistema eléctrico.
- Principal problema: corrosión en las turbinas.

En China y Rusia se han construido plantas mareomotrices de menor capacidad.

b) La energía térmica:

Es la de mayor magnitud y consiste en aprovechar la diferencia de temperatura de la capa superficial del mar con la de capas profundas bajo la termoclina. El potencial de este gradiente térmico es enorme, se han realizado experimentos con éxito en este tipo de plantas, denominadas OTEC por sus siglas en inglés "*Ocean Thermal Energy Conversion*". Su principio de funcionamiento es el siguiente:

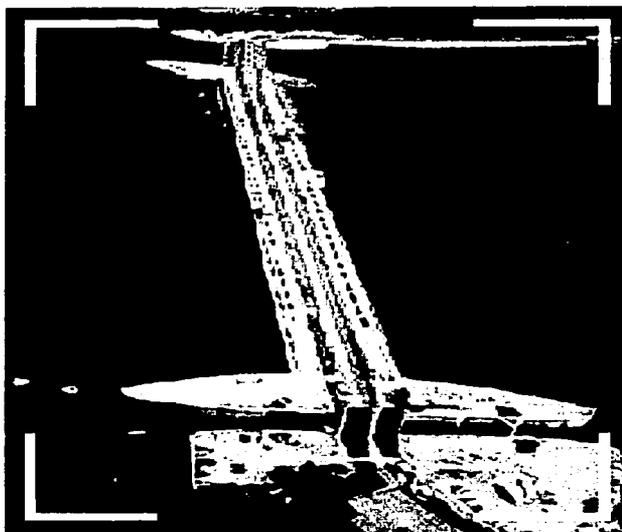


Figura 1.1 Vista aérea de la planta mareomotriz de La Rance Francia

En la zona tropical del océano existe un gradiente térmico permanente de más de 20°C entre la superficie y las capas profundas que se utiliza para un ciclo termodinámico. Se construye una máquina con el principio del ciclo de Carnot en el que el agua caliente de la superficie evapora el fluido de operación y el agua fría lo condensa. Se emplea, por ejemplo, el amoniaco, cuyas temperaturas de evaporación y condensación bajo ciertas condiciones de presión son cercanas a la temperatura superficial para evaporar (en zonas tropicales) y la del agua a una profundidad de 700m para condensar. Se requiere un tubo de esa misma longitud acoplado al barco lo que representado el mayor problema ingenieril. A continuación se da una lista de las temperaturas de operación para una planta de este tipo:

- Temperatura superficial del agua de mar: 25°C .
- Temperatura del agua de mar a 700m de profundidad: 5°C .
- Temperatura de evaporación del amoniaco (a presión atmosférica): 33.4°C .
- Temperatura de evaporación del amoniaco (bajo presión): 25°C .
- Temperatura de condensación del amoniaco(bajo presión): 5°C .

La idea original fue propuesta por D'Arsonval en 1881. Los primeros intentos se realizaron en Cuba, Abidjan y Brasil, alrededor de 1920. Estos intentos no fueron exitosos porque la energía necesaria para operar la planta fue superior a la extraída. Finalmente sí se han logrado éxitos. Uno de estos éxitos es el de una planta OTEC en Hawai que funcionó entre 1993 a 1998 con 210 kw.

c) El oleaje:

Han habido muchos intentos para utilizar esta energía. Dado que las olas están presentes en todos los puntos del océano. Sin embargo, tienen la dificultad inherente de los cambios bruscos de dirección, período y altura del oleaje. Existen diversas modalidades que han demostrado su viabilidad:

- La concentración del oleaje por el diseño de una cierta estructura, creando una carga hidráulica que es aprovechada posteriormente. A este tipo de sistemas se les denomina TAPCHAN (Tapered Channel System).
- El aprovechamiento de la energía cinética del movimiento de la ola. Se requiere de un conjunto de aparatos flotantes conectados entre sí.
- Cámaras neumáticas OWC (oscilating water column) en las que el aire, atrapado en una cámara abierta en la parte inferior sumergida en el agua y la superior cerrada, se comprime con el oleaje y estos cambios de presión se aprovechan para mover una turbina y generar electricidad.

Al primer tipo pertenece el prototipo experimental que se muestra en la figura 1.2 que se construyó en este proyecto de investigación.

Otro prototipo fue construido recientemente por la compañía Energetech en Australia y está en experimentación, cuyo costo es del orden de \$750 000 dólares y genera 300kw. En la figura 1.3 se muestra un nuevo diseño de este genero de prototipos de esta compañía.



Figura 1.2 Instalación del prototipo en Puerto Morelos Q.Roo.

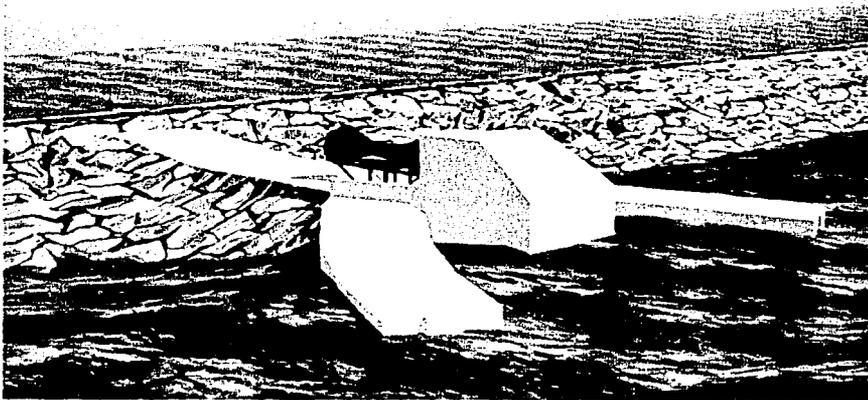


Figura 1.3 Diseño de una planta experimental de obtención de energía eléctrica en Australia.

Al segundo tipo OWC pertenece una planta experimental en Islay, Irlanda, desarrollada por la Queen's University of Belfast, que genera 180kw y tiene un costo de 950,000 libras. También pertenece a este tipo la bomba de resonancia que está experimentando el equipo que dirige S. Czitrom en la UNAM.

Al tercer tipo pertenecen el sistema experimental japonés Mighty Whale, con dimensiones de 30 x 50 m que es una estructura flotante. Se han realizado otros

experimentos exitosos en Noruega, Inglaterra y otros países. No obstante, algunos de ellos han sido destruidos por tormentas.

d) Rebase

Este término, "*overtopping*" (en inglés) o rebase, corresponde al caudal de agua que logra cruzar una barrera sólida en la orilla del mar. Generalmente es un fenómeno no deseado, dado que invade las estructuras en tierra firme. Paradójicamente en nuestro caso lo que se propone es obtener el máximo rebase posible.

Recientemente se han realizado investigaciones con el objeto de determinar la influencia del rebase en función de las características del oleaje y de la forma de las estructuras. No existe aún solución analítica general para cualquier configuración de la estructura pues la dificultad estriba en que la forma de las construcciones marinas es muy irregular y presenta discontinuidades. Para ciertas configuraciones, como el caso de una rampa impermeable, se han desarrollado modelos numéricos como el de Wurjanto y Kobayashi (1991), utilizado en esta tesis.

La mayoría de los trabajos experimentales se han realizado a pequeña escala. Son muy conocidas las mediciones de rebase de Goda (1970). En el Shore Protection Manual se proponen fórmulas semiempíricas, sin embargo mediciones posteriores como las de Goda (1984), demuestran que esa fórmula sobrevalora el "*overtopping*". Los resultados para el oleaje irregular los desarrollan Weggel y Goda considerando superposición de oleajes monocromáticos. Ya a finales de los ochenta y en los noventa fue posible generar en laboratorio oleaje irregular con lo que se obtienen resultados más precisos. Los más recientes son por ejemplo el modelo de Causon et al (2000), en los que se calcula numéricamente una estructura de geometría irregular. Los resultados de estos modelos fueron comparados con mediciones de laboratorio.

Los autores son muy cautos en extrapolar sus resultados y mencionan que son válidos en el rango muestreado en modelos a escala.

En nuestro caso se realizaron experimentos en laboratorio con olas de 1 a 4.8 cm de altura, y posteriormente en el mar con oleaje de 10 cm de altura. Con los resultados de diversos experimentos se construyen diagramas adimensionales para diseñar según la escala deseada y el oleaje existente.

Respecto al amplificador de oleaje por paredes convergentes existen muy pocos trabajos, como el de Kubune y Osato (1976). El conjunto de paredes convergentes y rampa que es el núcleo de esta tesis no se encontraron referencias, el modelo numérico desarrollado por Causon et al. (2000) tiene posibilidades de ser aplicado en este tipo de estructuras.

La idea original de este proyecto surgió como una inquietud por el problema de recambio de agua en la Laguna Bojórquez, Cancún, que ha sido estudiada por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM desde 1980. Si el sistema de bombeo propuesto es viable puede tener aplicaciones en sitios con características similares que requieran para su saneamiento el flujo de agua marina hacia lagunas litorales.

1.3 Objetivos

Objetivo General:

Demostrar la viabilidad de un sistema de bombeo mediante paredes concentradoras de oleaje para la obtención de un flujo de agua marina aplicable al saneamiento de lagunas costeras.

Objetivos particulares:

- Definir en orden de importancia los parámetros de diseño en el sistema de bombeo.
- Determinar cuales son las condiciones ambientales más favorables para el funcionamiento de un prototipo.
- Especificar los parámetros de diseño para un caso concreto de aplicación en la República Mexicana y el efecto de este sistema de bombeo.

1.4 Hipótesis

- a) Es factible aprovechar el oleaje para bombear agua del mar hacia un cuerpo de agua costero.
- b) La magnitud del caudal obtenido puede ser útil para fines de recambio de agua de la laguna litoral.
- c) Las paredes convergentes amplifican el oleaje en su interior en forma significativa.
- d) La rampa impermeable amplifica el oleaje.
- e) La estructura estática sin partes móviles es eficiente en el mar.
- f) Las variaciones de los parámetros de diseño no son críticas o sea que existe un rango en el que el aparato funciona en forma eficiente.
- g) Existen factores ambientales que si inhiben el funcionamiento del sistema de bombeo en ciertas condiciones, pero el promedio del gasto es favorable.

1.5 Metodología

El proyecto tuvo una etapa experimental desarrollada entre 1989 y 1997 la cual estuvo determinada por la obtención de recursos para la realización de las pruebas. El proyecto se desarrolló en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, se obtuvieron apoyos de equipo y asesoría del Instituto de Ingeniería, de financiamiento del Centro para la Innovación tecnológica, de la banco Somex y del CONACYT. Los desarrollos teóricos se hicieron de 1998 al 2001.

La Figura 1.4 describe el proceso.

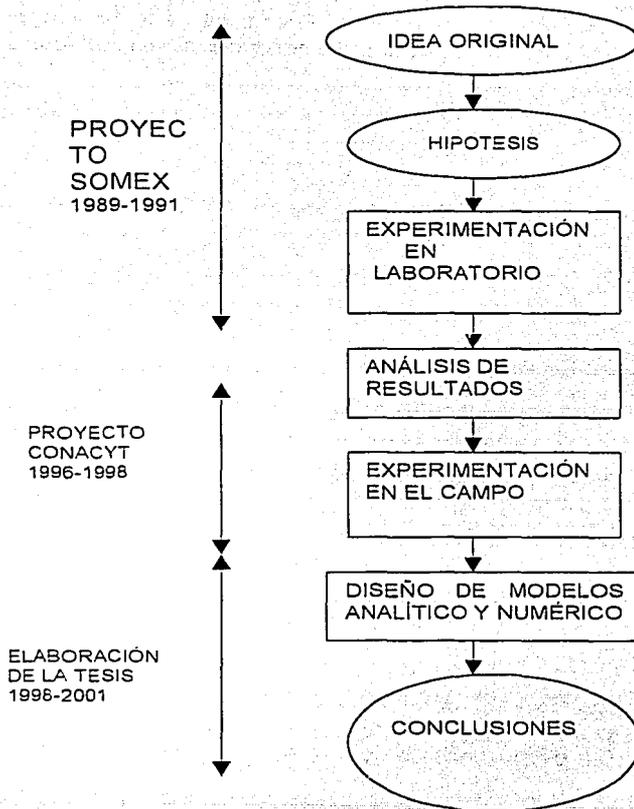


Figura 1.4 Desarrollo del proyecto de construcción de un sistema de bombeo

1.6 Organización del trabajo

El trabajo está organizado de la siguiente manera:

Capítulo 1

Se presenta una descripción general, un marco de referencia del estado del arte en experimentación y en modelos matemáticos.

Capítulo 2

Presentación de los conceptos fundamentales del oleaje, así como la determinación de los parámetros que definen un estado de mar. Las teorías que se han desarrollado para la explicación de este fenómeno. Los detalles de la formulación matemática se concentran en los apéndices.

Capítulo 3

Se describe el análisis estadístico del oleaje, que es un tema fundamental en esta investigación dado que se trabaja con oleaje irregular, y por ende el enfoque con el cual se trabaja toda la investigación.

Capítulo 4

Descripción del modelo analítico que se propone.

Capítulo 5

Se describen los experimentos en laboratorio. Dada la flexibilidad que representa ejecutar experimentos en condiciones controladas, se realizaron mediciones con variación de casi todos los parámetros, tanto de diseño como de oleaje. Con esto se obtuvo una base de datos que sirvió de referencia para la ejecución de mediciones en el mar.

Capítulo 6

Se presentan los resultados de las mediciones en campo. Los datos no son tan diversos como los de laboratorio. Las variables por su naturaleza misma, fueron más restringidas. La variable permanente bajo control fue la altura del vertedor.

Capítulo 7

Presenta la comparación de resultados en laboratorio y en campo.

Capítulo 8

Describe la validación del sistema de bombeo con datos de laboratorio de campo y la metodología del diseño para aplicaciones concretas.

Capítulo 9

Se dan las recomendaciones para la definición de los parámetros de diseño y de los lugares idóneos donde se puede utilizar un sistema de bombeo como el propuesto.

Capítulo 10

Se presentan las conclusiones y futuras líneas de trabajo.

Apéndices

Se refieren a las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos que tienen ingerencia en este sistema y en los dos métodos de conducción de agua: el de conductos a presión que se utilizó en los experimentos, y el de canales abiertos que se propone.

Referencias

Se anotan las fichas del material bibliográfico utilizado.

2 OSCILACIONES MARINAS

2.1 Introducción

No se ha desarrollado aún una teoría que explique en su totalidad el fenómeno del oleaje marino. Sin embargo, se han desarrollado teorías parciales con resultados lo suficientemente razonables para ser aplicados en el diseño de estructuras marinas.

En esencia una ola es un fenómeno oscilatorio de restitución al estado de equilibrio después de producida una perturbación. El movimiento de las olas corresponde al de un péndulo donde la amplitud de las oscilaciones se amortigua hasta disiparse completamente. Los fluidos por su naturaleza son un medio favorable para la propagación de las ondas.

Hasta la fecha, la teoría lineal es una herramienta muy utilizada con fines ingenieriles, la cual se deduce de las ecuaciones clásicas de la mecánica de fluidos. En concreto, en el apéndice A se describen las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos aplicadas al oleaje, que comprende la ecuación de continuidad, la de momentum y las condiciones a la frontera; y en el apéndice B se describen algunos elementos formales de la teoría lineal. Esta teoría considera al oleaje constituido por ondas senoidales todas idénticas que una vez conocidos sus parámetros (amplitud, velocidad angular y fase) es posible predecir sus parámetros en función del tiempo. En la realidad las olas marinas no tienen esa forma y además no son monocromáticas sino la superposición de diferentes olas con diversas formas y orígenes lo que hace que una predicción exacta sea muy complejo.

Haciendo un símil con las estrellas, de las cuales astronomía explica que el mapa celeste en un momento determinado es, por el retraso de la velocidad de la luz, un esquema que representa la posición histórica de las estrellas en diferentes tiempos según su distancia; así el oleaje, en un momento y posición determinadas corresponde a la superposición de oleajes generados en diversos puntos del océano en diferentes tiempos, aunados con los que se estén generando en el momento presente en las cercanías del lugar.

Ante esta asombrosa complejidad, los esfuerzos por lograr esquemas aproximados para definir el comportamiento del oleaje han sido bastante exitosos.

Históricamente, por mencionar sólo algunos de los logros más relevantes en el estudio analítico del oleaje, se tiene:

1802. Gerstner. Desarrolla la teoría trocoidal de las olas en aguas azules (término con tinte poético para nombrar al mar profundo en oceanografía).

1844. Airy. Publica la teoría lineal para olas en aguas someras y profundas. Lo sorprendente de esta teoría es que pese a su simplicidad los resultados son bastante congruentes. Esta teoría sigue siendo utilizada ampliamente.

1847. Stokes. Perfecciona una teoría lineal y la extiende a mayores órdenes de aproximación.

1871-76. Boussinesq y Raleigh. Explican teóricamente el solitón, una ola aislada que no modifica sus características en aguas someras.

1928. Sainflou. Desarrolla una teoría de la presión de ondas estacionarias para aplicación en puertos.

1943-47. Sverdrup y Munk. Elaboran el modelo S-M-B de predicción de oleaje (inicialmente con fines militares durante la segunda guerra mundial).

1952. Pierson et al. Proponen un modelo de predicción del oleaje irregular.

2001 a la fecha. Esta época se caracteriza esta época por el uso generalizado de modelos matemáticos apoyados con datos en tiempo real de boyas automáticas e imágenes de satélite.

En cuanto a la energía contenida en los diversos tipos de oleaje algunos autores han elaborado un esquema (Figura 2.1) que es aceptado como un buen indicador de la distribución de energía para las diversas frecuencias del oleaje.

Este esquema muestra las siguientes características del oleaje:

- Existen tres tipos de ondas :
Capilares.
Gravitatorias.
De largo periodo.
- La mayor energía se concentra en las olas gravitatorias producidas por el viento.
- Las fuerzas generadoras y restauradoras de las olas difieren para cada tipo de oleaje. A continuación se mencionan las más importantes.

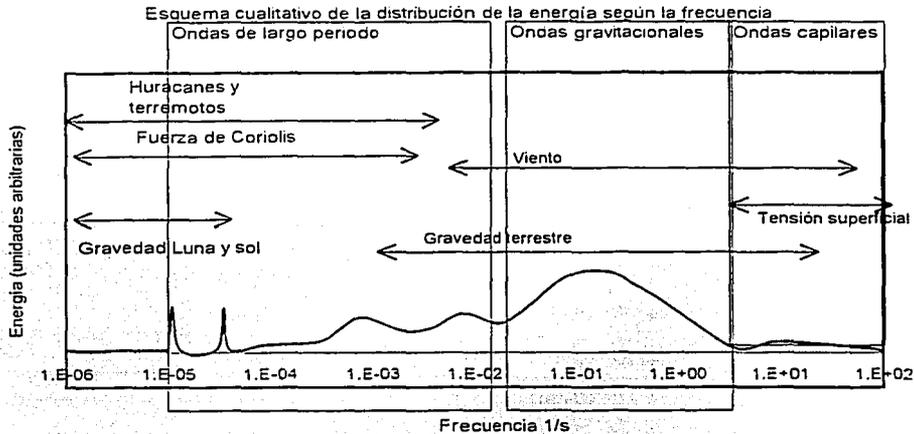


Figura 2.1 Distribución de la energía de las olas según su frecuencia.

Ondas capilares. Fuerza generadora viento; fuerza restitutiva tensión superficial. Su amplitud es de milímetros y su longitud de onda de centímetros.

Ondas gravitatorias. Fuerza generadora: viento; restitutiva el viento en contra o la fricción en la costa. Su altura es de decímetros a pocos metros (0.1 a 5) y longitud de onda de metros a decenas de metros.

Ondas largas. La fuerza generadora para las mareas es la gravedad de la luna y del sol sobre el mar. La fuerza restitutiva es la fricción con el fondo del mar. Los Tsunamis también son ondas largas, su fuerza generadora es un movimiento de la corteza de origen tectónico o volcánico. La fuerza restitutiva es la gravedad. Su altura va del rango de decímetros a metros (0.1 a 14). Otra onda larga es la provocada por la fuerza de coriolis porque implican un movimiento de masa en distancias grandes. Su rango de altura es de metros (5 a 20) y su longitud de onda de centenas de metros a miles de km.

Las fuerzas restitutivas no se comportan de manera similar. La tensión superficial es proporcional a la deformación en cambio la gravitatoria es constante y la de fuerza de fricción es proporcional al cuadrado de la velocidad.

La mayor amplitud se presenta en ondas largas, pero su ocurrencia en el tiempo es ocasional, a diferencia de las ondas gravitatorias que están presentes es casi

todo momento. Dentro de las ondas gravitacionales un estudio presentado por Kinsman determina que:

- 55% de la energía corresponde a oleaje con altura menor a 1.2m
- 25% a oleaje entre 1.2m y 4m.
- 10 % a oleaje mayor a 4m.

Como referencia de una cota superior de una onda larga se tiene el registro de un Tsunami de 70 metros de altura en 1737 en Kamchatka, Siberia.

Para el diseño de un sistema para el aprovechamiento de energía del oleaje el enfoque es en ondas gravitatorias, que son las de mayor contenido energético y con una altura de diseño de alrededor de 1.2m.

El tema del oleaje es sumamente amplio, aquí sólo se enlistan algunos de los tópicos que se presentan en el mar:

- Ondas internas. Se producen cuando existe un gradiente de densidad fuerte, como es el caso de la presencia de termoclina o haloclina muy bien definidas. Estas olas tienen amplitudes y longitudes de onda muy superiores a las superficiales.
- Ondas del sonido. Su modo de transmisión es por oscilaciones en la presión, como sucede en el aire; su velocidad es del orden de 1 500 m/s y pueden viajar grandes distancias sin atenuación del sonido. Un fenómeno muy interesante es el del canal sonoro que ocurre en mares tropicales, en el cual el sonido queda atrapado en una cierta capa por efectos de refracción. Hay estudios muy interesantes de sus posibles aplicaciones a la climatología.

La rompiente es la forma de disipación más notoria de las olas, se ha clasificado la rompiente en cuatro formas:

- Descretamiento
- Voluta
- Colapso
- Oscilación

2.2 Tipos de oleaje

Si se habla de viento de gran intensidad como la fuerza generadora del oleaje, la clasificación del oleaje en función del viento es "sea" (oleaje local) y "swell" (mar de fondo). El primero corresponde al lugar de generación. No hay periodos,

longitudes de onda ni direcciones definidos. En este sitio las características prevalecientes son:

- Asimetría.
- Gran peralte.
- Se da la superposición del oleaje.

El oleaje tipo "swell" o de fondo tiene las siguientes características.

Dispersión:

- Se pierde energía porque viaja como onda libre a costa de su propia energía.
- Dispersión angular pues viaja en todas direcciones.
- Dispersión radial. Como se generaron ondas de distintas características, cada onda viajará a distinta velocidad.

Efectos concentradores del oleaje:

- Soldadura: olas de periodos cercanos se sueldan en grupos.
- Refracción: en las proximidades de la costa la refracción hace que las ondas tiendan a viajar en patrones paralelos a las isobatas, lo que uniformiza el oleaje.

En cuanto al régimen de oleaje su clasificación es "monocromático" o "regular" e "irregular". El oleaje regular se puede procesar analíticamente con mayor definición y precisión.

2.3 Mecanismos de generación

Se sabe que oscilaciones verticales producen oleaje. Un ejemplo simple es la caída de una piedra en un estanque que genera ondas libres. Pero el efecto del viento que es paralelo a la superficie es un enigma. Se sabe que una vez formada una ola el viento paralelo a la superficie transmitirá momentum en las olas en forma distinta en la parte que incide (barlovento) y en la sombra (sotavento), incrementando la altura de la ola.

Existen dos interrogantes físicas, una referente a su generación inicial en un estado de mar con movimiento cero, y otra de cómo se llega a un estado de equilibrio pese a que la fuerza productora prevalece.

Una explicación para la generación del oleaje inicial con una fuerza tangencial es que el viento no es constante, que sufre cambios en forma de ráfagas, lo que provoca gradientes de presión y por tanto empujes verticales diferenciales que son los que provocan el oleaje. Un modelo matemático que analiza este fenómeno es el de resonancia elaborado por O. Phillips.

Sus fundamentos son:

- En $t=0$ el mar está en reposo.
- Un viento constante ha estado soplando por un periodo de tiempo muy largo.
- Un resultado de este modelo es la condición de resonancia del modelo mediante la ecuación:

$$\frac{gk^2}{\rho} - kU^2 \cos^2 \alpha + g = 0 \quad (2.1)$$

donde

ρ es la tensión superficial.

k el número de onda.

U la velocidad del viento.

ρ la densidad.

α el ángulo de incidencia del viento respecto al oleaje.

g la aceleración de la gravedad.

Como se apuntó en el inciso 2.1, existen tres tipos de ondas, capilares, gravitatorias y largas.

Cuando el viento empieza a soplar se generan ondas capilares, pero existe un momento en que se convierten en gravitatorias. La transición ha sido estudiada ampliamente y se tiene el esquema de la Figura 2.2 obtenida de Dean (1990).

En esta figura se distingue claramente la frontera entre el dominio de las fuerzas de tensión superficial y de la gravedad, que son las fuerzas restitutivas.

Se tienen los siguientes valores para la frontera entre ondas capilares y gravitatorias.

- Tensión superficial de 0.074 N/m del agua de mar.
- Celeridad: 0.232 m/s.
- Periodo: 0.074s.
- Longitud de onda 0.017m.

Para la generación del oleaje es muy importante el "*fetch*" (pista), o sea la longitud del área sobre la que sopla el viento en la misma dirección. Se requiere un viento constante en el área durante un periodo prolongado para llegar a un valor de equilibrio a partir del cual el oleaje no incrementa su altura. En el mar rara vez se observan pistas superiores a 600 mn, excepto en la antártica donde el "*fetch*" es a todo alrededor del continente y se puede considerar como ilimitado.

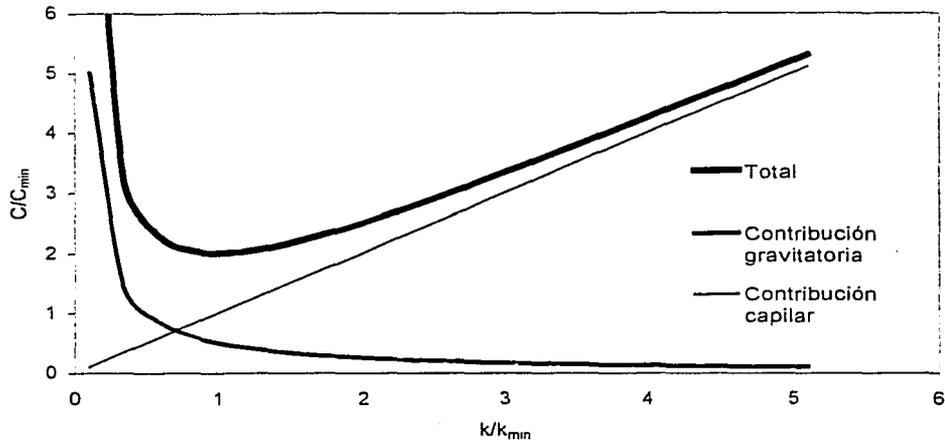


Figura 2.2 Contribución capilar y gravitacional en la celeridad de las olas

Para un viento dado no se genera una onda monocromática sino un rango de olas de diferentes periodos.

Para ondas largas los mecanismos de generación son:

Para las mareas: la fuerza gravitatoria de la luna y el sol en equilibrio con la fuerza centrífuga alrededor del centro de masas común. El efecto de la luna es 2.14 veces superior al del sol y la fuerza generadora es inversa al cubo de la distancia.

Para los tsunamis: una explicación teórica es que son producidos por la erupción de un volcán submarino o por el desplazamiento vertical entre dos placas tectónicas. El tema de la generación de los tsunamis aún no está resuelto claramente, puesto que no siempre que ocurren estos fenómenos se generan tsunamis.

2.4 Transformación del oleaje

En este inciso se enuncian los principales fenómenos de transformación del oleaje que ocurren en la transición entre aguas profundas y someras, considerando que este término es función de la razón entre longitud de onda y profundidad del océano.

El periodo permanece constante pero se modifica la longitud de onda y su altura. A continuación se describe la transformación del oleaje con dos enfoques: desde sus parámetros y desde los fenómenos que los producen:

En función de los parámetros se tienen las siguientes transformaciones:

- **Altura.** Decrece en altamar. La energía de una ola es directamente proporcional al cuadrado de la altura. La ola avanza a costa de su propia energía por lo que la altura de la ola se amortigua en su avance. En la playa la energía cinética se reduce al disminuir la profundidad, por lo que la energía potencial aumenta. En este caso la altura aumenta hasta que se presenta la rompiente. Después de la rompiente, donde hubo mucha pérdida de energía en turbulencia, la altura se reduce notablemente. Es factible, según las características del fondo, que la ola recomponga su forma y rompa nuevamente en varias ocasiones. En cada caso la altura decrece abruptamente después de romper.
- **Longitud de onda.** Fuera de la zona de generación del oleaje la ola aumenta su longitud de onda en aguas profundas. En aguas someras se longitud decrece nuevamente hasta la rompiente.
- **Celeridad.** Una vez generada, una ola aumenta su rapidez conforme avanza. Este hecho es el opuesto al movimiento de los sólidos en un medio con fricción donde la rapidez decrece al avanzar el objeto. El hecho de que la celeridad se incrementa explica el fenómeno de que el oleaje avance más rápidamente que el huracán que lo produjo. Por ejemplo, un huracán se desplaza a 25 nudos (13m/s), mientras que las olas iniciales tienen una celeridad de 15 m/s y el "swell" puede alcanzar 36m/s. Este hecho lo han utilizado los navegantes desde tiempo inmemorial como presagio de tormenta y buscar refugio.

En aguas someras la velocidad de la onda decrece en función de la raíz cuadrada de la profundidad. La ola se frena hasta llegar a la pendiente crítica (por observaciones directas el valor de la pendiente de rompimiento es de 1/7) de la rompiente.

- **Dirección.** El frente de una onda plana avanza sin distorsión en aguas azules, pero al llegar a aguas someras por efecto de la refracción se produce un cambio en la dirección si esta no coincide con las isobatas. En las playas las ondas tienden a incidir normalmente, las elevaciones tienden a concentrarse y en los valles se dispersan.

Desde el punto de vista de los fenómenos que modifican al oleaje se tienen:

Reflexión.

Al incidir sobre un objeto sólido, las olas se reflejan sin aparente pérdida de energía. La ley de la reflexión indica que el ángulo incidente es igual al reflejado. Las ondas largas tienen la peculiaridad de responder muy claramente a la reflexión en las playas o en las costas.

La ecuación de movimiento para una onda reflejada en un caso unidimensional, como en un canal con profundidad constante, es:

$$\frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left[bd \frac{\partial \eta}{\partial x} \right] + \omega^2 \eta = 0 \quad (2.2)$$

donde:

b el ancho del canal

d es la profundidad.

η la altura de la ola.

ω la velocidad angular.

Refracción.

Este fenómeno se presenta cuando un frente de ondas cruza una frontera que divide a dos áreas con velocidades de trasmisión distintas. Esto ocurre en el mar en frentes oceánicos o cuando la profundidad varía en aguas someras, y por ende la celeridad.

La refracción provoca que las olas tiendan a desviarse hacia zonas de menor profundidad, por lo que se presenta el caso en el que olas reflejadas en la costa retornan de nuevo por la refracción y quedan "atrapadas" en una zona costera. Por ejemplo se han detectado ondas atrapadas en el Golfo de Tehuantepec.

La ecuación que rige la refracción es la ley de Snell ecuación 2.3.

$$\frac{\text{sen} A_i}{C_i} = \frac{\text{sen} A_r}{C_r} \quad (2.3)$$

A_i y A_r son los ángulos de incidencia y refracción y C_i y C_r las celeridades en cada uno de los medios. En un caso más general donde hay variación irregular del fondo la ley de Snell es la ecuación:

$$\frac{\partial k \text{sen} \theta}{\partial x} - \frac{\partial k \cos \theta}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

Donde θ es el ángulo en el medio físico. Esta ecuación debe de resolverse por medio de métodos numéricos.

EL coeficiente de refracción es:

$$K_r = \sqrt{\frac{d_0}{d_1}} \quad (2.5)$$

d_0 y d_1 son las profundidades en los dos medios

Resonancia.

Este es un fenómeno generalmente indeseable para la ingeniería costera. Consiste en que el periodo de oscilación natural del oleaje en un puerto o en una bahía coincide (o es un múltiple) con el de la ola incidente. El efecto es que aún con poca energía del oleaje éste se amplifica notablemente.

En el caso de las ondas largas, en donde la reflexión es muy obvia, se puede presentar la resonancia por la múltiple reflexión con las orillas de una bahía, como es el caso de tsunamis en ciertas bahías en las costas de Japón.

En el caso de extracción de energía de las olas la resonancia sería un efecto muy favorable, pero como el oleaje es irregular es complejo. Diseñar principalmente en función de este fenómeno no se recomienda a menos que se tenga un patrón de oleaje muy cercano al monocromático.

Difracción.

Este fenómeno consiste en la trasmisión del oleaje en zonas protegidas o de "sombra." Por definición, es la cesión lateral de energía. La explicación de este fenómeno es que en un extremo de alguna estructura natural o artificial se producen oscilaciones, y este punto se puede considerar como un nuevo generador de olas que se difunde en forma radial. Por supuesto que la altura del oleaje es mucho menor que el original, pero no es cero. Los modelos que explican la difracción son complejos. Una forma usual de valorar la difracción es por medio de diagramas como los que se presentan en el SPM (Shore Protection Manual, 1984).

Se han resuelto las ecuaciones de la onda en casos particulares donde se presenta la difracción; no hay hasta el momento una solución general. Por ejemplo en el caso de un rompeolas semi-infinito con incidencia normal fue resuelto por Sommerfeld en 1896:

$$Ae^{-ikx} = \frac{1+i}{2} \left[e^{-ikx} \int_{-\infty}^{\beta} e^{-i(\pi/2)u^2} du + e^{ikx} \int_{-\infty}^{\beta} e^{-i(\pi/2)u^2} du \right] \quad (2.6)$$

donde:

$$\beta^2 = \frac{4}{\lambda}(r - x) \quad (2.7)$$

$$\beta'^2 = \frac{4}{\lambda}(r + x) \quad (2.8)$$

A la amplitud.

λ la longitud de onda.

r es la distancia del extremo del rompeolas.

x es la distancia.

u la velocidad.

Someramiento.

Este es un fenómeno asociado con la refracción. Consiste en que el cambio de profundidad modifica la celeridad de las olas causando aumento de altura de las elevaciones y disminución en los valles.

El coeficiente de someramiento tiene relación con las velocidades en los dos medios, y es:

$$K_s = \sqrt{2 \frac{c_{s_0}}{c_{s_1}}} \quad (2.9)$$

Donde c_{g_i} es la velocidad de grupo i .

ANÁLISIS DEL OLEAJE

3 ANÁLISIS DEL OLAJE

3.1 Hipótesis básicas

Para el diseño y construcción de una estructura en mar abierto o zona costera es esencial el conocimiento del estado del mar. Este se describe fundamentalmente por los parámetros: la altura, el periodo y la dirección del oleaje.

Estos parámetros fundamentales, y aparentemente de fácil registro, son muy variables y necesitan ser calculados cuidadosamente según el enfoque de aplicación.

Cuando se considera que el estado del mar es permanente, monocromático y unidireccional, el cálculo de la altura y periodo se obtienen inmediatamente a partir de una serie corta de observaciones. No obstante, en la naturaleza este caso es raro, por lo que para calcular los parámetros del oleaje para el diseño de construcciones se han desarrollado diversas técnicas que son de uso generalizado que han demostrado su utilidad práctica.

Existen varios enfoques para el estudio del oleaje:

- Análisis teórico del oleaje. Asumiendo generalmente como válida la hipótesis de que una onda simple puede representar un estado de mar y ciertas condiciones (como profundidad, amplitud, longitud de onda, medio, entre otras), se han derivado una serie de teorías que son de uso común.
- El análisis de una señal registrada en campo, laboratorio o generada sintéticamente se puede estudiar bajo dos puntos de vista: la temporal y la espectral.
- Caracterización de una señal mediante distribuciones de probabilidad de: los desplazamientos de la superficie libre, altura de la ola, periodo de ola y ambas. Otra vía de caracterización es a través de distribuciones espectrales.
- Estimación del oleaje en función de condiciones meteorológicas y físicas del medio. Al respecto se han desarrollado teorías empíricas, paramétricas y dinámicas de primer, segundo o tercer orden.

De todas estas, en este capítulo se abordan las siguientes:

- Análisis temporal. Consiste en procesar una serie de datos reales y deducir cuáles son las olas que lo componen. De este análisis se pueden seleccionar, por diversos criterios, una altura y un periodo característicos además de otros parámetros estadísticos.

- Análisis espectral. Consiste en suponer la existencia de una serie de ondas simples virtuales, que superpuestas, dan como resultado el oleaje real. Esto se logra por medio de la aplicación de diversas herramientas matemáticas, como los análisis espectral, armónico, etc. Lo poderoso de estos métodos es que se ha demostrado su solidez matemática que aunque se requieren una gran cantidad de operaciones con la ayuda de la computadora es posible resolverlos con rapidez y precisión. El método de análisis espectral más utilizado es el de Fourier. Éste considera que cualquier oleaje puede ser representado por la superposición lineal de ondas senoidales de diferentes frecuencias.
- Análisis por su origen para oleaje producido por el viento. Consiste en deducir cual es la ola equivalente según los parámetros del viento generador del oleaje. Con base en un modelo que supone una profundidad del mar constante y que el viento permanece constante en intensidad como en dirección. Como variable se tiene el "fetch" A el oleaje generado se le llama "significante".

Lo conveniente al realizar un análisis del oleaje es aplicar los tres enfoques a los mismos datos y posteriormente evaluar cual es la descripción del estado de mar más apropiada.

A continuación se describen con más detalle algunos de estos métodos y su aplicación:

3.2 En el dominio del tiempo

➤ Descripción:

Este método consiste en procesar series de datos reales y deducir cuales olas lo componen. Una vez determinadas se aplica la estadística para obtener los parámetros del oleaje, así como diagramas de probabilidad.

➤ Procedimiento:

- Corrección del nivel medio por efecto de la marea.
- Discretización de la señal.
- Cálculo de parámetros.
- Determinación de la dirección del oleaje.¹

➤ Aplicaciones:

Para el diseño de estructuras que requieran resistir los embates de las olas de cualquier tipo se supone que el oleaje es monocromático constituido exclusivamente por olas de la mayor altura registrada. Obviamente esta es una

¹ En este proyecto no se contó con la instrumentación necesaria para determinar la dirección del oleaje.

cota superior que da margen de protección siempre y cuando la serie de datos observada sea muy larga (un año o más) y abarque condiciones extremas.

Para fenómenos como el rebase o el ascenso máximo ("run-up") en los que lo que se requiere conocer el efecto acumulativo se selecciona la altura de la ola promedio (valor cuadrático medio con abreviatura *rms*) y con cálculos estadísticos es factible evaluar la probabilidad de excedencia.

➤ Desventajas:

No considera fenómenos excepcionales. Un diseño basado en estos resultados no implica que la obra portuaria sea resistente a todos los oleajes posibles.

➤ Procedimiento:

A continuación se describen con detalle los procedimientos:

□ La muestra.

El registro de observaciones debe de ser sumamente extenso para que la estadística tenga validez. Un registro de 200 olas es razonable. Además conviene tener registros en diversas condiciones climáticas que se presenten en el área de estudio. Una serie anual es lo mínimo recomendable para la caracterización de un estado del mar.

En la Figura 3.1 se muestra una ventana de una serie de oleaje.

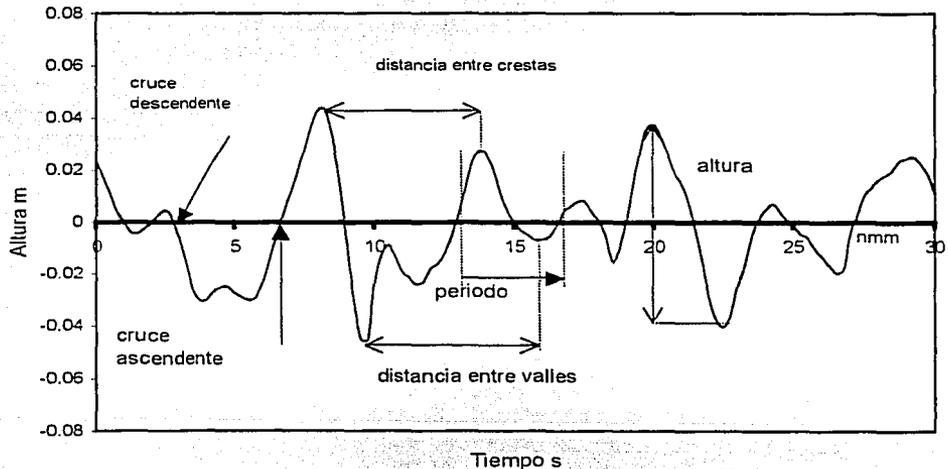


Figura 3.1 Parámetros de un registro de Oleaje

□ Corrección del nivel medio.

El nivel del mar varía constantemente por fenómenos como la marea y el "Setup" del viento (sobreelevación provocada por el arrastre de agua de la superficie por el viento que incide en la costa) por lo que es conveniente estandarizar los datos de oleaje al mismo nivel de referencia.

Existen los siguientes procedimientos:

- Media aritmética. Se calcula la media aritmética de la serie.
- Corrección lineal. Consiste en obtener una recta ajustada por el método de mínimos cuadrados.
- Corrección parabólica. Consiste en obtener una curva de segundo grado por el método de mínimos cuadrados.
- Corrección por secciones. Consiste en realizar promedios en intervalos de tiempo cortos y restar su efecto en cada sección. El ológrafo utilizado (Ológrafo Model TWG-12 de Applied Microsystems) tiene esta opción y por ejemplo cada cierto intervalo realiza los promedios de la altura. Este fue el procedimiento utilizado para los datos de oleaje de este proyecto. Con un intervalo de 5 minutos el máximo cambio del nivel del mar por el efecto de marea fue del orden de 0.03 m que, en comparación de los 0.10 m de la altura de la ola, resulta aplicable el restar la media aritmética al considerar una variación lineal.²

□ Discretización de la señal.

Es importante resaltar que los métodos para discretizar un registro de oleaje no deducen estrictamente todas las olas presentes sino que identifican las olas más notorias según el método seleccionado. En la figura 3.1 se indican algunos de los cruces por cero y las distancias entre crestas y valles. A continuación se describen brevemente estos métodos:

- Método de pasos ascendentes por cero.

La computadora puede realizar este proceso con la condición de cruce.

$$\eta_{i+1} < 0 \quad \text{y} \quad \eta_{i+1} < 0$$

Máximo:

$$\eta_{i-1} < \eta_i \quad \text{y} \quad \eta_i > \eta_{i+1}$$

Mínimo:

$$\eta_{i-1} > \eta_i \quad \text{y} \quad \eta_i < \eta_{i+1}$$

donde

² Los ológrafos tienen una línea base distinta de cero. En el utilizado de Applied Microsystems la línea base es de 10 metros.

donde

η_i , es el dato i -ésimo de la altura del oleaje.

Una vez determinados los tres puntos que determinan el máximo o mínimo se traza una curva de segundo grado para determinar el máximo más preciso, pues no coincide generalmente con el punto medio.

- Método de pasos descendentes. Es similar al anterior pero se determinan los cruces de positivo a negativo.
- Método de distancia entre crestas. Se determinan los máximos.
- Método de distancia entre valles. Se determina la parte negativa.

Es importante resaltar que los últimos métodos no necesariamente dan los mismos resultados dada la asimetría del oleaje irregular. También estos dos últimos procedimientos detectan más olas de alta frecuencia que no se perciben con los métodos de cruces por cero.

➤ Representación de resultados.

Los resultados más típicos de este método son diagramas de distribución de oleaje de altura contra periodo y distribución de probabilidad del oleaje.

En la figura 3.2 se muestra un esquema simplificado de la descripción del oleaje en Puerto Morelos, se observan tres picos, el más pequeño corresponde al oleaje local en la zona protegida por el arrecife, el segundo al oleaje característico fuera del arrecife y el tercero el oleaje fuera del arrecife en condiciones de viento muy intenso.

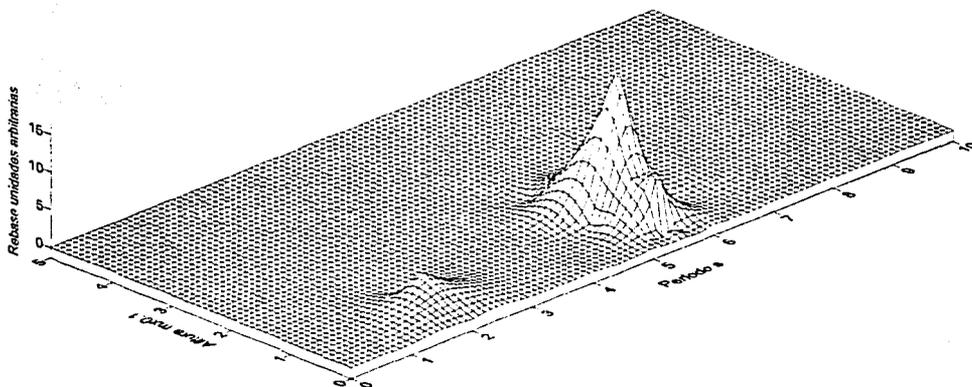


Figura 3.2 Diagrama de estado de mar Periodo y altura de ola contra rebase en la vertical de Puerto Morelos

El diagrama de probabilidad se muestra en la figura 3.3 esta basado en fórmulas como la de Rayleigh, que es característica en aguas intermedias, y la de Gauss para aguas profundas. Las ecuaciones de estos dos modelos son 3.1 y 3.2.

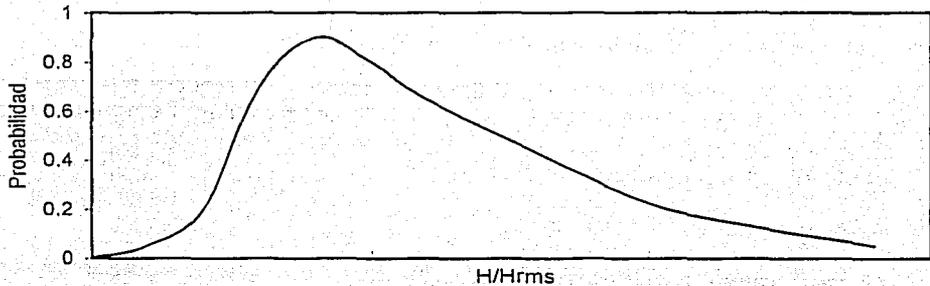


Figura 3.3 Diagrama de probabilidad del oleaje. Distribución de probabilidad de Rayleigh

$$P(\xi) = \frac{\xi}{m_0} e^{-\frac{1}{2} \frac{\xi^2}{m_0}} \quad (3,1)$$

Distribución de probabilidad de Gauss:

$$P(\xi) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi m_0}} e^{-\frac{1}{2} \frac{\xi^2}{m_0}} \quad (3,2)$$

m_i es el momento i-ésimo definido como:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (3,3)$$

f es la frecuencia y
S(f) la densidad de energía para esa frecuencia.

La altura m_s esta definida como:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2} \quad (3,4)$$

donde

N_0 es el número de datos de la serie.

El promedio del periodo se calcula con la fórmula:

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i^2} \quad (3,5)$$

La energía del oleaje es:

$$Energia = \frac{1}{2} \rho g \int_0^{\infty} 2S(f)df = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (3,6)$$

donde ρ es la densidad.

3.3 En el dominio de la frecuencia

➤ Descripción.

La esencia de este método es reemplazar una señal real por una serie matemática equivalente, la cual se puede procesar para obtener información referente a la señal real. Este concepto es de uso generalizado en la actualidad y ha demostrado solidez en sus resultados en muchas áreas de la física y la ingeniería.

No existe un método único de cálculo, existen los siguientes enfoques:

- Análisis espectral. Cuando no se cuenta con ninguna información preliminar en el sitio se aplica el análisis espectral, como el de Fourier, que consiste en reemplazar la serie original por la superposición de un número muy grande de señales sinusoidales. Las frecuencias de estas señales se dan de antemano. Una selección de frecuencias usual es con submúltiplos de 2 (la primera frecuencia corresponde al intervalo completo de muestreo, la segunda a medio intervalo, la tercera a la cuarta parte del intervalo, etc). Esta selección de frecuencias es la más utilizada dado que economiza mucho los cálculos (con dos ventajas, velocidad del cálculo y minimización

de errores de redondeo de la computadora), este método es conocido como FFT o transformada rápida de Fourier.

- Análisis armónico. Cuando se cuenta con información adicional (por ejemplo: la frecuencia de las componentes, como en el caso de la marea donde se conocen con precisión las fuerzas generadoras) se aplica el método de análisis armónico para determinar las características (amplitud y defasamiento) de cada componente.

En el caso del oleaje que es un fenómeno esencialmente aleatorio se aplica el análisis espectral.

➤ Limitantes.

- Dada la definición precisa de las frecuencias, existen valores que no se exploran. Hay mayor definición de las componentes conforme aumenta la frecuencia.
- Matemáticamente no hay límite en cuanto a los cálculos, pero físicamente existe una cota a partir de la cual los cálculos no tienen significado real. Esta cota, dada por la frecuencia de Nyquist que indica que la mínima frecuencia que se puede deducir de una serie de observaciones corresponde a la correspondiente a la mitad del intervalo de muestreo. Por ejemplo si el intervalo de muestreo es de 1 segundo, el periodo más pequeño detectable es de una señal con periodo de 2 segundos o frecuencia $\frac{1}{2}$ hz.

$$\Delta f = \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.7)$$

donde

Δf y Δt son los intervalos de frecuencia y de tiempo.

Por tanto en un caso real como el de los datos registrados con intervalos de 0.25 s, la máxima frecuencia que se puede utilizar es de 2 hz (o periodo 0.5 s).

- El parámetro principal es la densidad de energía para cada frecuencia.
- El algoritmo para el análisis de Fourier más utilizado es el FFT (Fast Fourier Transform), que requiere que la longitud de la serie de datos debe de ser una potencia de 2 lo que implica una restricción experimental. En nuestro

cuando el método solo utiliza $4,096=2^{12}$ datos. En el primer caso se completa la serie con 16 ceros y en el segundo se descartan 224 datos.

Es necesario realizar el cálculo para diversos estados del mar del lugar para obtener un esquema completo del panorama.

➤ Procedimiento:

- Corrección del nivel medio.
- Función ventana.
- Completar la serie a potencia 2^n datos.
- Cálculo de las componentes.
- Suavizado del espectro.
- Cálculo de resultados.

A continuación se detallan estos procedimientos:

- Corrección del nivel medio.

Este es un procedimiento idéntico al del análisis temporal. Se optó por restar el promedio del nivel del mar a intervalos cortos.

- Función ventana.

Para aminorar las oscilaciones en los extremos de la serie de datos se multiplican los datos por una función. Las más usadas son las de los tipos trapecoide y la de tipo coseno.

- Cálculo de las componentes de Fourier.

La fórmula del análisis espectral modalidad FFT es:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N [a_n \cos(2\pi f_n t) + b_n \text{sen}(2\pi f_n t)] \quad (3.8)$$

N es el número de datos del intervalo de muestreo y a_n y b_n coeficientes.

- Cálculo de componentes de Fourier.

Este procedimiento se realiza mediante el algoritmo FFT y lo realiza la computadora, los resultados se presentan como los coeficientes de la parte real y compleja a partir de los cuales se puede deducir la energía.

$$S(f_n) = 0 \quad \text{para } n=0 \quad (3.9)$$

$$S(f_n) = \frac{1}{2\Delta f} (a_n^2 + b_n^2) \quad (3.10)$$

- Suavizado del espectro.

Los valores oscilan en torno a los valores reales. Para definir más claramente los valores se filtra el espectro por medio de una función de peso, ponderando las frecuencias próximas a ella por medio de la función:

$$S(f) = \sum_{j=k-m}^{j=k+m} W(f_k - f_j) S(f_j) \quad (3.11)$$

donde W es una función normalizada de peso, como $W=1/m$ para el promedio aritmético u otras funciones que le dan mayor peso al valor central.

- Cálculo de parámetros espectrales.

La altura de cada componente es:

$$H_i = 2 \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$$

y se pueden calcular los periodos T_{01} y T_{02} con base en los momentos.

$$T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad T_{02} = \frac{m_0}{m_2} \quad (3.12)$$

- Espectro direccional.

Cuando se cuenta con varios sensores de presión que miden simultáneamente el oleaje es posible deducir el oleaje en cada dirección considerando la hipótesis de que el oleaje resultante es la superposición lineal de las ondas de cada dirección o sea que no se presentan efectos no lineales.

El espectro tiene la siguiente forma:

$$\sum_f^{f+\Delta f} \sum_{\theta}^{\theta+\Delta\theta} \frac{1}{2} a_k^2 = S(f, \theta) df d\theta \quad (3.13)$$

Si se tienen N sensores se realiza un análisis del espectro cruzado aplicando las siguientes ecuaciones:

Si se tienen N sensores se realiza un análisis del espectro cruzado aplicando las siguientes ecuaciones:

$$G_m(f) = \int_{-u}^u R_{mn}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (3.14)$$

donde

El número de espectros cruzados a calcular es $N(n-1)/2$.

➤ Representación de resultados.

El diagrama de concentración de energía por frecuencia es el principal resultado (espectro). Matemáticamente se realizan cálculos para obtener otros parámetros de interés.

La forma del máximo de frecuencia ofrece información adicional: si está muy definido indica que el oleaje es cercano al monocromático. Para cuantificar la agudeza del pico se utilizan los factores:

Anchura espectral:

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right] \text{ de cuarto orden} \quad (3.15)$$

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right] \text{ de segundo orden} \quad (3.16)$$

Y la agudeza del pico esta definida por la fórmula de Goda:

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \int_0^{\infty} f^n (S(f))^2 df \quad (3.17)$$

En la figura 3.4 se presenta un espectro de frecuencia, la ordenada es la densidad de energía que se define como:

$$S = H^2 \Delta f \quad (3.18)$$

Considerando las fórmulas de Owen y Battjes que se discuten en el capítulo 4, las cuales consideran que el rebase depende linealmente tanto del periodo como de la altura, se puede elaborar un diagrama tridimensional en el que la coordenada z corresponda al gasto para visualizar la zona donde el oleaje genera mayor rebase. En la figura 3.5 que se refiere al mismo espectro de la figura 3.4 existen tres picos. El primero corresponde a bajas frecuencias y conviene ignorarlo, el central al

oleaje prevaeciente y el mayor a un oleaje excepcionalmente alto que se presentó ocasionalmente.

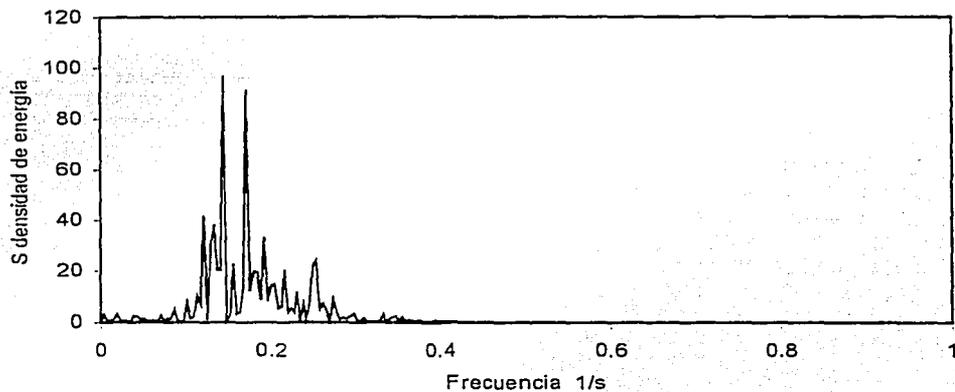


Figura 3.4 Espectro de frecuencia de una serie de oleaje en Cancún Q.Roo.

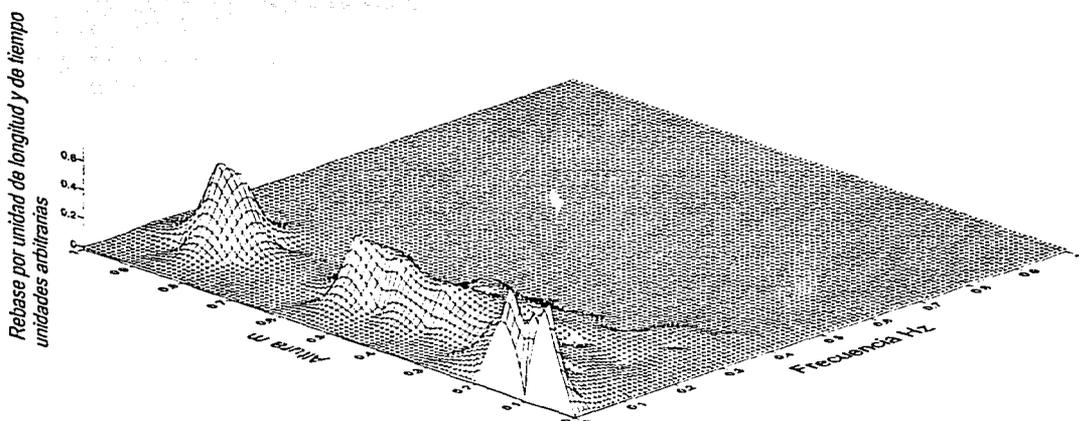


Figura 3.5 Diagrama tridimensional de altura y periodo en Puerto Morelos.

3.4 Análisis del oleaje por viento generador

Cuando no se cuenta con mediciones directas de las olas es posible deducir el oleaje producido por el viento utilizando los parámetros de intensidad del viento y la batimetría del lugar.

Es claro que este método indirecto tiene sus limitaciones dado que está basado en modelos matemáticos, El método Sverdrup-Munk-Bretschneider o SMB ofrece resultados bastante satisfactorios y se utiliza ampliamente para el pronóstico del oleaje en sitios donde no existen registros de las olas.

Las hipótesis de este método son las siguientes:

- Existe información precisa sobre dirección y velocidad del viento en la zona.
- Se considera que el área tiene una profundidad constante, no existen interferencias como islas. Su valor en aguas someras debe de calcularse como un promedio de la profundidad real de cada punto, en aguas azules no es necesario conocerla.
- El viento tanto en dirección como en intensidad, se mantiene constante.
- El viento es permanente o, más estrictamente, ha adquirido un estado de equilibrio.

Las ecuaciones de este modelo para aguas someras es para la altura del oleaje del modelo SBM son las 3.19 a 3.22:

$$H = 0.283 \frac{U^2 A_1}{g} \operatorname{Tanh} \left[\frac{0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42}}{A_1} \right] \quad (3.19)$$

donde

$$A_1 = \operatorname{Tanh} \left[0.530 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.75} \right] \quad (3.20)$$

Para el periodo:

$$T = 0.20 \frac{2\pi UB_1}{g} \operatorname{Tanh} \left[\frac{0.077 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25}}{B_1} \right] \quad (3.21)$$

donde

$$B_1 = \text{Tanh} \left[0.833 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{0.375} \right] \quad (3.22)$$

y F en este caso es el "fetch"

El Shore Protection Manual contiene gráficas para diversas condiciones para el cálculo del oleaje en aguas profundas y someras. Este modelo se aplicó en Puerto Morelos como referencia para el diseño del prototipo considerando datos históricos de viento ("hindcast") y los resultados típicos para la altura y periodo del oleaje, considerando que el "fetch" está limitado por la barrera de coral, son:

La altura y periodo típicos observados son $H=0.10m$ $T= 1.9s$ para la playa de Puerto Morelos.

Ajustando la altura de la ola a registros reales $H=0.10 m$ el periodo obtenido con el método SBM es $T=1.2s$.

Y ajustando el periodo real $T=1.93s$ la altura obtenida con el método SBM es $H=0.25m$.

Como se observa existen discrepancias con los registros reales y tienen su origen en las hipótesis del modelo no se cumplen estrictamente.

4 MODELO ANALÍTICO

4.1 Introducción

En este capítulo se describe un modelo analítico que explica, los fenómenos que ocurren dentro del amplificador del oleaje y que genera resultados bastante cercanos a los datos experimentales. Está basado en la solución de la ecuación de onda para olas largas propuesto por Lamb (1932).

La ventaja de contar con ecuaciones analíticas es que se pueden analizar los fenómenos desde muy diversos aspectos y se puede inferir el comportamiento del oleaje, dentro de los rangos de validez de la fórmula, y por tanto especificar los valores de los parámetros de diseño.

Se estudiaron las ecuaciones para los siguientes casos:

- Paredes convergentes con fondo plano.
- Modelo numérico de paredes convergentes y fondo variable basado en los conceptos de la óptica geométrica.

El primero está basado en ecuaciones empíricas obtenidas a partir de muchos experimentos a pequeña escala, no incluye la posibilidad de fondo variable.

El segundo fue un modelo que estaba sustentado en los fundamentos de la óptica geométrica donde se describen los fenómenos de reflexión, refracción y someramiento de cada una de las celdas en que fue subdividida el área en el interior del amplificador. Los resultados de la aplicación de este método con mediciones experimentales explicaban razonablemente casi todos los experimentos realizados salvo el de cambio de ángulo de abertura de las paredes. Con el enfoque de la óptica geométrica a partir de 90° se presenta reflexión total, y por tanto gasto nulo. Este resultado es contrario a los datos experimentales. La explicación es que la difracción es importante, por lo que se tomó la decisión de no proponer este modelo.

Las ecuaciones del modelo que se presentan incluyen la difracción y como se verá en el capítulo 8 explican satisfactoriamente los resultados experimentales.

El modelo que se presenta incluye la explicación de la difracción como se discute en el capítulo 8 en la sección de validación del modelo.

4.2 Ecuación de continuidad

Un modelo matemático que explique un fenómeno por medio de ecuaciones analíticas es de gran utilidad. Tal es el caso del principio de la conservación de la masa que intuitivamente es un parámetro conservativo. Estrictamente se sabe, a nivel de la física cuántica, que este principio no es rigurosamente cierto y se

reemplaza por el principio más general de conservación del par masa-energía- En términos macroscópicos el principio de conservación exclusivamente de la masa se puede considerar válido.

La ecuación de conservación de la masa se generaliza como la "ecuación de continuidad" que tiene un trasfondo más amplio aplicable a otros parámetros. Se presentan dos formulaciones para la deducción de esta ecuación. La primera, que es clásica, se basa en un volumen de control cúbico, la segunda, más elegante se refiere a un volumen de control de forma arbitraria.

Se deduce brevemente la derivación de la ecuación con ambos enfoques:

a) Volumen de control cúbico.

Características:

Volumen: fijo en el espacio, orientación de acuerdo con los ejes cartesianos como lo muestra la siguiente figura. Se indica el flujo en un solo eje y el tensor de esfuerzos en una sola de las caras para mayor claridad del esquema. La argumentación es extensiva para los otros dos ejes.

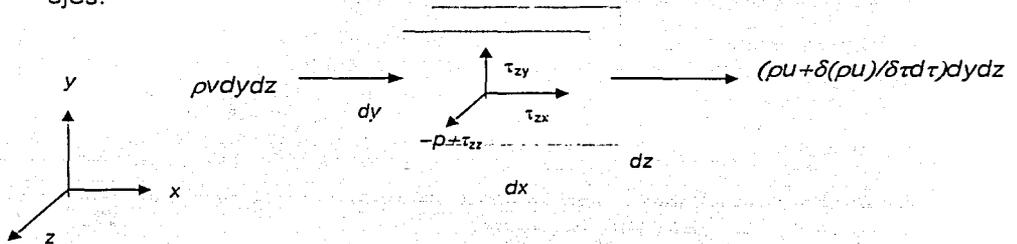


Figura 4.1 Tensor de esfuerzos en un cubo

Densidad: la densidad ρ del punto central, es representativa de todo el volumen de control y es diferenciable.

ρU : diferenciable en el punto central y se utiliza para estimar el valor en las paredes por medio de extrapolación lineal.

Por simetría lo que sucede en uno de los ejes sucede en todos los demás, por lo que el desarrollo en un eje es suficiente.

Sean dx, dy, dz son las dimensiones del cubo, U la velocidad, sus componentes $U(u, v, w)$, ρ la densidad, dt el intervalo de tiempo, V volumen $V=dx dy dz$. la masa en el elemento de volumen es:

$$m = \rho dv \tag{4.1}$$

el cambio de masa en el intervalo dt es:

$$\rho dV - \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \right) dV = - \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (4.2)$$

El signo menos indica flujo de entrada.

Por otro lado el flujo a través de la cara $dydz$ en $x=0$ por unidad de tiempo es:

$$\rho u dydzdt \quad (4.3)$$

y en la otra cara es:

$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dydzdt \quad (4.4)$$

La ganancia en masa en este volumen de control elemental es:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dydzdt = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dV \quad (4.5)$$

lo mismo en las otras dos direcciones:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dVdt \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dVdt \quad (4.6)$$

Sumando las tres componentes se tiene:

$$\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) dV \quad (4.7)$$

Igualando ambos términos de (4.2) y (4.7) se tiene:

$$\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) dV = - \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (4.8)$$

Esta ecuación se puede expresar como:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4.9)$$

que expresada vectorialmente es:

$$\nabla \cdot (\rho U) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4.10)$$

a) Segundo enfoque: volumen de control arbitrario.

Forma arbitraria.

Fijo en el espacio.

Densidad integrable en el volumen

El producto ρU integrable en la superficie.

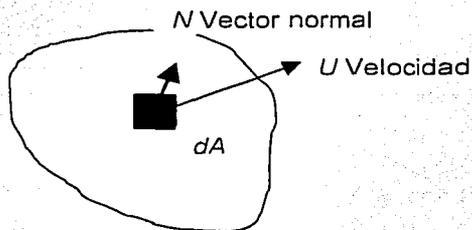


Figura 4.2 Esquema de un vector normal de velocidad

donde

dA es un elemento de área.

Como se observa, este esquema es más general ya que considera que la densidad puede variar en el interior del volumen siempre y cuando sea continua.

La dirección positiva se considera hacia fuera de la superficie o sea en la dirección normal al área.

La razón de cambio de masa dentro de la superficie es:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

La razón de la masa hacia el volumen de control a través de la superficie en términos de la velocidad es:

$$- \int_S \rho U dS$$

Igualando ambos términos se tiene:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \int_S \rho U dS \quad (4.11)$$

La diferencia básica de ambos esquemas es que no se extrapola el valor de la densidad pero se requiere conocerlo en el interior del volumen de control.

Se aplica el teorema de Green al segundo término y se tiene:

$$\int_V \nabla \cdot A dV = \int_S n \cdot A dS \quad (4.12)$$

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \int_V \nabla \cdot (\rho U) dV \quad (4.13)$$

n es un vector normal a la superficie

Desarrollando:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \int_V \nabla \cdot (\rho U) dV \quad (4.14)$$

Se obtiene finalmente:

$$\int_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) \right) dV = 0 \quad (4.15)$$

El integrando debe de ser cero dado que el volumen es arbitrario y se tiene la misma ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (4.16)$$

En términos de la derivada material la ecuación se expresa como:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot (U) = 0 \quad (4.17)$$

Se puede hacer una formulación euleriana (con el volumen de control en movimiento) y se obtiene el mismo resultado.

En el caso de fluidos incompresibles la densidad en cualquier elemento del fluido es constante y uniforme en todo el fluido. El primer término debe de ser cero y se tiene la siguiente expresión.

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4.18)$$

En caso de flujos irrotacionales existe un potencial de velocidades tal que la velocidad es el negativo del gradiente de ese potencial Φ :

$$U = -\nabla\Phi \quad (4.19)$$

En este caso la ecuación toma la forma:

$$\nabla \cdot (\nabla\Phi) = \nabla^2\Phi = 0 \quad (4.20)$$

Esta es la ecuación de Laplace, muy simple en su formulación matemática pero en general muy compleja de resolver analíticamente.

4.3 Oleaje en el interior de las paredes

El método propuesto es el siguiente:

Se aplica la ecuación de onda para un canal de longitud finita menor a la longitud de onda lo que corresponde a ondas largas. Un canal con longitud de onda comparable o mayor a la longitud de onda sería muy costoso y no necesariamente más eficiente.

Como todo modelo matemático hay tres tipos de consideraciones:

- Existen parámetros totalmente controlables, como dimensiones de las paredes y del fondo, y rugosidad.
- Los que están dados por la naturaleza y no hay forma de controlar como los parámetros del oleaje (periodo, altura y dirección) y el nivel del mar.
- Consideraciones teóricas que simplifican las ecuaciones pero cuyo costo es distanciarse de la realidad. Esto se permite siempre y cuando las ecuaciones sigan reproduciendo los resultados de una manera razonable.

En este caso se consideran dos hipótesis:

- El oleaje es del tipo armónico simple (senoidal).
- La pérdida del momentum y masa (que es la ganancia que se desea obtener) no se toma en cuenta en las ecuaciones.

Se consideran dos prototipos distintos, pero el método puede aplicarse a otras estructuras.

- Paredes convergentes fondo plano que es similar a un prisma triangular vertical.

- Combinación de paredes convergentes y rampa que asemeja a una pirámide cuadrangular en posición horizontal.

Las ecuaciones son las siguientes, Lamb (1997) y Rahman(1995).

La figura 4.3 muestra el diagrama del canal triangular visto en planta. x es la distancia entre el vértice ficticio y el vertedor, y L es la distancia entre el vértice y la entrada del canal.

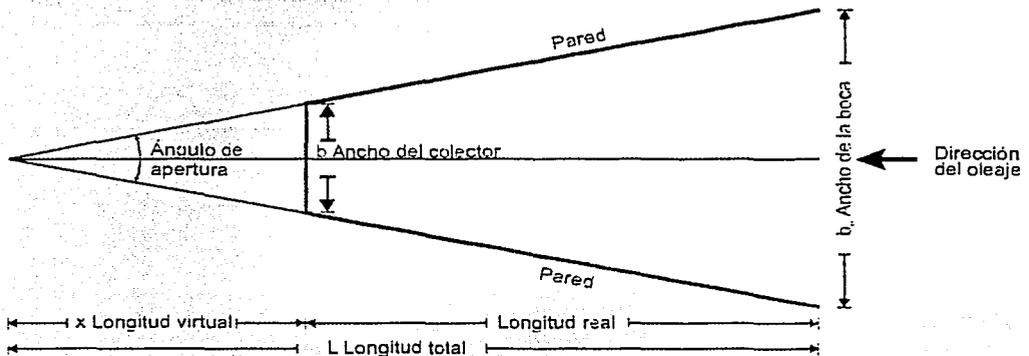


Figura. 4.3 Esquema del modelo matemático vista en planta

Se parte de la ecuación de continuidad aplicada a la entrada de un canal donde el eje horizontal parte del vértice.

$$\frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(d_0 b \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \omega^2 \eta = 0 \quad (4.21)$$

b es el ancho del canal. b_0 el correspondiente a la boca.

d_0 es la profundidad en la entrada.

η es la altura del oleaje.

ω la velocidad angular.

Las condiciones a la frontera son:

- En el fondo del canal la altura de la onda es finita.
- En la boca del canal el oleaje es del tipo armónico.

$$\eta = \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (4.22)$$

donde

ε es la fase.

Las ecuaciones se describen para cada caso:

- Canal de profundidad constante y paredes convergentes.

h constante

$$b=b(x)=b_0(x/L) \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = g d_0 \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \quad (4.24)$$

En $x=L$ $\eta = y(x) \cos(\omega t + \varepsilon)$

Dado que el oleaje es armónico es posible separa en la ecuación la parte espacial que es la ecuación 4.25.

$$-\omega^2 y = g d_0 \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad (4.25)$$

La ecuación diferencial es del tipo:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dy}{dx} + \xi^2 y = 0 \quad (4.26)$$

donde ξ es una constante, en este caso:

$$\xi^2 = \frac{\omega^2}{g d_0} \quad (4.27)$$

Ésta es una ecuación diferencial que se resuelve por medio de series donde y se substituye por una serie infinita del tipo:

$$y = \sum A_n x^n \quad (4.28)$$

y se encuentran relaciones de recurrencia para la ecuación de Bessel:

$$A_n = \frac{1}{(m+n)^2 - k^2} A_{n-2} \quad (4.29)$$

La cual se puede expresar el resultado en este caso:

La solución es del tipo:

$$y = A_1 J_0(\xi x) + A_2 Y_0(\xi x) \quad (4.30)$$

y

$$\eta = (A_1 J_0(\xi x) + A_2 Y_0(\xi x)) \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (4.31)$$

donde:

$$J_k(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^k \left[\frac{1}{k!} - \frac{1}{1!(k+1)!} \left(\frac{x}{2}\right)^2 + \frac{1}{2!(k+2)!} \left(\frac{x}{2}\right)^4 - \dots \right] \quad (4.32)$$

Aplicando las condiciones de frontera se tiene que el coeficiente B_1 debe de ser cero porque $Y_0(\xi x)$ tiende a infinito.

Entonces la solución es:

$$\eta = (A_1 J_0(\xi x)) \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (4.33)$$

De las condiciones a la frontera en $x=L$ el coeficiente es la amplitud y se tiene:

$$\eta = a \frac{J_0(\xi x)}{J_0(\xi L)} \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (4.34)$$

La naturaleza de la función de Bessel es una senoide amortiguada del tipo:

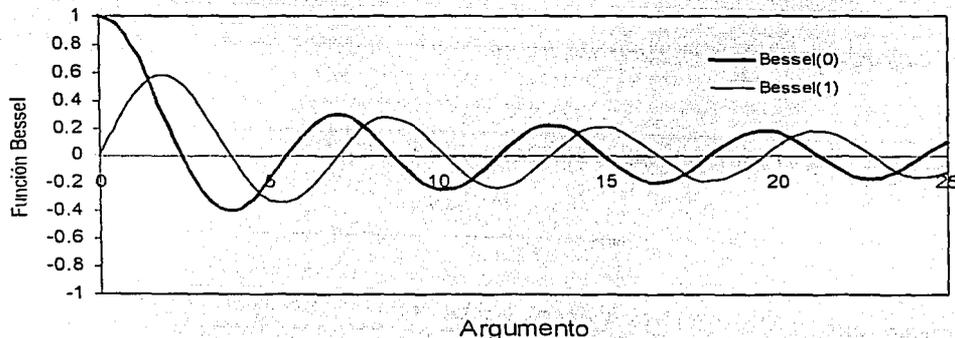


Figura 4.4 Comportamiento de las funciones de Bessel.

Es importante notar que los ceros de la función de Bessel en el denominador provocan valores infinitos, o sea resonancia, y están dados cuando se presenta $J_0(\xi x) = 0$.

Dado que el ángulo de las paredes y la longitud de las mismas determinan L , ξ queda como función de :

$$\xi = \xi(\text{longitud pared, ángulo, periodo, profundidad}).$$

Como se observa, la condición de resonancia puede presentarse por:

- El periodo de la ola que esta dado por las condiciones naturales.
- La profundidad sobre la que hay cierta opción al seleccionar el punto de instalación y que cambia con la marea.
- La longitud a lo largo de la horizontal que depende de la longitud de las paredes y del ángulo de abertura. Este es el elemento a definir.

a) Primer caso:

Ancho variable y profundidad constante:

$$\begin{aligned} b &= b_0(x/L) \\ d &= d_0 \end{aligned}$$

Con el procedimiento descrito se tiene la ecuación 4.34:

$$\eta = a \frac{J_0(\xi x)}{J_0(\xi L)} \cos(\omega t + \varepsilon)$$

$$\xi = \frac{\omega}{\sqrt{gd_0}}$$

c) Caso de profundidad y fondo variable:

$$\begin{aligned} d &= d_0(x/L) \\ b &= b_0(x/L) \end{aligned}$$

Siguiendo el mismo procedimiento se obtiene la solución:

$$\eta = a \frac{J_1(2\xi\sqrt{Lx})}{J_1(2\xi L)} \sqrt{\frac{L}{x}} \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (4.35)$$

Nótese que la función de Bessel es de primer orden y se tiene además un coeficiente $\sqrt{\frac{L}{x}}$ que amplifica la señal.

Para modelar el flujo que rebasa el francobordo en cada subintervalo de tiempo se calcula la altura de la ola ya amplificadas. El área se calcula multiplicando el ancho del vertedor por la altura de la ola menos la altura del vertedor.

$$\text{Area} = b(a' - F)$$

Para calcular el rebase se aplica la velocidad puntual de la ola para aguas someras con la fórmula descrita en el SPM.

$$c = a \cos \sqrt{\frac{g}{d_0}} \cos(\omega t) \quad (4.36)$$

donde:

a es la amplitud.

c la celeridad de la ola.

d_0 la profundidad.

ω la velocidad angular.

El caudal fluye hacia un estanque, la altura es variable y la velocidad de flujo instantánea se calcula con la fórmula de Darcy-Weinbach para conductos a presión (apéndice B).

El gasto se obtiene integrando la parte alta:

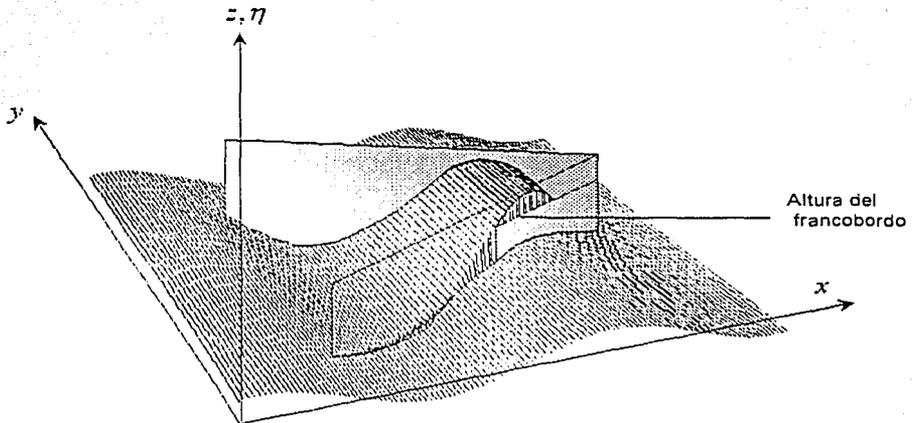


Figura 4.5 Parte de la ola que se capta en el colector dado una altura del francobordo.

$$Q = \frac{1}{T} \int_{-t_1}^{t_1} bc(\eta - F) dt \quad (4.37)$$

donde:

Q es el gasto.

F la altura del francobordo.

T el periodo de la ola.

$-t_1$ y t_1 son los tiempos de ascenso y descenso en que la ola alcanza el francobordo y son simétricos.

La velocidad de las partículas está dada por la expresión:

$$c = a' \sqrt{\frac{g}{d_o}} \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (4.38)$$

donde

a' es la amplitud de la ola amplificada
 t el tiempo.

La altura de la ola corresponde al valor amplificado.

Desarrollando:

$$Q = \frac{1}{T} ba' \sqrt{\frac{g}{d_o}} \int_{-t_1}^{t_1} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) (\eta - F) dt \quad (4.39)$$

como:

$$\eta = a' \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$$

$$Q = \frac{1}{T} ba' \sqrt{\frac{g}{d_o}} \int_{-t_1}^{t_1} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \left(a' \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) - F\right) dt$$

$$Q = \frac{1}{T} ba' \sqrt{\frac{g}{d_o}} \left[\int_{-t_1}^{t_1} \left(a' \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} t\right) - F \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)\right) dt \right]$$

$$Q = \frac{1}{T} ba' \sqrt{\frac{g}{d_o}} \left[\int_{-t_1}^{t_1} \left(a' \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} t\right)\right) dt \right] - \int_{-t_1}^{t_1} \left(F \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)\right) dt \quad (4.40)$$

La integral de \cos^2 es:

$$\int \cos^2 rx dx = \frac{x + \frac{\text{sen} 2rx}{2}}{2} \quad (4.41)$$

donde r es una constante.

Resolviendo la integral:

$$Q = \frac{1}{T} ba' \sqrt{\frac{g}{d_o}} \left[a' \left(\frac{t + \frac{T}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right)}{2} - \frac{TF}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \right) \right]_{-t_1}^{t_1}$$

$$Q = \frac{2}{T} ba' \sqrt{\frac{g}{d_o}} \left[a' \left(\frac{t_1 + \frac{T}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \cos \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right)}{2} - \frac{TF}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \right) \right] \quad (4.42)$$

donde t_1 es el punto donde la altura de la ola alcanza el francobordo:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \text{ang} \cos \left(\frac{a}{F} \right) \quad (4.43)$$

Finalmente La potencia Pot se calcula con la fórmula:

$$Pot = \rho g F Q \quad (4.44)$$

La potencia expresada en función del gasto es:

$$Pot = \rho g F \frac{2}{T} ba' \sqrt{\frac{g}{d_o}} \left[a' \left(\frac{t_1 + \frac{T}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \cos \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right)}{2} - \frac{TF}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \right) \right] \quad (4.45)$$

[The main body of the page contains extremely faint and illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the paper. The text is too light to transcribe accurately.]

5 EXPERIMENTACIÓN EN LABORATORIO

La fase de experimentos en laboratorio fue realizada por un equipo de investigadores del Instituto de Ciencias del Mar en las instalaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM entre 1989 y 1990. En esta fase se contó con la asesoría de los investigadores del Instituto de Ingeniería, y el financiamiento lo gestionó el Centro para la Innovación Tecnológica de la UNAM con el banco Somex.

El objetivo en esta etapa fue determinar la viabilidad del uso de un dispositivo de aprovechamiento de la energía del oleaje para el bombeo de agua marina, figuras 5.1 a y b, así como determinar cuales parámetros del oleaje, o del diseño, son los más relevantes y su rango de operación.

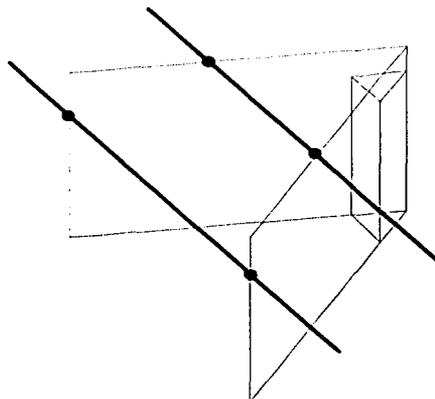


Figura 5.1a Dibujo del modelo a escala 1:50

La ventaja de los experimentos en laboratorio es que se cuenta con flexibilidad y control de las variables que intervienen:

- Altura del colector o vertedor.
- Longitud del conducto.
- Restricción del flujo en el conducto (diámetro).
- Longitud de las paredes.
- Ángulo de apertura de las paredes.
- Fondo plano o inclinado (rampa).

Limitantes:

- No se utilizó piso, por lo que las paredes no sellaban con el fondo.
- Forma del recipiente colector fue constante.

- Material de la rampa no fue ni liso ni impermeable como las paredes.
- La forma de las paredes no se modificó.
- Sistema de medición: como no se contaba con instrumentación automática se hizo mediante observación directa.

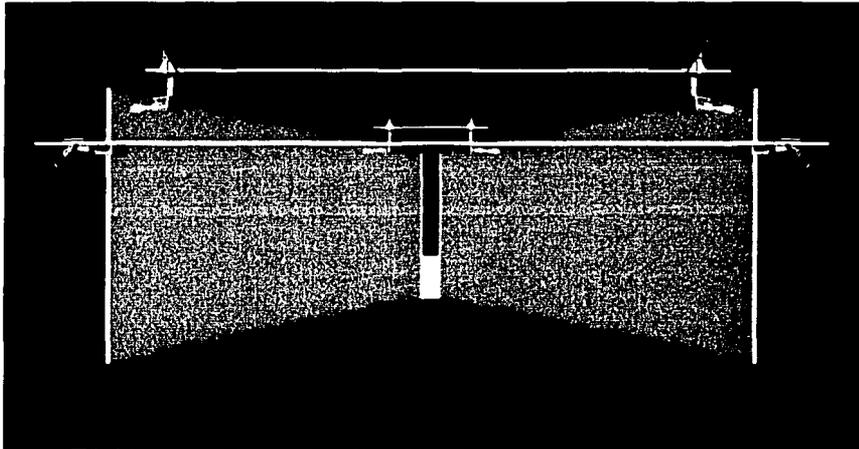


Figura 5.1b Dibujo del modelo a escala 1:50.

En cuanto al oleaje se variaron los siguientes parámetros:

- La altura en muchos experimentos.
- La dirección de las olas incidentes, fue normal, excepto en un experimento que precisamente tuvo como objetivo medir el efecto del oleaje oblicuo.
- La frecuencia solo se modificó en un experimento.

Limitación:

- Oleaje monocromático.

Algunos resultados iniciales fueron publicados (Ruiz,1994). Un análisis completo se presenta en este capítulo. En las figura (5.1a y 5.1b) se muestra el modelo.

5.1 Diseño del modelo

Las paredes se construyeron con dos placas planas de acrílico, de 0.5 x 1m, que convergen en el extremo con un prisma triangular-que a partir de este momento se

le denominará colector-. La base es un triángulo equilátero de 4 cm por lado. En el lado frontal del colector se tallaron dos rieles, en los cuales se insertaban placas del mismo material con la finalidad de variar la altura de entrada de las olas. En la parte inferior externa del colector se insertó un cople de acrílico para conectar la manguera.

Para darle solidez a la estructura se utilizaron dos varillas metálicas sujetas con "soportes para bureta" a las placas de acrílico. Una varilla se colocó frontalmente y otra en la parte superior

Las placas tocaban libremente el fondo. Sin embargo, una de las conclusiones importantes fue que se detectó que esto generaba pérdidas en el gasto. En la figura 5.2 se muestra un croquis de la vista en planta de la ubicación del sistema en el estanque, sólo se utilizó el batidor central

Para la conducción del agua se utilizó una manguera industrial de 1 1/2 pulgadas de diámetro, con una longitud de 25m, que conectaba el modelo con el sistema de medición en el exterior del estanque. Para librar las paredes del estanque se formaba un sifón de 1/2m de altura aproximadamente.



Figura 5.2 Croquis del estanque de oleaje con el modelo 1:50.

La medición del gasto se realizó por observación directa, registrando el volumen vertido en una pipeta graduada y cronometrando el tiempo de llenado de una pipeta.

El detalle del sistema de medición fue el siguiente:

- a) El agua de la manguera fluía sobre una cubeta que tenía un vertedor de 15 cm.
- b) El nivel de la cubeta justo al nivel de rebase se ajustaba al nivel del estanque.
- c) El agua vertida se recogía en una pipeta de 1 litro de capacidad.

El método de medición fue el siguiente:

- a) Se hacen los ajustes en el batidor para obtener el periodo de las olas requerido.
- b) Se ajusta el modelo con los parámetros del experimento (abertura, dirección del oleaje, altura del colector, longitud de la manguera, etc.).
- c) Se coloca el modelo en el estanque.
- d) Se nivela el tanque de medición con el estanque de oleaje. Este proceso se logra con precisión de 2 a 3 mm.
- e) Se verifica que el conducto este libre de burbujas de aire.
- f) Se inicia la producción de olas y se esperan unos minutos hasta estabilizar.
- g) Se miden por observación directa las alturas mínima y máxima en la entrada y en el fondo del modelo, simultáneamente al tiempo que se mide el gasto. Cada medición usualmente se repetía por lo menos en una ocasión.

5.2 Mediciones

Se efectuaron los experimentos variando un parámetro a la vez y el resto de los parámetros permanecieron con un valor fijo.

A continuación se describe cada experimento. Los resultados se presentan en normalizados y adimensionales. Como longitud característica se utilizó la altura del oleaje. El gasto para fines comparativos a otras escalas se presenta normalizado con el factor:

$$\frac{1}{\sqrt{gh^3}}$$

En algunas gráficas se indica una línea del umbral de referencia que se utilizará en la discusión de resultados y que corresponde a un nivel mínimo de eficiencia del sistema.

5.2.1 Gasto en función de la altura del rectificador.

Se inició el experimento con la altura del colector bajo el nivel del estanque, incrementándose a intervalos regulares por medio de placas que se insertaban en los rieles.

Objetivo: determinar que tan crítica es la altura en el colector que en una escala real corresponde al francobordo.

Diseño del experimento:

Incidencia del oleaje:	normal.
Altura de las olas:	entre 1,2 y 2.4 cm.
Profundidad inicial:	15 cm aprox.
Abertura de las paredes:	45°.

Resultado: En la gráfica 5.3 se muestran los resultados de las mediciones. Se observa que la pendiente es suave, lo cual es muy favorable ya que permite un rango amplio de funcionamiento eficiente. Hay un gasto incluso para valores negativos de la altura de la placa, hecho que no es muy relevante. Por otro lado el gasto tiende a cero a partir de una cota superior.

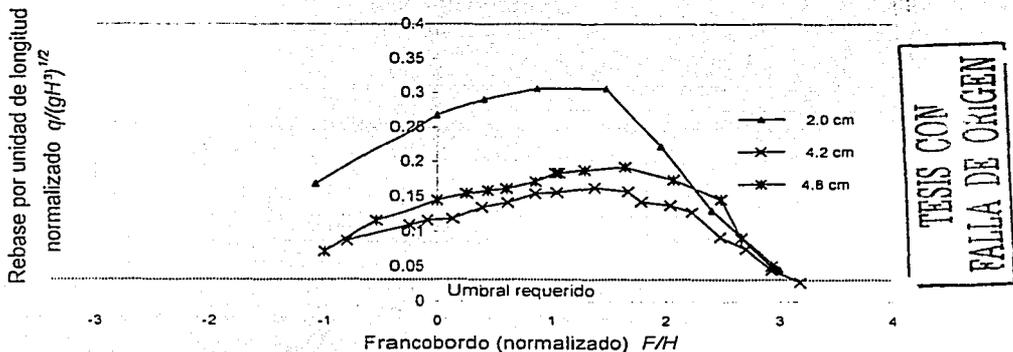


Figura 5.3 Efecto de la altura del colector sobre el gasto

5.2.2 Gasto en función de la longitud del conducto.

Se utilizó una manguera larga unida por medio de coples, la cual se fue acortando en cada experimento.

Objetivo: Determinar las pérdidas en función del largo del conducto.

Diseño del experimento.

Incidencia del oleaje:	normal.
Altura de las olas:	1 cm.
Altura del rectificador:	2 cm
Profundidad :	de 10 cm a 15 cm .

Resultados: La curva del gasto en función de la longitud es muy amortiguada, de los resultados se desprende, en principio, que la conducción no es un parámetro crítico. Los resultados se muestran en la figura 5.4. Para conductos muy largos esta variable será crítica y provocará una disminución sustancial del gasto.

TESIS COMPT
 FALTA DE CALIDAD

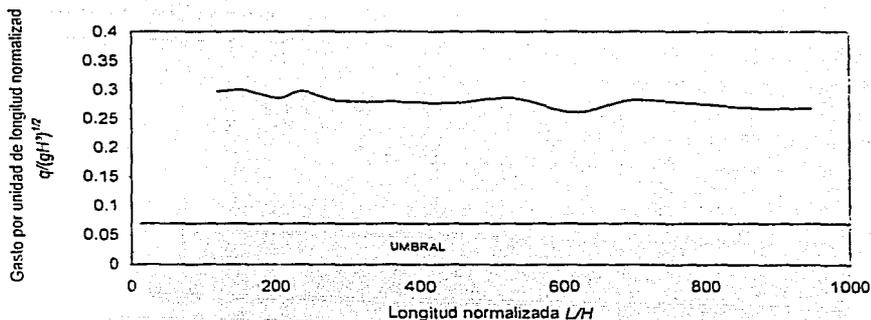


Figura 5.4 Gasto vs longitud del conducto

5.2.3 Gasto en función del diámetro del conducto.

Posiblemente un experimento más adecuado sería el de utilizar mangueras de distinto diámetro pero resultaba muy costoso por lo que se optó por la restricción por medio de una válvula.

Objetivo: Determinar la variación en función del diámetro del conducto.

Diseño del experimento:

Abertura de las paredes:	45 °.
Periodo de las olas:	1 s.
Profundidad entre	de 10 cm a 15 cm.
Altura del colector:	2 cm.

Resultados: el comportamiento es similar al que se podría tener con un flujo uniforme. Los resultados se muestran en la figura 5.5.

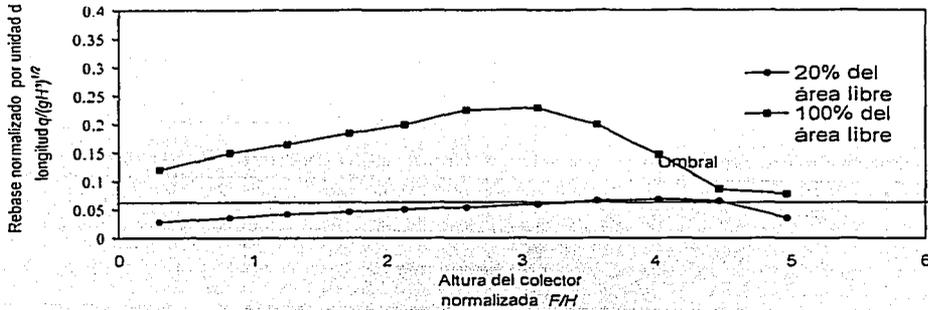


Figura 5.5 Gasto vs restricción del conducto

5.2.4 Gasto en función de la longitud de las paredes.

Para realizar este experimento se reemplazaron las paredes de acrílico por tablas de triplay de 2.40 m de largo. Se inició el experimento con la longitud total y se fue cortando sucesivamente en cada medición.

Objetivo: Determinar posibles modos resonantes.

Diseño del experimento:	
Ángulo de abertura de las paredes:	45 °
Profundidad en la entrada:	de 10cm a 15cm
Altura del colector:	2cm
Altura de las olas:	2cm.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Resultados: Se presentaron dos modos resonantes, considerando que la longitud del modelo es comparable a la longitud de onda. Estos resultados son acordes con la teoría. Los resultados se muestran en la figura 5.7.

5.2.5 Gasto en función del ángulo de abertura de las paredes.

Por medio de las varillas y las nueces se ajustó la abertura de las paredes.

Objetivo: determinar la forma de la curva y qué tan crítico es este parámetro.

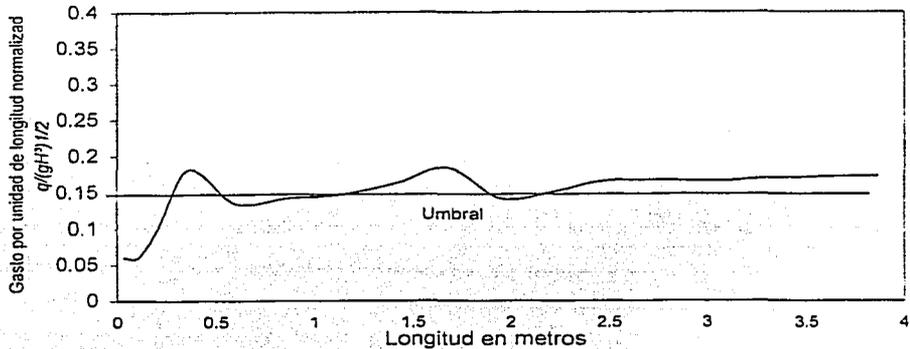


Figura 5.6 Gasto en función de longitud de las paredes

Diseño del experimento.

Incidencia del oleaje:	normal.
Altura de las olas:	2cm.
Profundidad en la entrada:	de 10cm a 15 cm.
Altura del colector:	2 cm.
Abertura de las paredes:	de 0° a 180°.

Resultado: La figura 5.7 se muestran los datos comparativos relativos al valor de máxima eficiencia. Se presenta un máximo suave, lo que es un resultado muy favorable ya que hay un rango amplio de funcionamiento óptimo del modelo. En un rango entre 20° y 60° hay un error máximo de 10% respecto al óptimo.

5.2.6 Gasto en función de rampa.

Este experimento fue realizado como un sondeo preliminar para determinar el efecto de una rampa interior. Se consideran los resultados cualitativos dado que, como se determinará en el modelo analítico, no necesariamente genera mayor gasto. La rampa se construyó en plastilina, que tiene un coeficiente de fricción mayor al del acrílico. Los resultados son sólo cualitativos e indican la influencia de la presencia de la rampa en la obtención de un mayor o menor gasto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

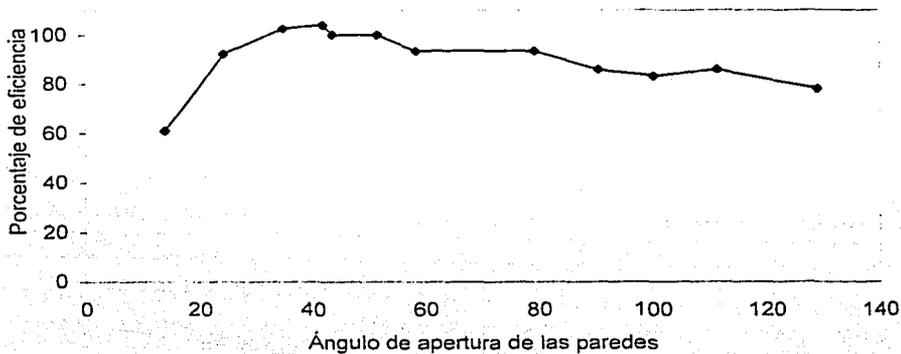


Figura 5.7 Eficiencia del gasto en función del ángulo de las paredes

Objetivo: determinar la importancia del uso de una rampa.

Diseño:

Incidencia del oleaje:	normal.
Abertura de las paredes:	45°.
Profundidad:	de 10cm a 15 cm.
Altura del colector:	2 cm.
Altura de la ola:	2 cm.
Angulo de las rampas:	57° y 65°.

Los resultados se muestran en la figura 5.8 conjuntamente con el efecto de la frecuencia.

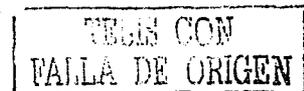
5.2.7 Experimentos en función del oleaje

Estos experimentos dependen de las condiciones naturales de las que no se tiene control en casos reales, por eso se muestran por separado. Se trata de determinar cuales parámetros los naturales o los de diseño son claves.

5.2.7.1 Gasto en función de la frecuencia.

Se graduó el periodo ajustando los brazos del batidor para tres frecuencias distintas.

Objetivo: determinar la influencia de la frecuencia del oleaje.



Diseño del experimento:

Incidencia del oleaje:	normal.
Abertura de las paredes:	45°.
Profundidad en la entrada:	de 10cm a 15 cm.
altura del colector:	2cm.

Resultado: Como se muestra en la gráfica 5.8 crecimiento casi lineal, esta es una variable muy importante.

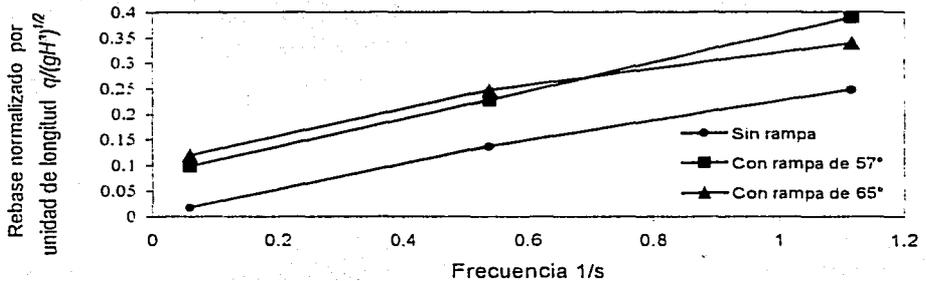


Figura 5.8 Gasto en función de la frecuencia y de la presencia de la rampa

5.2.7.2 Gasto en función del ángulo de incidencia del oleaje.

Para cada medición se cambió la dirección incidente del oleaje respecto al modelo.

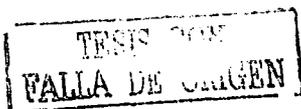
Objetivo: determinar qué tan crítico es este parámetro ya que la instalación permanente es fija y hay variabilidad en la dirección del oleaje a lo largo del año.

Diseño del experimento:

Se modificó la posición del modelo de entrada normal (0°) hasta paralela (90°) con intervalos de 10°.

Abertura:	45°.
Profundidad:	de 10cm a 15 cm.
Altura del colector:	2cm.

Resultado se presenta una curva de decaimiento con pendiente suave. Para un ángulo incidente entre 0° y 20° la eficiencia es óptima. Los resultados se muestran en la figura 5.9



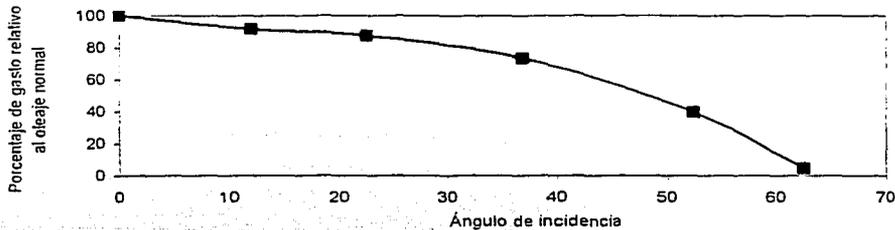


Figura 5.9 Eficiencia del rebase en función del ángulo de incidencia del oleaje

5.3 Resultados

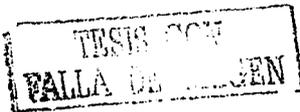
Para los experimentos en el modelo se tienen las siguientes conclusiones generales:

- El periodo y altura del oleaje son los principales parámetros que determinan la eficiencia del sistema de bombeo.
- La altura del colector es el parámetro más crítico en cuanto a la estructura.
- Existe un rango de funcionamiento relativamente amplio en cuanto a la dirección del oleaje incidente, la abertura y la longitud de las paredes.
- Una rampa interior incrementa el gasto.
- El diámetro y longitud del conducto no son parámetros críticos.
- La falta de sello de las paredes con el fondo ocasiona pérdidas en el gasto.
- Se presentaron indicios de resonancia en longitud de las paredes y ángulo de incidencia del oleaje. En un caso real el oleaje no es monocromático sino irregular por lo que es difícil que se presenten modos resonantes claramente definidos.

En el capítulo 7 se presenta un análisis detallado de los resultados comparativos del modelo como del prototipo en campo.

Como en toda investigación surgen nuevas interrogantes, en este caso se abren las siguientes posibilidades de experimentación a futuro:

- Variación de la forma de las paredes.
- Forma del estanque colector.
- Variación del gasto en función de la longitud de onda.
- Variación del gasto en función de la profundidad.



6 EXPERIMENTACIÓN EN CAMPO

En este capítulo se presenta la fase experimental en el mar. Con los resultados de laboratorio se determinó que el factor determinante es el oleaje y en relación al diseño los siguientes parámetros: la altura del colector, la presencia de la rampa y el ángulo de apertura de las paredes.

Como se trataba de un prototipo de prueba se seleccionó Puerto Morelos Q.Roo como el lugar para experimentar porque el rango de marea es pequeño (variación diaria de menos de 0.2m) y con un oleaje un de pequeña altura ($h_{1/3} < 0.2m$). Además cuenta con todo el apoyo logístico para realizar los experimentos. En la figura 6.1 se muestra un croquis del amplificador del oleaje que es el elemento fundamental del sistema. Tiene las siguientes características:

- Las olas inciden frontalmente.
- El colector evita el regreso de agua .
- Por una tubería submarina se conduce el agua hacia la costa.

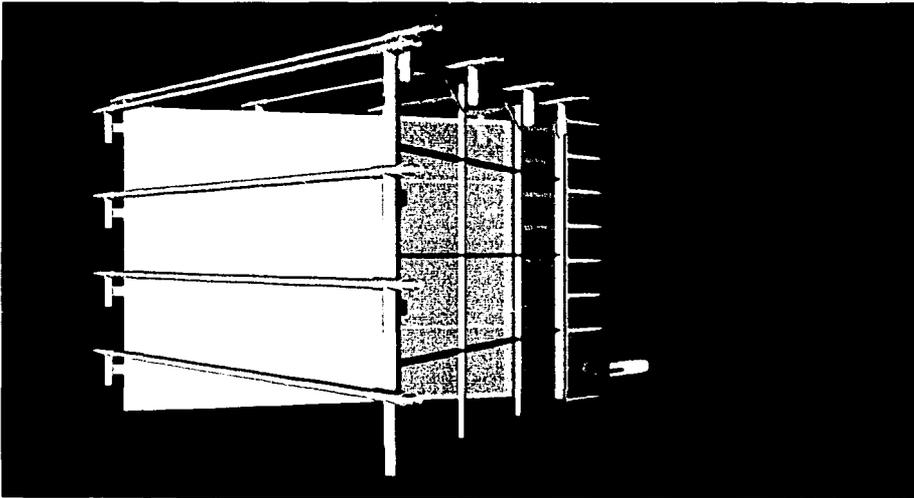


Figura 6.1a Vistas en perspectiva del amplificador de oleaje sin rampa.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

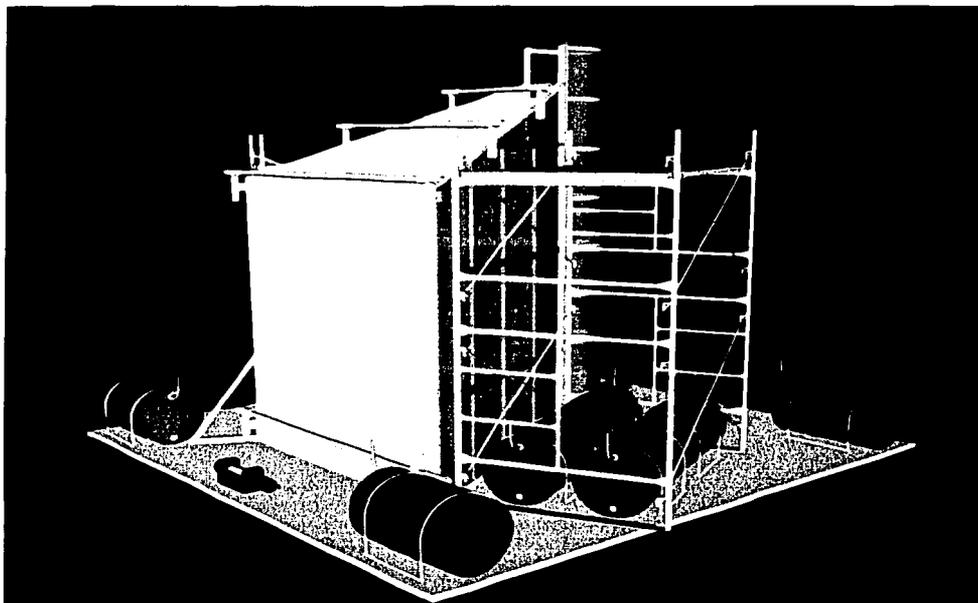
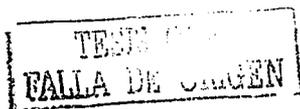


Figura 6.1b Vistas en perspectiva del amplificador de oleaje con rampa.

En la figura se muestra una vista del amplificador en perspectiva. La copia es real salvo el efecto semitransparente de las paredes que tiene por objeto visualizar el interior. Al fondo del tanque colector sobresale el cople para insertar la manguera. Los tubos horizontales tienen el objetivo de darle consistencia a la estructura para resistir el embate del oleaje.

En los croquis de la figura 6.2 se muestran las medidas y la descripción de la nomenclatura utilizada en el texto.



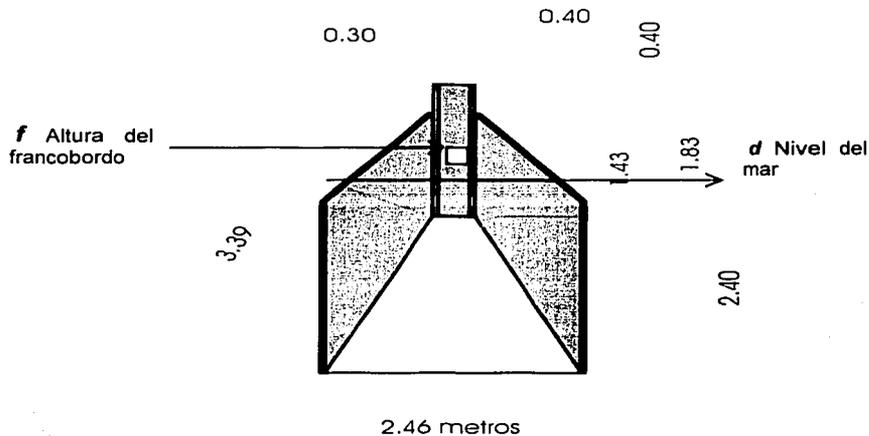


Figura 6.2a Vista frontal. Medidas en m.

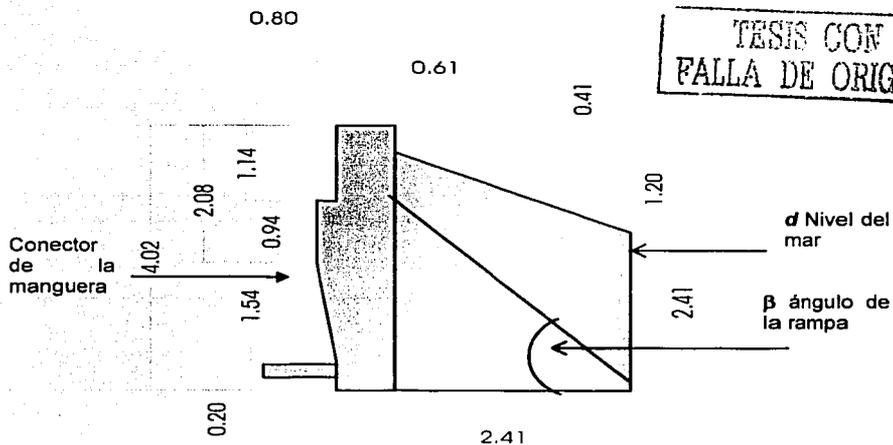


Figura 6.2b Vista lateral, medidas en m.

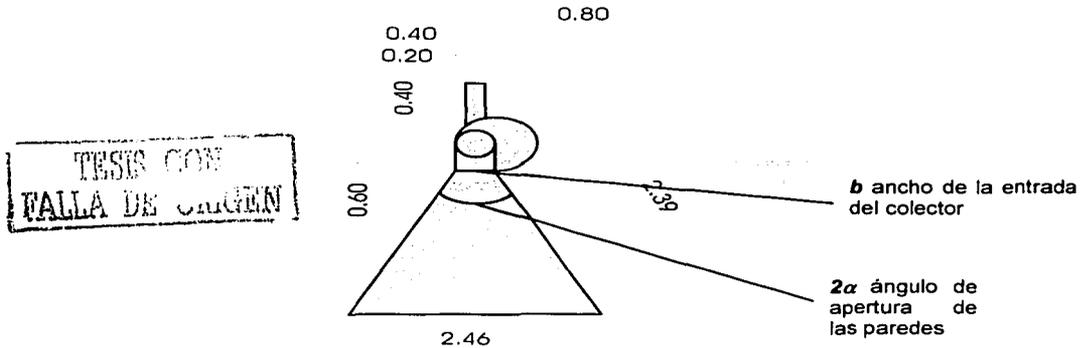


Figura 6.2c Vista en planta. Medidas en m.

A diferencia de la experimentación en laboratorio, en el caso del mar hay flexibilidad para modificar los parámetros. El oleaje está determinado por las condiciones naturales principalmente el viento y solamente se identificó la dirección normal para la ubicación del prototipo y se registraron series de tiempo de la altura. En cuanto al diseño se fijaron la apertura y longitud de las paredes, a diferencia del modelo se construyó un fondo plano y se sellaron las uniones con las paredes. Las únicas variables fueron la altura del colector y la presencia de la rampa. En cuanto a la forma del tanque colector se modificó en una ocasión para evitar pérdidas por reflexión.

El costo de los experimentos en el mar fue 60 veces superior al del laboratorio en condiciones controladas. Se describen a continuación los siguientes puntos de esta fase:

- Las condiciones ambientales del lugar.
- El diseño del prototipo.
- Las mediciones.
- Los resultados obtenidos.

6.1 Condiciones ambientales

La estación del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM se encuentra situada en Puerto Morelos a 40 km al sur de Cancún en Q. Roo. Esta estación opera desde principios de los años ochentas y su propósito ha sido estudiar esta zona del Caribe. Actualmente cuenta con los

siguientes recursos que se utilizaron para apoyo logístico en este proyecto:

- Acceso a playa para instalación del sistema de bombeo.
- Muelle con servicios de visitas para fijación del equipo y electricidad.
- Mareógrafo.
- Lanchas.
- Apoyo de buzos.
- Laboratorio.
- Centro de cómputo.
- Seguridad.
- Apoyo de personal para la instalación y recuperación del prototipo (estas maniobras requieren la participación de alrededor de 20 personas).

El prototipo se instaló en la estación de Puerto Morelos 4km al norte del poblado del mismo nombre. Frente a la estación está la laguna litoral, de 800m de ancho donde se encuentra la barrera de coral. Esta barrera absorbe el 90% de la energía del oleaje (esta cifra se obtuvo al aplicar un modelo de transmisión del oleaje a través de medios porosos (Silva,2002).

□ Medio marino.

➤ Oleaje.

El oleaje resultante en el interior de la laguna arrecifal es de pequeña amplitud comparado con el de antes de la barrera ($H_{rms}=0.14m$ contra $H_{rms}=0.40m$). Y es generado por viento local aunque existe una fracción que logra cruzar la barrera en pleamar o cuando el viento es de gran intensidad.

Valores característicos de una serie de datos registrados durante los experimentos se muestran en la tabla 6.1.

La dirección del oleaje es este-oeste que es la dirección del viento dominante y coincide con la dirección normal a la costa.

➤ Topografía.

- Características de la playa: la estación esta ubicada entre el manglar y el mar por una franja de tierra firme de 300m. La zona de playa federal es de 40 metros, la profundidad de la laguna arrecifal es del orden de 4m, en la zona del muelle la profundidad varía de 0m a 2m. Es una zona de pastos marinos lo que indica que hay poco transporte litoral. El fondo es arenoso con algunas zonas calcáreas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Parámetro	Valor
H_{rms}	0.06 m
T_{rms}	2.805 s
Momento M_0	0.734
Momento M_1	0.0262
Momento M_2	0.094
v'	0.0815
τ_{01}	2.7954
eta_{rms}	0.612771

Tabla 6.1. Valores característicos del oleaje en Puerto Morelos.

➤ Mareas.

Hasta el momento no hay cálculos directos de las constantes armónicas de este lugar, considerando lugares próximos como Cozumel y Puerto Juárez se tienen las siguientes características:

- las componentes armónicas principales son: S_2, M_2, S_2, K_1 Y O_1 .
- Pleamar máxima: 34.2 cm, bajamar mínima: -33.4 cm pleamar media superior: 11.1 cm, bajamar media inferior: -11.6 cm.
- Régimen mixto semidiurno y en épocas de cuadratura diurno.

➤ Agua de mar:

- Temperatura del mar: 27.74°C con desviación standard de 1.39°C.
- Salinidad: rango (34.340-36.825 ups) media 35.718 ups.
- Sigma-t (densidad): rango 21.35-24.10 kg/m³.

➤ Corrientes.

Hay muy pocas mediciones directas reportadas. Un esquema aproximado, Merino(1983), muestra corrientes con dirección noreste o suroeste a lo largo de la costa en una u otra dirección del orden de 10 cm/seg.

□ Atmósfera:

Los siguientes datos fueron tomados de Merino (1983):

- Clima: Awg Clima de sabana.
- Viento: Alisios dominantes entre febrero y julio (provenientes del este) y oscilación diaria entre sureste y norte entre julio y enero. Velocidad promedio 5 m/s.
- Temperatura ambiente entre 19.7 y 30.3, promedio 26.3.
- Diferencia entre temperaturas extremas al día < 5°C
- Precipitación : 1 123 mm.

- Evaporación: 1 754 mm.
- Huracanes y tormentas tropicales.
 Probabilidad de paso directo en esta zona de 2 en 19 años (uno cada 10 años aproximadamente).
 Cruce cercano en el área de 31 huracanes en 19 años (uno cada año y medio). Estos datos hay que interpretarlos en forma relativa dado que los huracanes varían en intensidad durante su avance y el único caso del paso de un huracán con daño severo en la zona fue el del Gilberto en 1988 que destruyó el muelle y dañó las instalaciones de la estación, y en Cancún causó severos daños.

6.2 Diseño del prototipo.

□ ELEMENTOS

Escalamiento:

Se hicieron las siguientes consideraciones para determinar los factores de escala:

Gasto:

- Se consideró a la altura del oleaje como dimensión característica de referencia.
- La altura del oleaje en el modelo (monocromático) es de 0.01m.
- Altura del oleaje (H_{rms}) en Puerto Morelos de 0.0606m.
- Factor de escala = $0.0606/0.01 = 6.06$
- Factor de escala del gasto. Es un sistema de superficie libre y esta determinado por el número de Froude con potencia $5/2$ del factor de escala. Para el gasto $Q_e = (H_e)^{5/2} = 90.4$.
- Si el gasto obtenido en el modelo fue del orden de 0.1 litros se espera un gasto de 9.04 litros/s.

➤ Paredes.

a) Escalamiento

Se tomó como referencia el experimento de largo de las paredes del modelo escalado con la longitud de onda.

- Existe una cota inferior para la cual el gasto empieza a disminuir rápidamente. Esta cota está situada alrededor de 0.3m si se normaliza la longitud en función de la longitud de onda para el modelo con una longitud típica de 1m en el peor de los casos se tiene el factor de escalamiento $0.3/1 = 0.3$.

- La longitud de onda para oleaje irregular a profundidad de 2m es, según Goda(2000) $\lambda=8.72m$ y la fracción mínima es $0.3 \times 8.72 = 2.6m$ que sería la longitud mínima de las paredes con un cierto margen se determinó que la longitud fuese 3m.
 - El costo de la estructura aumenta con la tercera potencia de la longitud por lo que hay que buscar el valor mínimo.
- b) Las dimensiones de los elementos fueron paredes de 3m de base por 4 de altura, base de 4x5m.
- c) El material que se utilizó fue de fibra de vidrio con una cuadrícula metálica de refuerzo.
- d) Forma: inicialmente las paredes fueron rectangulares, pero por razones prácticas se cortó un segmento triangular en la parte superior para disminuir el peso del prototipo y facilitar las maniobras de instalación y recuperación.
- e) Terminados y acoplamiento:
todas sus partes fueron pintadas con esmalte marino para mayor protección de la corrosión, y las uniones se hicieron con tornillos de acero inoxidable.

➤ El tanque colector.

Es un prisma (figura 6.3) cuya base son tres lados rectos y un cuarto y semicircular. Después de diversas pruebas se observó que en ocasiones las olas más grandes se reflejaban en el fondo regresando al mar. Se realizó una adaptación en forma de un cilindro mayor ligeramente asimétrico en la parte superior para capturar más agua. Para la inserción de la manguera se adaptó un cople de 8 pulgadas cercano a la base del colector.

El ancho del vertedor colector escalado sería de 0.24m, se decidió aumentar su dimensión a 0.40m. No hubo experimentos en el modelo para determinar el ancho óptimo. Con el modelo matemático que se presenta sí se pueden hacer estimaciones del ancho óptimo.

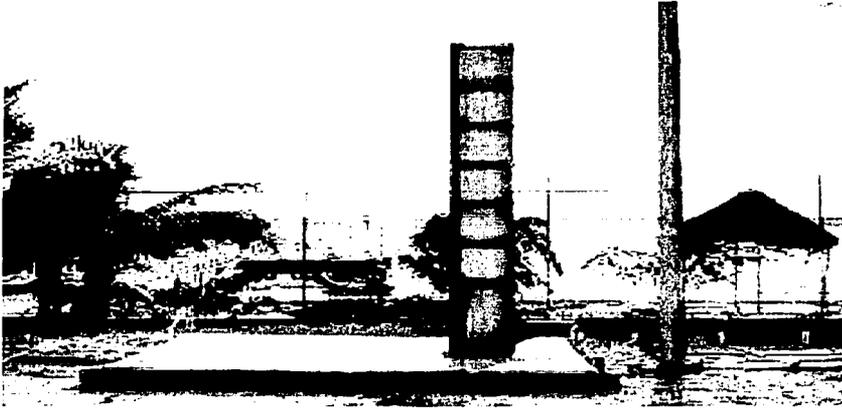


Figura 6.3 El colector al inicio de la construcción del prototipo

➤ Otros elementos del amplificador.

Puestos de observación. Se instalaron en la parte externa de las paredes andamios convencionales de construcción.

Flotación. Se emplearon doce tambos de plástico de 200 litros como flotadores. Cada flotador tiene dos válvulas para el llenado y vaciado de agua de mar durante las maniobras de instalación.

➤ Manguera de conducción

Se utilizó una manguera de plástico, con refuerzo de un núcleo en espiral de PVC, soporta la compresión y es bastante resistente a la corrosión del agua de mar. Se utilizaron tres tramos de 20 metros acoplados con coples de PVC. Para la instalación se enterró el primer tramo en la arena, procurando que no hubiese cambios de pendiente para evitar bolsas de aire. En la figura 6.5b se muestra la manguera ya instalada en el fondo marino.

➤ Estanque de medición.

Este fue el similar de una laguna litoral. Consiste en un tanque rectangular dividido en dos secciones. La primera para recepción del agua y la segunda para medición del gasto.

Una pared móvil de acrílico separa ambas secciones y ejerce las funciones de vertedor.

La primera sección tiene conectores para tres mangueras con las siguientes características y finalidades:

- La primera, de 8 pulgadas de diámetro, se comunica con el amplificador. Como válvula se utilizó una pelota del mismo diámetro.
- La segunda, de 2 pulgadas de diámetro, se utiliza para el llenado de la primera sección al nivel del mar. Por medio de una manguera del mismo diámetro se comunica hasta un punto cercano al amplificador para obtener el nivel del mar como estado de base inicial.
- La tercera manguera, de 1/2 pulgada de diámetro, es para el ajuste fino del nivel del mar.

En la figura 6.4 se muestra el estanque de medición. Se observa la separación interior con la placa de acrílico que funciona para ajustar la altura de derrame.

□ INSTALACIÓN

Estanque.

La colocación del estanque en la playa a un nivel inferior al nmm fue una operación laboriosa debido a que rebasa el nivel freático y tiende a flotar. Para lograr la profundidad se utilizaron anclas en los 4 extremos y se aflojó la arena con agua a presión, una técnica utilizada para la instalación de pilotes en el mar. Para forzar el hundimiento se colocó un tanque de 1000 litros de agua sobre el estanque.

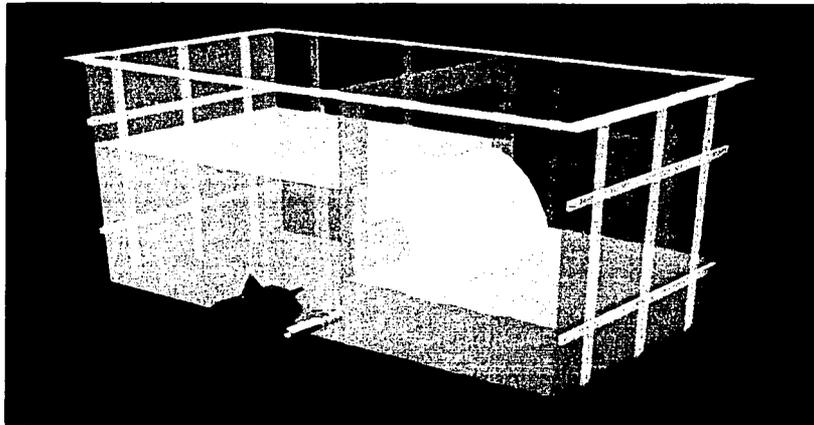
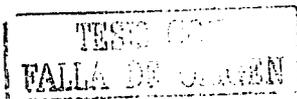


Figura 6.4 Tanque de medición



➤ Manguera.

La manguera en la sección de la playa también se colocó utilizando agua a presión para aflojar el terreno. Se tuvo especial cuidado en que la pendiente siempre fuera decreciente para evitar sifones que pudieron llenarse con burbujas de aire.

Previamente a la instalación la manguera se purga para limpiarla de arena y burbujas de aire.

Entre una campaña de medición y la siguiente transcurrían uno o dos meses en los cuales se introducía arena en el interior de la manguera. Para limpiar el interior de la manguera en cada campaña se probaron varias técnicas: la más efectiva fue el uso del "piggy" que es una técnica utilizada en tuberías petroleras submarinas y que consiste en forzar el paso de una esfera del mismo diámetro a través de la tubería. En este caso se utilizó una pelota del mismo diámetro llena de agua para forzar el movimiento de los extremos de la manguera se levantó sobre el nivel del mar, se introduce la pelota y se bombeó agua creando una carga hidrostática.

➤ Amplificador.

El amplificador sólo se instalaba durante los experimentos y después se recuperaba para modificaciones y mantenimiento.

Para inmovilizar el amplificador en el mar se fijaron en el fondo cuatro tornillos de acero inoxidable. Los extremos del amplificador se sujetaban con cadena y cable de polipropileno de ½ pulgada.

La secuencia de la maniobra de instalación del amplificador es la siguiente:

Paso 1. Con una camioneta, y colocando tablas en la arena, se remolca el prototipo en el mar.

Paso 2. Se desconecta el prototipo del remolque, que queda flotando.

Paso 3. Por medio de cuerdas desde el muelle se desplaza el prototipo hasta su posición en el extremo sur del muelle.

Paso 4. Una vez en posición frontal al oleaje los buzos abren las válvulas de los tanques cuidando de que el hundimiento sea simultáneo.

Paso 5. Se afianzan las cuerdas a los anclajes y se colocan muertos adicionales de cemento para fijar el prototipo.

Paso 6. Se enchufa la manguera.

Paso 7. Se colocan las tablas de los andamios.

Paso 8. Se instalan los ológrafos y otros sistemas de medición.

Las figuras 6.5a y b muestran la instalación en planta y perfil, respectivamente.

Las maniobras de recuperación son casi las mismas pero en sentido inverso. La maniobra requiere de medio día y la participación de alrededor de 20 personas.

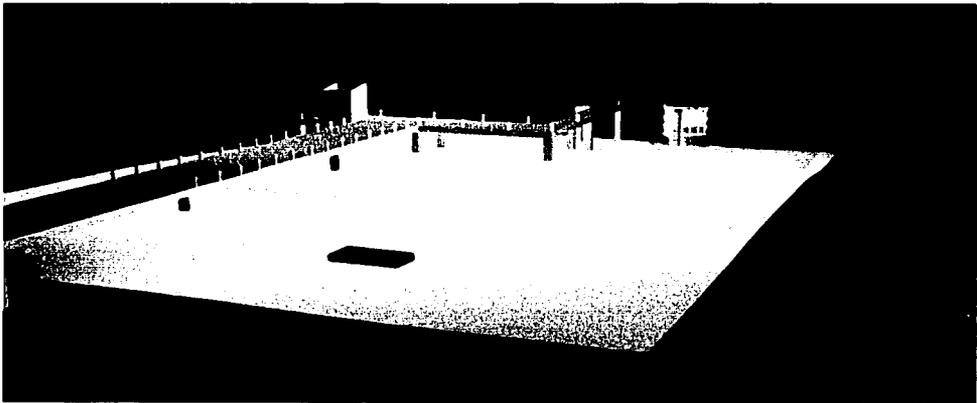


Figura 6.5a Vista en perspectiva de la instalación del sistema.

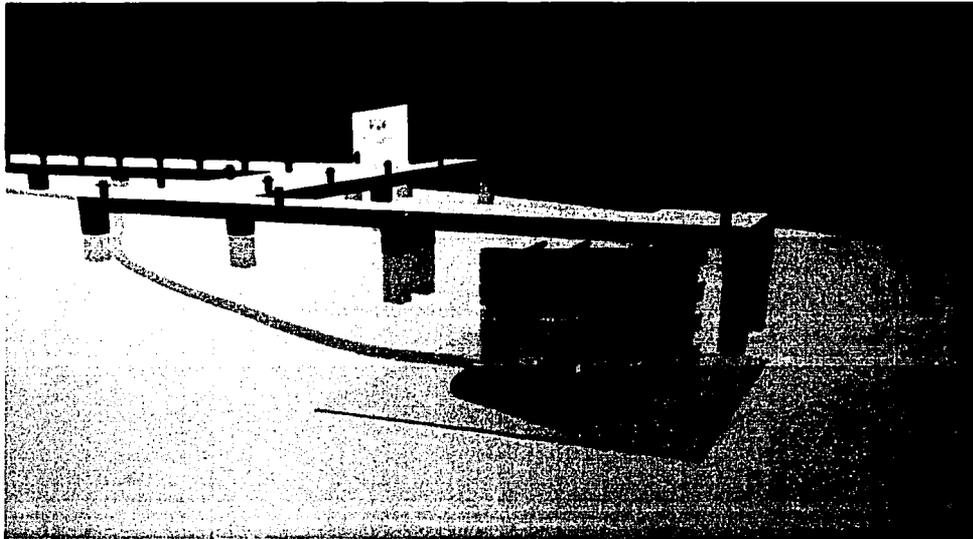


Figura 6.5b Acercamiento en perspectiva del amplificador.

6.3 Mediciones

□ PLANEACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Durante 1996 se diseñó y construyó el prototipo. Los experimentos se realizaron en febrero y en octubre de 1997. En el primer caso el prototipo no contaba con rampa. Se realizaron cuatro mediciones durante las cuales hubo variación de altura de las olas debido al viento por lo que se pudo registrar la relación del gasto respecto a la altura. En octubre se le instaló una rampa y se realizaron mediciones en dos días consecutivos con las mismas condiciones de viento y altura aproximadamente.

Los parámetros variables en el prototipo fueron:

Altura del oleaje.

En la figura 6.6 se observa que cuando aumenta la altura de las olas aumenta también el gasto. No es posible indicar con precisión la correlación pero sí es claro el efecto.

Altura del colector.

En la misma figura se observa tres estados:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- En el caso de que la altura del francobordo o colector fuera cero o aún, negativa sí se obtiene un gasto. Esto se debe a que el colector evita el contraflujo cuando baja el nivel a valores negativos. Es importante notar que el máximo se desplaza hacia la derecha, hacia valores más altos del francobordo.
- En el centro de la gráfica hay una pendiente suave con un máximo.
- Después de este valor disminuye el gasto hasta llegar a cero, que es el caso cuando el "run-up" no alcanza a rebasar. El rebase esta en el rango entre 0.1 y 0.2 de los valores normalizados.

La figura 6.6 muestra las mediciones sin la rampa.

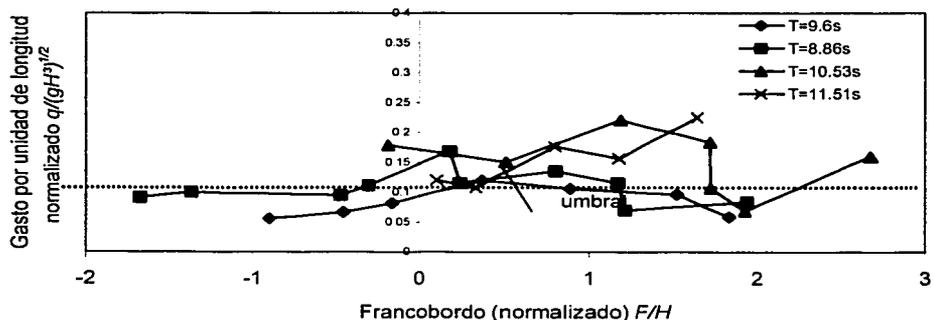


Figura 6.6 Mediciones del gasto para distintas alturas de olas en el prototipo

Uso de la rampa.

En la figura 6.7 Se muestran dos series de datos con rampa de 53° de inclinación. La forma de la gráfica es también curva, con un máximo y con valores mayores que cero aún en el caso de francobordo negativo.

Lo más relevante de este resultado es que la mayoría de los valores caen en el rango de 0.2 a 0.25 del gasto normalizado lo que muestra un aumento de alrededor de 25% en la eficiencia con la presencia de la rampa.

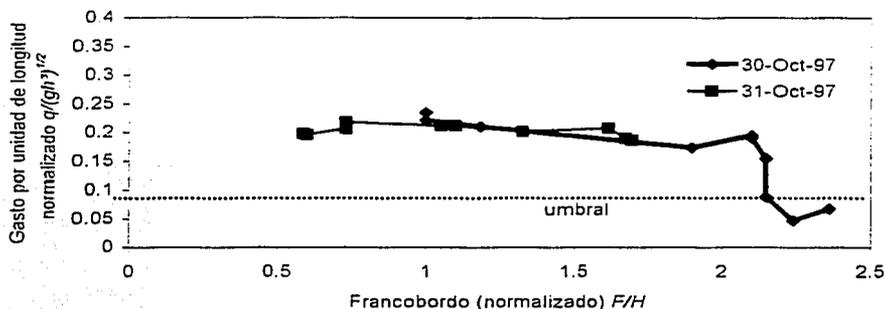


Figura 6.7 Mediciones del gasto en el prototipo con rampa. La línea punteada corresponde a una cota mínima que se emplea como referencia en el análisis

Parámetros registrados:

Oleaje.

Se utilizaron 2 ológrafos marca Applied Microsystems TWG-12 con:
 sensor de presión con resolución hasta décimos de milímetro
 sensor de temperatura hasta centésimos de °C
 intervalo de muestreo mínimo cuatro registros por segundo.

Los ológrafos calculan la marea promediando un determinado número de datos prefijados de oleaje.

El aparato se programa para que en cada determinado periodo se divida en un lapso de registro de datos y en uno de inactividad. Por ejemplo un caso común fue con rachas de 18 minutos por hora con registros de cuatro por segundo.

En la figura 6.8 se muestra un segmento de una serie de observaciones del oleaje típico de Puerto Morelos Q.Roo. En la figura 6.9 están los resultados del análisis espectral de una serie de 4,096 datos correspondientes al intervalo de las 15:34 a las 15:41 del 28 de junio de 1997. El subintervalo de muestreo fue de cuatro datos por segundo. Se realizaron mediciones en diversas épocas del año y siempre los resultados del análisis espectral fueron muy similares.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

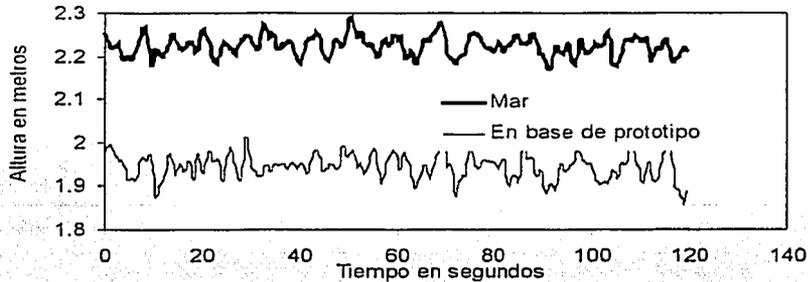


Figura 6.8 Oleaje en el mar a 30 metros del prototipo y en la entrada

El espectro de una serie de datos típica de Puerto Morelos se muestra en la figura 6.19.

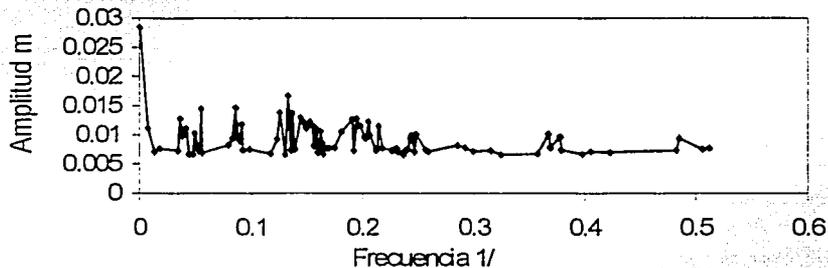


Figura 6.9 Espectro FFT típico del oleaje en Puerto Morelos Q.Roo

Con el fin de determinar cuál es el espectro de energía se promedió la densidad de energía en rangos de un segundo. En la figura 6.10 se muestran los promedios en tres casos.

- El primero en Puerto Morelos que corresponde a este caso, se observa que el rango entre 2 y 3 segundos es el de mayor contenido energético y que corresponde al viento local seguido por el de 5 a 6 segundos que corresponde al oleaje proveniente de altamar y que es el mismo de la playa este de Cancún.
- El segundo caso es en la playa este de Cancún. Es de mayor energía, es importante señalar que la escala es logarítmica y abarca dos órdenes de magnitud lo que indica que el arrecife absorbe el 99% de la energía del oleaje incidente.



- Un tercer caso que corresponde al oleaje de Puerto Morelos antes de incidir con el arrecife pero en condición de tormenta. Se hace notar que contiene diez veces más energía que el del segundo caso.

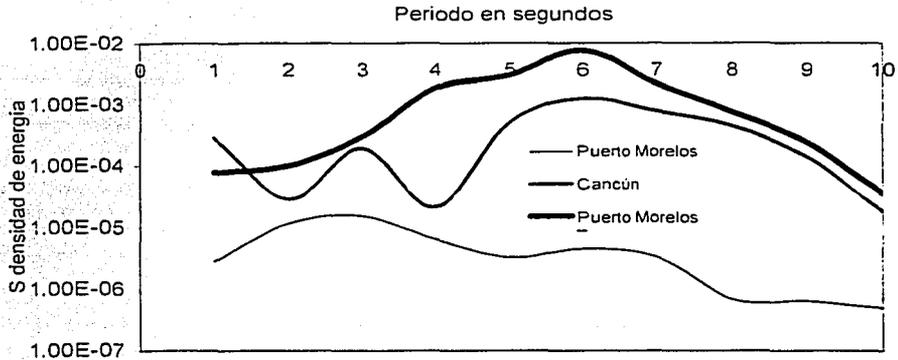


Figura 6.10 Densidad de energía en tres diferentes estados de mar

□ TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Marea.

Para los experimentos se utilizó el mareógrafo de la estación colocado en el muelle, el cual imprime una gráfica y graba los datos en registro digital. Como referencia se utilizaron los pronósticos de mareas para Puerto Juárez o Cozumel. Fue muy importante conocer la altura de la marea dado que en bajamares inferiores, principalmente en el caso de mareas vivas, el nivel dentro del estanque de medición era inferior a la altura del vertedor por lo que no se podían realizar las mediciones.

Gasto.

Se calculó el volumen vertido por unidad de tiempo. Conocidas las dimensiones del estanque se registró la altura del nivel cada 10 cm en el tanque de medición. Como la observación era con lecturas directas participaron tres observadores para corroborar los datos..

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Flujo

Para medir el flujo en el interior de la manguera se utilizó un correntímetro doppler (Starflow ultrasonic doppler bidireccional marca Unidata) con las siguientes características:

- Principio de operación: efecto Doppler (se registra el desplazamiento transversal de la frecuencia de un haz sonoro que es reflejado por las partículas en movimiento que acompañan al flujo).
- Promedia sobre un arco con cierta inclinación.
- En un líquido puro, sin partículas, el instrumento no funciona, pero en el agua de mar siempre existen partículas en suspensión.
- Detecta movimientos del plancton o de peces.
- El registro de presión puede ser utilizado para medir la marea.
- Dimensiones 29x7x25cm³.
- Registra presión, velocidad y temperatura.
- El intervalo de registro es de entre 5 segundos y una semana.

Dadas las dimensiones del instrumento, su fuente de poder se encuentra externa por lo que debe de estar conectada a una batería o celda fotoeléctrica en la superficie por medio de un cable de 15m. Este cable tiene adicionalmente un conducto hueco que permite que el sensor de presión registre la presión atmosférica.

Sus limitantes son:

- El tiempo de muestreo no puede ser inferior a 5 segundos por lo que no puede detectar oleaje.
- Debe ser instalado cerca de la orilla.

Oleaje.

Se colocan los ológrafos uno distante 50m del amplificador y otro en la base o en otro punto que se considere importante.

Calibración de los niveles:

- Se cierra el acceso de la manguera y se nivela el estanque receptor.
- Se colocan las placas a la altura requerida en el colector.
- Se destapa la manguera y se realizan las mediciones.
- Se extrae el agua del estanque receptor con una bomba de gasolina.

Gasto vs altura del oleaje.

Como el oleaje es un parámetro natural, lo que se hizo fue efectuar las mediciones en diferentes épocas del año. Los experimentos más completos se realizaron en febrero y principalmente en octubre de 1997 cuando se ya se contaba con los aparatos de medición y todos los problemas inherentes a la instalación habían sido resueltos.

Gasto vs altura del colector.

Se inició con el nivel en el interior igual a nmm y se fue elevando el francobordo hasta obtener el gasto cero. Para cada medición hubo que ajustar el nivel de referencia con el nmm puesto que el intervalo entre mediciones fue de una hora.

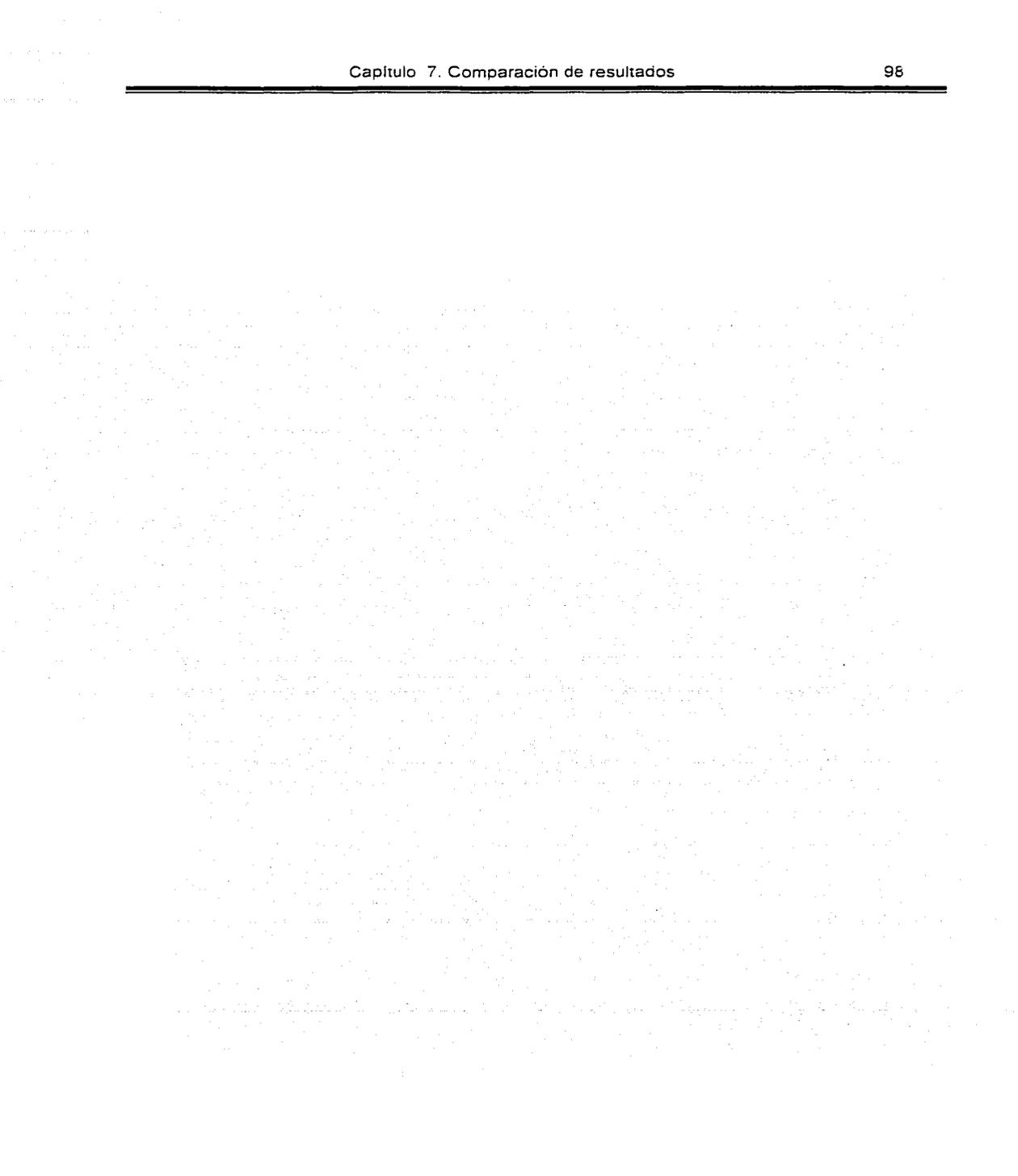
Gasto en función del uso de la rampa.

La rampa se colocó en una sola posición, correspondiente a 50°. Ésta se selló a las paredes con fibra de vidrio. Una dificultad importante en la instalación fue que se formaba un tanque hermético bajo la rampa, por lo que se instalaron tapas para su llenado y vaciado. Los experimentos fueron los mismos, variando la altura del colector.

6.4 Resultados

- Las mediciones realizadas muestran que los valores del gasto son ligeramente inferiores a los del modelo pero están dentro del rango de operación esperado.
- El parámetro que determina fundamentalmente el gasto es la altura de las olas.
- El patrón de comportamiento de las curvas de gasto contra el francobordo es similar a las obtenidas con el modelo.
- La rampa incrementa el gasto.
- El flujo en el tubo no es constante.

[The page contains extremely faint and illegible text, likely due to low contrast or scanning quality. The text is organized into several paragraphs, but the content is unreadable.]



7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analiza el efecto de cada parámetro en el gasto efectivo considerando:

- Resultados obtenidos con el modelo.
- Resultados obtenidos con el prototipo.
- Resultados citados en la literatura de mediciones experimentales.
- Resultados de aplicación de modelos matemáticos.

La discusión comprende:

- Eficiencia del sistema de bombeo en cada uno de los parámetros.
- Análisis del sistema de medición empleado.
- Efecto del sistema de bombeo en su entorno.
- Resumen de resultados.

7.1 Eficiencia del sistema

Es importante aclarar que para medir la eficiencia del sistema, en el uso de los conceptos de rebase y gasto efectivo que se hace en esta investigación estos términos no son equivalentes por la siguiente razón: el rebase corresponde al volumen que cruza el francobordo por unidad de tiempo. Y el gasto efectivo se refiere al volumen que llega al sistema de medición. Los dos difieren dado que el segundo depende de la potencia y esta de la altura del francobordo y de la fricción del sistema de conducción por lo que el gasto efectivo es menor al rebase. En otros términos, el rebase máximo ocurre con altura del vertedor nula pero el gasto efectivo máximo corresponde a la altura óptima del vertedor, que es necesariamente mayor que cero.

➤ Efecto del oleaje.

El oleaje es la fuente de energía del sistema y los parámetros fundamentales son su altura, la frecuencia y la dirección.

○ Efecto de la Altura.

Para efectos de comparación, dada la diversidad de presentaciones en la literatura se propone la siguiente fórmula para poder comparar los efectos de la altura en el gasto:

$$Q_2/Q_1 = \left(H_2/H_1 \right)^r \quad (7.1)$$

El exponente r indica la relación entre razón de gasto Q_i y razón de altura de la ola H_i .

- $r = 1$. Significa que la relación es lineal. Por ejemplo, si la altura se duplica el gasto también lo hace.
- $r > 1$. Un aumento en altura corresponde a un aumento mayor en el gasto. Por ejemplo, un aumento en el doble de altura corresponde un aumento de cuatro veces el gasto.
- $r < 1$. Un aumento en la altura corresponde a una disminución en el gasto.

La siguiente tabla muestra los resultados de la relación gasto o rebase y la altura de la ola.

Autor	Parámetro	Exponente r
Goda	Rebase	2.58
SPM (modelo matemático)	Rebase	2.48
Batjes	Rebase	2.00
Owen (modelo matemático)	Rebase	3.01
Raichlen	Rebase	1.00
Este proyecto Modelo en estanque	Gasto efectivo	0.92
Este proyecto Prototipo en el mar	Gasto efectivo	1.23

Tabla 7.1. Variación del gasto contra la altura según diversos experimentos.

- Frecuencia.

No se encontraron experimentos en que la única variable fuera la frecuencia y los demás parámetros permanecieran constantes. Teóricamente el rebase es independiente de la frecuencia porque el área bajo la curva, que corresponde al rebase, es la misma si la amplitud es constante. Se observa que normalmente las olas de menor frecuencia tienen mayor amplitud pero el efecto independiente de la frecuencia no es relevante.

- Dirección.

La dirección dominante en general es perpendicular a la playa, el prototipo se instala enfrentándolo a la dirección del oleaje dominante.

En los resultados del capítulo 5 se muestra la eficiencia del gasto útil en el modelo en el estanque de oleaje. Se observa que lógicamente para una incidencia normal se obtiene el máximo pero en el mar el oleaje es irregular y

no hay una dirección bien definida por lo que seguramente habrá un error en la dirección óptima de las paredes. El decrecimiento de la curva es muy suave por lo que un error de 20 grados implica una pérdida de solamente 20%.

Las conclusiones son:

- La altura de la ola es el factor más importante para el funcionamiento del sistema. Este parámetro está determinado por el estado de mar.
- En cuanto a la dirección una desviación de $\pm 20^\circ$ implica una pérdida máxima de 20% y a una desviación de $\pm 10^\circ$ la pérdida será de 5%.

➤ Efecto de las paredes convergentes.

Este es uno de los temas esenciales de esta tesis y ha sido estudiado con mayor profundidad.

Kurbune y Osato (1976) proponen una ecuación empírica para obtener el factor de amplificación de la altura de la ola en el interior de dos paredes de longitud infinita convergentes para profundidad constante. Este modelo considera que hay una acumulación de agua en donde convergen las paredes de acuerdo con la siguiente relación:

$$\frac{180^\circ}{\text{ángulo}} = \frac{\text{altura de la ola en el fondo}}{\text{altura de la ola en la entrada}} \quad (7.2)$$

El perfil de la ola a lo largo de la pared se obtiene calculando el punto de amplificación mínima. El decrecimiento de la altura de la ola es lineal del fondo hasta este punto y a partir de ahí se considera un efecto virtual de difracción.

La distancia para la mínima amplificación se calcula con la fórmula:

$$\frac{x_{\min}}{L} = 0.16 e^{1.05 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

$$x_{\min}/L = 0.16 \exp[1.05 \tan(\alpha/2)] \quad (7.3)$$

Donde :

L = Longitud de las paredes

x_{\min} = Distancia mínima.

α = Ángulo de apertura de las paredes.

En el caso del modelo y del prototipo el decrecimiento de la amplitud cae en la primera parte que es lineal.

Con los datos del modelo, del prototipo y de este modelo matemático se obtiene la gráfica de la figura 7.1.

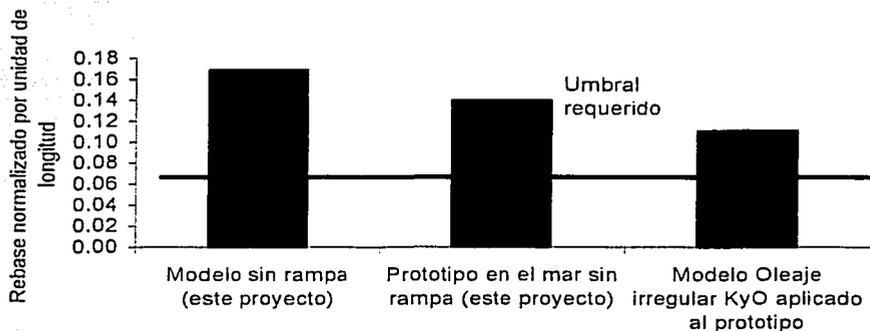


Figura 7.1 Efecto de las paredes en el rebase para diversos casos

En las gráficas se indica un valor de gasto normalizado por unidad de longitud de 0.063 correspondiente a medio metro cúbico por segundo. Este valor indica aproximadamente una cota inferior, por lo que valores menores denotan ineficiencia en el sistema.

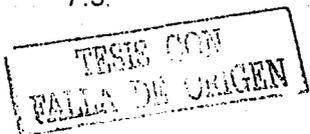
Se observa que la presencia de las paredes es clave ya que proporciona un gasto superior a esta cota mínima.

- o Abertura de las paredes.

En el modelo se realizó un experimento de gasto útil en relación a la abertura de las paredes. En el prototipo no se pudo realizar este experimento porque cada variante implicaba modificación sustancial del prototipo. En la tabla 7.2 se explica el comportamiento en cada rango.

- o Longitud de las paredes.

El único experimento con que se cuenta fue el que realizamos en el estanque con oleaje regular el comportamiento del gasto útil es relativamente complejo. Un análisis de cada sección se muestra en la tabla 7.3.



Angulo da apertura	Comportamiento
<20°	Hay poca ganancia en el gasto.
45°	Un máximo que para oleaje irregular será muy difícil de ubicar.
Entre 20° y 60°	Un rango de funcionamiento óptimo con 10% de pérdidas.
Entre 60° y 120°	Disminuye gradualmente la eficiencia hasta un 70%.

Tabla 7.2 Comportamiento del gasto en función del ángulo de abertura de las paredes

Rango	Comportamiento
0-0.4 veces la longitud de onda(λ).	El gasto es crítico. Se debe a que las paredes son tan cortas que no influyen. Hay que estar fuera de este rango.
0.4 λ . 1.7 λ .	Hay dos máximos probablemente relacionados con resonancia. Si se obtiene en la realidad será una coincidencia favorable pero en régimen de oleaje irregular no conviene buscar estos puntos porque probablemente no existan.
>0.4 λ .	Hay muy poca variación en el gasto y éste aumenta levemente con la longitud de las paredes. Así que no es necesario buscar un desarrollo muy grande porque aumenta mucho en el costo y rinde poco. Se puede seleccionar cualquier punto en este rango y determinarlo por la rampa más eficiente.

Tabla 7.3 Comportamiento del gasto en función de la longitud de onda

Se promediaron los datos de las observaciones en el modelo con oleaje regular, dando un valor normalizado del rebase de 0.168.

Se promediaron los datos del rebase en el prototipo sin la rampa con oleaje irregular, el valor normalizado del rebase es de 0.1394.

Finalmente, como referencia se calculó el rebase teórico con el modelo de Kubune y Osato(1976). Éste se aplicó a los parámetros del prototipo y se evaluó el volumen en que sobrepasaba la altura del francobordo, calculando la forma del rebase (que es lineal dado que la x_{min} es menor a una longitud de onda).

Lo importante de estos resultados, aún considerando el valor más pequeño es que sobrepasan por más del doble al umbral requerido que se ha considerado como referencia.

- Ángulo entre las paredes.

Según la teoría de rayos las ondas se reflejarán en las paredes de acuerdo con la ley de reflexión de la óptica geométrica se presentan tres casos:

- Para ángulos pequeños habrán reflexiones alternadas en las paredes hacia el interior.
- Para cierto ángulo crítico de 45° (respecto a la bisectriz del amplificador, lo que corresponde a una abertura de 90° de las paredes) se producirá la reflexión total y la ola ya no penetrará hacia el interior.
- Para ángulos mayores a 45° las olas se reflejarán hacia el exterior.

- Efecto de la rampa.

Para este tema se hace referencia solo a la literatura dado que no realizamos experimentos independientes de la rampa sin paredes.

En la figura 7.2 se presentan algunos resultados. La cuestión fundamental es si la rampa es útil o no y cuanto aporta.

Se promediaron los datos de las observaciones en el modelo con oleaje regular.

A excepción del primer valor que es excepcionalmente elevado SPM(1984) los resultados son aproximadamente del mismo orden de magnitud¹.

En el cuarto caso, que corresponde a mediciones en rampa de bloques es muy claro el efecto de la fricción. Los demás casos se refieren a rampas lisas e impermeables.

Un valor promedio aproximado sería del orden de 0.03 del rebase normalizado. Esto equivale a la mitad del rebase requerido, o sea que la rampa sola no podría suministrar el gasto total.

Para evaluar en que porcentaje es superior una rampa a una pared vertical se realizó primero un ejercicio con el modelo numérico de Wurjanto y Kobayashi(1991). En estos cálculos los datos corresponden al oleaje de

¹ Este valor reportado por el Shore Protection Manual ha sido analizado por otros autores y lo consideran muy alto comparado con datos reales.

Para evaluar en que porcentaje es superior una rampa a una pared vertical se realizó primero un ejercicio con el modelo numérico de Wurjanto y Kobayashi(1991). En estos cálculos los datos corresponden al oleaje de Puerto Morelos y con la profundidad real se obtuvo el rebase para una rampa con diferentes inclinaciones sin francobordo. Es importante apuntar que este modelo tiene la limitación de no poder resolver paredes verticales la máxima pendiente calculada fue de 89°. Ocasionalmente el programa presenta inestabilidades para ciertos valores, por lo que se hicieron cálculos en la vecindad de estos.

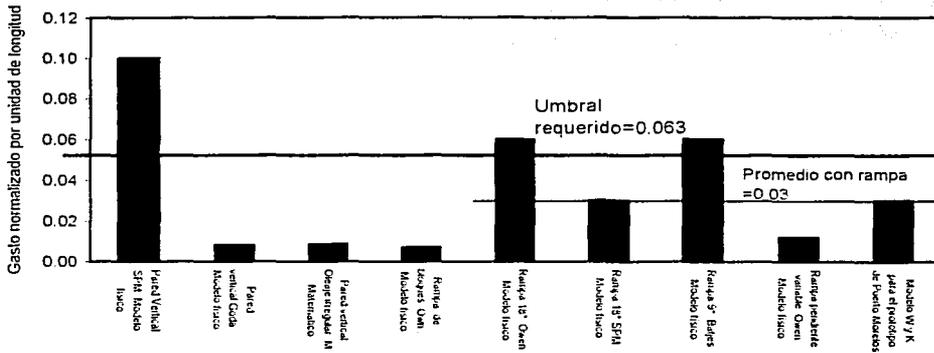


Figura 7.2 Efecto de la rampa en el rebase para diversos experimentos

Existen también unas fórmulas empíricas de Owen (Herbich,1990) que funcionan para pendientes de 1:5 a 1:1. Con éste modelo también se realizó un cálculo para el oleaje de Puerto Morelos. Lo importante de los resultados es el perfil de la curva. En la figura 7.3 se muestran las formas de la curva en función del ángulo para dos modelos.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

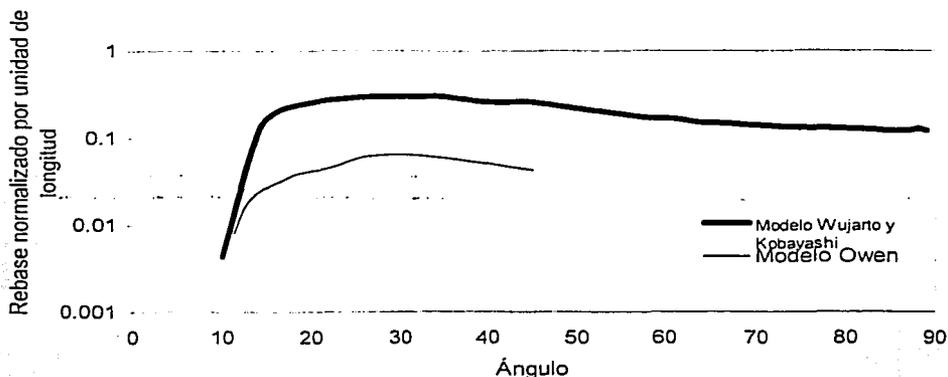


Figura 7.3 Rebase en función del ángulo de inclinación de la rampa aplicando dos modelos matemáticos

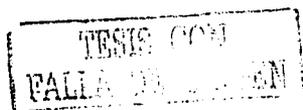
Es importante señalar que la escala vertical es logarítmica. De los valores calculados en el modelo se obtuvo, para el modelo W & K, un máximo en 35° de 0.2994 del valor normalizado, y para 89° un valor normalizado de 0.120 lo que corresponde a una relación de 2.4 favorable del efecto de la rampa.

- o Inclinación de la rampa.

En la tabla 7.4 se analiza el comportamiento del rebase en función de la rampa.

Rango	Comportamiento
<15°	Muy ineficiente.
Máximo 35° para el modelo WK y 28° para el modelo de Owen.	El punto máximo no está bien definido, los experimentos en el estanque mostraron que este máximo tiende a moverse según la altura de las olas. Una desviación de 10° implica una pérdida del 18%. Y una de 15° una pérdida de 31%.
De 20° a 55°	Zona óptima de funcionamiento.
De 55° a 90°	Tiende a disminuir

Tabla 7.4 Comportamiento de la rampa en función de la inclinación



Las conclusiones más importantes de este experimento con rampa fueron:

- La rampa sí incrementa el rebase por un factor del orden de 2.4 en relación a una pared vertical.
 - La rampa sola no satisface los requerimientos del sistema de bombeo, aporta aproximadamente la mitad.
 - El rango de funcionamiento óptimo es de 23° a 53° con una pérdida máxima de $<31\%$.
- Efecto combinado de paredes y rampa.

Este es el tema central de esta tesis, por lo que los aportes son básicamente resultados de nuestros experimentos.

La pregunta fundamental es cómo se combinan los efectos de rampa y paredes cuando trabajan en conjunto.

En la figura 7.5 se describe el rebase con mediciones en el modelo en el estanque de oleaje con rampa, el de las mediciones con el prototipo en Puerto Morelos y el de los cálculos del modelo W&K para una rampa sin paredes que la limiten.

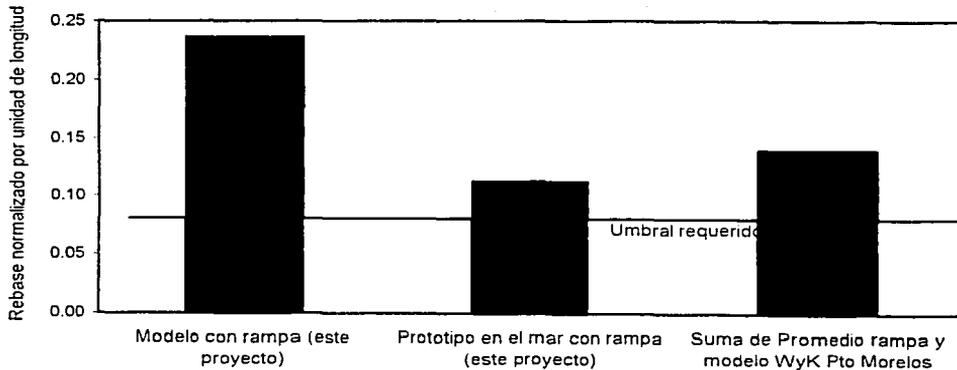


Figura 7.4 Efecto combinado de paredes y rampa en modelo, prototipo y modelo matemático

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se muestran tres valores:

- El primero es el correspondiente a la rampa en el modelo en el estanque de olas con oleaje regular.
- El segundo al valor promedio en el prototipo en el mar.
- El tercero a las referencias, del modelo W y K para paredes convergentes.

El total excede por más del doble al valor requerido lo que da un buen margen al considerar las pérdidas.

RESUMEN

- o Los aportes de las paredes y las pérdidas son aditivos en el caso de que trabajen conjuntamente.
- o El efecto de las paredes es aproximadamente el triple del de la rampa.
- o El aporte conjunto es de dos veces la cota mínima de referencia.

➤ Efecto del nivel del mar. Marea y sobreelevación por viento.

La marea afecta directamente el nivel del mar y por consiguiente la altura del vertedor o francobordo, que es uno de los parámetros fundamentales del sistema.

El caso ideal es que no exista la marea o que su rango sea mucho menor al del oleaje.

No es conveniente que el francobordo sea rebasado por la elevación causada por la marea porque podría ocurrir una inversión en el sentido del flujo en caso de que la marea descienda. Por otro lado si la altura del francobordo es mayor que cierto valor máximo ya no hay gasto porque la ola no alcanza a rebasar.

Dado que la eficiencia del rebase en relación al francobordo no es lineal sino que su comportamiento es similar a una parábola, con una altura óptima, y que la marea durante un día presenta dos máximos y dos mínimos de diferente amplitud, la altura del francobordo es por tanto la diferencia entre el francobordo inicial (cercano al óptimo) y el nmm.

➤ Efecto del viento.

El viento, cuando sopla hacia la costa causa una elevación "*Wind Setup*" debido al arrastre de la capa superficial que puede ser del orden de metros en el caso de huracanes.

Existe un método numérico para calcular esta sobreelevación que depende esencialmente de la velocidad del viento (normal a la costa), el *Fetch* (distancia sobre la que sopla el viento con velocidad aproximadamente constante) y la profundidad. Por medio de gráficas se calcula el periodo y altura de la ola, y por un método de aproximaciones por diferencias finitas se va calculando el incremento en el nmm causado por el viento.

Un auxiliar muy útil para conocer el efecto del viento en una zona son las mediciones del nivel del mar en los mareógrafos. Con estos datos se puede deducir el aporte del viento en el nivel del mar. Lo deseable es que la serie de datos sea de varios años. En las tablas de pronósticos se anotan generalmente el nivel máximo medido y el nivel de máxima elevación causada por la marea. Debido al viento la altura máxima registrada es del orden de cuatro veces el nivel máximo de la marea según las tablas de Predicción de Mareas (1984). En resumen se tienen los siguientes puntos:

- El efecto de la marea es oscilatorio y generalmente tiene dos máximos y dos mínimos por día. Si el rango de marea es grande se reduce la eficiencia del sistema de bombeo; lo deseable es que sea mucho menor que la altura de las olas.
- El nivel del mar puede cambiar por efecto del viento su efecto puede ser del orden de cuatro veces la marea. Es muy difícil evaluar su efecto dado que una leve sobreelevación aumenta el rebase pero si excede al francobordo anula el funcionamiento del sistema.

➤ Altura del francobordo.

En los experimentos realizados por diferentes autores el rebase depende inversamente del francobordo. Por ejemplo, Herbich(1990) publica resultados en los que el rebase aumenta conforme disminuye el francobordo, lo que es un resultado lógico, y el rebase será máximo cuando el francobordo sea cero. El decrecimiento puede ajustarse aproximadamente con una función de segundo grado de acuerdo con el modelo de Battjes(Herbich,1990), con una expresión del tipo:

$$R_b = \text{función}(AF)$$

donde

R_b es el rebase.

A es una constante.

F es la altura del francobordo.

Por otro lado, la conducción del volumen que rebasó el francobordo depende de la altura (según la fórmula de Darcy-Weichbach para flujo uniforme) tanto si es conducto cerrado:

$$Q = Area \sqrt{\frac{2gh}{fL/D}} \quad (7.4)$$

donde:

Q es el gasto.

g aceleración de la gravedad.

h altura.

f factor de fricción del conducto.

L longitud del conducto.

D diámetro del conducto.

En el caso de un canal abierto el gasto se calcula con la fórmula de Manning (Para flujo uniforme):

$$Q = \frac{area}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (7.5)$$

donde

S es la pendiente $S=h/L$.

R el radio hidráulico que es el área entre el perímetro mojado.

n coeficiente de fricción de Manning del revestimiento del canal.

En ambos casos el gasto es función de la raíz de la altura que corresponde al francobordo. EL perfil es el de una parábola que se abre en la dirección positiva del eje x y con vértice en el origen.

Los dos efectos combinados corresponden al producto de las dos funciones, que resultan en una parábola abierta en la dirección negativa del eje vertical con un máximo. Los resultados del modelo indican una asimetría en la curva con pendiente mayor en el descenso que corresponde a mayor altura del francobordo por lo que hay que tratar de evitar esa zona.

Para la altura óptima hay que referirse a los experimentos, el valor preciso del máximo no esta bien definido. Se mencionan varios experimentos y el rango del francobordo normalizado con la altura de la ola. En la tabla 7.6 se

comentan los diferentes experimentos relacionados con la altura del francobordo.

Experimento	Comentarios	Rango de altura del francobordo de mayor eficiencia (normalizado). <i>F/H.</i>
Modelo sin rampa.		3.2-3.5
Modelo sin rampa. Restricción del conducto.	Con el conducto muy restringido el nivel en el colector se estabiliza.	4-5
Prototipo. Sin rampa.	Aumenta al aumentar la altura de las olas.	0.3-0.7 0.7-1.4
Prototipo. Con rampa.	No está muy definido.	0.9-1.7

Tabla 7.5 .Efectos del francobordo en los experimentos.

Pendiente del francobordo.

Existen dos opciones:

- que la rampa tenga la altura del francobordo y la ola vierta directamente después de la rampa.
- Que el francobordo sea una pequeña pared vertical al final de la rampa.

Para definir este punto nos remitimos a los experimentos de Goda (2000) en los que se calcula el rebase en función de la altura del francobordo incluyendo valores negativos. En todos los casos se presenta un máximo pronunciado en el rango entre 1.5 y 2 de la razón entre la profundidad del francobordo y la altura de la ola.

El francobordo afecta el gasto en los siguientes aspectos:

- La efectividad de los efectos de rebase y el flujo que se produce posterior al francobordo es una curva con un máximo, y ascenso más lento que el descenso por lo que hay que inclinarse a menores valores.
- El valor del máximo se desplaza hacia mayores valores de francobordo al aumentar la altura de las olas.
- Eliminando casos especiales se sugiere un valor entre $1.25H$ y $1.5H$ para la altura del francobordo.
- Respecto a la altura del francobordo la forma óptima es que tenga una profundidad entre 1.5 y 2 de la altura de la ola.

➤ Otros efectos menores.

Forma de las paredes.

De experimentos cualitativos en un canal de olas se detectó que la forma parabólica es ligeramente más eficiente. No se han realizado las mediciones precisas para cuantificar el aumento en la eficiencia con exactitud. Kofoed (2000) realizó experimentos con paredes curvas y los resultados son similares a los de paredes rectas.

La compañía Energetech de Australia (www.energetech.com.au) construyó un prototipo para la obtención de energía eléctrica con paredes parabólicas argumentando mayor eficiencia.

➤ Conducción por tubería submarina.

Para medir el flujo en la tubería se colocó un ológrafo en la entrada y un correntómetro Doppler en el interior. Observándose que el nivel oscila en forma irregular.

Es posible que al disminuir el área de entrada o el diámetro de la tubería se obtenga un flujo más estable pero también habrá dos inconvenientes importantes:

- El gasto puede disminuir porque el área transversal es menor.
- El mantenimiento de la tubería es complicado. Pequeños obstáculos como piedras, que se encontraron en su interior o la acumulación de pequeñas burbujas de aire pueden formar un tapón que puede obstruir el flujo.

Durante el tiempo de experimentación (1996 a 1998) el control de la tubería submarina representó uno de los problemas experimentales más difíciles de resolver. Previamente a las mediciones era necesario efectuar procedimientos de mantenimiento, limpieza interior, etc.

Uno de los problemas más complicados en una tubería marina es el crecimiento de organismos en su interior. Esto no se presentó por las condiciones de baja productividad de esta zona del caribe. No obstante, en instalaciones en aguas de alta productividad por ejemplo en la costa del Pacífico, se puede incrementar la fricción interna o pueden bloquear totalmente el interior. Las maniobras para mantener limpia la tubería pueden llegar a ser costosas, por lo que una conclusión importante de esta experiencia es reemplazar en lo posible la tubería submarina por un canal abierto. Esto tiene dos ventajas notables:

- a) La fricción en un canal es mucho menor de la de un conducto a presión.

b) El mantenimiento de un canal es mucho más sencillo y económico.

La tubería submarina es una opción para la conducción del agua del amplificador hacia la laguna.

El flujo es no es constante.

Los problemas que se encontraron durante las pruebas en una tubería de tres secciones de 20 m cada una y 8 pulgadas de diámetro fueron:

- Es muy complicada su instalación.
- El oleaje fuerte las desplazaba de su sitio.
- Los coples entre dos secciones pueden presentar fugas.
- Es común que se introduzca arena en el interior y que afecte el flujo.
- Durante la operación se introducen burbujas que pueden llegar a formar un tapón de aire.
- No se formaron incrustaciones de organismos en el interior pese a que han permanecido bajo el agua durante más de dos años.
- El sistema de limpieza mediante un "piggy" es el más efectivo para la limpieza.

Se sugiere utilizar un canal abierto por su facilidad en el mantenimiento.

7.2 Análisis del sistema de medición

En la tabla 7.6 se concentran los diversos aspectos de los sistemas de medición utilizados como ventajas, y tiempos de preparación del equipo y de medición.

Parámetro.	Método.	Ventajas.	Desventajas	Tiempo de preparación	Tiempo de medición
Gasto.	Medida del volumen vertido.	Muy confiable.	Instalación complicada por el manto freático.	25'	5'
Flujo en la tubería.	Con registro automático (correntímetro Doppler).	Fácil de instalar.	Resultados difíciles de interpretar y correlacionar	15 minutos al día	Un dato cada 2"
Olas.	Ológrafo automático.	Muy preciso y confiable.	Una instalación segura en el mar es complicada. Software ineficiente en el vaciado de datos.	Programación 30'. Instalación 30'. Vaciado de datos 5 horas.	1 dato cada 0.25".
Olas.	Sensores de nivel de capacitancia.	No son confiables.	Muy frágiles Calibración.	5'	1"
Olas.	Visual (se cuenta el número de olas y su altura).	No es muy preciso. En primera aproximación los resultados son correctos.	Dependen del observador.	5'	1'
Nivel en el colector.	Con ológrafo.	Muy confiable y preciso.	Instalación peligrosa para el operador.	Programación 30'.	Un dato cada 0.25"
Nivel del mar.	Mareógrafo Instalación permanente.	Confiable y preciso.	Ninguna.	Funciona en forma continua.	Continuo.

Tabla 7.6. Características de los sistemas de medición empleados.

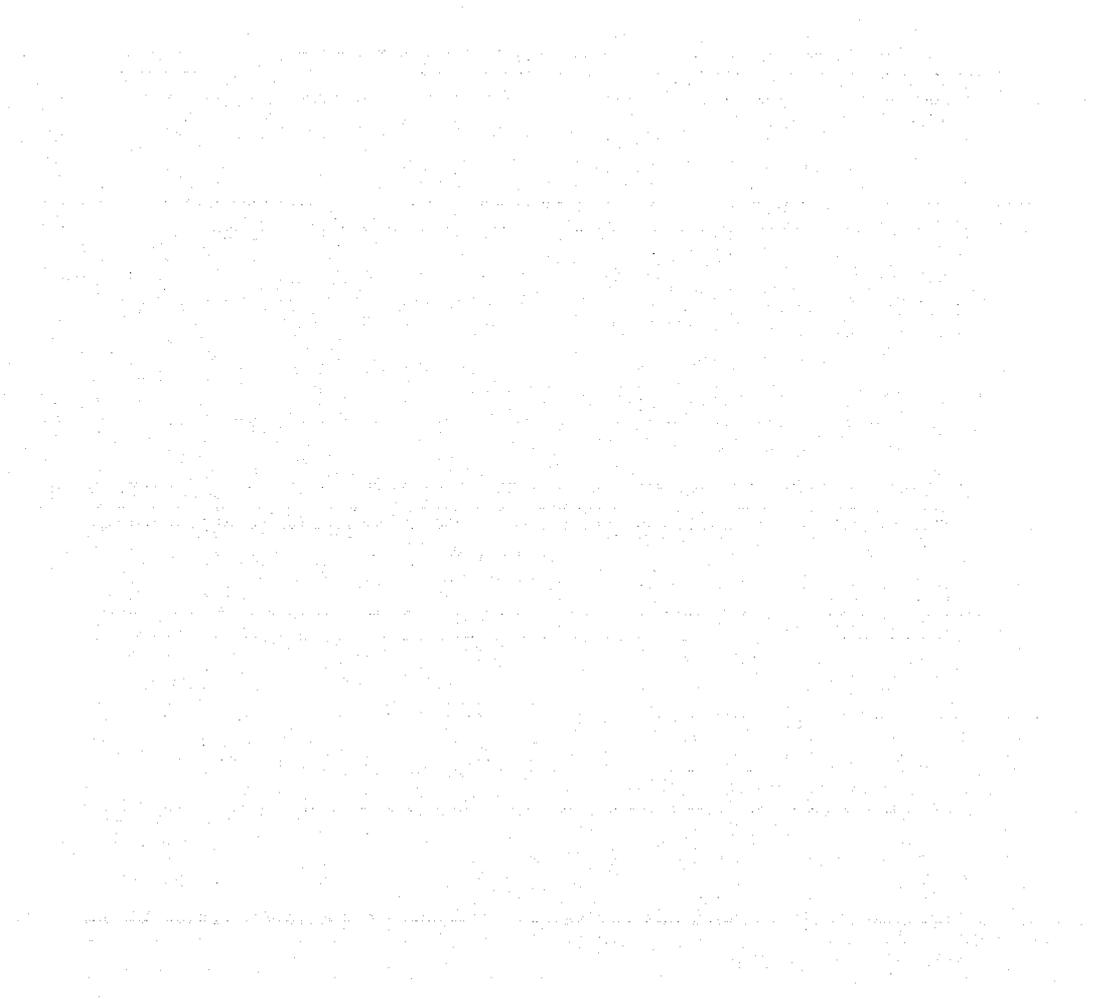
Los puntos mas importantes referentes a los sistemas de medición fueron:

- La valoración del gasto midiendo el volumen vertido por unidad de tiempo es confiable.
- La medición de las olas con ológrafos automáticos es precisa y confiable, pero la instalación segura en el mar es complicada.
- La medición del oleaje con sensores de capacitancia no fue adecuada.
- Un mareógrafo fijo es muy seguro, útil y confiable.

7.3 Resumen de resultados

Parámetros más significativos	Oleaje (no hay control pero hay que conocer bien el régimen).	Altura es el más importante.
		Frecuencia: El rebase disminuye con su aumento.
		Dirección un error de 20° afecta 20%.
	Paredes	Aportan el 75% del gasto.
		Abertura: El rango óptimo es (20°-60°) error 10%.
		Longitud: Que exceda 0.4 λ.
		Forma: La parabólica es ligeramente más eficiente.
Rampa	Contribuye con el 25% del gasto.	
	Pendiente óptima (20°-55°).	
Parámetros de diseño	Nivel	NMM si el rango de marea no excede a la altura de la ola.
	Francobordo	Altura sobre NMM 1.25 a 1.5 veces la altura de la ola.
		Profundidad entre 1.5 y 2 veces la altura de la ola.
Conducción	Canal abierto es preferible a tubería submarina	
Pérdidas	Pendiente Rampa	30%
	Marea	20%
	Dirección del oleaje incidente	20%
	Abertura paredes	10%
	Efecto del viento	Variable pero puede ser desde favorable o bloquear el sistema.
	TOTAL (sin viento) Por lo que hay que sobreestimar el gasto útil en 80%.	80%

Tabla 7.7. resumen los resultados más significativos



8 MODELO INTEGRAL DE DISEÑO

8.1 Introducción

En este capítulo, que es el fundamental en la tesis, se agrupan los elementos descritos en los capítulos anteriores para proporcionar un esquema del modelo que explica el funcionamiento del sistema. El modelo se valida con los datos obtenidos en laboratorio y en campo.

El esquema se describe en la figura 8.1.

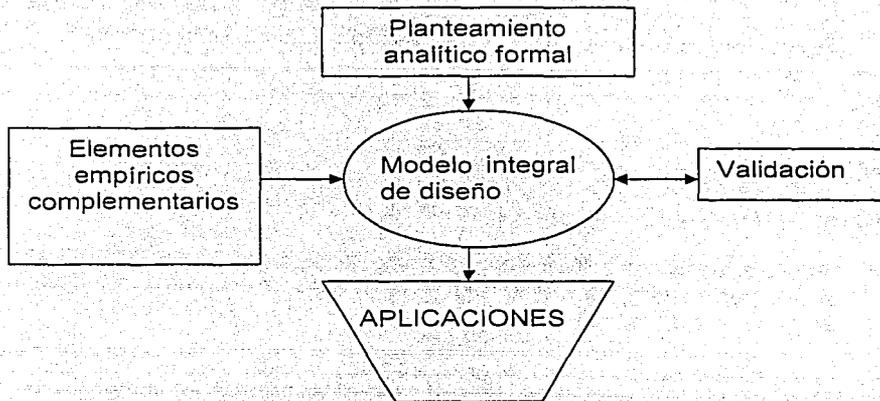


Figura 8.1 Esquema conceptual del modelo de diseño del sistema de bombeo.

- Planteamiento formal:

Está fundamentado en el método analítico descrito en el capítulo 4 que esta basado en la ecuación de continuidad y en su aplicación a un canal con paredes convergentes en el que inciden ondas largas, de aquí se infiere el factor de amplificación y la relación entre los elementos estructurales en relación con el oleaje incidente.

- Elementos empíricos complementarios:

a) De experimentos realizados por diversos investigadores y los nuestros se infiere que la amplificación tiene una cota superior de un factor de 3 que aunque se puede exceder bajo ciertas circunstancias este valor es un tope validado por muchos experimentos.

- b) En experimentos Recientes (Kofoed,2000) se muestra que existe una relación empírica sugerida por Van der Jansen en 1995 del tipo exponencial decreciente entre el gasto y el francobordo del tipo:

$$Q = A \exp^{-BF} \quad (8.1)$$

donde

A y B son coeficientes experimentales.
Q el gasto.

- c) El oleaje no siempre es normal, existen diversas fórmulas empíricas para describir su efecto sobre el rebase. Sobre la base a nuestros propios experimentos en laboratorio proponemos la fórmula siguiente:

$$Q = Q_0 \cos^2 \theta \quad (8.2)$$

donde

Q_0 es el gasto con incidencia normal y θ el ángulo incidente.

- d) Otro elemento que Kofoed encontró en sus experimentos en rampa fue que la forma elíptica del vertedor aumentaba el rendimiento del rebase en un 18% por lo que se sugiere la aplicar la forma elíptica al vertedor.

El modelo en el laboratorio tuvo la gran ventaja de que era factible determinar el efecto de un parámetro particular dejando fijos los demás, incluso los parámetros del oleaje como se describe en el capítulo 5.

En el prototipo en el mar la flexibilidad para realizar experimentos es muy limitada por las dificultades inherentes del trabajo en el campo, donde el oleaje estaba dado por condiciones naturales. La gran ventaja de estos experimentos fue el conocer las dificultades reales y determinar la factibilidad de aplicación del sistema.

Las secuencia de las utilizadas en el modelo es la siguiente:

Datos de entrada:

Para el oleaje: altura, periodo y dirección. $H_{rms}, T_{rms}, \varphi$.

Para el nivel del mar: profundidad en la entrada del amplificador d_0 .

Para el conducto de salida: radio, longitud, coeficiente fricción: $radio, L_c, f$.

Para el amplificador:: ángulo paredes, longitud de las paredes, altura del francobordo, ancho del francobordo, abertura de la boca. α, L_p, F, b, b_0 .

El proceso de validación es el siguiente:

las longitudes total L y posición del vertedor x se obtienen con:

$$x = \frac{b/2}{\tan \frac{\alpha}{2}} \quad L = \frac{b_0/2}{\tan \frac{\alpha}{2}}$$

Se obtiene el ángulo de la rampa, si es el caso con la fórmula:

$$\beta = \text{ang tan} \left(\frac{d_0}{L-x} \right)$$

La amplificación se calcula mediante las ecuaciones del modelo para fondo constante y para rampa 4.34 y 4.35:

$$\eta = a \frac{J_n(\xi x)}{J_n(\xi L)} \cos(\omega t + \varepsilon) \quad \eta = a \frac{J_1(2\xi\sqrt{Lx})}{J_1(2\xi L)} \sqrt{\frac{L}{x}} \cos(\omega t + \varepsilon)$$

donde

$$\xi = \frac{2\pi}{T\sqrt{gd_0}}$$

η la altura de la ola.

J_n es la función bessel de orden n .

ε es la fase.

$a' = a \frac{J_n(\xi x)}{J_n(\xi L)}$ es la amplitud amplificada.

El rebase se obtiene mediante la ecuación 8.6 que se describirá mas adelante en este capítulo:

$$Q = \frac{2a'b}{T} \sqrt{\frac{g}{d_0}} \left[a' \left(t_1 - \frac{T}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \cos \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) - \frac{T}{2\pi} F \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \right) \right]$$

Con el área del colector se puede calcular la altura de fricción que es la carga hidráulica aprovechable. Una vez conocida la altura de fricción se calcula la velocidad en la tubería con la fórmula de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L U^2}{D 2g}$$

donde

f es el coeficiente de fricción.

L la longitud del conducto.

D el diámetro del conducto.

h_f la altura de fricción.

Con esta fórmula se calcula la velocidad de flujo, que multiplicada con el área del conducto da el gasto, y éste se compara con los datos reales.

Por último se propone el uso de un canal abierto para el transporte del caudal dado que la tubería sumergida presenta muchos problemas de instalación y de mantenimiento. El diseño del canal se calcula en base a la fórmula de Manning.

El modelo en el laboratorio tuvo la gran ventaja de que era factible determinar el efecto de un parámetro dejando fijos los demás incluso los parámetros del oleaje como se describe en el capítulo 5.

En el prototipo en el mar la flexibilidad para realizar experimentos es muy limitada por las dificultades inherentes del trabajo en el campo donde el oleaje estaba dado por condiciones naturales. La gran ventaja de estos experimentos fue el conocer las dificultades reales y determinar la factibilidad de aplicación del sistema.

8.2 Validación en modelo en laboratorio

En este modelo se realizaron diversas pruebas con el modelo a escala de dimensiones aproximadas de 1m². Los experimentos efectuados fueron del gasto en función de:

- Altura del francobordo .
- Ángulo de apertura de las paredes.
- Longitud de las paredes.
- Ángulo de incidencia del oleaje.
- Longitud del conducto.

8.2.1 Variación del gasto en relación con la altura del francobordo.

Las figuras 8.2 al 8.5 muestran los valores de los datos de gasto vs el oleaje.

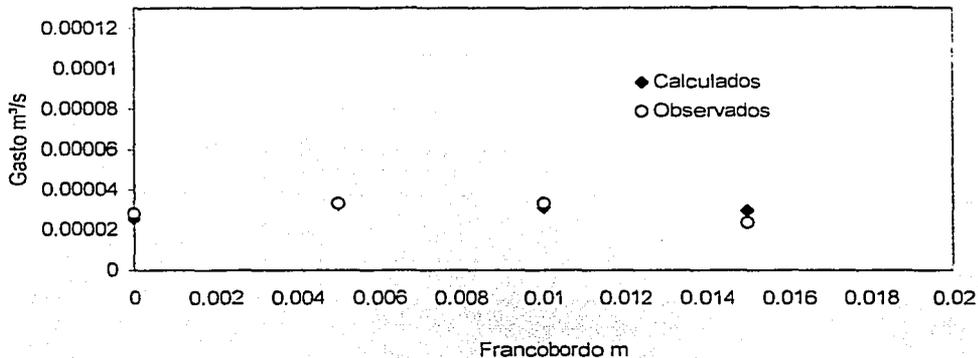


Figura 8.2 Gasto para ola de 0.1m de altura

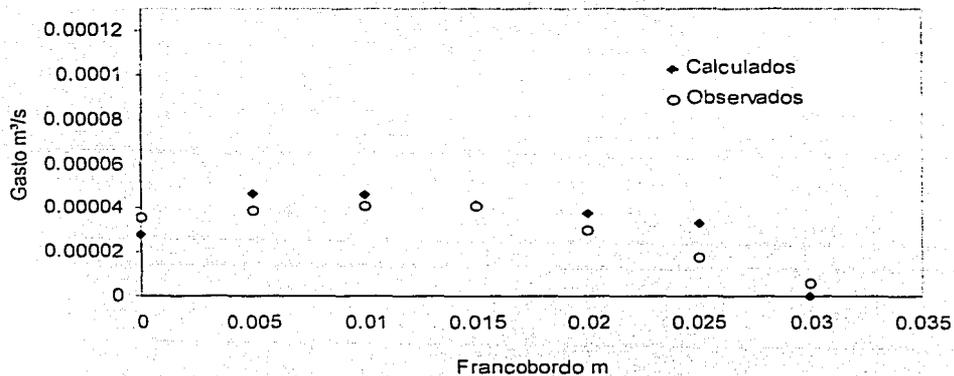


Figura 8.3 Gasto para ola de 0.02m de altura

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

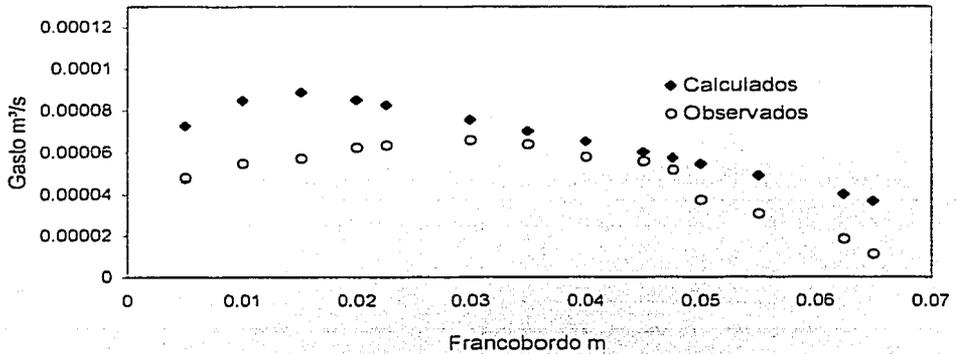


Figura 8.4 Gasto para ola de 0.04m de altura.

Modelo 1:50. Variación francobordo vs gasto. Altura de la ola 0.048m

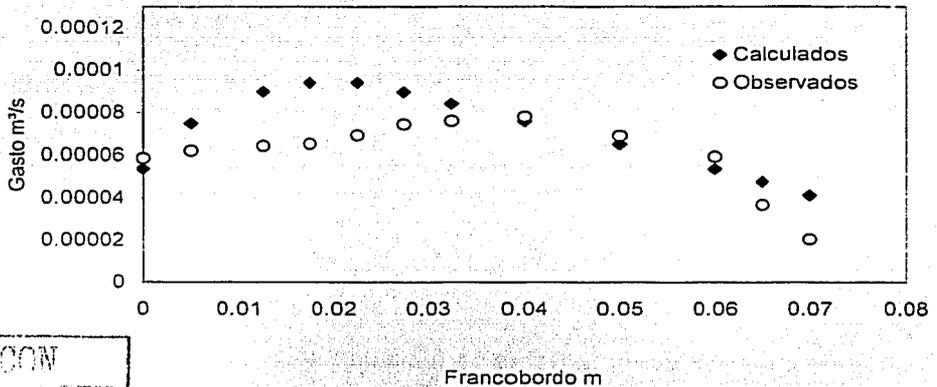


Figura 8.5 Gasto para ola de 0.048 m de altura.

TESIS CON
VALIA DE ORIGEN

8.2.2 Ángulo de abertura de las paredes.

En este experimento el fenómeno determinante es la difracción. Si no existiese se presentaría la reflexión total a partir de un ángulo de abertura de 90°. Las

mediciones confirman que se presenta a difracción aunque disminuye el gasto para ángulos mayores a 45° .

La figura 8.6 muestra la comparación de datos observados y calculados por el método analítico.

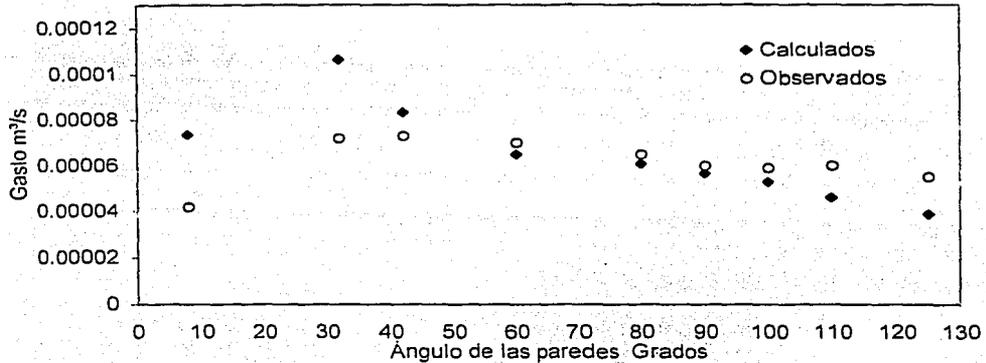


Figura 8.6 Gasto vs ángulo de las paredes

8.2.3 Longitud de las paredes.

Dada la naturaleza de la solución analítica es factible la presencia de regiones de resonancia, y por las dimensiones del experimento es posible observar que se presentan varios máximos que las fórmulas predicen también. En la figura 8.7 se muestra el comportamiento de los datos observados y calculados. Es notable la presencia aparente de varios máximos que, como se determina por el modelo analítico, sí pueden existir.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

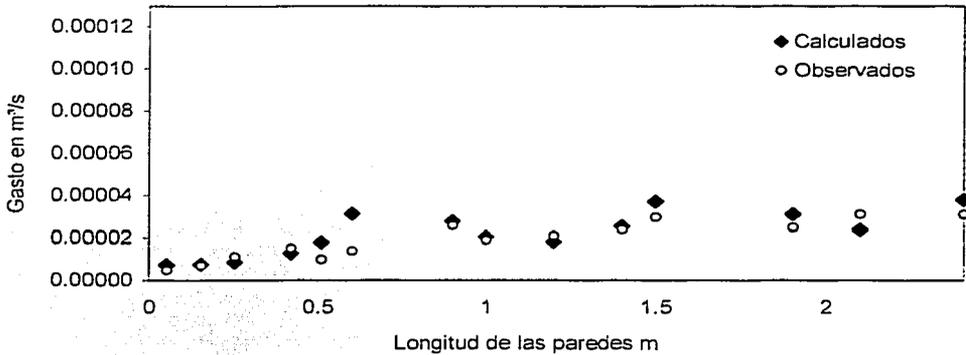


Figura 8.7 Gasto vs longitud de las paredes

8.2.4 Ángulo de incidencia del oleaje.

Herbich(1990) muestra conclusiones experimentales de "run-up" de varios autores, nuestros datos parecen mostrar una correlación más precisa con el coseno cuadrado del ángulo que es parecida a esos resultados experimentales. En la figura 8.8 muestra la relación datos observados y calculados.

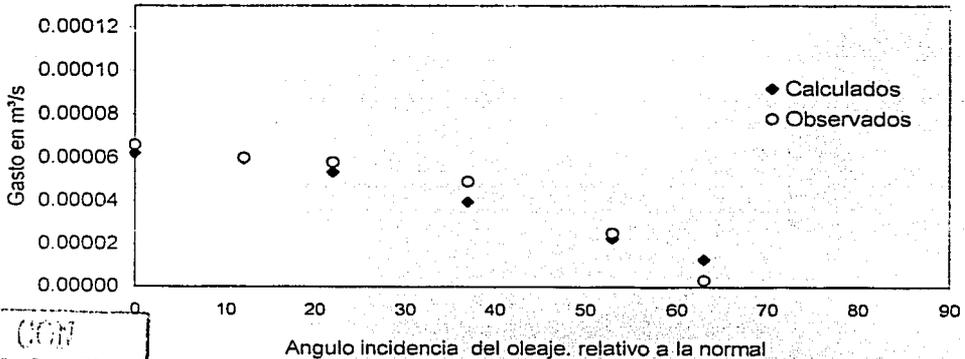


Figura 8.8 Gasto contra ángulo de incidencia del oleaje

ENSIO CON
FALLA DE ORIGEN

8.2.5 Longitud del conducto.

Para hacer este experimento se fue cortando el conducto. Se aplica la fórmula de Darcy-Weisbach para movimiento en conductos a presión.

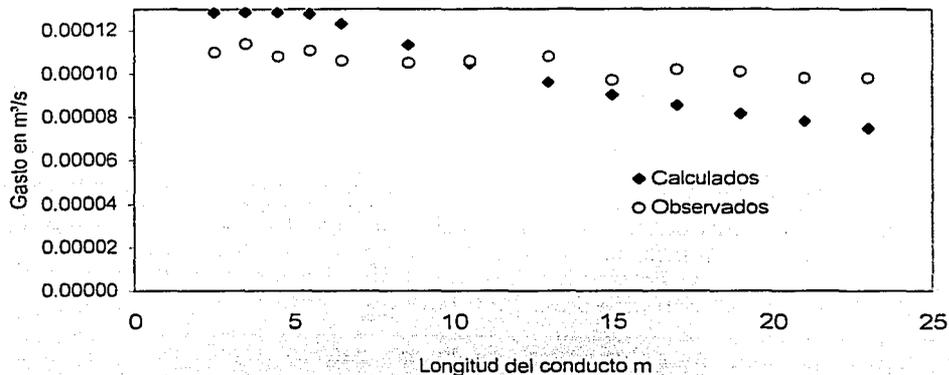
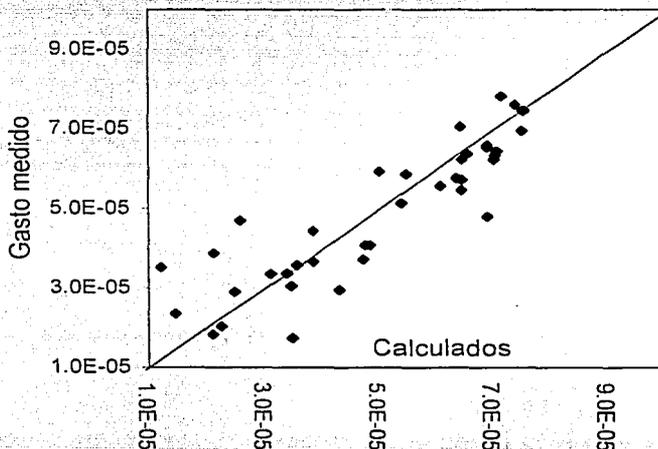


Figura 8.9 Gasto contra longitud del conducto

Los resultados calculados parecen sobrestimar las pérdidas por el conducto.

Para efectos de correlación se presentan todos los datos en conjunto comparados con los medidos en la figura 8.10.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 8.10 Comparación del gasto entre el modelo y observaciones en m³/s

8.3 Validación del prototipo en el mar

En el capítulo 6 se describe el prototipo con el que se experimentó en Puerto Morelos. Su estructura de fibra de vidrio fue diseñada para resistir el oleaje durante los experimentos aproximadamente dos semanas con una altura de olas de 0.2m. Una vez terminado el experimento se sacaba del mar, se hacían ajustes o se reparaba. Las únicas variables fueron la altura del francobordo determinada por el nivel del mar y unas placas móviles.

Se realizaron mediciones en dos condiciones con y sin rampa que corresponden a los incisos del modelo analítico. El oleaje siempre fue similar con una pequeña variación correspondiente al oleaje local generado por el viento que es un oleaje de alta frecuencia (periodo aproximado a 2 s) y oleaje de periodo aproximado de 5 s proveniente de "swell" con una onda de rebote con el arrecife.

En la figura 8.11 se presentan los resultados referidos modelo experimental propuesto por Van del Meer y Janssen en 1995 (ecuación 8.1), se observa que existe bastante concordancia con los datos. La altura corresponde al valor amplificado.

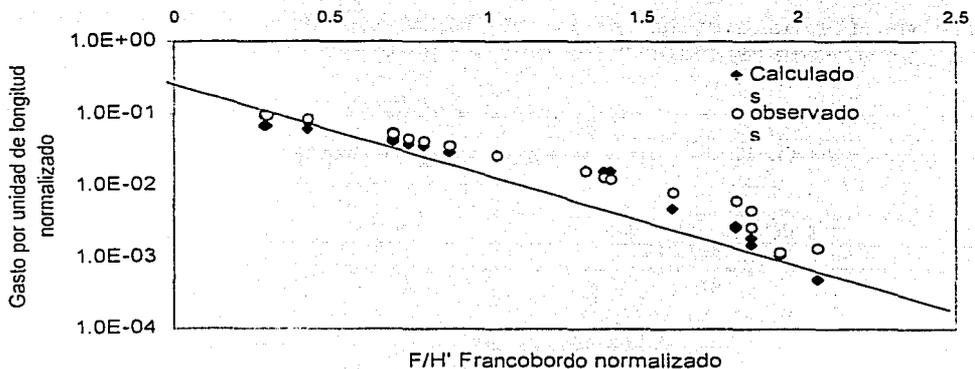
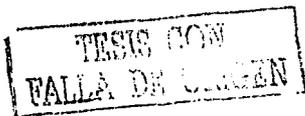


Figura 8.11 Datos de gasto del prototipo en relación con el modelo de Van der Meer y Janssen

El diagrama de la figura 8.12 muestra las mediciones sin rampa, en este caso no existieron las condiciones para resonancia.



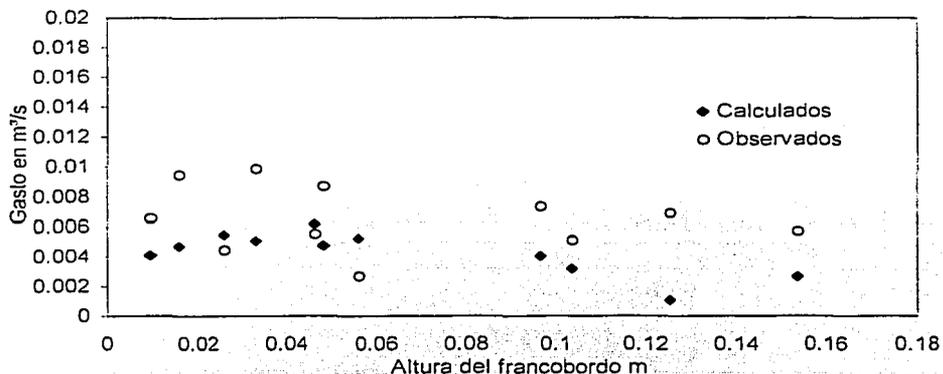


Figura 8.12 Comparación de datos calculados y observados con fondo constante para variación del francobordo

La figura 8.13 muestra los resultados con rampa.

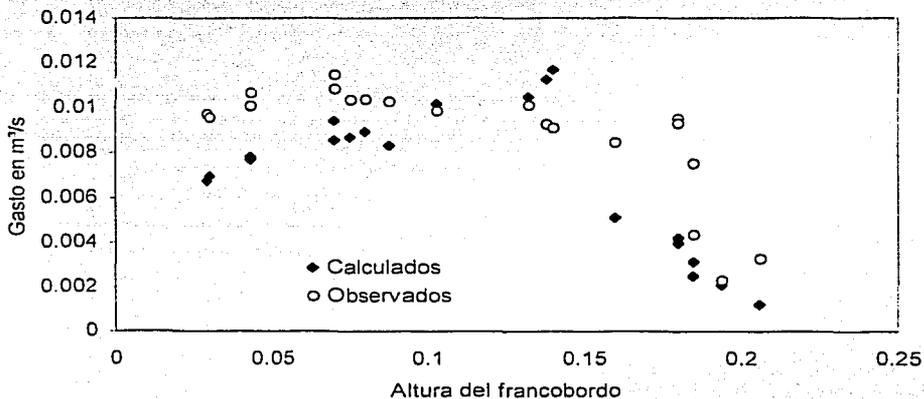


Figura 8.13 Comparación de datos calculados y observados con rampa para variación del francobordo

Finalmente, para correlacionar los resultados en la figura 8.14 se muestra un diagrama de gasto real vs el calculado por el modelo para el fondo plano y la figura 8.15 el diagrama para fondo variable.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

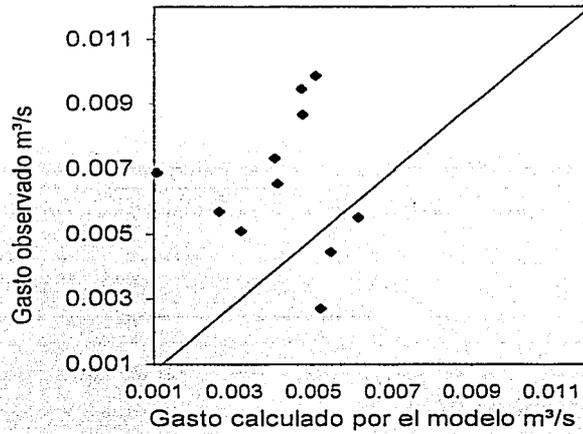


Figura 8.14 Datos Gastos observados y reales fondo constante

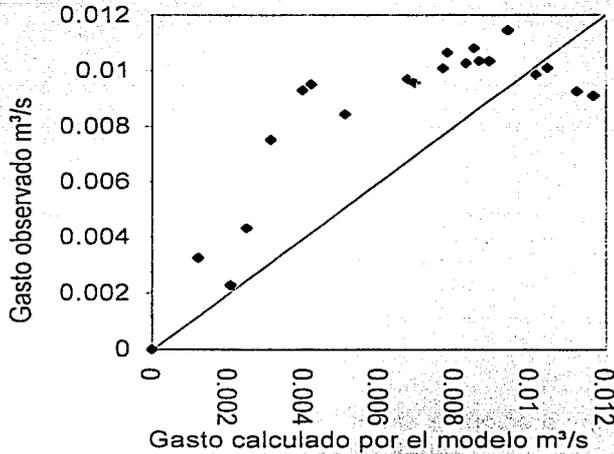
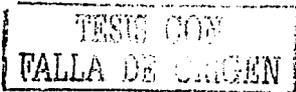


Figura 8.15 Gastos observados y reales fondo variable



8.4 Diseño

El esquema consiste en cinco bloques:

El bloque de entrada proporciona los datos de:

- Gasto requerido.
- Tipo de oleaje (amplitud, periodo, dirección, etc.)
- Pronóstico de marea (constantes armónicas).
- Rango de profundidad en los sitios viables considerando la marea.
- Rango de dimensiones del amplificador (ancho y largo).
- Rango de distancia a la laguna costera.

El bloque de procesamiento de datos consiste en:

- Cálculo de parámetros básicos (abertura de las paredes, pendiente de la rampa- que puede ser cero-, posición del vertedor, longitud de las paredes).
- Por medio de un algoritmo en computadora se calcula el factor de amplificación utilizando las ecuaciones del modelo, ejecutando todas las iteraciones de los parámetros.

Producto:

- Listado de posibilidades óptimas.

Selección de la opción más viable. Esto lo realiza el equipo de ingenieros, tomando en consideración otros criterios (financieros, sociales, etc).

Cálculos definitivos:

Parámetros de diseño

- Gasto diario.
- Cálculo del canal de salida.

En forma esquemática se representa este proceso en la figura 8.16

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

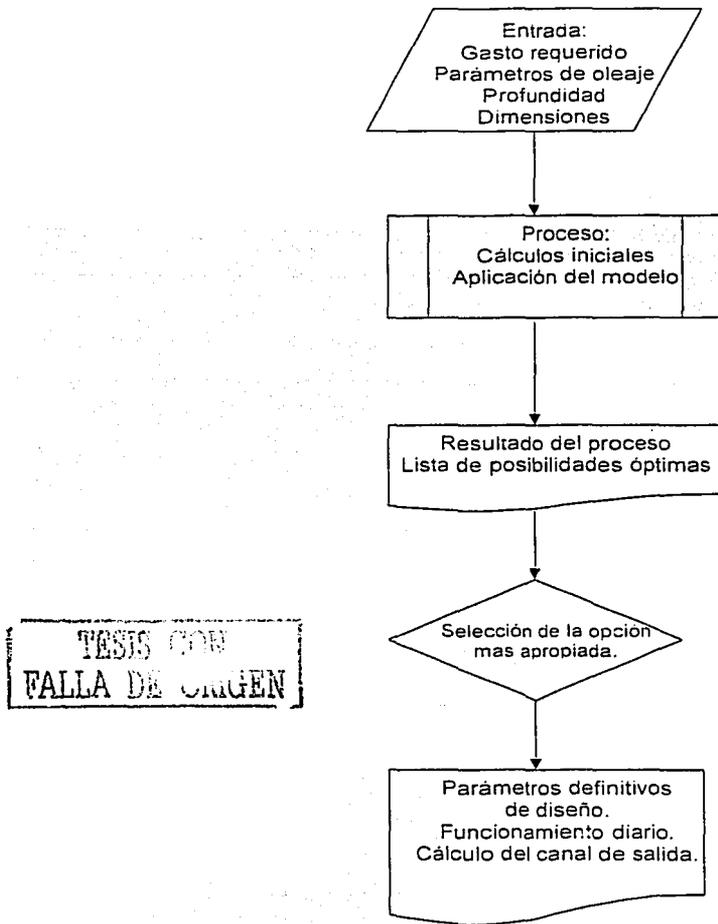


Figura 8.16 Diagrama de flujo del diseño

8.4.1 Parámetros generales.

En el proyecto de aplicación se determina el área geográfica y los requerimientos de gasto mínimo (con el mapa del área se fijan los sitios posibles de instalación, y con el pronóstico de la marea se determina la variación del nivel del mar).

8.4.2 Análisis del oleaje.

Es necesario caracterizar el oleaje de la zona donde se planea instalar el sistema de bombeo. Los datos se pueden obtener por medio de los siguientes procedimientos en orden decreciente de prioridad:

- Instalación de ológrafos. Series continuas de observaciones de un año.
- Pronóstico del oleaje basado en mediciones de vientos.

Con estos datos se realizan los procedimientos descritos en el capítulo 3 de análisis en el tiempo y la frecuencia para obtención de:

- Análisis espectral para determinar el oleaje de mayor energía.
- Altura, periodo r_{ms} .
- Dirección predominante de las olas.

8.4.3 Aplicación del método analítico para la determinación de la distancia longitudinal.

La distancia longitudinal es la distancia entre el vértice virtual del amplificador y la boca del mismo. Con base en este dato se puede calcular la ubicación del colector y posteriormente el resto de los parámetros estructurales.

La ecuación del modelo analítico determina la amplificación del oleaje por medio de funciones de Bessel. Matemáticamente se pueden obtener valores muy grandes principalmente cuando se acercan a puntos resonantes. Se sabe por las experiencias en laboratorio que la resonancia sobretodo en oleaje irregular no se presenta tan nítidamente por lo que hay que tomar a los resultados con objetividad. La información que sí podemos obtener del modelo matemático es:

- Tendencia creciente o decreciente.
- Los rangos de valor máximo.

Los valores máximos según experimentos realizados por diversos autores es de 5 para el "Run-up" y el valor característico para máximo es de 3 por lo que en los cálculos de amplificación el valor máximo permitido es de 3.

Con los parámetros del oleaje que se tienen se determina el valor de la distancia longitudinal y de la posición del vertedor más adecuado por medio de los diagramas siguientes:

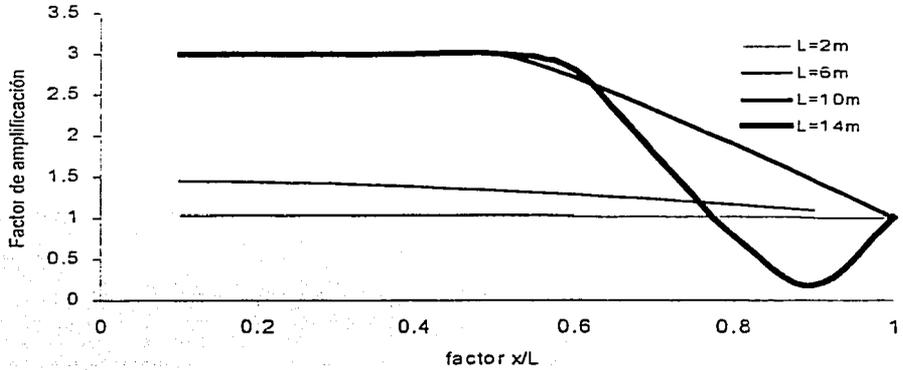


Figura 8.17 Gráfica para seleccionar la distancia longitudinal en prototipo en fondo plano

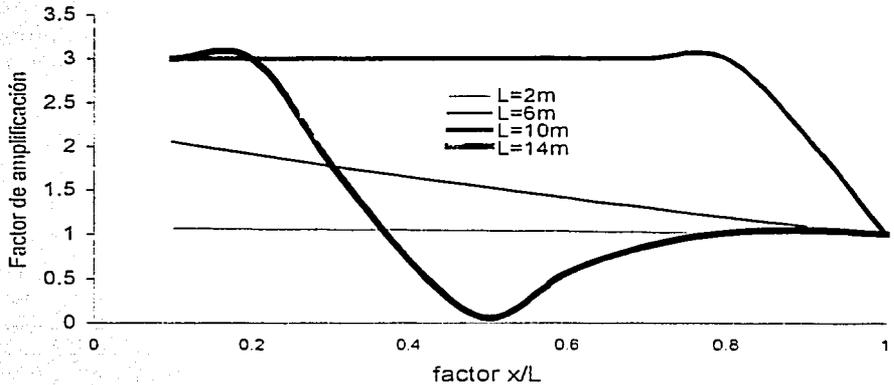
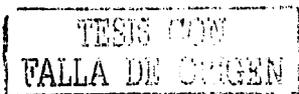


Figura 8.18 Gráfica para seleccionar la distancia longitudinal en prototipo con rampa

La cota superior del factor de amplificación es de tres. Estos diagramas muestran claramente las zonas óptimas. Por ejemplo si se selecciona una $L=14\text{m}$ el valor de x/L que determina la posición del vertedor debe de ser inferior a 0.2 o sea $x=2.8\text{m}$.

8.4.4 Cálculo de los parámetros estructurales.

Una vez definida L y x es necesario definir una variable más para fijar todos los parámetros y el ancho del vertedor.



Resultaría muy impráctico construir diagramas para todas las posibilidades por lo que se elaboró un algoritmo que las calcula y que indica los valores óptimos.

Con b como el ancho del vertedor los parámetros se obtienen mediante las siguientes fórmulas:

Ángulo de las paredes:

$$\alpha = \text{ang tan} \left(\frac{b/2}{x} \right) \quad (8.3)$$

Ángulo de la rampa:

$$\beta = \text{ang tan} \left(\frac{d_0}{L-x} \right) \quad (8.4)$$

Longitud de la pared:

$$p = \frac{L-x}{\cos \alpha} \quad (8.5)$$

El gasto se obtiene con la ecuación:

$$Q = \frac{2a'b}{T} \sqrt{\frac{g}{d_0}} \left[a' \left(t_1 - \frac{T}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \cos \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) - \frac{T}{2\pi} F \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \right) \right] \quad (8.6)$$

Q es el gasto.

T el periodo

F la altura del francobordo.

b el ancho del vertedor.

t_1 es el valor donde la ola alcanza la altura del francobordo. Se calcula con:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \text{ang cos} \left(\frac{a}{F} \right) \quad (8.7)$$

ω es la velocidad angular $2\pi/T$

La potencia se calcula de la siguiente manera:

$$P_{oi} = \rho g Q F \quad (8.8)$$

Expresada en función del gasto la potencia es:

$$P_{oi} = \rho g F \frac{2a'b}{T} \sqrt{\frac{g}{d_0}} \left[a' \left(t_1 - \frac{T}{2\pi} \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \cos \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) - \frac{T}{2\pi} F \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t_1 \right) \right) \right] \quad (8.9)$$

Se hace una iteración de los valores del ancho del colector desde valores muy pequeños hasta una cota muy grande como L y se el programa presenta los resultados así como los valores óptimos para realizar la selección.

8.4.5 Cálculo del francobordo.

Por medio de una gráfica de potencia vs altura del oleaje amplificado se determina la altura óptima del francobordo como lo muestra la siguiente figura:

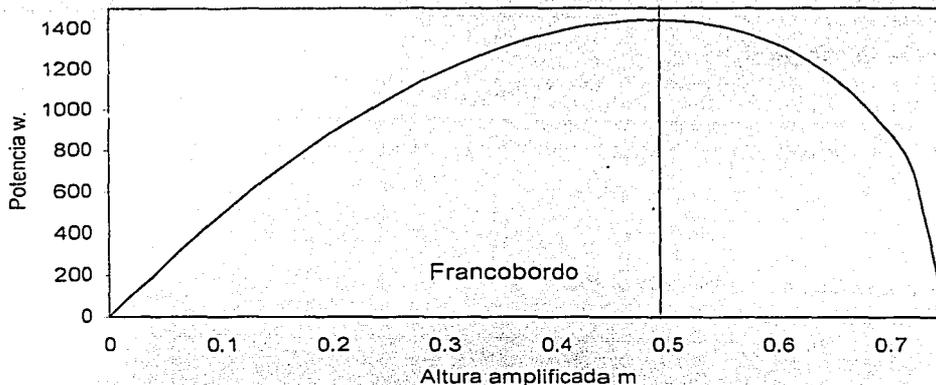


Figura 8.19 Potencia de una bomba para Cancún con los parámetros altura de la ola 0.5m amplificación 3, periodo 5.5s ancho del colector 2m y profundidad 3.5m

Se calcula el transporte máximo y en función de éste se determina la forma del canal abierto acorde con la topografía del terreno. Con el transporte máximo se fija el tirante y el ancho del canal.

Se calcula el gasto diario y se determina el número de sistemas de bombeo.

8.4.6 Cálculo anual del gasto.

El gasto a lo largo del año puede cambiar por dos factores: la marea así como el cambio en la intensidad y dirección del viento.

En el caso de la marea se puede hacer un cálculo de su efecto en la eficiencia incorporando el pronóstico de la marea. Esto se hace conociendo las constantes armónicas del lugar. El nivel del mar influye de dos maneras, modificando la profundidad en la entrada y la altura del francobordo. La siguiente figura muestra el efecto de la marea en el gasto en un caso típico durante 24 horas:

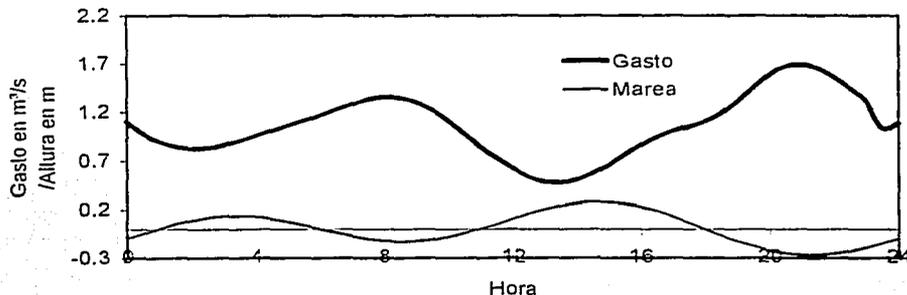


Figura 8.20 Efecto de la marea en el gasto en un periodo de un día

En cuanto a la dirección del viento, si se conoce el patrón de comportamiento anual, se puede deducir la dirección incidente del viento (con el siguiente diagrama se obtiene el factor de corrección. En lugares donde existe una variación de la dirección del viento una solución podría ser un deflector del oleaje).

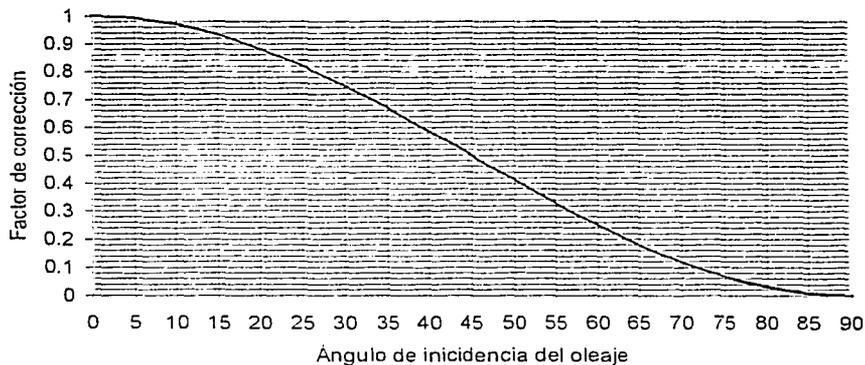


Figura 8.21 Factor de corrección del gasto en función de la dirección del oleaje

8.4.7 Selección de la estructura.

Con los resultados obtenidos para fondo plano y con rampa se selecciona en base a costos y eficiencia la estructura más adecuada así como el número de bombas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

8.4.8 Canal de conducción

Una vez determinado el gasto máximo se calcula la conducción por medio de un canal abierto con los siguientes parámetros:

Pendiente del canal:

$$S = \frac{F}{\text{Longitud del canal}} \quad (8.10)$$

El ancho del canal puede ser el ancho del vertedor como una solución bastante práctica.

La altura de las paredes se calcula con la fórmula de Manning para canales abiertos.

8.5 Ejemplo de una aplicación práctica del sistema de bombeo.

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Puntos

PUNTOS

Los puntos desarrollados en este inciso son los siguientes:

Generalidades

Selección del lugar

Elementos

Amplificador del oleaje:

Dimensiones.

Efecto de la marea.

Cotas.

Conducción del amplificador hacia los estanques:

Dimensiones .

Cálculo del gasto.

Cotas

Tanque de estabilización:

Dimensiones.

Flujo hacia los estanques.

Cotas.

Estanques:

Dimensiones.

Flujo de salida.

Cotas.

Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas:

Introducción.

Costo del amplificador de oleaje.

Costo del bombeo con bombas eléctricas.

Tabla comparativa.

Puntos de control y margen de carga.

Conclusiones y recomendaciones.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Generalidades

GENERALIDADES:

La acuicultura es una ciencia experimental que ha tenido mucho auge a partir del siglo XX. Sus aplicaciones pueden ser altamente redituables. Existe acuicultura de agua dulce y de agua de mar en estanques o acotando una región marina (también denominada maricultura). El funcionamiento de un sistema de tanques de acuicultura tiene determinados puntos críticos que es necesario analizar para satisfacer plenamente los requerimientos de todas las disciplinas involucradas para lograr el éxito. Entre los aspectos mas importantes se tienen:

Comercialización. Con la selección del cultivo de especies valuadas en el mercado a un alto precio en el periodo de operación.

Clima. Los organismos son muy frágiles sobretodo en su estadio larval que requiere de condiciones estables mantenidas experimentalmente. El estadio juvenil es mas resistente y soporta un rango mayor de variación de los parámetros.

Calidad del agua. Por la gran cantidad de experimentos realizados se ha detectado que la calidad del agua es un factor crucial. La presencia de organismos patógenos puede dispararse y contaminar a todos los estanques siendo obligatorio el vaciado y saneamiento de los mismos. Lo que requiere de renovación continua del agua. Cada especie necesita de condiciones específicas de recambio de agua por varias razones entre ellas:

- Renovación del agua de los estanques. Se debe de mantener un flujo continuo para el recambio de agua. Sin embargo, existen momentos como los de alimentación o suministro de antibióticos en los cuales se debe suspender el flujo de agua. El flujo tiene un rango amplio por ejemplo en el caso de cangrejos los estanques deben de tener un flujo equivalente a la renovación de toda el agua entre 15 y 20 minutos.
- Consumo de oxígeno disuelto. Si se agota se provoca alta mortalidad. En el caso de los crustáceos una profundidad de solo 10 cm les permite tomar el aire directamente de la superficie cuando disminuye el oxígeno disuelto en el agua.
- Limpieza de desechos orgánicos para evitar le generación de organismos patógenos.
- Generación de sustancias químicas nocivas por el metabolismo de los propios organismos. En el caso de los cangrejos y los crustáceos en general se genera amonio.

- Parámetros del agua: temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, etc. Tienen rangos muy definidos para cada especie y el agua en los estanques debe de mantenerse dentro de esos límites.
- Profundidad. Cada especie necesita una profundidad específica, en algunos casos es pequeña (del orden de 0.10m) porque se requiere de alta temperatura para incrementar el metabolismo. En otras lo conveniente es profundidad de mas de 1 metro como en el caso de las langostas. La profundidad óptima para cada especie se ha determinado experimentalmente.

Es importante señalar que la presente propuesta de suministro de agua marina se refiere al estadio de postlarvas hasta su maduración. Dado que las larvas necesitan un manejo muy preciso con condiciones perfectamente controladas.

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Generalidades continuación

Ejemplos de cultivos de acuicultura

A continuación en la tabla 8.1 se mencionan algunos ejemplos de las especies comerciales y sus parámetros asociados.

Organismo	ejemplos de especies	RANGO			ESTANQUE				GASTO Por estanque l/s
		Temperatura	salinidad	oxígeno	Dimensiones	tirante	Volumen m ³	Recambios Por día	
Camarón	<i>Peneus aztecus</i>	23°C-32°C	28ups-35ups	>3ml/l	3.35x61x0.3	0.3m	59.475	7	4.819
Langosta	<i>Homarus americanus</i>	20°C		>3ml/l	0.36x152x0.26	0.26m	0.142272	2	0.003
Cangrejo	<i>Callinectes sapidus</i>	25°C-30°C	10ups-40ups	>3ml/l	1.2*2.4*0.1	0.10m	0.288	96	0.320
Ostras		>19°C	10ups-16ups	>3ml/l	1.5m ³	Flotante	1.5m ³	constante	
Almejas	<i>Mercenaria mercenaria</i>	20°C-25°C	marina	>3ml/l	1.2x5x0.05	0.05a 1.0	promedio 1.5m ³	constante	

Tabla 8.1 Parámetros de estanques de acuicultura para algunos crust

El valor de saturación de oxígeno considerado es de 4.6 ml/l (Sverdrup et al 1970)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Diseño preliminar BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA Selección del lugar	Notas
<p>SELECCIÓN DEL LUGAR.</p> <p>El mismo sitio Puerto Morelos Q.Roo donde se realizaron los experimentos por las siguientes razones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es un centro de investigación perteneciente al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología donde existe la experiencia y el interés de realizar experimentos en acuacultura. Las especificaciones del sistema pueden hacerse extensivas a otras instituciones en la misma área geográfica como la Universidad de Quintana Roo. • Ya se tiene la experiencia de instalación del sistema del sistema de bombeo en las condiciones de estado de mar propias de ese lugar. • Se cuenta con un muelle que facilita el acceso al amplificador de oleaje <p>Condiciones ambientales:</p> <p>Rango de temperatura del agua: 27.74°C±1.39°C Rango de salinidad del agua: 34.340 ups-36.825ups</p> <p>Rango de oxígeno disuelto en el agua >4.6 ml/l</p> <p>Rango de marea pleamar superior : 0.111m redondeado 0.11m y bajamar inferior ±0.116m redondeado ±0.115m</p> <p>Oleaje: Régimen irregular</p> <p>Altura 0.10m-0.20m cota mínima 0.10m</p> <p>Periodo T_{rms} 1.80s</p> <p>Dirección dominante. del Este</p>	<p>Atlas de PtoMorelos Merino et al.</p> <p>Sverdrup et al. Tablas de mareas Instituto de Geofísica. Los valores redondeados son para efecto de los cálculos.</p> <p>Mediciones directas.</p>

Diseño preliminar BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA Dimensiones de los estanques	Notas
<p>Dimensiones de los estanques</p> <p>Posición de los estanques: Situados dentro de los terrenos del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología lo mas próximos al mar En la figura 8.22 se ve una vista desde arriba del sistema de estanques. En la figura 8.23 una vista completa de la parte inferior, en la figura 8.24 un estanque aislado y en la figura 8.25 el sistema de canales de drenaje.</p> <p>Las cotas son: Altura inferior: sobre el nmm. 0.175m Altura superior sobre el nmm 0.275m profundidad: 0.100m</p> <p>Dimensiones Largo 2.40m Ancho 1.20m Profundidad 0.10m</p> <p>Recambio 3 o 4 veces su volumen por hora.</p> <p>Número de estanques: Este se calcula entre el gasto óptimo obtenido en el amplificador entre el gasto requerido por cada estanque.</p> <p>Número de estanques propuesto: 20. (Para que un sistema de estanques de este tipo sea redituable se proponen entre 10 y 15 estanques como mínimo).</p>	<p>Este se calcula entre el gasto obtenido entre el gasto requerido por cada estanque.</p>

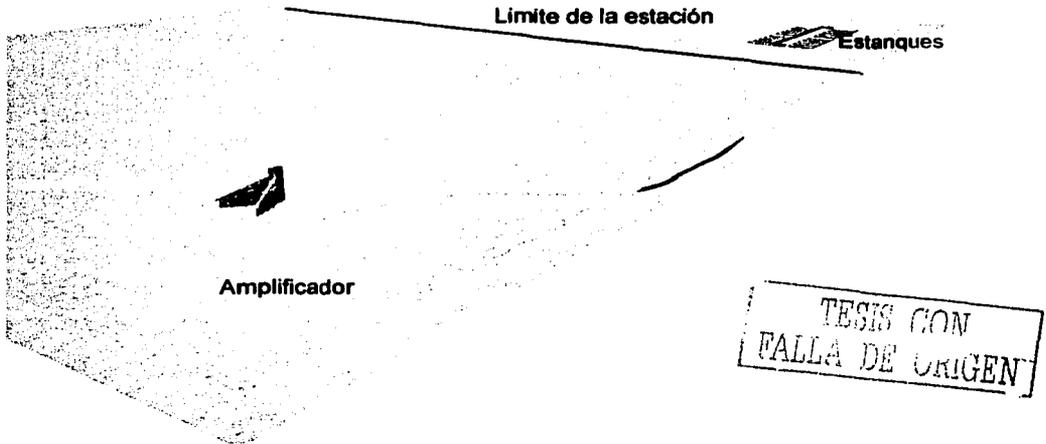


Figura 8.22 Vista parcial de la instalación del sistema de estanques.

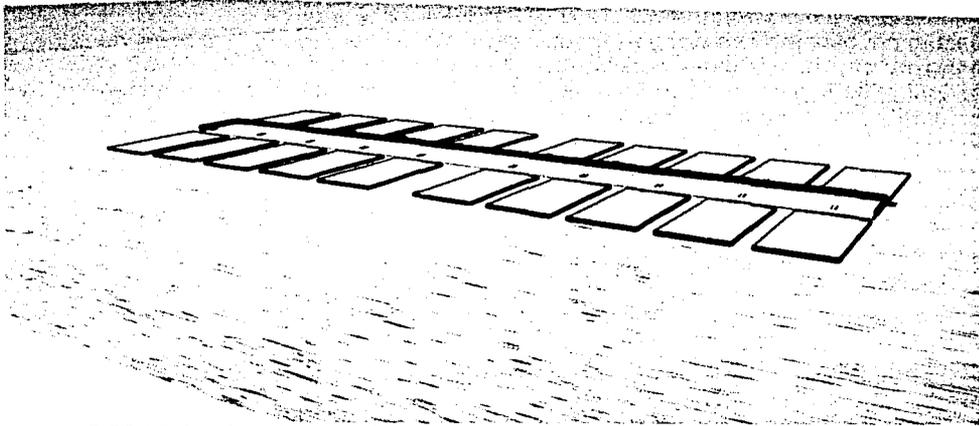


Figura 8.23 Vista del sistema de estanques.

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Amplificador de oleaje. Efecto de la marea. Cotas

AMPLIFICADOR DE OLEAJE. EFECTO DE LA MAREA

La figura 8.24 muestra la variación del gasto diario por efecto de la marea.

La curva de marea típica es la siguiente:

Variación diaria con la marea en sisigias

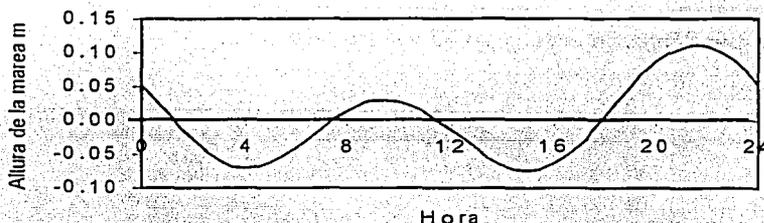


Figura 8.24 Altura de la marea en sisigias.

El efecto en el gasto en condiciones de máxima variación de la marea se muestra en la figura 8.25.

Variación del gasto con la marea
En condiciones de marea de sisigias

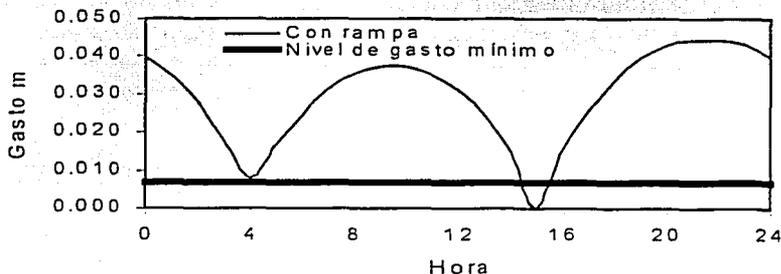


Figura 8.25 Gasto en función de la marea.

COTAS.

Elevación del amplificador	0.32m
Nivel pleamares medias superiores	0.11m
Nivel del mar	0.00m
Nivel de bajamares medias inferiores	-0.115m.

Notas

Según datos de pleamares y bajamares máximas registradas en Puerto Juárez Q.Roo.

Considerando marea de sisigias. En general el efecto será mas amortiguado.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Diseño preliminar BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA Conducción del amplificador hacia los estanques. Dimensiones	Notas
<p>DIMENSIONES</p> <p>La conducción se realiza entre dos estanques: en la entrada entre el tanque del amplificador y el de rebosamiento y en el de salida entre un tanque de salida y el mar.</p> <p>Como se requiere que la pérdida por fricción sea pequeña el diámetro debe de ser relativamente grande y de una medida comercial.</p> <p>Pérdidas por fricción $h_f = 0.01\text{m}$</p> <p>Diámetro del tubo de entrada $D = 0.25\text{m}$</p> <p>Factor de fricción: $f = 0.0219$</p> <p>Longitud de la manguera: $L = 70\text{m}$.</p>	<p>Se calcula aplicando la fórmula de Darcy-Weisbach para el rango de la altura de fricción.</p> <p>Se calculó con la manguera utilizada calibrando los datos a la mínima desviación estándar.</p> <p>Distancia del amplificador a las instalaciones.</p> <p>Se calculó obteniendo el gasto para una altura mínima de fricción que puede ocurrir ocasionalmente en mareas de sisigias.</p>

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Conducción del amplificador hacia los estanques. Cálculo del gasto. Cotas

CÁLCULO DEL GASTO.

Se plantea el siguiente problema:

Se tienen dos tanques (el del colector y el de estabilización) con niveles de superficie libre $z_1=0.32\text{m}$ y $z_2=0.31\text{m}$ respectivamente. Se desea calcular el gasto si están comunicados por una manguera de hule de 10 pulgadas ($D=0.254\text{m}$) de diámetro y $L=70\text{m}$ de longitud que transporta agua de mar a 29°C que tiene una válvula y esta conectada a los tanques como se muestra en la figura 8.24.

Solución:

Para agua a 29°C se tiene un coeficiente de viscosidad $8.2 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$. Para manguera de hule se tiene $\epsilon=1.5 \times 10^{-6} \text{m}$ y $\epsilon/D=5.9055 \times 10^{-6}$. La presión en cada tanque es igual a la presión atmosférica $P_1=P_2=P_a$. Las velocidades de las partículas de agua en la superficie libre de ambos tanques son nulas $V_1=V_2=0$. Se consideran algunas pérdidas locales.

Entrada en E2 $k_1=0.5$

Pérdida a lo largo de la manguera calculada con la ecuación de Darcy-Waisbach
Además, se consideran:

Pérdida en la válvula E3 $k_2=4.4$ correspondiente a abertura de la válvula por ejemplo 45% en el caso de válvula de disco White(1994).

Pérdida en el codo E4 $k_3=0.25$ (codo 90° regular con bridas)

Pérdida sumergida de salida E5 $k_4=1$.

La ecuación de conservación de la energía aplicada al sistema es:

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h$$

Las pérdidas h son la correspondiente a la manguera mas las pérdidas locales:

$$h = h_f + \sum h_i$$

La diferencia de alturas es la pérdida a lo largo de la manguera más las pérdidas locales.

$$z_1 - z_2 = h_f + \sum h_i$$

La diferencia de alturas es la pérdida a lo largo de la manguera mas las pérdidas menores

La ecuación queda de la siguiente forma:

$$z_1 - z_2 = \frac{v^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + k_1 + k_2 + k_3 + k_4 \right]$$

Sustituyendo los valores conocidos:

Donde el factor de fricción f es función del número de Reynolds (R_e) y de la rugosidad relativa (ϵ/D), es decir:

$$f = fcn(R_e, \epsilon/D)$$

Primera aproximación f elevada para flujo turbulento:

$$f=0.03 \text{ (alto)}$$

$$V=0.117\text{m/s}$$

$$R_e=VD/\nu=3.61 \times 10^4$$

Para este número de Reynolds en el diagrama universal de Moody se tiene para $\epsilon/D=5.9055 \times 10^{-6}$ (tubo liso)

$$f=0.0255$$

con este nuevo valor del factor de fricción se obtiene:

$$V=0.126\text{m/s}$$

$$R_e=3.90 \times 10^4$$

Del diagrama de Moody se obtiene un nuevo valor de f

$$f=0.0219$$

$$V=0.127\text{m/s}$$

$$R_e=3.93 \times 10^4$$

Como el número de Reynolds converge se acepta este valor del factor de fricción por tanto:

La velocidad es:

$$V=0.127\text{m/s}$$

Y el Gasto

$$Q=VA=V(\pi/4)(0.254)^2=0.00643\text{m}^3/\text{s}$$

Que es el gasto requerido.

COTAS

Amplificador

0.32m.

Tanque de estabilización

0.31m.

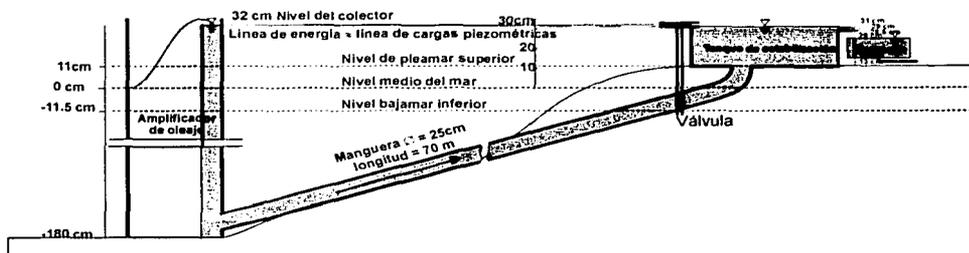


Figura 8.26. Perfil de cargas piezométricas.

El detalle del perfil de cargas en la parte superior se describe en la siguiente gráfica.

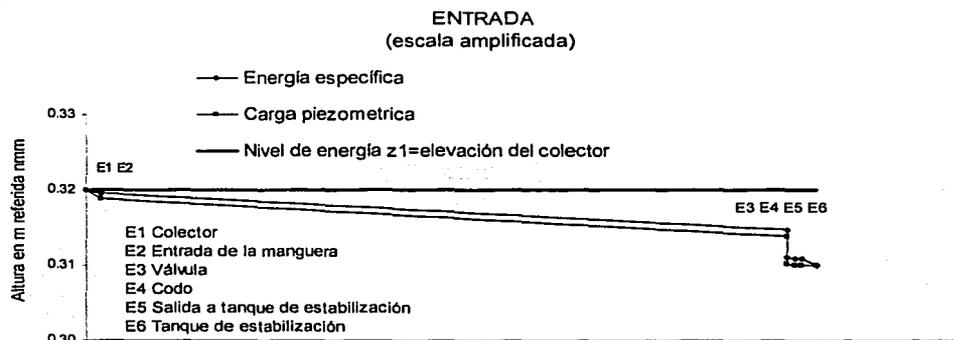


Figura 8.27. Perfil de cargas piezométricas con escala ampliada.



Figura 8.28 Detalle de las cotas de los estanques.

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Tanque de estabilización

Tiene los siguientes objetivos:

Mantener aproximadamente constante el nivel.

Alimentar en paralelo cada uno de los 20 estanques de cangrejos por medio de escotaduras comunicadas por pequeños canales.

Por medio de conductos en paralelo minimizar las pérdidas de entrada a cada uno de los estanques.

Dimensiones:

Largo	15.4m.
ancho	1.2m.
Area	18.48m ²
Volumen	3.69m ³
Altura	0.20m.
Cota inferior	0.11m.
Cota superior	0.31m.

La siguiente figura muestra una perspectiva del tanque de estabilización donde se indican la posición de los puntos y los conductos de salida a los estanques.

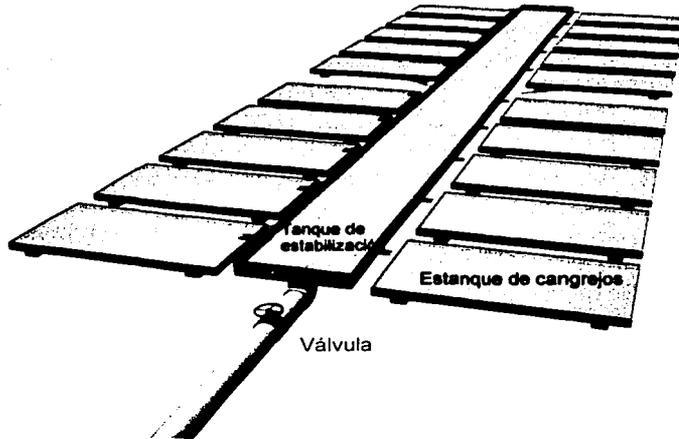


Figura 8.29 Tanque de estabilización y estanques.



Figura 8.30 Perfil posterior del sistema de estanques.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

<p>Diseño preliminar BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA Flujo de salida del tanque de estabilización a los estanques.</p>	<p>Notas</p>
<p>FLUJO DE SALIDA DEL TANQUE DE ESTABILIZACIÓN A LOS ESTANQUES.</p> <p>El tanque de estabilización alimenta cada uno de los estanques por medio de escotaduras. El flujo de las escotaduras se calcula considerándolo como el de un vertedor de pared delgada.</p> <p>La fórmula general para un vertedor rectangular de cresta delgada es:</p> $Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^3$ <p>donde b es el ancho del vertedor h la altura μ un coeficiente experimental para el cual existen distintas fórmulas según las dimensiones. Para valorarlo se utilizó la fórmula de Rehbock:</p> $\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{\frac{3}{2}}$ <p>donde w es la profundidad de la base del vertedor al fondo Con h=0.02m b=0.06m w=0.18m</p> <p>Se obtiene un coeficiente μ=0.66429431</p> <p>y un gasto Q=0.0003329 m³/s =0.333 l/s</p> <p>El gasto requerido por estanque es Q=0.0003215m³/s=0.322l/s</p> <p>Esto implica que el gasto es ligeramente superior al que se desea. Para realizar el ajuste fino en el tanque estabilizador se instalan pequeñas compuertas corredizas como se muestra en la figura 8.31. El agua fluye hacia un canal de 23 cm de longitud con un desnivel de medio cm.</p>	<p>Cada Canaleta recibe el flujo de 4 estanques, el quinto confluye directamente en el canal canal principal.</p>

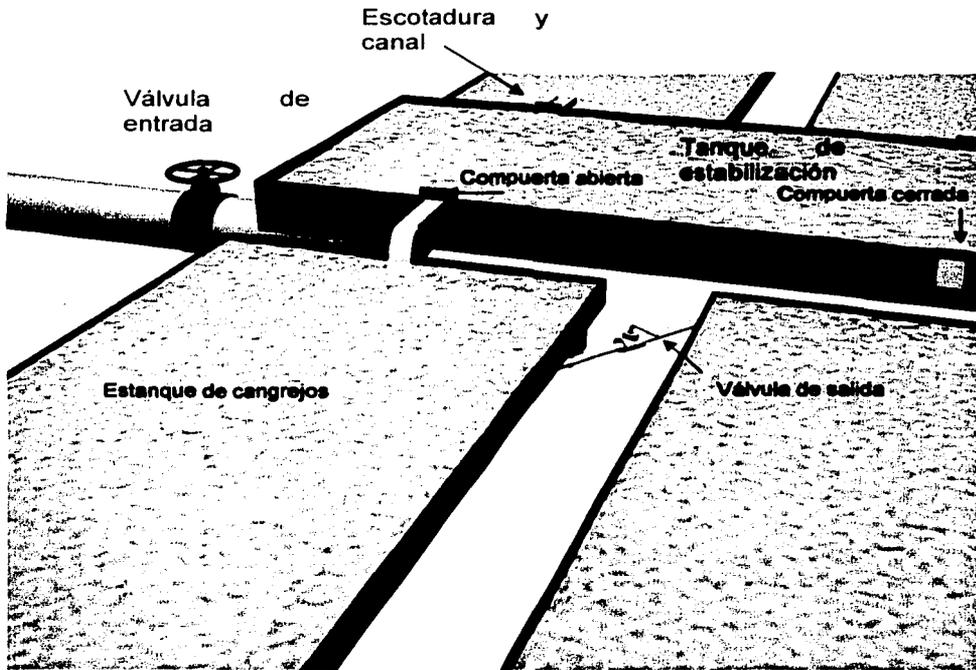


Figura 8.31. Elementos de los estanques.

TESIS CON
FALLA DE CALIFICACIÓN

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Estanques Tubo de salida

Objetivo:

Recibir la descarga de cada uno de los tanques por medio de los siguientes elementos:

- Salida en el centro del estanque.
- Un codo.
- Un tubo de 1.4m de largo hacia un extremo.
- Una válvula reguladora del flujo.
- Canaleta de salida.

Los parámetros del tubo de salida son::

Gasto 0.0003215m³/s.

Diámetro. (media pulgada)

0.0254 m

Coefficiente de fricción

f=0.0225

Longitud

1.4m.

Las pérdidas se presentan en:

- Entrada
- Codo de 90°
- A lo largo del tubo (coeficiente a definir).
- Válvula de control
(tipo lenteja entre 15° y 20° de abertura).
- Salida

$k_1=0.5$

$k_2=0.25$

$f=0.025$

$k_3=1.4$

$k_4=1$

Pérdidas totales (la altura del estanque)

$\Sigma h_f = 0.10m$

El factor de fricción se obtuvo por iteraciones hasta que el número de Reynolds convergiera a un valor constante por el método utilizado en la manguera de entrada.

Los coeficientes fueron obtenidos del octavo capítulo de Sotelo(1997).

FLUJO DE SALIDA AL MAR

Se utiliza el drenaje con que cuenta la estación hacia el mar para transportar el flujo de salida de otros estanques de acuicultura.

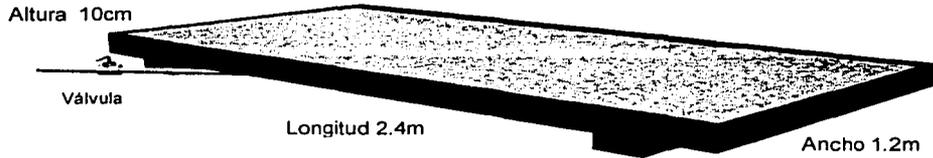


Figura 8.32 Vista superior de un estanque.

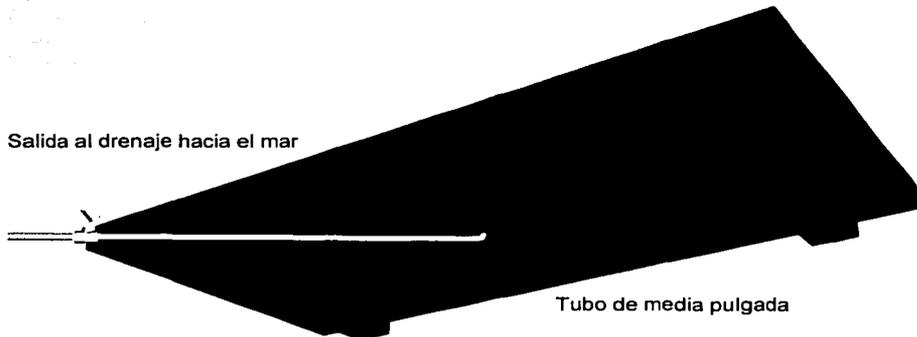


Figura 8.33. Vista interior de un estanque.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas

COSTO COMPARATIVO ENTRE BOMBEO POR OLEAJE Y POR BOMBAS ELÉCTRICAS

Para fines de estimar la viabilidad del sistema de bombeo por oleaje se presentan los costos de la instalación de la bomba de oleaje y tubería vs el costo de las bombas eléctricas y su operación durante 5 años. En el caso de la bomba de oleaje el prototipo que se presenta tiene las mismas dimensiones del utilizado en los experimentos pero en concreto en vez de fibra de vidrio. Es de esperarse que para oleaje de mayor magnitud aumente el rendimiento de la bomba como lo predice el modelo.

Para la obtención de las cifras se consultaron asesores de constructoras con experiencia en instalaciones marinas y de proveedores de materiales y equipos con los precios de enero 2003. Los valores se convierten finalmente a dólares para fines comparativos (a razón de cambio 11 pesos por dólar).

Bombeo por oleaje.

Se analizan los siguientes elementos:

Amplificador con los siguientes cálculos:

- Ancho de las paredes
- Volumen total
- Costo de construcción
- Costo de operación
- Conducción
- Mantenimiento
- Respaldo para eventualidades
- Instalación

Bombeo por bombas eléctricas:

Se analizan los siguientes elementos.

- Costo de las bombas
- Conducción
- Costo de operación
- Mantenimiento
- Respaldo para eventualidades
- Instalación

Finalmente se hace un cálculo comparativo entre ambos sistemas de bombeo para estanques de acuicultura a varios años.

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas

Cálculo del ancho de las paredes.

CALCULO DEL ANCHO DE LAS PAREDES

Para el cálculo del espesor de las paredes, dado que es una estructura no convencional se consideró un simil de un dique y se calcula el espesor de los elementos del talud exterior.

Datos:

Altura de la ola

$$h=0.20m.$$

Rango del ángulo del dique

$$\alpha \text{ (Entre } 30^\circ \text{ y } 45^\circ).$$

Densidad del concreto.

$$\rho_s=2\ 650kg/m^3.$$

Densidad del agua de mar.

$$\rho_w=1\ 025\ kg/m^3.$$

Nivel de daño:

Inicio de avería.

Cálculos:

La función de estabilidad correspondiente a la banda superior de confianza del 96% de un dique de escollera no rebasable se calcula con base en la tabla experimental de Iribarren.

$$\Psi_{nr}=0.0797$$

Diámetro de las piezas para dique no rebasable:

$$S_r = \frac{\rho_s g}{\rho_w g} = 2.585$$

$$R_r = \frac{S_r}{(S_r - 1)^3} = 0.6488$$

$$D_{nr} \left(\frac{\rho_w R_r \Psi H^3}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Los resultados para diferentes altura de ola desde la media de 0.2 hasta la de tormenta de 0.80m es:

Altura ola m	Espesor m
0.2	0.054
0.3	0.081
0.4	0.109
0.5	0.136
0.6	0.163
0.7	0.190
0.8	0.217

Como se observa el espesor de 0.20m es mas que suficiente pero por razones constructivas para protección de las varillas a la corrosión se opta por:

Espesor de las paredes.

$$e = 0.25m$$

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas

Cálculo del volumen. Continuación

Los datos son los correspondientes a las figuras 6.2 a,b y c del prototipo.

El amplificador consta de:

2 paredes.

1 rampa.

1 colector que tiene forma de un prisma y un cilindro cortado longitudinalmente.

Pared.

forma:

trapezoidal

dimensiones en metros

B=2.6m b=2.41m h=4m

área:

10.02m²

área de dos paredes

20.04m²

espesor

0.25m

Volumen paredes

5.01m³

Rampa

forma:

trapezoidal

dimensiones

B=3.13 b=0.38m h= 4.17m

área

7.31 m²

espesor

0.25m

volumen rampa

1.83m³

Colector. Se calcula evaluando el área que incluye el espesor menos el área interior. El área se compone de un rectángulo y un semicírculo.

área externa:

dimensiones

rectángulo 0.40x0.90m²

área

Semicírculo con radio 0.45m

0.68m²

área interna

dimensiones

rectángulo

0.38x0.40

Semicírculo radio

0.20

área interna

0.22m²

área colector

0.46m²

altura

4.02m

Volumen

1.79m³

VOLUMEN TOTAL

8.63m³

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas

Conducción.

Costo de operación y mantenimiento

CONDUCCIÓN

La conducción se hará por medio de mangueras resistentes a medio ambiente marino. Se ha probado la denominada de uso rural, Habrá dos mangueras una de entrada de longitud 70m y una de salida mas corta 49m.

Tipo de manguera. Manguera de PVC, de hule o de algún material liso y resistente..

Diámetro:	10 pulgadas	0.254m
Longitud manguera de entrada		70m
Costo aproximado por metro		\$279.09
Costo por metro (menos descuento+iva)		\$208.55
Costo total en pesos		\$14 599
Costo en dólares		1 3027 dólares

COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Combustible		0.00
Mantenimiento: Eventual limpieza y reposicionamiento de ductos		150 dólares anuales

<p>Diseño preliminar BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas Respaldo para eventualidades</p>	<p>Notas</p>																																
<p>RESPALDO PARA EVENTUALIDADES</p> <p>En el caso de una eventualidad que esencialmente es un periodo prolongado de calma se requiere de una bomba autónoma para evitar la muerte de los organismos.</p> <p>Se propone una bomba de gasolina con las siguientes características,</p> <table data-bbox="144 553 1014 800"> <tr> <td>Tipo</td> <td>gasolina</td> </tr> <tr> <td>Potencia</td> <td>3.1 hp</td> </tr> <tr> <td>Rendimiento</td> <td>400l/min</td> </tr> <tr> <td>Precio pesos</td> <td>2893+iva</td> </tr> <tr> <td></td> <td>302 dólares</td> </tr> <tr> <td>consumo</td> <td>1litro/hora</td> </tr> <tr> <td>Probable uso</td> <td>5 horas cada frente frío</td> </tr> <tr> <td></td> <td>20 frentes fríos al año</td> </tr> <tr> <td></td> <td>total 200 horas al año</td> </tr> </table> <p>Conducción:</p> <table data-bbox="144 873 1014 1092"> <tr> <td>Mangueras de 2 pulgadas.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Longitud manguera de entrada</td> <td>40m</td> </tr> <tr> <td>Longitud manguera de salida</td> <td>40m</td> </tr> <tr> <td>Costo de lista por metro</td> <td>\$55.17</td> </tr> <tr> <td>Costo (menos descuento+iva)</td> <td>\$41.23</td> </tr> <tr> <td>Costo mangueras</td> <td>\$3 298</td> </tr> <tr> <td></td> <td>300 dólares</td> </tr> </table>	Tipo	gasolina	Potencia	3.1 hp	Rendimiento	400l/min	Precio pesos	2893+iva		302 dólares	consumo	1litro/hora	Probable uso	5 horas cada frente frío		20 frentes fríos al año		total 200 horas al año	Mangueras de 2 pulgadas.		Longitud manguera de entrada	40m	Longitud manguera de salida	40m	Costo de lista por metro	\$55.17	Costo (menos descuento+iva)	\$41.23	Costo mangueras	\$3 298		300 dólares	<p>No se evalúa el costo de combustible por ser mínimo e irrelevante.</p>
Tipo	gasolina																																
Potencia	3.1 hp																																
Rendimiento	400l/min																																
Precio pesos	2893+iva																																
	302 dólares																																
consumo	1litro/hora																																
Probable uso	5 horas cada frente frío																																
	20 frentes fríos al año																																
	total 200 horas al año																																
Mangueras de 2 pulgadas.																																	
Longitud manguera de entrada	40m																																
Longitud manguera de salida	40m																																
Costo de lista por metro	\$55.17																																
Costo (menos descuento+iva)	\$41.23																																
Costo mangueras	\$3 298																																
	300 dólares																																

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas

Construcción

Instalación

CONSTRUCCIÓN

Para la construcción se consideran los siguientes puntos:

Cemento tipo 2. (para agua de mar)

La proporción por cada metro cúbico es de:

800 dm³ grava
 400 dm³ arena
 250 kilos cemento
 150 kg de varilla

El método de colado es "Tubo Tremi" que consiste en que se coloca una cimbra metálica se instalan las varilla y se va vaciando el cemento que desplaza el agua del fondo a la superficie.

El costo del colado incluyendo material, mano de obra y cimbra si se tiene acceso directo con el camión es de aproximadamente:

\$4 500/m³

El relleno bajo el hueco de la rampa puede ser arena de mar.

Costo total

Volumen total por costo por m³=8.63x4500

\$38 823

3 530 dólares

INSTALACIÓN

La del amplificador ya está contemplada en la construcción, la de la instalación de las mangueras se hace mediante agua a presión para enterrarlas en la zona de playa.

Costo de la instalación

\$5 000

455 dólares

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas

Bombeo por bombas eléctricas

Costo de las bombas

Conducción

BOMBEO POR BOMBAS ELÉCTRICAS.

En este caso se requieren 2 bombas para trabajar alternadamente (los proveedores sugieren cambio cada 20 horas). La instalación es relativamente sencilla y el costo principal es el consumo de energía eléctrica y el mantenimiento y reposición del equipo por el uso continuo y la corrosión del agua marina. La conducción tanto de entrada como de salida se realiza por mangueras de 2 pulgadas.

También se requiere un sistema de bombeo en caso de eventualidad de suspensión de energía eléctrica y sería la misma bomba de gasolina prevista en el caso de oleaje.

Los costos proporcionados por diferentes proveedores son similares y se indican valores medios.

COSTO DE LAS BOMBAS

Potencia	1.5 hp
Manguera de salida	3 pulgadas
Gasto	1 000 litros/min
Costo	\$2 798
Costo mas iva	\$3 217
Número de bombas (2 de uso y una de repuesto)	3
Costo total	\$9 653
	Tres bombas
	Unitario
	878 dólares
	(293 dólares)

CONDUCCIÓN

Tipo	Manguera tipo rural (plástica con espiral de pvc)
Entrada	40m de 3 pulgadas
Salida	40m de 3 pulgadas
Costo por metro (precio de lista)	\$90.86
Costo (menos descuento + iva)	\$67.91
Costo total	\$5 433
	494 dólares

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas

Costo de operación (bombas eléctricas)

Mantenimiento

COSTO DE OPERACIÓN

Este es el rubro mas importante en la operación de estas bombas por lo que se requiere que se tenga acceso al sistema eléctrico lo que elimina la posibilidad de uso en islas y lugares de la costa alejados de los centros de población.

La energía eléctrica está subsidiada y el costo por kw/hr depende de la zona. En Quintana Roo el valor es muy bajo comparado con la zona centro del país. La política energética es ir eliminando subsidios por lo que el valor actual podría triplicarse a corto plazo.

Considerando los precios del kw en el 2002 se tiene un costo de \$0.727 kh/h sin impuestos. El costo con los impuestos (iva y otros conceptos es de 61.54%.

Costo real kw/hr en Quintana Roo	\$1.17
----------------------------------	--------

Consumo:

La bomba trabajan continuamente las 24 horas del día los 365 días del año.

Horas por año	8 760hrs
---------------	----------

Factor de conversión 1hp=745.6999 watt

Potencia de la bomba de 1.5hp= 1 118.54 kw

Consumo anual de la bomba	9 798.5 kh/hr
---------------------------	---------------

Costo del consumo anual de la bomba	\$11 464.24
	1 042 dólares

MANTENIMIENTO

Por el desgaste de las bombas de trabajo casi continuo y con agua de mar los proveedores sugieren una operación de mantenimiento cada 6 meses y reemplazo de la bomba cada dos años.

Mantenimiento semestral por bomba	\$500.00
-----------------------------------	----------

Mantenimiento de 2 bombas semestral	\$1000.00
-------------------------------------	-----------

Promedio anual mantenimiento	\$91 dólares
-------------------------------------	---------------------

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Respaldo para eventualidades (bombas eléctricas)

Instalación

RESPALDO PARA EVENTUALIDADES

En el caso de una eventualidad que se puede deber a fallas en el servicio eléctrico por algún temporal generalmente se requiere de una bomba autónoma para evitar la muerte de los organismos.

Se propone una bomba de gasolina con las siguientes características,

Tipo	gasolina
Potencia	3.1 hp
Rendimiento	400l/min
Precio	\$2 893+iva
consumo	303 dólares
Probable uso	1litro/hora
	5 días al año
	total 120 horas al año

Conducción:

Mangueras de 2 pulgadas.	
Longitud manguera de entrada	40m
Longitud manguera de salida	40m
Costo de lista por metro	\$55.17
Costo (menos descuento+iva)	\$41.23
Costo mangueras	\$3 298
	300 dólares

INSTALACIÓN

Esta operación es relativamente sencilla respecto a la bomba de oleaje y el costo principal es el de conectores.

Material	\$1500
Mano de obra	\$1000
Total	\$2500
	227 dólares

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Costo comparativo entre bombeo por oleaje y por bombas eléctricas

COSTO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS. (precios en dólares)

AÑO 1		AÑO 2		AÑO 3	
Construcción	3530	Mantenimiento	150	Mantenimiento	150
Conducción	1327				
Instalación	455				
Respaldo bomba	302				
Respado conducción	300	Combustible	0	Combustible	0
mantenimiento	150				
combustible	0	Total	150	Total	150
TOTAL	6064				

TOTAL EN 3 AÑOS DE OPERACIÓN BOMBEO POR OLEAJE 6 064 dólares

BOMBEO POR BOMBAS ELÉCTRICAS

AÑO 1		AÑO 2		AÑO 3	
Costo bombas	878	Reemplazo de una bomba	293	Reemplazo de una bomba	293
Conducción	494	mantenimiento	91	Mantenimiento	91
Mantenimiento	227				
Resplado bomba	302				
Respaico conducción	300	Consumo energía eléctrica	1042	Consumo energía eléctrica	1042
Instalación	272				
Combustible	1,042	Total	1426	Total	1426
Total	3,515				

TOTAL EN 3 AÑOS DE OPERACIÓN BOMBEO POR BOMBAS ELÉCTRICAS 6367 dólares

Como se observa en poco mas de 3 años se recupera la inversión de un sistema de bombeo por oleaje y a partir del cuarto año el costo anual es mínimo.

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Puntos de control y margen de carga

Para la operación del sistema de bombeo se proponen los siguientes puntos de control con los siguientes propósitos:

Mantenimiento de cada uno de los componentes.

- Operación Diariamente se interrumpe el flujo para alimentación.
- Experimentación. En un sistema de este tipo se destinan algunos tanques para experimentación en la que se varían algunos parámetros como el gasto.

Hay 43 puntos de control en el sistema

- En el amplificador (1). Un francobordo mayor que cualquier altura de ola para impedir el flujo de agua con fines de mantenimiento.
- En el tanque de rebosamiento(1). Una válvula de entrada como se mostró en las figuras para regular el gasto.
- En el tanque de rebosamiento(20). Una pequeña compuerta para cada uno de los estanques para regular el flujo.
- En el tanque de rebosamiento(1). Una escotadura con su compuerta al final para controlar excedencia de nivel.
- En cada estanque(20). Una válvula de salida para regular el flujo.

Margen de operación. Los 32 cm de altura que proporciona el francobordo se destinan de la siguiente manera:

		Altura en cm
Pérdidas de la manguera de entrada.		1.0
Escotadura y desnivel para cada tanque.		2.5
Altura del estanque		10.0
Ancho del tubo de salida		1.5
Nivel de pleamar superior		11.0
		Subtotal
		26.0
Margen	32-26cm	6.0

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Diseño preliminar

BOMBEO EN ESTANQUES DE ACUACULTURA

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones y recomendaciones

El diseño integral de una planta de acuacultura compete a especialistas en el tema esta sección solo se refiere al suministro de agua de mar.

El diseño esta propuesto para Puerto Morelos pero puede ser aplicado a otro sitio con las mismas condiciones en la costa de Q. Roo. Es necesario hacer una medición previa del oleaje dado que puede variar por la distancia al arrecife.

La restricción mas importante es la nivelación del terreno al nmm. En caso de instalarse un prototipo con condiciones de oleaje de mayor altura, la cota mínima puede incrementarse.

Se puede aplicar el sistema de bombeo a otros cultivos siempre y cuando se calculen adecuadamente el tirante máximo y el nivel de referencia.

El costo del sistema experimental se amortiza en 3 años comparándolo con el uso de bombas eléctricas convencionales, a partir de ahí el costo es mínimo. Con la ventaja adicional de que puede ser utilizado en zonas donde se carezca de electricidad.

8.6 EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO

A continuación se presenta otra posible aplicación del sistema de bombeo que en caso de contar con oleaje con suficiente energía se podría utilizar para bobear agua hacia una laguna litoral. Se aplicó un método numérico del programa AQUAMAP del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería para la circulación en la Laguna Bojórquez. Con tres sistemas de bombeo con un gasto cada uno de $1\text{m}^3/\text{s}$. Los datos de oxígeno disuelto del Mar Caribe se tomaron de la base del NODC. Para el caso de la demanda de oxígeno disuelto se tienen los siguientes resultados:

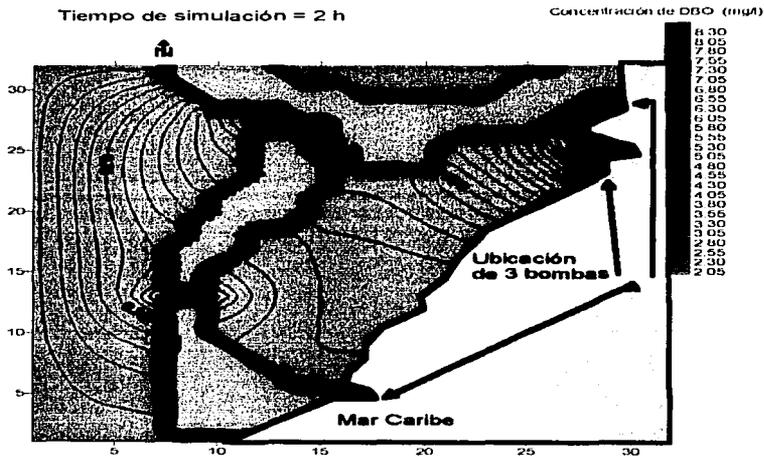


Figura 8.34 Efecto en el DBO de la laguna Bojórquez después de 2 horas de bombeo de agua de mar

Después de 25 horas el diagrama es el siguiente donde se observa claramente la disminución de los valores de oxígeno en las proximidades de las zonas de descarga.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

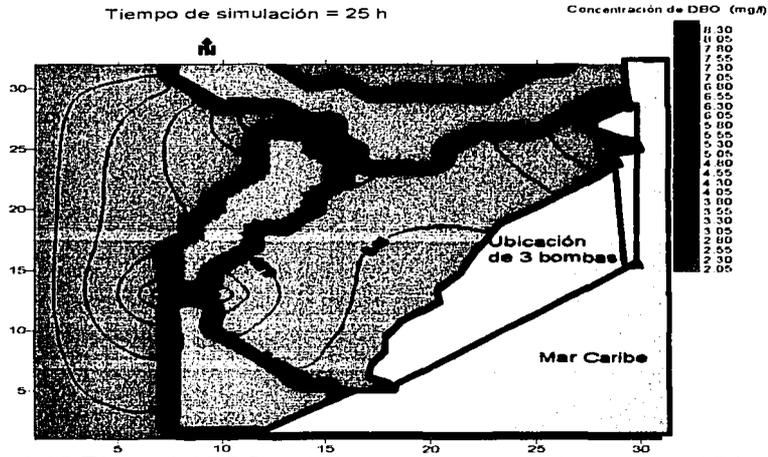


Figura 8.35 Efecto del DBO en la laguna Bojórquez después de 25 horas de bombeo de agua de mar

TESIS COM
FALLA DE ORIGEN

[The page contains extremely faint and illegible text, likely due to low resolution or scanning quality. The text is scattered across the page and does not form any recognizable paragraphs or sections.]

RECOMENDACIONES

[The main body of the page contains extremely faint and illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the document. The text is too light to transcribe accurately.]

9 RECOMENDACIONES

Se plantean las siguientes recomendaciones, de acuerdo con los resultados obtenidos, en los siguientes temas:

- Observaciones de oleaje y mareas.
- Sitios probables de aplicación.
- Volumen del cuerpo de agua.
- Lugares de instalación.
- Forma y tamaño.
- Mantenimiento.

Observaciones de oleaje y mareas.

- Es indispensable contar con mediciones de mareas a largo plazo en todos los puertos.
- Es muy recomendable instalar ológrafos en todos los puertos para referencia a cualquier posible construcción de una estructura en la costa. De preferencia tres ológrafos para determinar la dirección con precisión.
- Una vez instalado un sistema de bombeo es muy conveniente realizar un seguimiento de monitoreo con un sistema de mediciones de niveles, caudales, oleaje, etc, dado que es un sistema aún en experimentación.

Sitios probables de aplicación.

- Debido a que la costa mexicana tiene 10,000km de litoral; el sistema de bombeo se puede aplicar en las lagunas que presenten problemas de eutrofización o exceso de contaminantes.
- También puede ser utilizado en estanques de acuicultura siempre y cuando su nivel no esté muy elevado respecto al nivel medio del mar.

Volumen de cuerpo de agua.

- Para lagunas no muy grandes del orden de $5 \times 10^6 \text{m}^3$ o menos, para cuerpos de agua mayores es efecto sería casi imperceptible.

Lugares de instalación.

- Construir una escollera específicamente para el sistema de bombeo es incosteable lo mejor es aprovechar la existencia de escolleras o bien salientes rocosas de fácil acceso.

Forma y tamaño.

- Un prototipo de tamaño relativamente pequeño como de un cuadro de $10 \times 10 \text{m}^2$ es adecuado ya que tiene las siguientes ventajas:
 - Afecta poco el transporte litoral.
 - Puede ser reemplazado por modelos más eficientes a futuro, con un costo relativamente bajo.
 - Su pérdida por huracán no es muy costosa y puede ser reconstruido.
- En lugares de alta variabilidad de dirección del viento es recomendable un deflector de oleaje.

Mantenimiento

Si se utiliza el canal abierto como medio de conducción del caudal es necesario que realizar breves maniobras de limpieza del fondo y si es en la arena puede ser un conducto que trabaja como canal abierto.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

10 CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

Conclusiones

En cuanto al Sistema de Bombeo:

- Un sistema de bombeo como el presentado con oleaje del orden de 1m de altura, que es el oleaje que se presenta en las costas de México, puede generar un gasto del orden de $1\text{m}^3/\text{s}$.
- Se puede emplear para renovar agua de lagunas de volúmenes del orden de $5 \times 10^6 \text{m}^3$ o menores.
- También puede emplearse en estanques de acuicultura siempre y cuando su nivel sea del orden del francobordo del prototipo.

En cuanto a la conducción:

- Se recomienda al canal abierto en vez de la tubería submarina para la conducción del caudal.
- Para su instalación se puede utilizar una escollera, dique o una saliente de rocas como ya se ha utilizado en otros países.
- Hasta el momento se han utilizado estructuras similares en otros países para conversión de energía del oleaje en eléctrica y en este caso sería la primera vez que se hiciera con fines de bombeo para saneamiento de lagunas litorales.

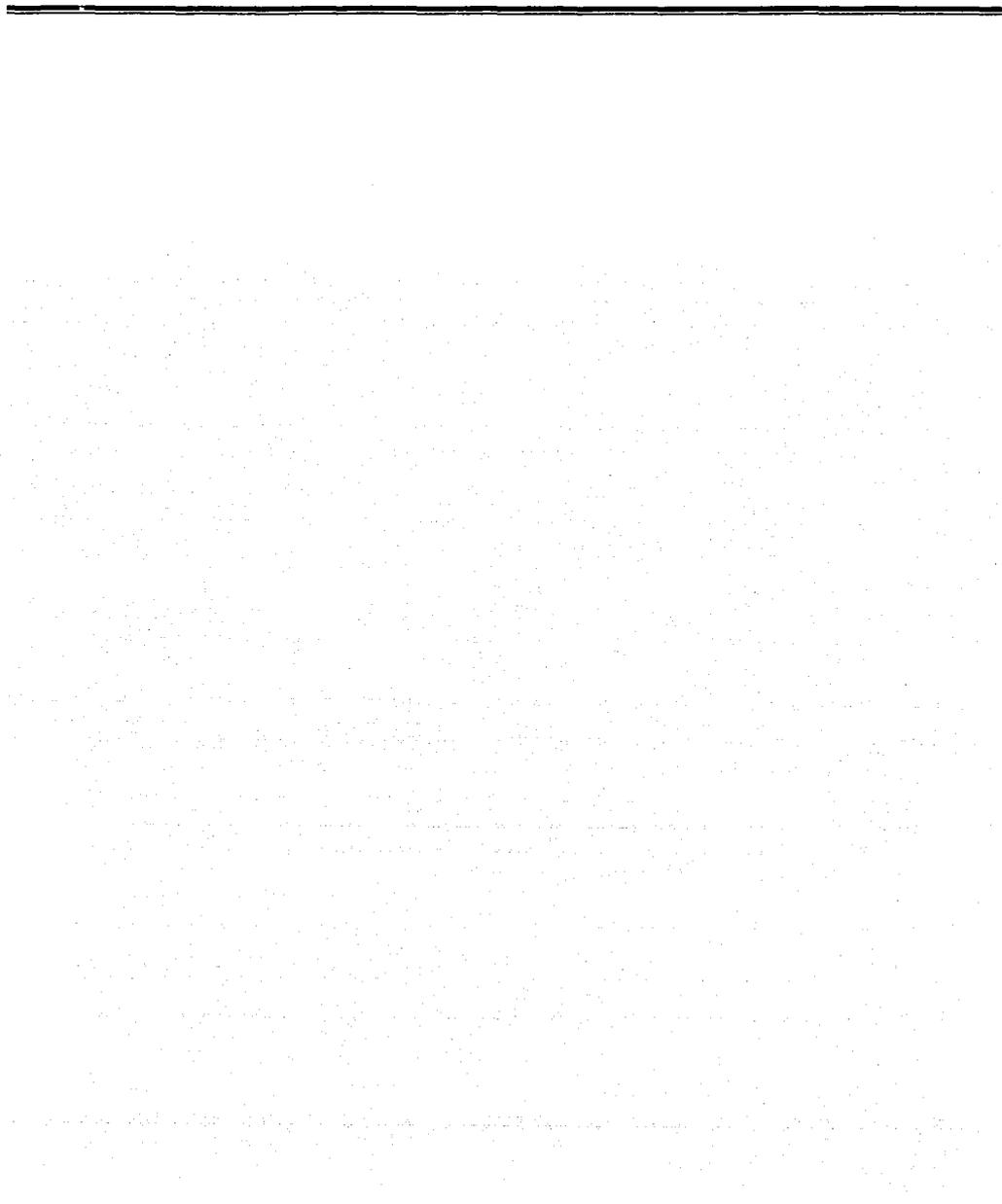
En cuanto al modelo analítico:

- Es adecuado el uso de éste en la incidencia de ondas largas en paredes convergentes con oleaje aproximadamente monocromático.

Futuras líneas de trabajo

- En México no se tiene una tradición en cultura marítima, prueba de ello es el poco conocimiento que se tiene de sus costas. Un parámetro básico para el diseño de este tipo de sistemas es el oleaje. Por lo que hay que invertir más recursos humanos y materiales para su correcta caracterización.
- Respecto al sistema de bombeo lo ideal es construirlo en una laguna pequeña donde sus resultados sean notorios al corto plazo.
- Investigar variantes de las paredes convergentes como paredes parabólicas, paraboloides de revolución etc. a nivel de laboratorio.

En general una línea de trabajo a futuro es explorar otras posibilidades de extracción de energía oceánica en nuestro país dado el extenso litoral.



APÉNDICE A ECUACIÓN DE MOMENTUM

La segunda ley de Newton en su forma más general indica que en el caso de fluidos para cualquier volumen de control:

Suma de fuerzas = cambio de momentum (mU) por unidad de tiempo

donde

m es la masa.

U la velocidad.

En el caso de fluidos es más conveniente expresar las ecuaciones en términos de la densidad en lugar de la masa.

Las fuerzas se expresan como aceleraciones dU/dt por la masa que en el caso de un volumen de control infinitesimal es la densidad media por la diferencial del volumen.

t es el tiempo.

Se establece por conveniencia un volumen de control cúbico infinitesimal ubicado en ejes cartesianos y se determinan cuáles son las fuerzas que actúan sobre el cubo descomponiendo las fuerzas en sus componentes en cada uno de los ejes.

En el caso de la presión, ésta es un escalar que actúa perpendicular a cada una de las seis caras y por eso tiene signo negativo. En cada cara hay tensiones tangenciales y normales. A primera vista parecería imposible medir cada una de estas componentes pero con aproximaciones como el conocimiento del comportamiento de estas tensiones en flujos "normales" se hacen simplificaciones que se ha observado que son válidas y por tanto se pueden obtener soluciones analíticas.

En el caso de las fuerzas de "cuerpo" (que actúan sobre todo el volumen de control) se utiliza solo la fuerza de la gravedad como constante en la dirección negativa del eje vertical.

En resumen la ecuación de momentum se describe de la siguiente forma:

Densidad por aceleración = gradiente de presión + gravedad + fuerzas viscosas.

A continuación se enuncian estos conceptos en formulación matemática para un volumen de control cúbico con volumen $dV = dx dy dz$:

Densidad por aceleración:

$$\sum F = \rho \frac{dU}{dt} \quad (\text{A.1})$$

donde

g es la aceleración de la gravedad.

ρ la densidad.

V el volumen.

F la fuerza.

Suma de esfuerzos sobre las paredes:

Se define un tensor de esfuerzos para cada una de las paredes ij de la siguiente forma:

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Considerando el efecto normal de la presión sobre cada pared el tensor de esfuerzos definido ahora como σ_{ij} se expresa como:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} - p & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} - p & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} - p \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

p es la presión.

Cada uno de los elementos τ_{ij} se puede expresar en términos del gradiente de velocidad (exclusivamente en el caso de fluidos newtonianos como el agua). Se hacen consideraciones de simetría y el coeficiente de viscosidad dinámica μ es constante en todo el campo. Por ejemplo cada término queda expresado de la siguiente forma:

$$\tau_{zy} + \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (\text{A.4})$$

Finalmente, las ecuaciones conocidas como de Navier-Stokes tienen la siguiente expresión en notación vectorial:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 U - g \quad (\text{A.5})$$

donde

μ es un coeficiente y la gravedad g solo actúa sobre el eje zz'

[The body of the page contains extremely faint and illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the document. The text is too light to transcribe accurately.]

APÉNDICE B CONDICIONES DE FRONTERA

Para estudiar el comportamiento de un fluido dentro de un área determinada es necesario determinar las condiciones en las fronteras. Éstas pueden ser sólidas como en el caso del fondo marino, variables, como la superficie donde sólo en condiciones excepcionales no hay movimiento, o bien fronteras virtuales entre el fluido al delimitar la zona.

El conocimiento de la batimetría determina una de las condiciones a la frontera de la siguiente forma:

Como es un obstáculo impermeable la velocidad normal debe de ser cero $w=0$. Por otro lado, la batimetría esta descrita en función de la posición:

$$z = -h(x, y)$$

derivando esta expresión:

$$w = u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{B.1})$$

Como $w=0$

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (\text{B.2})$$

En términos del potencial en caso de que sea un flujo irrotacional:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \quad (\text{B.3})$$

donde Φ es el potencial de velocidad.

La condición de frontera de superficie libre se obtiene planteando la ecuación que describe la altura sobre la superficie libre por medio de una función conocida η (que corresponde a los datos del oleaje o que se puede describir analíticamente con una función periódica) que depende de su ubicación en el plano xy y del tiempo t o sea $\eta = \eta(x, y, t)$, o sea:

$$z = \eta(x, y, t)$$

Derivando esta expresión se tiene la velocidad vertical:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (\text{B.4})$$

Que en términos del potencial

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad (\text{B.5})$$

Las condiciones previas son cinemáticas pues se obtienen desde un enfoque de movimiento exclusivamente. Para un enfoque dinámico se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes, que desarrolladas para condiciones en las cuales no hay tensiones tangenciales, son muy pequeñas y no se toman en cuenta (como las producidas por el viento o el fondo marino) y además que no hay viscosidad, o sea que $\mu=0$.

La ecuación de Bernoulli es:

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} [u^2 + v^2] + \frac{p}{\rho} + gz = c(t) \quad (\text{B.6})$$

o en términos del potencial para u y v :

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = c(t) \quad (\text{B.7})$$

El lado derecho es una función del tiempo exclusivamente.

APÉNDICE C CONDUCCIÓN EN CONDUCTOS A PRESIÓN

El flujo en un conducto a presión fue utilizado en la tubería que comunicaba el amplificador del oleaje con el estanque de medición. En este apéndice se presentan algunos conceptos generales del flujo en tuberías con atención hacia las condiciones particulares del tubo utilizado para no explayarse en un tema que es muy amplio. Por ejemplo una vez determinado el régimen turbulento de nuestro caso no se profundiza en el flujo laminar.

No existe una solución general del movimiento de un fluido en el interior de una tubería, existen varias soluciones para casos particulares en el caso de flujo laminar sobretodo considerando que los efectos de viscosidad y compresibilidad son despreciables. En el caso de flujo turbulento probablemente no pueda encontrarse una solución general.

La frontera entre flujo laminar y turbulento se ha determinado con el valor del número de Reynolds de 2300 que es cuando el flujo laminar se empieza a desestabilizar.

Una primera aproximación del número de Reynolds se calcula con la fórmula:

$$R_e = \frac{\rho U d}{\mu} = \frac{U D}{\nu} \quad (C.1)$$

Donde:

ν el coeficiente de viscosidad cinemática.

D es una longitud característica,

U es la velocidad.

Con los valores obtenidos experimentalmente en el prototipo:

$$U=0.1 \text{ m/s.}$$

$$\nu=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s.}$$

$$d=0.2 \text{ m.}$$

El número de Reynolds es 2×10^4 , estando en la categoría de flujo turbulento con dependencia moderada con el número de R_e .

Se puede calcular la longitud de la entrada L_e que corresponde a la distancia necesaria para que se establezca el flujo. También se puede calcular conociendo el valor de R_e mediante una fórmula obtenida por análisis dimensional de la siguiente forma:

$$\frac{L_e}{D} = g \left(\frac{U D}{\nu} \right) = g R_e \quad (C.2)$$

La cual es válida en flujo laminar.

Para flujo turbulento una fórmula empírica para determinar el fin de la transición es:

$$\frac{L_c}{D} \approx 4.4 R_{acnt}^{\frac{1}{6}} \quad (C.3)$$

Para nuestro tubo $L_c/d=22.9$ por tanto $L_c=4.6m$ que corresponde a la distancia en la cual el flujo se estabilizaría. Es importante señalar que este análisis se refiere a flujo uniforme y que el flujo real observado no fue uniforme sino acelerado por lo que los resultados que se presenten son aproximados.

ECUACIONES DE MOVIMIENTO:

La ecuación de continuidad en coordenadas cilíndricas (r, θ) es:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (r U_\theta) + \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (C.4)$$

Si se considera que no hay variación a lo largo de la circunferencia el segundo término es cero y para un flujo totalmente desarrollado U_r es función solamente de la distancia r se tiene:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_r) = 0 \quad (C.5)$$

ó $r U_r = 0$

en la frontera: $r=R$ y $U_r=0$

La ecuación del momentum en coordenadas cilíndricas se reduce a:

$$\rho U \frac{\partial U}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau) \quad (C.6)$$

Donde: τ es la fuerza tangencial. El término de la izquierda es cero porque la velocidad no es función de x sino del radio solamente. Por otro lado g_x es la componente de la velocidad perpendicular al ducto. Se tiene:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau) = \frac{d}{dx} (p + \rho g_x \text{sen}(\alpha)) \quad (C.7)$$

donde

α es el ángulo de inclinación del conducto.

Como ambos términos dependen de variables distintas cada término debe de ser una constante. Integrando se obtiene:

$$\tau = \text{constante}(r)$$

En la pared con $r=R$ el valor de τ es:

$$\tau = \frac{1}{2} R \frac{\Delta p + \rho g \Delta z}{\Delta L} \quad (\text{C.8})$$

Hasta este punto la argumentación es analítica. Ahora se aplica el análisis dimensional:

$$\tau = F(\rho, U, \nu, d, \varepsilon)$$

y se obtiene:

$$f = \frac{8\tau}{\rho U^2} \quad (\text{C.9})$$

f es el parámetro de fricción de Darcy.

Se obtiene la ecuación de Darcy-Weisbach que es válida para flujo uniforme tanto laminar como turbulento.

$$h_f = f \frac{L U^2}{d 2g} \quad (\text{C.10})$$

Falta evaluar el coeficiente de Darcy y determinar el perfil de velocidad del flujo. Para ello se emplean fórmulas empíricas como la de Colebrook para el cálculo del coeficiente de fricción f .

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (\text{C.11})$$

Ésta es una fórmula implícita, fácilmente evaluable por métodos numéricos.

Moody evaluó esta fórmula en diferentes condiciones y obtuvo una gráfica clásica para evaluar f . En el caso del tubo del experimento el valor de f está alrededor de 0.045.

Para determinar el perfil del flujo turbulento se emplea la fórmula empírica:

$$\frac{U}{U_{\max}} \approx \frac{1}{(1 + 1.33\sqrt{f})} \quad (\text{C.12})$$

En el caso del tubo:

$$U = 0.78U_{\max}$$

Para el flujo laminar la curva del flujo desarrollado es una parábola alargada, y en el del turbulento es casi constante excepto en las paredes.

APÉNDICE D CONDUCCIÓN EN CANALES ABIERTOS

Una de las conclusiones importantes de esta tesis es la sustitución del flujo en tubería por en canal abierto por las condiciones de instalación, mantenimiento y costo.

En éste apéndice se mencionan algunos de los conceptos generales más importantes de los canales abiertos y se concluye con un caso de aplicación concreto en la Laguna Bojórquez en Cancún Q.Roo.

Los canales abiertos tienen la característica de que una de las fronteras es la superficie libre en contacto con la atmósfera y el resto de las fronteras son superficies sólidas impermeables. La ventaja de esta situación es que se conoce la presión en todo el canal y que se puede considerar constante pero la gran dificultad es que no se conoce de antemano la forma que adopta el fluido.

Conceptualmente dadas las fuerzas que intervienen se caracteriza el flujo por medio del número de Froude, $Fr=V/C_{cr}$ donde V es la velocidad y C_{cr} es la velocidad crítica del canal y que delimita dos tipos de flujo uno veloz pero con poca profundidad (supercrítico) y otro lento pero de mayor profundidad (subcrítico).

ECUACIÓN DE FLUJO UNIFORME

La primera consideración que se hace es suponer que la ecuación de Darcy-Weisbach para flujos a presión es válida en canales abiertos.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (D.1)$$

Para el tratamiento de canales abiertos el diámetro D se sustituye por el radio hidráulico que en el caso de un canal circular es $D=4R_h$

$$h_f = f \frac{4 L V^2}{R_h 2g} \quad (D.2)$$

Después se aplica la ecuación de momentum en un volumen de control que comprende una sección del canal, Considerando que la velocidad es constante y la presión también lo es por tanto:

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_f = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (D.3)$$

se reduce a:

$$h_f = z_2 - z_1 = S_0 L \quad (D.4)$$

donde S_0 es la pendiente y L la longitud del canal suponiendo que es un canal recto.

Igualando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene una fórmula para la velocidad:

$$V_0 = \left(\sqrt{\frac{8g}{f}} \right) (\sqrt{R_h S_0}) \quad (D.5)$$

Esta es la ecuación de Chezy, el primer término es una constante. Esta ecuación se utilizó durante más de 100 años hasta que nuevas observaciones determinaron que la constante de esta fórmula dependía también del radio hidráulico en relación $R_h^{1/6}$ con esta nueva consideración se obtuvo una fórmula semiempírica más precisa que es la de uso actual más generalizado y se conoce como fórmula de Manning.

$$Q = VA = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_0^{1/2} \quad (D.6)$$

Donde n es un coeficiente que depende del material de las paredes exclusivamente.

Un concepto natural y sumamente útil es el de energía específica que comprende los términos del tirante y velocidad. No representa la energía total por tanto no es una cantidad que se conserve pero muestra propiedades muy interesantes del flujo en el canal por ejemplo pueden existir dos condiciones una de flujo subcrítico y otra supercrítico que tengan la misma energía específica, también sirve para encontrar el tirante crítico que es el punto-agua entre ambos tipos de flujo.

El método para estudiar un canal es primero determinar la velocidad por la ecuación de Manning y posteriormente por medio de la energía específica determinar el tirante.

Normalmente se tienen canales sumamente largos y como las pérdidas por fricción dependen de la velocidad se llega a un momento de equilibrio en el que la suma de las fuerzas es cero y el tirante es constante por lo que se le llama tirante normal.

Cuando existen cambios de área transversal, de pendiente, curvatura, etc no se tiene un tirante constante, en estos casos los cálculos de velocidad y tirante se hacen considerando que la ecuación de Manning es válida en intervalos pequeños y se realizan los cálculos por medio de algún método de diferencias finitas.

Un fenómeno muy importante en los canales es el salto hidráulico que es un cambio brusco de régimen supercrítico a subcrítico por un cambio de pendiente. En este caso hay una gran pérdida de energía que es una de las aplicaciones de este fenómeno. La carga hidráulica disipada se calcula por medio de la fórmula:

$$h_f = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad (D.7)$$

Donde y_1 y y_2 son los tirantes previo y posterior al salto.

APLICACIÓN

A continuación se describen las especificaciones para el canal de conducción de agua marina desde el prototipo en mar abierto en la playa de Cancún hacia la Laguna Bojórquez.

Terreno: El canal se debe de adaptar al terreno que es de 2 tipos, la primera parte roca viva, la segunda playa y la tercera a construcciones urbanas que comprenden un andador, un estacionamiento y una carretera de 6 carriles.

Forma: Secciones rectas que se adapten al terreno. En la parte de la roca puede ser un canal abierto rectangular, en el resto un tubo circular enterrado.

Régimen de flujo: No uniforme dado que el caudal proviene del oleaje que por naturaleza es irregular.

Gasto máximo: El prototipo pretende suministrar un gasto promedio de $1\text{m}^3/\text{s}$, que puede llegar a ser el doble en caso de oleaje intenso. Con un factor de 2 el canal debe de diseñarse para un gasto de $Q=2\text{m}^3/\text{s}$.

Coefficiente de rugosidad de Manning: La superficie del canal debe de ser lisa por ejemplo de cemento pulido (Chow, 1994).

$$n=0.011$$

Forma del canal: Las secciones hidráulicas geométricas tienen una geometría óptima para un canal rectangular es la mitad de un cuadrado, para un trapecial medio hexágono, para un triangular medio rectángulo.

Los criterios de selección pueden ser:

- a) Ancho del canal mínimo para afectar lo menos posible al terreno.
- b) Facilidad de construcción.

Estos criterios los satisfacen el rectángulo y el círculo (para el cual existen tuberías prefabricadas).

Altura inicial: Se hicieron cálculos iterativos para obtener un gasto de $4\text{ m}^3/\text{s}$ y se obtuvieron las siguientes alturas:

Canal rectangular 0.5m

Canal circular 0.3m

Velocidad del canal: De acuerdo con la fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_0^{1/2}$$

$V=2.2$ m/s

Velocidad crítica:

$$V_{crit} = \sqrt{gV}$$

V_c = velocidad crítica.

$V_c = 3.13$ m/s

Régimen del flujo como la velocidad es inferior a la crítica y ésta velocidad es la mayor el régimen será siempre:

Subcrítico

Como consecuencia no es de esperarse la presencia de un salto hidráulico.

Por último se hace una consideración en base a la sedimentación dado que es indeseable el flujo de arena hacia la laguna.

La velocidad de sedimentación de arena fin en suelos no cohesivos varía entre 0.24 y 0.7 m/s (Chow, 1994) por lo que no se esperaría sedimentación excepto en el caso donde los intervalos entre olas generen velocidades inferiores a estos valores, por lo que se propone colocar trampas de arena.

Cambio de forma. En la playa se puede cambiar de sección rectangular a circular para que la tubería vaya enterrada hasta la laguna.

El diámetro de la tubería será de:

Diámetro 1.6 m

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- 1 Bruun P., F. Asce and G. Viggosson. 1997. The wave Pump: Conversion of Wave Energy to Current Energy. Journal of de Waterway, Port, Coastal and Ocean Division. Vol 103 No W W 4.
- 2 Causon D. D. Ingram, C.Minham,j.Zang, k.Hu and J.Guo. 2000. Coastal Engineering. ACCE. P 2087-2099.
- 3 Chow V.T. 1994. Hidráulica de Canales Abiertos. Mc Graw Hill.
- 4 Czitrom S., E. Prado, R. Peralta, M. Merino, F. Ruiz y M.A. Alatorre. 1994. Resonant Duct Wave Amplification. Proceedings of 1993 European Wave Energy Symposium. 21-24 July 1993. Scotland. 157-162.
- 5 Chamberlain P.G. and D. Porter. 1995. The modified mild-slope equation. J. Fluid Mechanics. Cambridge University Press. Pp 393-407.
- 6 Charlier R.H. And J.R. Justus. Ocean Energies. 1993. Environmental, economic and technological aspects of alternative power sources. Elsevier Oceanography Series.
- 7 Coche A.G. and J.F. Muir. 1992. Pond Construction. Simple methods for aquaculture. 20/2 FAO training series.
- 8 De Lara R. Castro T. Criterios y modelos de operación en acuicultura. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.
- 9 Flight. 1999. What goes around comes around. Better water circulation on the Adriatic coast.
- 10 Godz Y. 2000. Random Seas and Design of Maritime Structures. Advanced Series on Ocean Engineering- Volume 15. World Scientific.
- 11 González A., M. Merino y S.Czitrom. 1992. Laguna Bojórquez, Cancún: Un sistema de características marinas controlado por la atmósfera. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. México 19(1).
- 12 Herbich J.B. Editor. 1990. Handbook of Coastal and Ocean Engineering. Volume 1. Wave Phenomena and Coastal Structures. Gulf Publishing Company.
- 13 Instituto de Geofísica. UNAM. 1984. Tablas de predicción de mareas 1985.
- 14 Kinsman. 1965. Wind waves. Prentice Hall.

- 15 Kofoed J. 2000. Optimization of Overtopping Ramps for Utilization of Wave Energy. Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory Department of Civil Engineering. Aalborg University,
- 16 Kubune K. & M.Osato. 1976. « A study of wave height distribution along a breakwater with a corner. Rept. Port an Harbour Res. Inst 25(2).
- 17 Lamb.H.1997. Hydrodynamics. Cambridge Mathematical Library.
- 18 NOAA, 1981. Tropical Cyclones of the North Atlantic Ocean, 1871,1980. National Climatic Center.
- 19 Marsden J y Hoffman M. 1996:Análisis básico de variable compleja. Trillas.
- 20 Mei, C.C. 1989. The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves. Advanced Series on Ocean Engineering. Volume 1. World Scientific.
- 21 Merino M. 1986. Aspectos de la circulación costera superficial del Caribe Mexicano con base en observaciones utilizando tarjetas de deriva. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. 13 (2).
- 22 Merino M y L. Otero. 1983. Atlas Ambiental Costero. Puerto Morelos. Conacyt-ICMyL, CIQROO 1991.
- 23 Merino, AM, S Czitrom, E. Jordán, E. Martí, P. Thomé and P. Moreno.1990. Hydrology and Rain Flushing of the Nichupté Lagoon System, Cancun, Mexico. Estuarine, Coastal and Shelf Science 30.
- 24 National Oceanographic data center. Washington. DC. Data base Atlantic Ocean.
- 25 Peralte R. 1993. Fluidos: apellido de líquidos y gases. La ciencia desde México. V115. Fondo de Cultura Económica.
- 26 Porter D. And D.J. Staziker.1995 Extensions of the Mild-slope Equation. 1. J. Fluid Mechanics.
- 27 Rahman M. 1995. Water Waves. Claredon Press. Oxford.
- 28 Randlov P Editor. 1993. Wave Energy Converters. Generic Technical Evaluation Study. Danish Wave Power aps, Dinamarca.
- 29 Ruíz F., M. Merino, M. Alatorre, S. Czitrom y V. Franco. 1994. Un dispositivo de bombeo de agua marina activado por oleaje. Ingeniería Hidráulica en México Vol IX Núm 2.

-
- 30 Ruo-Shan Tseng, w. Ri-Hsiang, H. Chai-Cheng. 2000. Model Study of a Shoreline Wave Power System. Ocean Engineering vol 27.
 - 31 Sverdrup H. M. Jonson and R. Fleming. 11970. The Oceans. Their Physics, Chemistry and General Biology. Prentice Hall.
 - 32 Silva R.P. Salles & A. Palacio. 2002. Linear Waves propagating over a rapidly variable finite porous bed. Coastal Engineering. 44.
 - 33 Shore Protection Manual. Vol I. 1977. U. S Army Coastal Engineering Research Center.
 - 34 Vershinki. N.V. 1989. Energía del Océano. Mir Moscú. ISBN 5-03-0007016.
 - 35 White F. 1994. Fluid Mechanics. Mc. Graw Hill.
 - 36 Wurjanto, A. And N. Kobayashi. 1991: Numerical Model for Random Waves on Impermeable Coastal Structures And Beaches. May, 1991. U.S: Army Coastal Engineering Research Center. Research
 - 37 www direcciones en web
 - a) www.vows.ac.uk
 - b) www.energetech.com.au
 - c) <http://www.jamstec.go.jp/jamstec/myt.html> (mighty whale)
 - d) <http://www.edf.fr/html/en/decouvertes/voyage/usine/retour-usine>