



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

“BLOW-JET”, TECNOLOGÍA OCEANOMOTRIZ  
DE LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA  
DEL OLEAJE (WEC), EN SUS ETAPAS:  
CONCEPTO DE DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DEL  
PROTOTIPO A ESCALA EN UN CANAL DE OLAS

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

P R E S E N T A:

XAVIER CHÁVEZ CÁRDENAS

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN



MÉXICO, D.F. OCTUBRE 2010



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. ECHÁVEZ ALDAPE GABRIEL  
Secretario: DR. MENDOZA BALDWIN EDGAR GERARDO  
Vocal: DR. SILVA CASARÍN RODOLFO  
1<sup>er</sup> Suplente: DR. PEDROZO ACUÑA ADRIÁN  
2<sup>do</sup> Suplente: DR. CARMONA PAREDES RAFAEL BERNARDO

POGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TUROR DE TESIS:**

DR. SILVA CASARÍN RODOLFO



---

**FIRMA**



# *Agradecimientos*

---

Primeramente gracias a CONACyT por el apoyo económico brindado durante los dos años de la maestría.

En segundo lugar gracias a el proyecto THESEUS por brindar los recursos económicos para el proyecto y mi beca de los meses restantes correspondientes al alargue de la tesis.

Gracias a los Doctores Rodolfo Silva Casarín y Edgar Gerardo Mendoza Baldwin por brindarme un espacio de trabajo durante mi estancia como estudiante y todavía a la fecha, además de soportar las peticiones y reclamos.

A mis compañeros del grupo de costas y puertos, a todos los estudiantes que realizaron estancia en el laboratorio y colaboraron con el proyecto, y más aún a mis compas del laboratorio, el ingeniero Toño y el ingeniero Miguelon, reciban un sincero agradecimiento.

Muchas gracias a todas las personas que me apoyaron en mí partida al Distrito Federal: compañeros y profesores del laboratorio de materiales, a mi directora de tesis de licenciatura Dra. Elia por conseguirme la casa y a las personas que me apoyaron a mi llegada: compañeros de clase que incluso hasta con el hospedaje me ayudaron, a mi tutor el Dr. Echávez por sus consejos, mis vecinos que además de su apoyo me amueblaron un poco el depa.

En especial agradezco a toda mi familia, a mi amasita que siempre me apoya y confía en mí. A mi jefe que también me apoya pero como presiona con la fecha del examen. Mi carnal que me ayudó en el segundo año con la mitad de la renta y a mi carnala que me auxiliaba y auxilia cada vez que me enfermo. A mi novia Cristina por apoyarme durante los dos años y darme lata. Así como al apoyo anímico por parte de mis primos.



*“Lo último que uno sabe,  
es por donde empezar”*  
**Blaise Pascal.**





# RESUMEN

---

El desarrollo inicial de un dispositivo oceanomotoriz se expone en la presente tesis, dicho dispositivo integra la tecnología destinada al aprovechamiento de la energía undimotriz o tecnología WEC por sus siglas en inglés Wave Energy Converter.

Objetivo fundamental de la tecnología WEC es atender las condiciones imperantes en la actualidad, en lo que concierne a la generación de energía eléctrica, como una alternativa que reemplace a los hidrocarburos como fuentes de generación energética, recurso no renovable y cuyas sustancias producto de su combustión son un problema de contaminación a escala global.

El respeto por el medio ambiente ha centralizado los esfuerzos en las energías verdes (renovables y limpias); mostrando diversas tecnologías un evidente adelanto al grado de estar en etapa de comercialización, éstas tecnologías corresponden a las que aprovechan la energía eólica y solar directa y en lo que respecta a la energía oceánica, a la gran variedad de turbinas empleadas en la generación a partir de la energía mareomotriz y de corrientes marinas.

Beneficio importante resulta el hecho de que el mercado tecnológico del campo de la energía undimotriz permanece prácticamente intacto a pesar del gran número de dispositivos diseñados producto de esta misma lucha por conquistar el mercado y evitar la dependencia tecnológica.

El diseño sorprendentemente sencillo, inspirado en ideas funcionales como los son el TAPCHAN y los geiseres marinos, basa su geometría en el instrumento musical denominado tuba. Emulando al TAPCHAN el dispositivo pretende concentrar la ola en su interior y al imitar a los geiseres marinos pretende entregar dicha energía en forma de un chorro potente, siendo esto último la razón de bautizar el dispositivo con el nombre de *Blow-Jet*.

La etapa de evaluación del modelo a escala del *Blow-Jet* se realizó en un canal de olas, sometiéndose a 300 ensayos producto de la combinación de los parámetros variables, siendo éstos: altura de ola y periodo (estado de mar) además de la fracción sumergida e inclinación del *Blow-Jet* (posición). Durante los ensayos los parámetros de interés registrados fueron alturas de ola frente y detrás del *Blow-Jet* así como la velocidad del agua a la entrada y velocidad del chorro de salida.

Se codificaron dos programas que permitieron procesar y analizar los datos y uno más que determina de forma precisa la energía que captura el *Blow-Jet*, empleando la energía cinética específica de Stokes de segundo orden ( $SKE_S$ ) y la ecuación del perfil de la superficie libre del agua de la teoría lineal ( $\eta$ ) para calcular la energía cinética y potencial respectivamente.

La comparación de la energía que captura el *Blow-Jet* y la que entrega el mismo en el chorro, determinó la eficiencia energética de cada ensayo, siendo menor del 10% para todos los casos.

A pesar de las eficiencias aparentemente bajas, el análisis a este primer diseño resulta de gran importancia como referencia para realizar modificaciones a la geometría con la finalidad de obligar a la ola capturada a salir por el orificio correspondiente, además de revelar un amplio panorama de opciones que auguran un promisorio futuro para el *Blow-Jet* como dispositivo de aprovechamiento y protección.

# ABSTRACT

---

This thesis describes the initial development of a marine device intended to harness wave energy known as WEC (Wave Energy Converter) technology.

Respect for the environment has led to the development of many new technologies for the creation of “green energy” (renewable and clean), exploiting wind and direct solar energy. With respect to ocean energy, the WEC is one example of the wide variety of turbines which aim to generate energy from tidal and ocean currents, a field in which there is still scope for innovation since, as yet, no device has managed to dominate the market.

The surprisingly simple design of the *Blow-Jet* was inspired by functional ideas, such as the TAPCHAN devices and naturally occurring marine geysers, while its geometry is based on a musical instrument, called the tuba. Emulating the TAPCHAN, the device aims to concentrate the wave inside the device and, imitating marine geysers, expel that energy in the form of a powerful jet, hence the name *Blow-Jet*.

A scale model of the *Blow-Jet* was evaluated in a wave flume, through 300 trials, which gave a combination of variable parameters, which are: wave height and period (sea state) and the submergence and inclination of *Blow-Jet* (position). During the tests, the parameters of interest included: wave heights in front of and behind the *Blow-Jet* and jet velocity at the entrance and exit of the device.

Two programs were coded to process and analyze the data and a third was used to accurately calculate the energy that the *Blow-Jet* captures. Using Stokes second order specific kinetic energy ( $SKE_S$ ) and the equation for a free surface profile of water linear theory ( $\eta$ ) kinetic and potential energy can be calculated. The comparison of energy captured and that delivered by the jet is determined as the energy efficiency of each test, is given as less than 10 % for all cases.

Despite its apparently low efficiency, the analysis of this first design is of great importance as a reference for making modifications in the geometry of the device and it is believed that there is a promising future for the *Blow-Jet* as a device for the harnessing of green energy.



# *Índice General*

---

RESUMEN	IX
ABSTRACT	XI
<i>Índice General</i>	XIII
<i>Índice de Figuras</i>	XIX
<i>Índice de Tablas</i>	XXV
<i>Lista de Símbolos</i>	XXVII
OBJETIVOS	XXXI
MOTIVACIÓN	XXXIII
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. METODOLOGÍA . . . . .	5
I.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO . . . . .	5
II. ENERGÍA ( <i>como recurso</i> )	7
II.1. ENERGÍA NO RENOVABLE . . . . .	9
II.2. ENERGÍA RENOVABLE . . . . .	10
II.2.1. FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE . . . . .	10

II.3. ENERGÍA OCEÁNICA . . . . .	11
II.3.1. ESTADOS DE DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA OCEANOMOTRIZ . . . . .	12
II.3.2. FUENTES DE ENERGÍA OCEÁNICA . . . . .	13
II.3.2.1. Mareomotriz . . . . .	14
II.3.2.2. Corrientes Marinas . . . . .	14
II.3.2.3. Gradiente Térmico Oceánico . . . . .	16
II.3.2.4. Gradiente de Salinidad . . . . .	18
<b>III. ENERGÍA UNDIMOTRIZ</b>	<b>21</b>
III.1. EL OLEAJE COMO FUENTE DE ENERGÍA . . . . .	23
III.2. TECNOLOGÍA . . . . .	24
III.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS POR LA FORMA EN QUE OPERAN . . . . .	25
III.2.1.1. Mecánico Directo . . . . .	25
III.2.1.2. Neumático Indirecto . . . . .	25
III.2.1.3. De Rebase . . . . .	26
III.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS POR SU UBICACIÓN . .	27
III.2.2.1. Sobre la Línea de Costa . . . . .	27
III.2.2.2. Cerca de la Costa . . . . .	28
III.2.2.3. Mar Adentro . . . . .	28
<b>IV. PANORAMA ENERGÉTICO EN MÉXICO</b>	<b>29</b>
IV.1. PROGRAMA ENERGÉTICO EN 1976 Y REALIDAD EN 2000 . . . . .	31
IV.2. ENERGÍA OCEÁNICA . . . . .	32
IV.2.1. MAREOMOTRI . . . . .	32
IV.2.2. UNDIMOTRIZ . . . . .	32
IV.2.3. CORRIENTES MARINAS . . . . .	33
IV.2.4. RESPIRADEROS HIDROTERMALES/OTEC . . . . .	34

<b>V. OLEAJE</b>	<b>37</b>
V.1. CARACTERIZACIÓN . . . . .	39
V.1.1. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS ONDAS . . . . .	39
V.1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS OCEÁNICAS . . . . .	40
V.1.3. CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE . . . . .	42
V.1.3.1. Oleaje Local o <i>Sea</i> . . . . .	42
V.1.3.2. Oleaje Distante o <i>Swell</i> . . . . .	42
V.1.4. ESTADO DE MAR . . . . .	43
V.1.4.1. Descripción Estadística Temporal y Espectral de un Estado de Mar . . . . .	43
V.2. INTERACCIÓN OLA-ESTRUCTURA . . . . .	43
 <b>VI. <i>BLOW-JET</i>, CONCEPTO DE DISEÑO</b>	 <b>47</b>
VI.1. MODELO MATEMÁTICO DEL PERFIL HIDRODINÁMICO . . . . .	51
VI.2. ELECCIÓN DEL PERFIL . . . . .	53
VI.3. CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE LOS PERFILES . . . . .	53
VI.4. FABRICACIÓN DEL <i>BLOW-JET</i> . . . . .	55
VI.4.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PERFILES . . . . .	55
VI.4.2. PROCESO CONSTRUCTIVO . . . . .	56
VI.4.2.1. Intento de Fabricación con Acrílico . . . . .	56
VI.4.2.2. Definitivos en Fibra de Vidrio . . . . .	57
 <b>VII. <i>BLOW-JET</i>, ETAPA DE ANÁLISIS EN EL CANAL DE OLAS</b>	 <b>59</b>
VII.1. OBJETIVO DE LOS ENSAYOS . . . . .	61
VII.2. DETERMINACIÓN DE LOS ENSAYOS . . . . .	61
VII.3. ESQUEMA EXPERIMENTAL . . . . .	62
VII.3.1. INSTRUMENTACIÓN PARA MEDICIÓN DE VELOCIDADES . . . . .	62
VII.3.1.1. Velocidades a la Entrada . . . . .	62

VII.3.1.2. Velocidades a la Salida . . . . .	63
VII.3.2. INSTRUMENTACIÓN PARA OBTENER ALTURAS DE OLA . . . . .	63
VII.3.3. POSICIÓN DEL <i>BLOW-JET</i> . . . . .	64
VII.4. CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE EMPLEADO . . . . .	65
VII.4.1. HR WAVEMAKER . . . . .	65
VII.4.2. POLYSYNC . . . . .	65
VII.4.3. WAVE DATA COLLECTOR (WDC) . . . . .	66
VII.4.4. FLOWMANAGER . . . . .	67
VII.5. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS . . . . .	68
VII.6. PROCESAMIENTO DE DATOS . . . . .	70
VII.6.1. ADVs . . . . .	70
VII.6.2. FLOWMAP . . . . .	71
VII.6.3. SENSORES DE NIVEL . . . . .	73
<b>VIII. ANÁLISIS ENERGÉTICO</b>	<b>75</b>
VIII.1. ENERGÍA A LA ENTRADA (OLEAJE) . . . . .	77
VIII.1.1. ENERGÍA CINÉTICA . . . . .	77
VIII.1.1.1. Planteamiento del Programa TOTAL_ENERGY.f90 . . . . .	80
VIII.1.2. ENERGÍA POTENCIAL . . . . .	84
VIII.2. ENERGÍA A LA SALIDA (CHORRO) . . . . .	88
VIII.3. EFICIENCIA HIDRÁULICA . . . . .	89
VIII.3.1. ENERGÍA POTENCIAL A LA SALIDA . . . . .	91
<b>IX. RESULTADOS</b>	<b>95</b>
IX.1. ALTURAS DE OLA . . . . .	97
IX.1.1. COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN ( $K_{tr}$ ) . . . . .	97
IX.1.2. EFICIENCIA DE DISIPACIÓN ( $\eta_{diss}$ ) . . . . .	98
IX.2. VELOCIDADES . . . . .	100



IX.2.1. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN ( <i>F.A.</i> ) . . . . .	100
IX.3. INFLUENCIA DE <i>L</i> Y <i>H</i> EN LA EFICIENCIA HIDRÁULICA . . . . .	102
<b>X. DISCUSIÓN</b>	<b>107</b>
<b>XI. CONCLUSIÓN</b>	<b>111</b>
<b>XII. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>115</b>
<b><i>A. Propiedades ingenieriles de las ondas progresivas</i></b>	<b>121</b>
A.1. RELACIONES BÁSICAS . . . . .	121
A.2. ENERGÍA Y PROPAGACIÓN DE ENERGÍA EN ONDAS PROGRESIVAS . . . . .	124
A.2.1. ENERGÍA POTENCIAL . . . . .	124
A.2.2. ENERGÍA CINÉTICA . . . . .	125
<b><i>B. Canal de olas</i></b>	<b>129</b>
B.1. ESTRUCTURA PROPIA DEL CANAL . . . . .	129
B.2. SISTEMA DE GENERACIÓN DE ONDAS . . . . .	130
B.2.1. SISTEMA DE ABSORCIÓN . . . . .	130
B.3. INSTALACIÓN PARA LA INSTRUMENTACIÓN . . . . .	131
B.4. SISTEMA DE LLENADO Y VACIADO . . . . .	131
<b><i>C. Instrumentación</i></b>	<b>133</b>
C.1. ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV) . . . . .	133
C.2. FLOWMAP . . . . .	134
C.3. SENSORES DE NIVEL (MONITORES DE LAS SONDAS DE ONDA) . . . . .	137
<b><i>D. Datos procesados con los programas LEEWDC y REFLE</i></b>	<b>139</b>
<b><i>E. Velocidades procesadas</i></b>	<b>149</b>

<b>F. <i>Energía</i></b>	<b>157</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>163</b>

## Índice de Figuras

---

II.1. Evolución desde 1971 hasta 2007 del total mundial de suministro de energía primaria por combustible (Mtoe) [OECD/IEA, 2009] . . . . .	9
II.2. Comparación del total mundial de suministro de energía primaria por combustible entre los años 1973 y 2007 (Mtoe) [OECD/IEA, 2009] . . . . .	10
II.3. Potencial de utilización de la energía oceánica . . . . .	11
II.4. Estado de desarrollo de la tecnología, <i>Ref. Powertech Labs Report. 2008</i> . . . . .	12
II.5. La Rance, estación mareomotriz en Francia . . . . .	14
II.6. Esquema de diseño de los principales componentes mecánicos para una turbina de corrientes marinas . . . . .	15
II.7. Potencia extraíble de las corrientes marinas de una velocidad dada, en eficiencia del 30 % promedio (CEC, 1996) . . . . .	15
II.8. THE BLUE CONCEPT, Mar de pruebas en el estrecho noruego de Kvalsundet, Noruega ( <i>Hammerfest Strom AS, Norway</i> ) . . . . .	16
II.9. OPEN-CENTRE TURBINE, Instalación en Orkney, Escocia ( <i>OpenHydro, Ireland</i> )	16
II.10. Tipos de turbinas [Khan et al., 2009] . . . . .	16
II.11. Diferencia de temperaturas entre la superficie y 1000 m de profundidad . . . . .	17
II.12. Ciclo cerrado OTEC ( <i>Ciclo Rankine</i> ) . . . . .	17
II.13. Demostración de un dispositivo termodinámico OTEC de ciclo Rankine de 1MW ( <i>Saga University, Japan</i> ) . . . . .	18
II.14. Sistema experimental OTEC de 30kW ( <i>Saga University, Japan</i> ) . . . . .	18
II.15. Montaje experimental del desarrollo de membranas de potencial osmótico para el aprovechamiento de energía del gradiente de salinidad ( <i>Statkraft SF, Norway</i> )	18

III.1. Distribución de los niveles de poder del oleaje en aguas profundas, en kW/m de cresta de ola . . . . .	24
III.2. POWERBOUY, Absorbedor puntual de libre flotación, mar de pruebas en Hawaii ( <i>Ocean Power Technologies, USA</i> ) . . . . .	25
III.3. Esquema de un dispositivo OWC . . . . .	26
III.4. LIMPET ( <i>Land Installed Marine Power Energy Transmitter</i> , dispositivo OWC) [ <i>Queens University Belfast, 2002</i> ] . . . . .	26
III.5. WAVE DRAGON, De rebase con amarre holgado, mar de pruebas en Nissum Bredning, Dinamarca ( <i>Wave Dragon ApS, Denmark</i> ) . . . . .	27
III.6. TAPCHAN (TAPered CHANnel) . . . . .	27
III.7. PELAMIS, Dispositivo flotante articulado, montaje de la primera granja de dispositivos para mar adentro, frente al norte de Portugal ( <i>Ocean Power Delivery, UK</i> ) . . . . .	28
IV.1. Comparación entre la propuesta de 1976 y la realidad en 2000, respecto a la generación de energía eléctrica . . . . .	31
IV.2. Modelo del sistema QK ( <i>turbinas de eje vertical</i> ) . . . . .	34
V.1. Parámetros característicos de las ondas . . . . .	40
V.2. Periodo-energía de las ondas [ <i>Kinsman, 1965</i> ] . . . . .	41
V.3. Mecanismos de onda encontrados en la ingeniería de costas y la interacción del oleaje y la ingeniería costera . . . . .	45
VI.1. Junio 1983, México D.F. [Repper, 1983] . . . . .	49
VI.2. Esquema general del TAPCHAN . . . . .	49
VI.3. Géiser marino . . . . .	50
VI.4. Perfil de mínima resistencia . . . . .	51
VI.5. Perfiles elegidos . . . . .	53
VI.6. Dimensiones tomadas del catalogo yamaha . . . . .	54
VI.7. Geometría del <i>Blow-Jet</i> 1 ( $y = 1.37178 x^{3/4}$ ) . . . . .	56
VI.8. Enfriamiento del acrílico en contacto con el molde de madera . . . . .	56
VI.9. Mitad del <i>Blow-Jet</i> en acrílico . . . . .	56

VI.10. <i>Blow-Jet</i> 1, 2 y 3 en fibra de vidrio . . . . .	57
VI.11. Interior del dispositivo . . . . .	57
VII.1. Esquema experimental . . . . .	62
VII.2. Posiciones a evaluar del <i>Blow-Jet</i> . . . . .	64
VII.3. Interfaz WaveMaker . . . . .	65
VII.4. Ventana para la configuración de los ADVs . . . . .	65
VII.5. Visualización del registro de velocidades durante la medición . . . . .	66
VII.6. Adquisición de datos WDC . . . . .	66
VII.7. Interface gráfica del WDC para la rutina de calibración . . . . .	67
VII.8. Configuración de la frecuencia del laser (destellos) . . . . .	68
VII.9. Número de ráfagas y grabaciones (destellos) . . . . .	68
VII.10. Tiempo entre pulsos y ráfagas . . . . .	68
VII.11. Secuencia de los ensayos . . . . .	69
VII.12. Conversión a velocidades . . . . .	71
VII.13. Sexta parte de la historia de velocidades a la entrada del <i>Blow-Jet</i> (prueba 53) . . . . .	71
VII.14. Proceso para escalar imagen . . . . .	72
VII.15. Cuatro (46, 47, 48 y 49) de las sesenta imágenes correspondientes al ensayo 53 . . . . .	72
VII.16. Mapas vectoriales correspondientes a las imágenes de la figura VII.15 . . . . .	73
VII.17. Historia de las velocidades de salida (prueba 53) . . . . .	73
VIII.1. Áreas proyectadas . . . . .	81
VIII.2. Comparación entre $KE_{lineal e}$ y $KE_{Se}$ , determinadas ambas tanto con alturas de ola medidas ( $H$ medida) como con las alturas de ola teóricas (las ingresadas en el sistema de generación: 0.08, 0.12, 0.16 y 0.20 m) . . . . .	83
VIII.3. Esquema del volumen discretizado para el cálculo de la energía potencial . . . . .	85
VIII.4. Perfil de la superficie libre detenido en $t = 0$ ( $H = 0.16$ m, $T = 1.4$ s y $L = 2.7487$ m) . . . . .	85
VIII.5. $PE_e$ contra $KE_{lineal e}$ . . . . .	86

VIII.6. $TE_e$ calculada con $H$ medida y $H$ teórica . . . . .	87
VIII.7. $KE_s$ calculada con la velocidad promedio ( $\bar{v}_s$ ) contra la calculada con velocidad máxima ( $v_{smax}$ ) . . . . .	89
VIII.8. $\eta_H$ calculada con $TE_e$ (determinada con $H$ medida) y $KE_s$ (determinada con $\bar{v}_s$ y $v_{smax}$ ) . . . . .	90
VIII.9. Comparación entre $KE_s$ y $TE_s$ , ambas calculadas tanto con $\bar{v}_s$ como con $v_{smax}$	92
VIII.10. $\eta_H$ calculada con $TE_e$ (determinada con $H$ medida) como denominador y como numerador $KE_s$ y $TE_s$ (determinadas con $\bar{v}_s$ y $v_{smax}$ ) . . . . .	93
IX.1. $K_{tr} = (H_{tr\ 1/3}) / (MI\_HS)$ . . . . .	97
IX.2. $K_r$ . . . . .	98
IX.3. Comparación entre la eficiencia hidráulica ( $\eta_H$ ) y la eficiencia de disipación ( $\eta_{diss}$ )	99
IX.4. $F.A.$ determinado con $\bar{v}_e$ como velocidad de entrada . . . . .	101
IX.5. $F.A.$ determinado con $\bar{u}_e$ como velocidad de entrada . . . . .	102
IX.6. Influencia de la longitud de onda y la altura de ola, $S = 1/3$ . . . . .	103
IX.7. Influencia de la longitud de onda y la altura de ola, $S = 1/2$ . . . . .	104
IX.8. Influencia de la longitud de onda y la altura de ola, $S = 2/3$ . . . . .	105
A.1. Definición esquemática para la determinación de la energía potencial . . . . .	125
A.2. Determinación de la energía potencial como resultado del incremento de masa de agua en el área del valle a el área de la cresta . . . . .	126
B.1. Canal de olas ( <i>Instituto de Ingeniería UNAM</i> ) . . . . .	129
B.2. Pala hidráulica . . . . .	130
B.3. Instalación para la instrumentación . . . . .	131
B.4. Sistema de bombeo . . . . .	132
C.1. Vectrino dentro del canal de olas . . . . .	133
C.2. Esquema de funcionamiento del vectrino . . . . .	134
C.3. Principios básicos del PIV . . . . .	135
C.4. Interface gráfica del FlowManager . . . . .	136

C.5. Sondas de onda . . . . . 137

C.6. Consola para 8 monitores de las sondas de onda . . . . . 137





# Índice de Tablas

---

II.1. Tipos de energía oceánica . . . . .	13
V.1. Clasificación de las ondas por su periodo [ <i>Johnson et al., 1978</i> ] . . . . .	41
VI.1. Dimensiones de los tres dispositivos . . . . .	56
VII.1. Condiciones de evaluación . . . . .	61
D.1. Alturas de ola ( $H$ ) y periodos ( $T$ ), $S = 1/3$ [LEEWDC] . . . . .	141
D.2. Alturas de ola ( $H$ ) y periodos ( $T$ ), $S = 1/2$ [LEEWDC] . . . . .	142
D.3. Alturas de ola ( $H$ ) y periodos ( $T$ ), $S = 2/3$ [LEEWDC] . . . . .	143
D.4. Parámetros obtenidos a partir de la separación de las ondas incidente y reflejada, $S = 1/3$ [REFLE] . . . . .	144
D.5. Parámetros obtenidos a partir de la separación de las ondas incidente y reflejada, $S = 1/2$ [REFLE] . . . . .	145
D.6. Parámetros obtenidos a partir de la separación de las ondas incidente y reflejada, $S = 2/3$ [REFLE] . . . . .	146
D.7. Coeficiente de transmisión ( $K_{tr}$ ) calculado como el cociente de la altura de ola transmitida ( $H_{tr1/3}$ ) entre la incidente ( $MI\_HS$ ) . . . . .	147
E.1. Velocidad promedio ( $\bar{v}_e$ ), promedio de las crestas ( $\overline{v_{e\max}}$ ) y velocidad máxima ( $v_{e\max}$ ) obtenidas con SUAVI.f90 a partir de la señal limpia igualmente obtenida con SUAVI.f90 . . . . .	150
E.2. Historia de las velocidades obtenida a partir del análisis realizado con el FlowMap, $S = 1/3$ . . . . .	151

E.3. Historia de las velocidades obtenida a partir del análisis realizado con el FlowMap, $S = 1/2$ . . . . .	152
E.4. Historia de las velocidades obtenida a partir del análisis realizado con el FlowMap, $S = 2/3$ . . . . .	153
E.5. Número de chorros, tiempo promedio del chorro ( $t_{chorro}$ ), velocidad promedio ( $\overline{v_s}$ ) y velocidad máxima ( $v_{s\max}$ ) obtenidas con PROMATRIZ.f90 . . . . .	155
F.1. Análisis energético, $S = 1/3$ . . . . .	159
F.2. Análisis energético, $S = 1/2$ . . . . .	160
F.3. Análisis energético, $S = 2/3$ . . . . .	161

## *Lista de Símbolos*

---

$A$	Área
$a$	Amplitud y radio menor de la elipse
$a_x$	Aceleración horizontal
$a_z$	Aceleración vertical
$b$	Radio mayor de la elipse
$C$	Celeridad
$c$	Velocidad de la luz
$C_g$	Celeridad de grupo
$d$	Diferencial
$E$	Energía
$E_{curr}$	Energía empleada (perdida) para la generación de corrientes
$E_{diss}$	Energía disipada
$E_i$	Energía incidente
$E_r$	Energía reflejada
$E_{tr}$	Energía transmitida
$f$	Frecuencia
$g$	Aceleración debida a la fuerza de gravedad
$H$	Altura de ola
$H_i$	Altura de ola incidente
$H_r$	Altura de ola incidente
$H_{tr}$	Altura de ola incidente
$h$	Profundidad
$I$	Inclinación
$i$	Parte imaginaria
$KE$	Energía cinética
$K_r$	Coefficiente de reflexión
$K_{tr}$	Coefficiente de transmisión
$k$	Número de onda
$L$	Longitud de onda
$L_o$	Longitud de la onda en función de $z$
$l$	Longitud del <i>Blow-Jet</i>
$m$	Masa
$O$	Origen
$o_e$	Orificio de entrada

$o_s$	Orificio de salida
$PE$	Energía potencial
$PE_T$	Energía potencial del volumen total
$p$	Presión
$p_D$	Presión dinámica
$Q$	Gasto o caudal
$R$	Altura del perfil
$r$	Radio del orificio de entrada ( $o_e$ )
$S$	Fracción sumergida o sumergencia
$SKE$	Energía cinética específica
$T$	Periodo
$TE$	Energía total
$t$	Tiempo
$u$	Velocidad horizontal
$V$	Volumen
$v$	velocidad
$w$	Velocidad vertical
$x$	Coordenada horizontal
$z$	Coordenada vertical
$\bar{z}$	Distancia vertical al centro de gravedad de la masa
$z_1$	
$\beta$	
$\gamma$	Pesos específico
$\Delta x$	Separación entre sensores
$\zeta$	Desplazamiento horizontal
$\eta$	Perfil de la superficie del agua
$\eta_S$	Perfil del agua (Stokes de segundo orden)
$\eta_H$	Eficiencia hidráulica
$\eta_{diss}$	Eficiencia de disipación
$\xi$	Desplazamiento vertical
$\rho$	Densidad
$\sigma$	Frecuencia angular
$\phi$	Potencial de velocidades
$\Re$	Parte real
$\partial$	Parcial

### Índices

$curr$	Generación de corrientes
$D$	Dinámica
$diss$	Disipada
$e$	Entrada

---

<i>g</i>	Grupo de ondas
<i>i</i>	Incidente
<i>lineal</i>	Teoría lineal
<i>max</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>r</i>	Reflejada
<i>S</i>	Stokes de segundo orden
<i>s</i>	Salida
<i>T</i>	Volumen total
<i>tr</i>	Transmitida

$\bar{\alpha}$  (barra superior) significa valor (medio) de  $\alpha$



# OBJETIVOS

---

El objetivo central de la presente investigación consiste en concretar un dispositivo innovador perteneciente a la tecnología oceanomotriz WEC, por las palabras en inglés Wave Energy Converter.

Las metas específicas son:

- Diseño de cuyo dispositivo se pretende aproveche la energía del oleaje (undimotriz), con base en un concepto estudiado anteriormente en México e inspirado en ideas funcionales y consolidadas como son: el TAPCHAN (dispositivo WEC) y géiser marino; para culminar con una concepción geométrica adaptada a la tuba (instrumento musical de viento).
- Evaluación experimental del modelo a escala bajo un entorno de laboratorio, mediante pruebas en el canal de oleaje con la finalidad de determinar su desempeño hidráulico.
- Procesar y analizar los resultados de la evaluación experimental para calcular la eficiencia hidráulica y establecer la caracterización de su comportamiento.

Este objetivo constituye el primer paso en el desarrollo de un nuevo concepto de aprovechamiento de la energía oceánica, el cual pretende ser parte de un proyecto de gran dimensión; enfocado éste, al diseño de un complejo energético costero donde la energía marítima sea utilizable.





# MOTIVACIÓN

---

La riqueza de México como país se extiende también a sus litorales pues cuenta con poco más de 11000 km de ellos. De entrada, esta magnitud bastaría para justificar el desarrollo de dispositivos para aprovechar la energía del océano. Dentro de la gama de posibilidades que este desarrollo ofrece, la energía undimotriz (del oleaje) se perfila como una excelente opción en las costas del Pacífico y más aún el mar de Cortés donde se tienen registradas las mayores alturas de ola a nivel nacional.

El trabajo de investigación que aquí se presenta es una de muchas respuestas al llamado de frenar la contaminación derivada de la combustión y extracción de fuentes de energía fósiles, necesidad imperante hoy día en nuestro planeta. Es así que esta investigación se enfoca en diseñar un dispositivo que aproveche la energía del oleaje, la cual integra la lista de fuentes de energía verde, esto es, aquella energía generada a partir de fuentes primarias respetuosas con el medio ambiente, es decir, energías renovables y que emiten pocos o nulos productos secundarios contaminantes. El fin último es ir, poco a poco, ganando lugar a la obtención de energía por medio de la quema de productos fósiles y disminuir de este modo las concentraciones de  $CO_2$ , que en últimos años han sido motivo de preocupación.

Si bien, el trabajo que se presenta en esta Tesis no busca desarrollar un sistema de producción masiva de energía, sí se busca complementar la distribución energética a los sitios y pequeñas poblaciones que hoy día está fuera de la red nacional, a la par de ofrecer una fuente energética para aplicaciones diversas.



---

Capítulo I

# INTRODUCCIÓN

---

*“Al principio vienen necesariamente a la mente la fantasía y la fábula.*

*Desfilan después los cálculos matemáticos,  
y solo al final la realización corona el pensamiento”*

**Konstantín E. Tsiolkovski.**



---

“*La energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma*”, es quizá la expresión más representativa respecto de la energía, sin embargo, el concepto de energía no cuenta con una propuesta de aceptación unánime, pues es entorno a la definición formal de energía que han girado controversias desde tiempos pasados existiendo, a la fecha, tantas acepciones como ramas de la ciencia y la investigación. Entre ellas destaca por su simpleza la definición que se le asigna en la Física tradicional: “*La capacidad para realizar un trabajo*”.

En aras de cuantificar la energía, los científicos Robert Mayer y James Joule realizaron experimentaciones, con mayor éxito del segundo, logrando establecer una relación entre unidades de energía mecánica y unidades de calor, culminando con el “*principio de equivalencia*” el cual sustituyó al “*principio de conservación de la energía*” a finales del siglo XIX y principios del XX [Lopes, 2009]. En fechas posteriores, el físico Albert Einstein con su teoría de la relatividad (ahora aceptada) colocó de nueva cuenta a la energía en tema de discusión y, al definir la energía en reposo con la expresión mundialmente conocida:  $E = mc^2$ , dividió en opinión a la comunidad científica.

En todo caso, la energía se encuentra en la naturaleza en muy diversos tipos; el captarla y convertirla en aprovechable para la sociedad es un reto cada vez mayor dado el hecho de la creciente demanda como primera necesidad. Las fuerzas naturales, nombradas hoy “*energías renovables*”, tales como el calor solar, el viento, las mareas y la fuerza de las olas, fueron conocidas por la humanidad muy temprano, ya sea como fuerzas útiles o destructivas. En la época prehistórica fueron consideradas y adoradas como dioses, porque la humanidad ingenua no pudo encontrar ninguna explicación física o práctica del tremendo poder que poseían. Antes de cualquier documento escrito, las leyendas describen que el fuego fue donado al hombre por Prometeo, quien robó el fuego a los dioses en el cielo y lo llevó a la tierra. Este primer uso del fuego se produjo hace cerca de medio millón de años y se considera como la primera referencia a la energía [Belessiotis y Delyannis, 2000].

La fuente original de energía fue el trabajo físico realizado, en un inicio, por el hombre y posteriormente con ayuda de las bestias trajo consigo un desarrollo favorable; este creciente desarrollo aunado al incremento en la demanda de energía, pronto planteó la necesidad de invención de instrumentos, dispositivos, maquinarias, etc. (tecnología) capaces de aprovechar la energía producto del movimiento de elementos como el viento y el agua, re-direccionando dicho movimiento a su conveniencia.

Ejemplos de estas primeras tecnologías son: las velas, mantas enormes que permitieron controlar el desplazamiento por los mares de grandes navíos; los molinos, quizá los artefactos más representativos por el hecho de que los había accionados por el viento (los más famosos), por el agua y por animales (molinos de sangre). Logrando re direccionar las fuerzas gracias a invenciones como la rueda dentada y el tornillo sin fin, de *Arquímedes*, transmitiendo fuerzas y movimientos entre ejes perpendiculares.

Así pues, la energía es la necesidad de la humanidad a través de la cual otras ciencias o tecnologías han sido promovidas, lográndose un desarrollo conjunto y paralelo de ambas.

Con el acelerado desarrollo marcado por la revolución industrial en los siglo XVIII y XIX, donde apareció el carbón como fuente de energía, y enfatizado durante la segunda revolución

industrial (finales del siglo XIX y principios del XX) con el surgimiento de la industria del petróleo y la introducción del motor de combustión interna, se desvió la atención en términos de fuentes de energía hacia los yacimientos de hidrocarburos, por su rentable explotación y por su, para aquellos tiempos, calidad de inagotables.

Las necesidades y condiciones actuales, contaminación y el cercano ya vaticinado agotamiento del crudo, obligan a regresar y centrar los esfuerzos de investigación y desarrollo tecnológico en las energías renovables. A pesar de los enormes progresos de la ciencia y la tecnología desde los tiempos antiguos, las energías renovables están todavía en estado de investigación, experimental o aplicaciones; mostrando la eólica y solar un marcado adelanto sobre energías como la biomasa y oceánica.

No obstante el desarrollo de la energía marítima se puede catalogar como “*incipiente*” por su corto tiempo respecto a las demás energías en lo concerniente a investigación, esta ha captado la atención de muchos organismos mundiales, al grado que a la fecha se cuentan miles de patentes pertenecientes a dispositivos concebidos para captar la energía marítima de una o algunas de sus fuentes, siendo esto último, un factor primordial y decisivo en el auge despertado en últimos tiempos; pues dentro de las fuentes que ofrece el océano para explotar la energía se encuentran: la energía del oleaje, de las mareas, de las corrientes marinas, el gradiente de temperaturas y de la salinidad. De lo anterior se deduce que el océano es “*una mina inagotable de energía*”.

Ningún aspecto de la inmensa masa de agua que rodea a los continentes es más evidente que el patrón incesante de las olas en su superficie; otorgando a los océanos su estado de eterno movimiento. Incluso sin la fuerza perturbadora de un viento local, la superficie del mar se mueve por olas que han viajado desde lugares lejanos.

Desde tiempos inmemoriales, el hombre ha visto estas oleadas rítmicas del mar, entregar su energía contra las rocas y los riscos de forma brusca y estrepitosa o mediante la difusión en forma gradual y menos repentina a medida que se desplazan sobre una playa de poca profundidad. La constante es la concentración de la energía en las costas, lo que obliga al hombre a utilizar su ingenio en aras de proteger sus asentamientos de los embates del océano. Esta obligación se acrecienta en la actualidad cuando se busca, no solo defenderse de la acción del oleaje sino captar y aprovechar esta energía.

La investigación aquí presentada, expone un trabajo que inspirado en el fenómeno natural de los geiseres marinos como la conocida “*Bufadora*” en Ensenada, Baja California y en la sencillez del TAPCHAN, propone un concepto de diseño inicial sobre un dispositivo oceanomotriz perteneciente a la tecnología WEC (*Wave Energy Converter*).

## I.1. METODOLOGÍA

Con la finalidad de concretar los objetivos establecidos, la metodología llevada a cabo consistió en diseñar un dispositivo bautizado posteriormente como “*Blow-Jet*”, se eligieron los perfiles internos de dicho dispositivo, se construyeron tres modelos de pequeña escala con fibra de vidrio, se sometieron a las pruebas elegidas en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería, se obtuvieron los datos producto de los ensayos, se procesaron los datos y se analizaron estos para terminar expresándolos y reflejándolos en resultados.

## I.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Con la intención de adentrar al lector en las bases teóricas del trabajo realizado, esta Tesis contiene los siguientes capítulos en los que se revisa el estado del arte de cada tópico:

CAPÍTULO II: ENERGÍA (como recurso)

CAPÍTULO III: ENERGÍA UNDIMOTRIZ

CAPÍTULO IV: PANORAMA ENERGÉTICO EN MÉXICO

CAPÍTULO V: OLAJE

La totalidad en relación a la concepción del dispositivo energético marino: inspiración, diseño, elección de los perfiles y fabricación del mismo; se detalla en el CAPÍTULO VI: *BLOW-JET*, CONCEPTO DE DISEÑO.

El CAPÍTULO VII: *BLOW-JET*, ETAPA DE ANÁLISIS DEL PROTOTIPO A ESCALA EN EL CANAL DE OLAS, presenta la metodología experimental.

El análisis energético se da a conocer en el, CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS ENERGÉTICO.

Finalmente, con el análisis y procesamiento de datos culminados, los resultados se muestran en el CAPÍTULO IX: RESULTADOS.

La crítica, discusión, conclusiones y propuestas de futuras líneas de investigación se incluyen en dos capítulos que dan por terminado el presente trabajo: CAPÍTULO X: DISCUSIÓN, CAPÍTULO XI: CONCLUSIÓN y CAPÍTULO XII: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.





---

Capítulo II

# ENERGÍA (*como recurso*)

---

*“Comparada con la masa,  
la energía es como una moneda depreciada  
respecto a otra de gran valor”*

**Albert Einstein.**



Las fuentes de energía utilizadas por el hombre son numerosas, y se han incrementado con el curso del tiempo. La aparición de nuevas futes de energía no ha hecho desaparecer las anteriores, aumentando la diversidad: el carbón ha suplantado a la madera, pero no la ha eliminado, lo mismo ha ocurrido con el petróleo en relación con el carbón. La complejidad se deriva no solo del número de recursos energéticos que existe hoy día, sino también del hecho de que la mayor parte de esos recursos tienen más de un uso, lo que provoca que en la elección de las fuentes energéticas interfieran consideraciones de todo tipo.

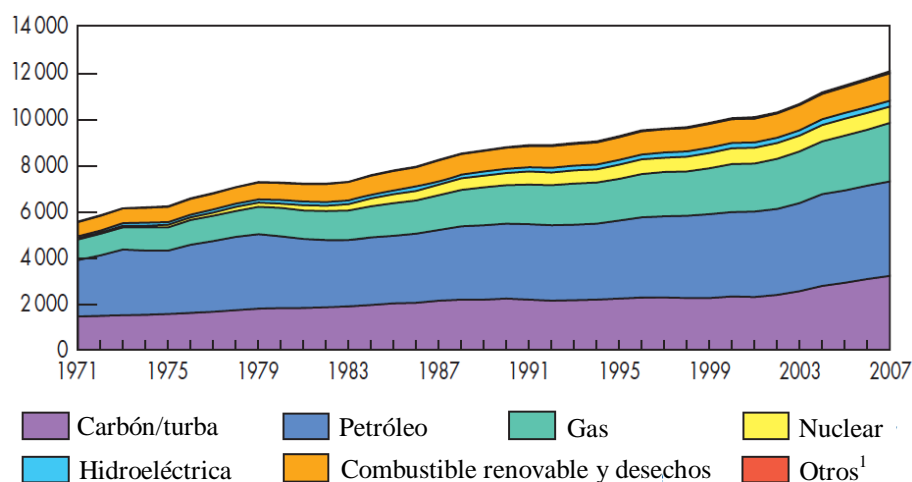
En relación con el origen de las fuentes de energía hay que diferenciar el carácter renovable o no de la fuente.

## II.1. ENERGÍA NO RENOVABLE

Basada en recursos no renovables, constituye un potencial energético fijo que se agota progresivamente con el consumo y se encuentra vinculada a ciclos geológicos de formación, como los combustibles fósiles. Estos recursos finitos, a pesar de presentar una distribución geográfica irregular, satisfacen mayoritariamente la demanda mundial de energía.

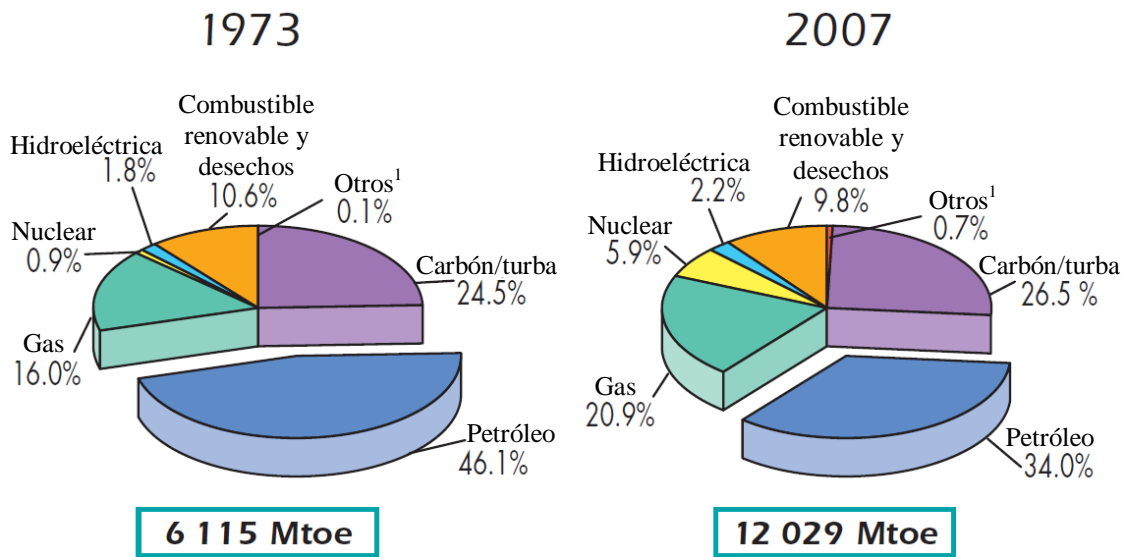
Dentro de los recursos que integran la energía no renovable y adquieren una importancia económica fundamental, se incluyen los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural, aunque también hay que tener en cuenta los combustibles nucleares, como uranio y torio.

En términos económicos a la energía no renovable se le conoce como capital energético. Las figuras II.1 y II.2 muestran la distribución de fuentes energéticas que actualmente abastecen la demanda mundial.



**Figura II.1:** Evolución desde 1971 hasta 2007 del total mundial de suministro de energía primaria por combustible (Mtoe) [OECD/IEA, 2009]

<sup>1</sup>Otros incluye geotérmica, solar, eólica, etc.



**Figura II.2:** Comparación del total mundial de suministro de energía primaria por combustible entre los años 1973 y 2007 (Mtoe) [OECD/IEA, 2009]

## II.2. ENERGÍA RENOVABLE

Son energías que se vinculan con ciclos de regeneración continuos y disponen de un potencial inagotable. Las energías renovables, también denominadas rentas energéticas, provienen del espacio exterior. En la actualidad, sólo dos formas de energía renovable pueden ser utilizadas: la energía solar y la energía gravitatoria de la Luna.

La energía solar genera de manera indirecta otras formas energéticas renovables; como la eólica debido a las corrientes de convección de masas de aire con temperaturas diferentes, la del mar (gradientes térmicos marinos, corrientes, olas, etc.) y la energía hidráulica como producto derivado de la evaporación y condensación de las aguas superficiales. Por su parte, la energía gravitatoria de la Luna provoca las mareas, siendo una forma de energía perfectamente utilizable.

Igualmente, mención aparte merece la energía geotérmica o energía térmica almacenada en el interior de la Tierra, sin embargo, esta energía térmica, salvo en determinadas formaciones geológicas, origina flujos de calor muy pequeños para ser utilizados directamente.

### II.2.1. FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

- Solar directa: Fotovoltaica (PV) esta tecnología permite la transformación de la luz solar directamente en corriente eléctrica. Calor y frío solar (SHC), es la base de las tecnologías y diseños para la calefacción solar de agua. Concentración de energía solar (CSP), el camino de la conversión de todas las tecnologías de concentración de energía solar se basa en cuatro elementos básicos: concentrador, receptor, el transporte, almacenamiento y conversión de energía; en algunas plantas de energía solar térmica una porción de la energía térmica se

almacena para su uso posterior [OECD/IEA, 2006].

- Eólica: La energía cinética del viento aprovechada para producir electricidad mediante turbinas eólicas.
- Geotérmica: Energía disponible como calor procedente del interior de la corteza de la Tierra, por lo general en forma de agua caliente o vapor. Se explota en sitios adecuados para la generación de electricidad después de la transformación, o directamente en forma de calor para la calefacción urbana, agricultura, etc.
- Hidráulica: La energía potencial y cinética del agua convertida en electricidad en instalaciones hidroeléctricas. Sin importar el tamaño de las plantas.
- Biomasa: Cubre una amplia gama de productos, subproductos y residuos derivados de la silvicultura y la agricultura, así como de los residuos municipales e industriales corrientes, que pueden ser utilizados como combustibles para producir calor o electricidad.
- Oceánica: Energía mecánica resultante del movimiento de las mareas, olas o corrientes del océano, aprovechada para la producción de electricidad. También los gradientes de temperatura y salinidad, así como biomasa de algas marinas integran las fuentes de energía oceánica [OECD/IEA, 2007]. A continuación se presenta en mayor detalle la energía oceánica como fuente primaria.

## II.3. ENERGÍA OCEÁNICA

Los océanos contienen una enorme cantidad de energía, pues se calcula que absorben, del Sol, alrededor de 4000 veces la cantidad de energía que se consume hoy en día por la actividad humana [Breeze, 2005]. Dicha energía se puede obtener de diferentes fuentes y explotarse para la generación de energía útil. En comparación con otras energías renovables, las tecnologías para extraer energías de este recurso se encuentran en una fase temprana de desarrollo y pertenecen a la tecnología de tercera generación. La figura II.3 es un esquema de los posibles usos de la energía tomada de los océanos.

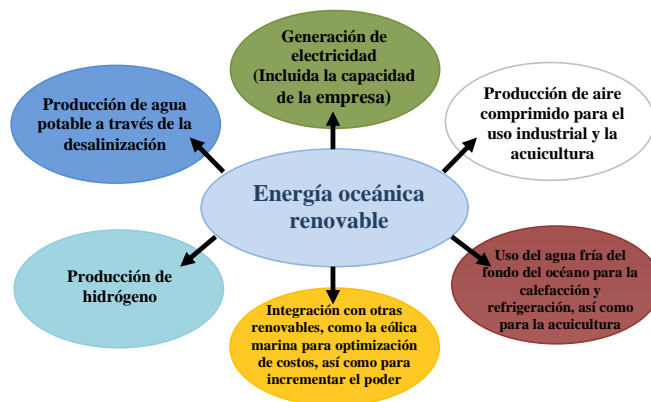


Figura II.3: Potencial de utilización de la energía oceánica

### II.3.1. ESTADOS DE DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA OCEANOMOTRIZ

El desarrollo de los diversos sistemas de aprovechamiento de energías renovables sigue un proceso relativamente simple y con etapas que, si bien, no necesariamente se siguen de manera cronológica, sí determinan el avance y factibilidad de un determinado sistema. En la medida que algún desarrollo cumple satisfactoriamente cada una de los estados estará más cerca de convertirse en un proveedor real de energía para la sociedad. Los estados de desarrollo más comúnmente reconocidos son [Khan y Bhuyan, 2009]:

- Concepto de diseño: Corresponde a los sistemas que han atraído la atención debido a sus características únicas y prometedoras, que pueden o no realizarse en el futuro.
- Parte escala (Tanque): Aparatos, conceptos y prototipos que están en la fase de investigación y desarrollo, sometiéndose a pruebas en el entorno de laboratorio.
- Parte escala (Mar): Las tecnologías que, se informa, han sido sometidas a pruebas en el mar (parte del sistema de un modelo a escala del prototipo total o parcial).
- A gran escala: Dispositivos o conceptos que han visto al menos un ciclo completo de desarrollo, independientemente de su ámbito de aplicación de la producción comercial o el estado actual de progreso.
- Pre-comercial: Los sistemas que logran tal nivel de avance, que resulta razonable esperar su despliegue comercial dentro de pocos años.
- Comercial: Las tecnologías que han estado operando de manera comercial por un período de tiempo significativo.

En la figura II.4 se presenta el número de desarrollos que se encuentran en los distintos estados de acuerdo con el inventario del Powertech Labs Report (2008).

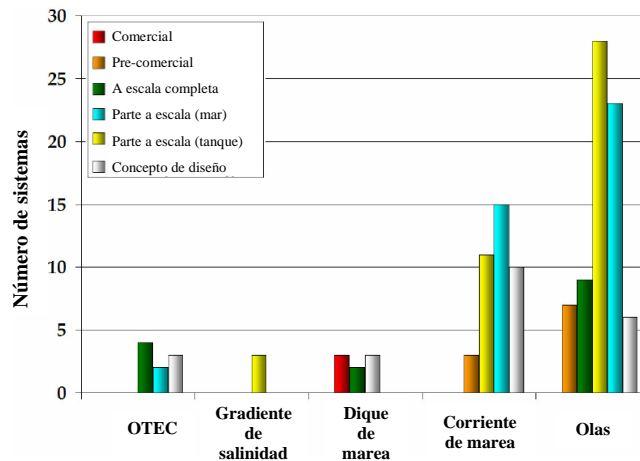


Figura II.4: Estado de desarrollo de la tecnología, Ref. Powertech Labs Report. 2008

En los últimos 20 años, la tecnología de energía marítima ha recibido relativamente poco financiamiento. Sin embargo, hay un renovado interés en la tecnología, y conceptos varios ahora representan prototipos de demostración a gran escala alrededor de la costa británica. Pero las tecnologías de energía marítima aún deben resolver dos problemas importantes al mismo tiempo: demostrar el potencial de conversión de energía y superar un riesgo técnico muy elevado por un ambiente hostil. Otros obstáculos no técnicos incluyen la evaluación de los recursos, la previsión de producción de energía y herramientas de diseño, prueba y normas de medición, los impactos ambientales, arreglos de las granjas (“*farms*”) de sistemas de energía de los océanos y las plantas de uso dual que combinan la energía y otras estructuras [OECD/IEA, 2007].

### II.3.2. FUENTES DE ENERGÍA OCEÁNICA

Los sistemas de conversión más desarrollados tienen que ver con: energía de las mareas, energía térmica, las corrientes marinas y las olas del mar. La energía de las mareas resulta de los campos gravitacionales de la Luna y el Sol. Los vientos que soplan sobre la superficie del océano generan las olas del mar. La energía térmica se deriva directamente de la radiación solar, aprovechando la energía del gradiente térmico de las diferencias de temperatura entre las aguas superficiales y las frías aguas profundas. Las corrientes marinas son causadas por diferencias térmicas y de salinidad, así como por efecto de la marea. El gradiente de salinidad utiliza la diferencia de presión que surgen entre el agua dulce y el agua de mar. Todas estas características del medio marino constituyen fuentes de poder sin explotar. Otras posibles fuentes como el gradiente de salinidad, la biomasa de algas, etc.; también muestran potencial, pero están en un nivel mucho más bajo de desarrollo [OECD/IEA, 2006]. La tabla II.1 presenta un resumen de las tecnologías más conocidas para aprovechar la energía marina y el potencial energético que, se estima, se podría tomar de cada una.

	Recurso	Tecnologías	Recurso global estimado
<b>Undimotriz</b>	Oleaje en costa, cerca de la costa y aguas profundas	OWCs, rebase, amortiguadores de punto	8 000-80 000 TWh/y
<b>Mareomotriz</b>	Cuencas de marea	Presas, turbinas hidráulicas	200 TWh/y
<b>Corrientes marinas</b>	Mareas, topografía, gradiente de salinidad y térmico	Turbinas, ala alternante	Hasta 5 TW 800 + TWh/y
<b>Gradiente de salinidad</b>	Presión diferencial entre agua dulce y agua de mar	Membrana osmótica semi-permeable	2 000 TWh/y
<b>Gradiente térmico</b>	Temperatura diferencial entre la superficie y el fondo	Ciclo termodinámico de Rankine	10 000 TWh/y

**Tabla II.1:** Tipos de energía oceánica

### II.3.2.1. Mareomotriz

La energía mareomotriz es una fuente de energía extremadamente predecible, que sólo depende de la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol y las fuerzas centrífugas creadas por la rotación del sistema Tierra-Luna. Los sistemas que captan esta energía se pueden clasificar en dos tipos principales: Aluvión de marea, que utilizan la energía potencial de la marea y corrientes de marea (que se incluye en II.3.2.2 Corrientes Marinas) que emplea la energía cinética. El primer sistema de este tipo, en estado comercial, es la estación en la Rance, Francia que actualmente genera hasta 240 Megawatts (ver figura II.5).



**Figura II.5:** La Rance, estación mareomotriz en Francia

Un aluvión de marea es típicamente una presa, construida a través de una bahía o estuario con registros de una amplitud de la marea de más de 5 m. La generación de electricidad de aluvión de marea emplea los mismos principios que la generación hidroeléctrica, salvo que el flujo de las corrientes de marea es en ambas direcciones. Un aluvión de marea típica consiste en turbinas, compuertas, diques y esclusas buque. Las turbinas que se utilizan en andanadas de marea son unidireccionales o bidireccionales. Aluvión de marea se puede dividir en dos tipos: sistemas de una sola cuenca y los sistemas de doble cuenca.

Los sistemas de una sola cuenca requieren una descarga a través de una bahía o estuario. Hay tres métodos de operación para la generación de electricidad dentro de una cuenca única los cuales son los mismos para la operación de la cuenca principal en los sistemas de doble cuenca:

Generación por reflujó. La cuenca es llenada con agua a través de las compuertas durante la marea alta. Generación por inundación. Durante la marea las compuertas y turbinas se mantienen cerradas hasta que desarrolla una presión hidrostática sustancial a través de la barrera. Dos vías de generación. Este método de operación utiliza tanto las fases de inundación y reflujó de la marea para generar electricidad [O Rourke et al., 2010].

### II.3.2.2. Corrientes Marinas

Las corrientes oceánicas más rápidas, excluyendo las corrientes de marea, son obtenidas por un proceso complejo que involucra la adsorción de la radiación solar en el océano y la atmósfera. Esto es seguido por una transformación y redistribución del ecuador hacia los polos desplazando las corrientes de aire y agua, y finalmente una concentración de las corrientes oceánicas en el límite oeste de las cuencas oceánicas (o las costas orientales de los continentes) por la rotación de la Tierra. La Corriente del Golfo en el Atlántico, el Kuroshio frente al Japón y el sistema

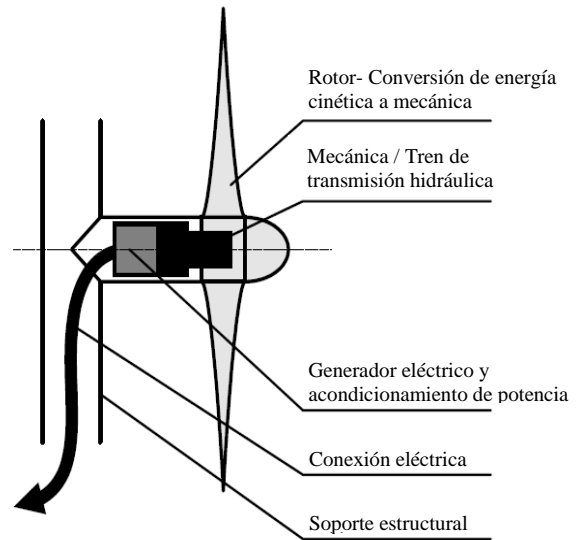


de Agulhas-somalíes en el este de la costa africana oriental forman los sistemas de corrientes principales.

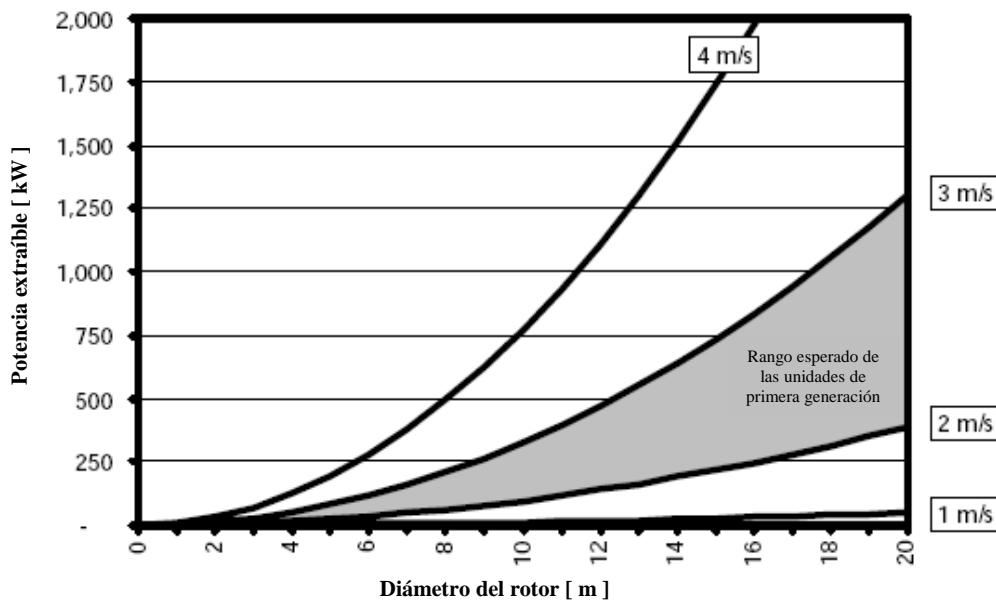
Las corrientes de marea son el flujo de agua de mar como consecuencia por el ascenso y caída de las mareas. Otros factores, tales como la salinidad y diferencia de temperaturas local también contribuyen al movimiento de las aguas oceánicas. Esto puede ser magnificado por la topografía submarina, sobre todo en las proximidades de la tierra, o en los estrechos entre las islas y tierra firme.

La energía cinética de las corrientes de marea se puede aprovechar mediante técnicas relativamente convencionales, siguiendo principios similares a los de extracción de energía del viento. Una serie de convertidores submarinos similares a “molinos de viento bajo el agua” se han propuesto, aunque esta opción requiere un mayor desarrollo.

La técnica más comúnmente considerada para la explotación de las corrientes marinas emplea una turbina (figuras II.6, II.8, II.9 y II.10), colocada normal a la dirección del flujo ya sea montada en el fondo marino o colgada de una plataforma flotante. La potencia extraíble, como una función del diámetro del rotor de la turbina para varias velocidades de la corriente, se muestra en la figura II.7.



**Figura II.6:** Esquema de diseño de los principales componentes mecánicos para una turbina de corrientes marinas



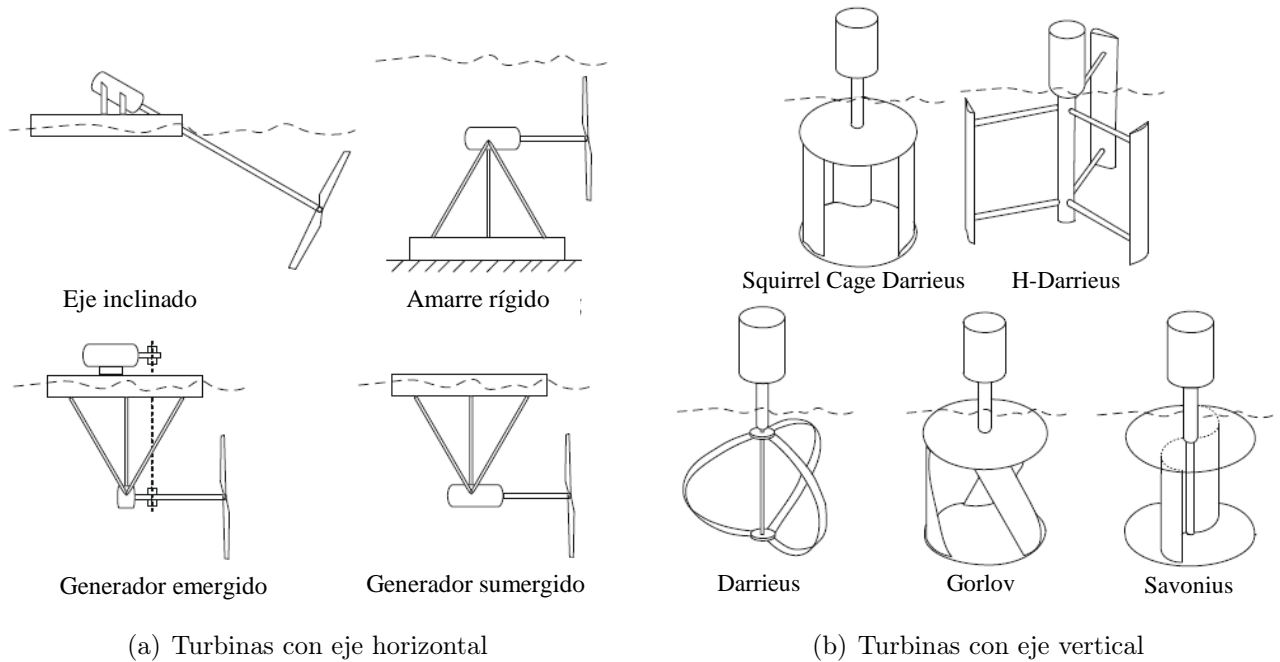
**Figura II.7:** Potencia extraíble de las corrientes marinas de una velocidad dada, en eficiencia del 30% promedio (CEC, 1996)



**Figura II.8:** THE BLUE CONCEPT, Mar de pruebas en el estrecho noruego de Kvalsundet, Noruega (*Hammerfest Strom AS, Norway*)



**Figura II.9:** OPEN-CENTRE TURBINE, Instalación en Orkney, Escocia (*OpenHydro, Ireland*)



**Figura II.10:** Tipos de turbinas [*Khan et al., 2009*]

### II.3.2.3. Gradiente Térmico Oceánico

OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) es la tecnología empleada para aprovechar el gradiente térmico vertical del océano; definido como la diferencia de temperaturas entre el agua de la superficie, cuya temperatura es incrementada por la energía solar y el agua de las profundidades conservada a baja temperatura, por ausencia de radiación solar.

El gradiente de temperatura normalmente requerido para hacer efectiva una planta OTEC

es de 20° C, lográndose este al garantizar una profundidad superior a los 1000 m. Las zonas tropicales y subtropicales resultan idóneas (ver figura II.11), pues los rayos del sol inciden plenos logrando un incremento mayor en la temperatura de la superficie en comparación a otras regiones. Las capas superficiales actúan como medios de almacenamiento de energía solar, permitiendo el funcionamiento de las plantas OTEC durante las 24 horas del día [Fuller, 1978]; a este ritmo, alcanzando una probable eficiencia del 3%, teóricamente podría ofrecer 13 veces el consumo energético mundial [Breeze, 2005].

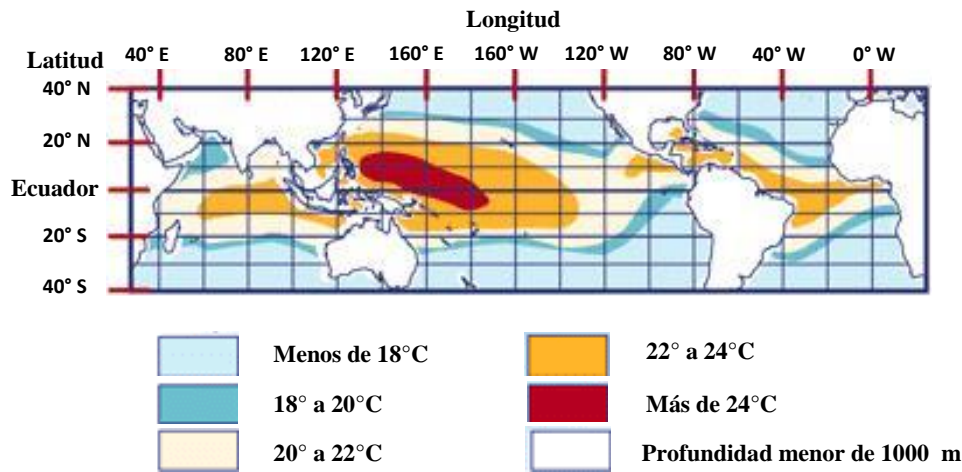


Figura II.11: Diferencia de temperaturas entre la superficie y 1000 m de profundidad

El concepto de OTEC fue propuesto inicialmente por Julio Verne en su novela “20 000 leguas de viaje submarino” en 1869, para 1881 el físico francés Jacques Arsene D´Arsonval propuso formalmente OTEC como una aplicación del ciclo Rankine (ciclo cerrado) y en 1920 uno de sus estudiantes, Georges Claude, construyó un planta OTEC de ciclo abierto en la bahía de Matanzas, Cuba [Fuller, 1978, Plocek y Laboy, 2009].

Una planta de OTEC se compone de un motor térmico que convierte la energía térmica en trabajo mecánico a través del gradiente de temperatura. La tecnología OTEC se divide en tres categorías: de ciclo cerrado, de ciclo abierto y ciclo híbrido.

El sistema de ciclo cerrado es el más común de los tres, la diferencia de temperaturas se utiliza para vaporizar y condensar un fluido de trabajo (e.g. amoníaco) que impulsa una turbina-generator para producir electricidad, (ver figuras II.12, II.13 y II.14). En el ciclo abierto o ciclo de Claude; el agua superficial, caliente, se introduce en una cámara de vacío donde se vaporiza repentinamente, este vapor de agua producido acciona una turbina-generator para generar electricidad. El ciclo híbrido

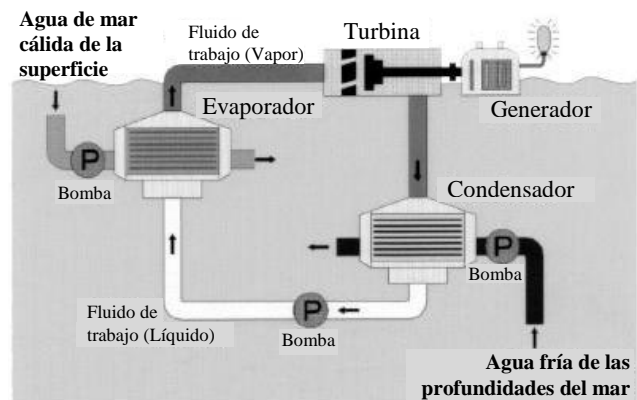


Figura II.12: Ciclo cerrado OTEC (Ciclo Rankine)

combina las características del ciclo cerrado y el ciclo abierto [Plocek y Laboy, 2009].



**Figura II.13:** Demostración de un dispositivo termodinámico OTEC de ciclo Rankine de 1MW (Saga University, Japón)



**Figura II.14:** Sistema experimental OTEC de 30kW (Saga University, Japón)

Dos subproductos atractivos y negociables de OTEC: El agua potable, producto de la condensación del vapor de agua restante en el ciclo abierto; los crustáceos, los cultivos de algas u otros alimentos o energía resultante de la maricultura. La aplicación de la maricultura utilizaría los nutrientes surgidos de la circulación de agua fría a través de condensadores de OTEC [Cohen, 1982].

#### II.3.2.4. Gradiente de Salinidad



**Figura II.15:** Montaje experimental del desarrollo de membranas de potencial osmótico para el aprovechamiento de energía del gradiente de salinidad (Statkraft SF, Noruega)

El SGP (Salinity Gradient Power) se basa en la diferencia de potencial químico entre una solución de sal concentrada y otra diluida. La tecnología que se emplea para aprovechar el poder del gradiente de salinidad está constituida por una membrana semi-permeable de conversión y las dos técnicas más empleadas son:

Principio de osmosis presión-retardada. En este sistema las dos soluciones de diferente salinidad se ponen en contacto por medio de una membrana semi-permeable. Esta membrana permite al solvente (agua) filtrarse y retiene al soluto (sal disuelta). La diferencia de potencial químico provoca el transporte de agua de la solución de sal diluida (baja presión) a la solución concentrada (alta presión), que a la vez resulta en una presurización del volumen de agua transportado. Este volumen de agua a presión

transportado se puede utilizar para generar energía eléctrica en una turbina.

Principio de electrodiálisis inversa. Basado en un número de membranas intercambiables catión anión, se apilan en un patrón intercambiable entre ánodo y cátodo. Los compartimientos entre las membranas son llenados alternativamente con una solución de sal concentrada y una diluida. El gradiente de salinidad resulta en una diferencia de potencial (e.g. 80 mV para agua de mar y agua de río) sobre cada membrana. La diferencia de potencial químico provoca el transporte de iones a través de las membranas de solución concentrada a las de solución diluida. Como resultado, un electrón puede ser transferido desde el ánodo al cátodo a través de un circuito eléctrico externo. Esta corriente eléctrica y la diferencia de potencial en los electrodos puede ser usada para generar energía eléctrica.

Basado en resultados de análisis realizados, el principio de osmosis de presión-retardada luce más atractiva para la generación de energía a partir de salmueras, debido a su mayor densidad de poder combinado con su mayor recuperación de energía. Por mismas razones la electrodiálisis inversa resulta más atractiva para generar energía usando agua de mar y de río [Post et al., 2007].



---

Capítulo III

# ENERGÍA UNDIMOTRIZ

---

*“Supongo que a la mayoría de nosotros el mar nos pone un poco nerviosos.  
Sea cual sea su sonrisa, dudamos de su amistad”*

**H. M. Tomilson.**





La conversión de la energía presente en el oleaje a energía eléctrica u otros productos útiles es un desafío de ingeniería formidable y requiere el desarrollo de nuevas tecnologías para en medida de lo posible aprovechar simultáneamente algunas de las otras fuentes de energía renovables [Boud, 2003].

Aunque la primer patente conocida fue presentada en Paris por dos franceses en 1799 y era un dispositivo de costa destinado a bombear agua potable a una villa cercana [Alcorn y Lewis, 2008]; los mayores progresos se han hecho desde la crisis petrolera de la década de 1970. El Reino Unido, Noruega, Japón, Suecia, India, Portugal, China, Dinamarca, Corea, España e Irlanda han tenido programas de conversión de energía del oleaje en mayor o menor tamaño [Duckers, 1995], y desde entonces un gran número de dispositivos de conversión se han propuesto. Sin embargo, sólo unos pocos han sido objeto de una amplia revisión por pares y han funcionado adecuadamente a gran escala. A lo largo de este periodo se distinguen dos auges, el primero en 1970 propiciado por la crisis del petróleo y encabezado por el Reino Unido, país muy rico en este recurso, auge que se presume termina debido a la falta de desarrollo en la tecnología para continuar con la etapa a gran escala; el segundo y actual auge comenzó en 1990 con el objetivo de reducir el uso del carbón, de esta época destacan desarrollos a gran escala en Escocia, India, Japón y Portugal.

## III.1. EL OLEAJE COMO FUENTE DE ENERGÍA

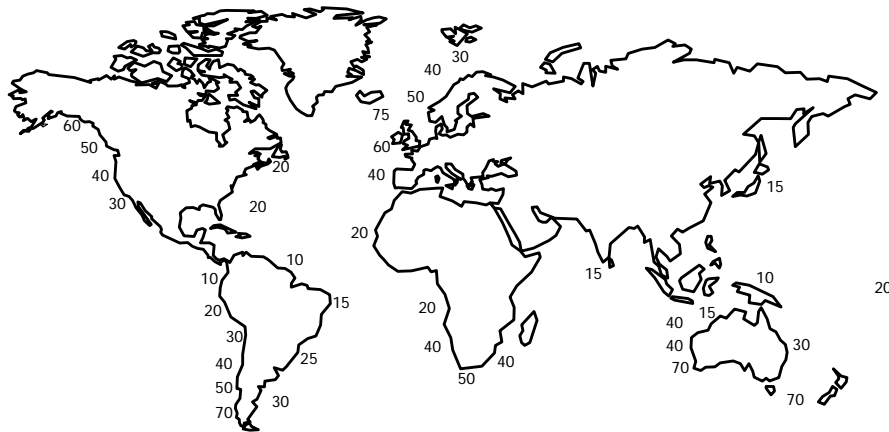
Uno de los primeros retos a que se enfrenta la captación de la energía del oleaje es precisamente a la caracterización y entendimiento de los procesos que condicionan su desplazamiento, a fin de hallar las zonas propicias para la captación evitando regiones de alta disipación natural de energía.

En mar abierto, las olas se generan cuando la velocidad del viento es mayor de 0.5 m/s. Las crestas de las olas se mueven aproximadamente a la velocidad del viento que las crea y en la misma dirección. La longitud de onda de las olas (la distancia entre las crestas) y el período (el tiempo entre crestas) dependerá de la velocidad del viento, cuanto más tiempo el viento sople a favor y cuanto mayor sea el área de agua sobre la que sopla el viento, mayor será la altura de las olas generadas por el viento [McKay, 2009].

En aguas profundas, las olas pueden viajar fuera de las zonas de tormenta con una pérdida mínima de energía, persistiendo por grandes distancias (es decir, decenas de miles de kilómetros) desde el origen (“fetch”). Por consiguiente las costas con exposición al viento predominante y grandes fetches, tienden a tener climas con mayor energía asociada. (e.g. las costas oeste de América, Europa y Australia/Nueva Zelandia como se muestra en la figura III.1) [Boud, 2003].

Existen grandes variaciones en los niveles de potencia con el paso de cada ola, día a día y de mes a mes. Sin embargo, la variación estacional es en general favorable en las zonas templadas, ya que la energía del oleaje (como la energía eólica) es máxima en los meses de invierno coincidiendo con la mayor demanda de energía [Duckers, 1995, Boud, 2003].

Al acercarse a las costas, las olas pueden ser perturbadas de varias maneras, dando lugar



**Figura III.1:** Distribución de los niveles de poder del oleaje en aguas profundas, en kW/m de cresta de ola

a cambios en la dirección (debido a la refracción) y potencia (debido a las pérdidas derivadas de la fricción del fondo marino y la ruptura de la ola). Las pérdidas de energía dependerán de la anchura de la plataforma continental, la pendiente y rugosidad del fondo marino y pueden alcanzar valores de alrededor de la mitad del nivel de energía de las olas en alta mar. La diferencia en niveles de energía entre aguas profundas y cerca de la costa, puede ser considerablemente menor en las aguas costeras con fondos marinos lisos y donde las aguas profundas estén más cerca a la costa, como ocurre, alrededor de la mayoría de las islas volcánicas [Boud, 2003].

Al apreciar la figura III.1, la cual muestra la distribución global de la potencia del oleaje que arriba a las costas, resulta notorio el bajo potencial dirigido hacia territorio mexicano en comparación con el potencial que reciben algunos países europeos, más hay que tener en cuenta que los valores, además de ser muy generales, corresponden a la potencia del oleaje en aguas profundas; valores que cambiarían dependiendo de la proximidad que se tenga respecto a la costa y de la geomorfología de ésta. Este cambio en la magnitud de la potencia del oleaje es debido a la transformación que sufren las ondas (olas) al interactuar con el relieve batimétrico y topográfico de la costa (refracción, difracción y reflexión). Así pues, se tendrán zonas cercanas a la costa donde la potencia del oleaje disminuya y otras donde aumente (puntos de concentración de energía).

## III.2. TECNOLOGÍA

El convertidor de energía de las olas ideal, tendrá impedancia perfecta en concordancia con el clima de ola incidente, capturando así la totalidad de la energía de dicha ola (la reflexión y la transmisión serán nulas). Esta situación por lo general sólo se encuentra para una frecuencia de onda y cada dispositivo presenta su propia dependencia de la frecuencia. Algunos dispositivos llegan a lograr una eficiencia de más de 100% para una frecuencia específica debido a efectos de resonancia, ya que se comportan como absorbentes de punto y atraen la energía un poco más allá

de su capacidad física. En la mayoría de los casos, sin embargo, la eficiencia o el ancho de captura es considerablemente inferior al 100 % en cualquier frecuencia y de manera ponderada sobre un rango de frecuencias, la eficiencia promedio puede ser generalmente de 25-35 % [Duckers, 2000].

A diferencia de los grandes aerogeneradores, hay una amplia variedad de tecnologías para aprovechar la energía de las olas, como resultado de las diferentes formas en que la energía puede ser absorbida por las olas, también dependiendo de la profundidad del agua y de la ubicación (costa, cerca de la costa, mar adentro).

Las revisiones recientes han identificado alrededor de un centenar de proyectos en diversas etapas de desarrollo. El número no parece estar disminuyendo: nuevos conceptos y tecnologías superan por mucho a los que están siendo abandonados [Falcão, 2010]. Aunque muchos diseños se han desarrollado y llevado a cabo pruebas numéricas y de laboratorio (sobre todo en tanque o canal de olas), solo unos pocos dispositivos han progresado a los ensayos en mar [Boud, 2003].

La utilización de la energía de las olas implica una cadena de procesos de conversión de energía, cada uno de ellos se caracteriza por su eficiencia, así como las limitaciones que introduce y tienen que ser controladas. De especial relevancia es el proceso hidrodinámico de absorción de energía del oleaje [Falcão, 2010].

### III.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS POR LA FORMA EN QUE OPERAN

#### III.2.1.1. Mecánico Directo

En este tipo de dispositivos, la estructura mantiene una interacción directa con las olas con el fin de facilitar la toma de la energía. En general, el potencial de este tipo de dispositivos radica en su elevada relación potencia-peso, ya que la estructura es directamente la conducción de la toma de energía. Este tipo de dispositivos pueden ser flotantes o fijos ya sea al fondo del mar o a un rompeolas. Existe la posibilidad de almacenamiento, por corto plazo, en estos dispositivos en forma de presión hidráulica del acumulador. Ejemplo de estos tipos de dispositivos es el OPT, (figura III.2) [Alcorn y Lewis, 2008].



**Figura III.2:** POWERBOUY, Absorbedor puntual de libre flotación, mar de pruebas en Hawaii (*Ocean Power Technologies, USA*)

#### III.2.1.2. Neumático Indirecto

En este tipo de dispositivo la estructura actúa como una caja de cambios y de amortiguamiento. En un dispositivo OWC (Oscillating Water Colum), las olas provocan un flujo de aire alternado a través de una toma de energía neumática, como se muestra en la figura III.3. La gran área de la superficie del agua en comparación con el área anular de una turbina prepara las velocidades, desde velocidades bajas en la superficie del agua a velocidades de aire altas aptas para el funcionamiento de un turbogenerador. La ventaja de este tipo de sistema es que no existe un vínculo estructural con la toma de energía y por lo tanto las fuerzas de ondas de gran tamaño no pueden ser transferidas a dicha toma. La desventaja es, por supuesto, que una estructura de mayor tamaño es requerida para encerrar el volumen de aire necesario y por tanto la relación potencia-peso es más baja. Este tipo de dispositivos pueden ser flotantes o fijos al fondo del mar o a un rompeolas [Alcorn y Lewis, 2008].

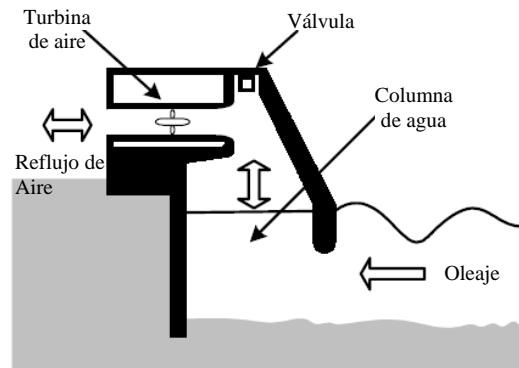
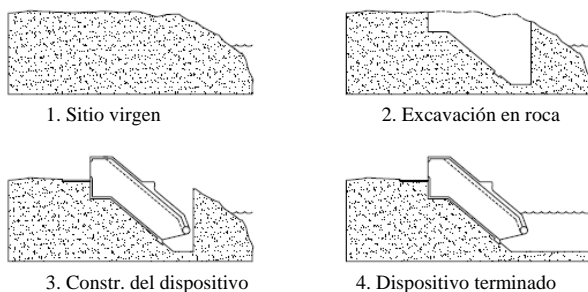


Figura III.3: Esquema de un dispositivo OWC



(a) Concepto de construcción



(b) Montaje de turbo-maquinaria

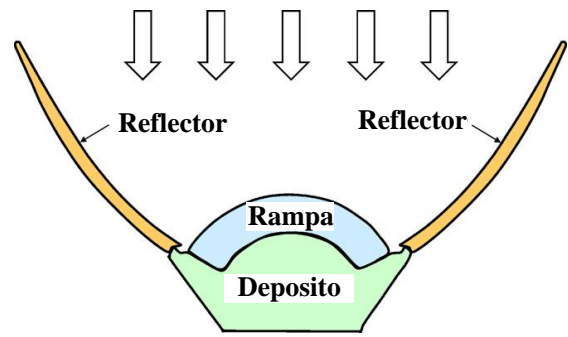
Figura III.4: LIMPET (*Land Installed Marine Power Energy Transmitter*), dispositivo OWC [Queens University Belfast, 2002]

### III.2.1.3. De Rebase

En este tipo de dispositivos el diseño de la estructura provoca que las olas se deslicen sobre una playa o zona de embudo y ganen elevación sobre el nivel medio del mar. Esta agua que sobrepasa se almacena en un embalse o reservorio y la diferencia de carga proporciona la toma de energía a través de turbinas localizadas en la parte baja (carga menor). La ventaja de este sistema es el almacenamiento inherente en el depósito y la capacidad de producir una salida suave de energía. La desventaja es que requiere una estructura lo suficientemente grande para el depósito y para soportar las cargas de grandes ola que se pueden presentar; esto reduce la relación potencia-peso [Alcorn y Lewis, 2008]. De los dispositivos más destacados en esta clasificación se encuentran el TAPCHAN, considerando el más simple, elegante y económico [Duckers, 2000], ubicado en costa; (ver figura III.6) y el moderno Wave Dragon de aguas profundas (figura III.5).



(a) Pruebas en mar



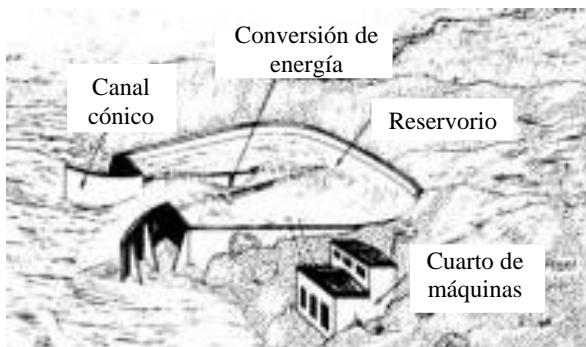
(b) Concepto de funcionamiento (*en planta*)

**Figura III.5:** WAVE DRAGON, De rebase con amarre holgado, mar de pruebas en Nissum Bredning, Dinamarca (*Wave Dragon ApS, Denmark*)

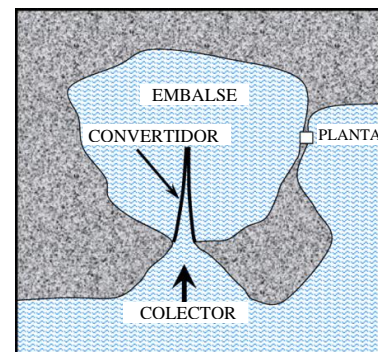
### III.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS POR SU UBICACIÓN

#### III.2.2.1. Sobre la Línea de Costa

Estos son dispositivos que se construyen directamente sobre la línea de costa o en una estructura de protección como los rompeolas. La ventaja es que la conexión con las obras civiles en tierra a través de cables resulta más fácil. La desventaja es que el recurso de energía de las olas en la costa es muy reducido en comparación incluso con una corta distancia en alta mar. Algunos esquemas recientes han justificado esto con el diseño de dispositivos enfocados a la evolución de nuevos rompeolas, lo cual reduce los costos de capital civil.



(a) Funcionamiento esquematizado



(b) Esquema de la topografía ideal

**Figura III.6:** TAPCHAN (TAPered CHANnel)

### III.2.2.2. Cerca de la Costa

Estos dispositivos se construyen cerca de la costa, pero fuera de la zona de rompiente de las olas. Usualmente a profundidades de hasta unos 20 m. Pueden ser fijos o flotantes. Se tiene menor recurso energético que en alta mar, pero puede ser fácilmente compensado por los costes de instalación de carácter civil.

### III.2.2.3. Mar Adentro

Estos dispositivos flotan sobre aguas con 30 m de profundidad, pero una profundidad de 50 m de diseño es más típica. La ventaja es que el recurso de onda no ha disminuido, pero la enorme distancias a la costa, en la mayoría de los casos, representan una desventaja que se refleja en los elevados costos en cable y estructuras adicionales, al igual que en operación y mantenimiento.



**Figura III.7:** PELAMIS, Dispositivo flotante articulado, montaje de la primera granja de dispositivos para mar adentro, frente al norte de Portugal (*Ocean Power Delevery, UK*)

---

Capítulo IV

PANORAMA ENERGÉTICO EN  
MÉXICO

---

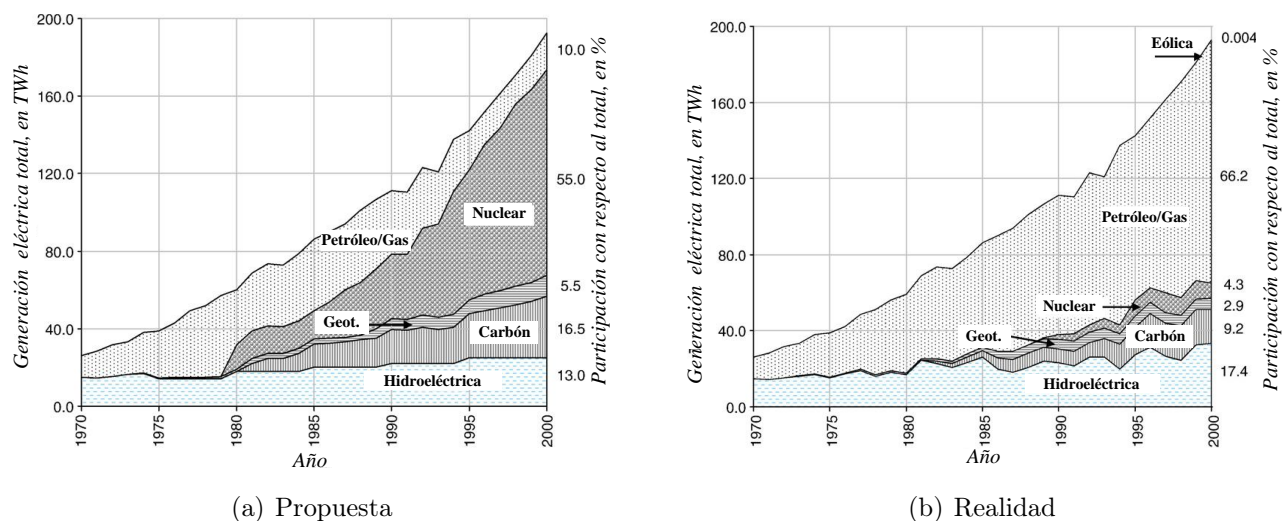




## IV.1. PROGRAMA ENERGÉTICO EN 1976 Y REALIDAD EN 2000

La crisis energética mexicana de 1971-1974, provocó el debate sobre la importancia de analizar los éxitos y errores de la planificación energética del país para mejorar su gestión. La crisis se agravó en 1973, pues aunada a la insuficiente producción nacional de crudo que resultaba insuficiente para cubrir la demanda nacional, se sumó el embargo petrolero de los países árabes. El programa de energía de 1976, solicitó que el sector eléctrico mexicano se convirtiera en el eje impulsor del desarrollo económico, social y ambiental del país. De acuerdo con dicho plan, las plantas termoeléctricas podrían ser sustituidas durante el periodo 1975-2000 por tecnologías más competitivas con el fin de eliminar el subsidio a la electricidad. Se consideró que las mayores innovaciones tecnológicas en la ingeniería serían aprovechadas con la energía nuclear y la renovable como la hidroeléctrica y la geotérmica.

Resultó que México llegó al año 2000 con una gran dependencia del petróleo y del gas natural para la producción eléctrica. Lamentablemente el programa energético de 1976 fue denegado por la voluntad política de los gobiernos posteriores. En diciembre de 1976 cuando José López Portillo tomó el poder para el periodo 1976-1982, las responsabilidades de la antigua Secretaría del Patrimonio Nacional (SePaNaI) se incluyeron en la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial (SePaFI) [Bazán y Fernández, 2008], ambas, denominaciones anteriores de la actual Secretaría de Energía (SENER).



**Figura IV.1:** Comparación entre la propuesta de 1976 y la realidad en 2000, respecto a la generación de energía eléctrica

En México, la política energética vigente comenzó a mediados de 1970, derivada de la ilusión de que había enormes reservas de petróleo y gas. Este argumento fue utilizado como instrumento en la política energética para justificar y evitar la necesidad del desarrollo de fuentes de energía nuclear y renovable para el sector eléctrico. A la fecha, las reservas probadas de hidrocarburos son insuficientes para cubrir la demanda eléctrica del país por más de una década. Esta falta de

combustible amenaza la auto-suficiencia de energía del sector eléctrico del país. Además, dado el alto precio de los hidrocarburos en el mercado, los costos de oportunidad para la producción de electricidad en México siguen aumentando considerablemente [Bazán y Fernández, 2008].

México se encuentra en una encrucijada respecto de la energía verde. Por un lado, este país tiene todos los elementos necesarios para convertirse en un gran usuario y desarrollador de tecnología de punta. Debido a su posición geográfica e instrumentos de política exterior, como el TLC y el Plan Puebla-Panamá (entre México y los países de Centroamérica), México podría convertirse en un importante exportador de esta tecnología a sus mercados vecinos. Por otro lado, sin embargo, el paradigma de las grandes petroleras está profundamente grabado en la mente de muchas personas, incluidos funcionarios y líderes del sector energético. El esfuerzo que se debe realizar incluye la implementación de políticas de energía agresiva y una variedad de cambios técnicos y no técnicos en el mercado energético [Huacuz, 2005].

## IV.2. ENERGÍA OCEÁNICA

Aún con todo lo acaecido en el pasado, el país registra actividad en el campo de la energía oceánica, específicamente en cuatro áreas: mareomotriz, undimotriz, corrientes marinas y OTEC/respiraderos hidrotermales [OES/IA, 2009].

### IV.2.1. MAREOMOTRIZ

Mareas con amplitudes de 6 m en la parte norte del Golfo de California son el resultado de una condición de resonancia de las ondas de tipo diurno impulsadas desde Los Cabos a lo largo del mar de Cortés

En la actualidad, el potencial del uso de esta amplitud de la marea para mover las turbinas en la inundación o el reflujó o una combinación de ambos, por medio de represas de marea, se encuentra en fase de evaluación. Se tienen cálculos que permiten estimar 1,000 y 40,000 MW para longitudes de aluvión de 10 a 75 km.

Un doble recinto de producción de electricidad continua en un sistema de lagunas costeras, cerca de Puerto Peñasco, en el norte del Golfo de California, requiere de un aluvión de tan sólo 3 km de largo. La producción de unos 90 MW se ha estimado para este sistema. Además, estas cuencas pueden ser utilizadas para la acuicultura.

### IV.2.2. UNDIMOTRIZ

El litoral de la costa del Golfo de México y mar Caribe no son una opción viable para invertir en energía undimotriz, pues es una zona abrigada donde la potencia del oleaje es baja, y el hecho de que de los 2,786.838 km de costa frontal, 2,559.97 km (92.46 %) corresponden a playa

de arena no contribuyen a generar puntos de concentración de energía. Caso contrario, el litoral de la vertiente del océano Pacífico mexicano es una magnífica opción para el desarrollo de la energía undimotriz, ya que cuenta con una longitud de costa frontal (expuesta a mar abierto) de 7,775.2 km, de los cuales 5,424.6 km (69.769 %) corresponden a playas de arena y 2,213.3 km (28.466 %) a costas rocosas; la difracción y reflexión generadas en las costas rocosas propician el peralte de las olas generando en la mayoría de los casos puntos de concentración de energía. Lo antes mencionado concuerda con la presencia del fenómeno de la “bufadora” a lo largo de la costa del Pacífico.

Saber que el mercado tecnológico dentro del campo enfocado al aprovechamiento de la energía undimotriz permanece prácticamente intacto, resulta en una gran motivación para la investigación a nivel mundial; pues como ya se ha hecho mención, diversas tecnologías muestran un evidente adelanto al grado de estar en etapa de comercialización, éstas tecnologías corresponden a las que aprovechan la energía eólica y solar directa y en lo que respecta a la energía oceánica, a la gran variedad de turbinas empleadas en la generación a partir de la energía mareomotriz y de corrientes marinas.

El gran número de dispositivos patentados constatan la carrera por desarrollar tecnología eficiente en el aprovechamiento de energía undimotriz, cuyo beneficio, hacerse con energía renovable y limpia, se extiende a lograr dominar el mercado y evitar la dependencia tecnológica.

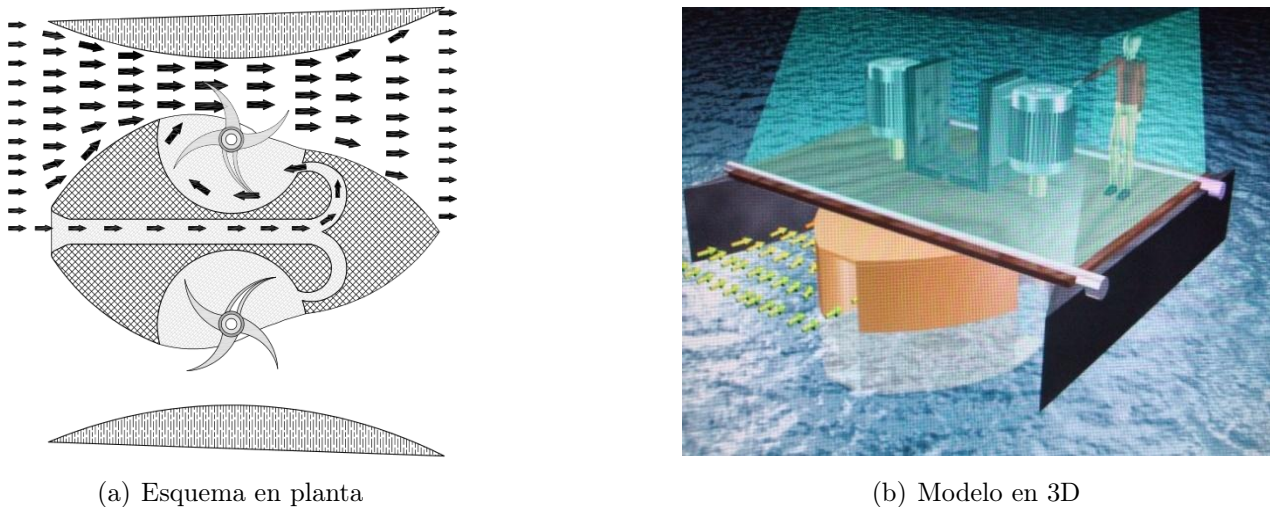
Los esfuerzos para utilizar la energía del oleaje en México se han centrado en el desarrollo de tecnologías para bombear agua de mar, útil para la gestión de los ecosistemas costeros. Dos bombas de agua de mar se han desarrollado en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional de México. Uno de estos sistemas, llamado REAL, amplifica las ondas incidentes por medio de dos muros convergentes, similares a un Tapchan, para capturar las crestas en un colector de agua que conduce el agua de mar por gravedad hacia el cuerpo de agua.

El otro sistema (SIBEO), amplifica las ondas de resonancia entre la frecuencia de la onda conducida y un sistema masa-resorte comprimido por el agua en el tubo de aspiración y el aire amortiguado en una cámara de compresión. De nuevo, las crestas se derraman dentro de un colector, que impulsa por gravedad un flujo hacia un cuerpo de agua. Durante 2009, las mejoras en el diseño SIBEO se han hecho con el fin de duplicar el rendimiento. Antes de que finalice el año 2010, los experimentos en estanque de olas se llevarán a cabo con un modelo a escala de la bomba. Se espera que un sistema a gran escala con el nuevo diseño logre bombear hasta  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un clima típico de oleaje en México.

### IV.2.3. CORRIENTES MARINAS

Existe una gran variedad de turbinas de eje horizontal y vertical que puede aprovechar la energía en las corrientes marinas. En el Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional de México, un sistema flotante con dos turbinas de eje vertical, se encuentra en fase de desarrollo. Un modelo a escala del sistema QK (figura IV.2) ha sido probado con éxito en el canal de aguas Ohmsett con un pórtico de arrastre de la que se midió el rendimiento del sistema. MAR, Inc., es el

contratista de operación de las instalaciones del Departamento de Estados Unidos del Interior (USDOI) Servicio de Gestión de Minerales (MMS). En la actualidad, con base en la experiencia adquirida, mejoras en el diseño se están aplicando para un prototipo para ser probado en el mar.



**Figura IV.2:** Modelo del sistema QK (*turbinas de eje vertical*)

Lugares en México con un buen potencial para la generación de electricidad a partir de las corrientes marinas son el Canal de Cozumel en el Mar Caribe y el Canal del Infiernillo en el Golfo de California. En Cozumel, las corrientes continuas promedian alrededor de 1.5 m/s mientras que en Infiernillo, las corrientes de marea tienen velocidades promedio de 4 m/s. Dado que el sistema QK flota atado a una ancla, ajusta su orientación a las corrientes, de modo que continúa la generación de electricidad independiente de los cambios en la dirección actual. Cálculos teóricos para un prototipo a gran escala estiman una generación de hasta 60 kW por unidad flotante para corrientes entre 1 y 3 m/s.

#### IV.2.4. RESPIRADEROS HIDROTERMALES/OTEC

La estratificación en los océanos del mundo ofrece gradientes de temperatura que se puede utilizar para generar electricidad con la tecnología OTEC, sin embargo México no ha participado en esta investigación. Durante el año 2009, un esfuerzo importante se ha llevado a cabo en México para encontrar fuentes de agua con alta temperatura en el océano que puedan ser utilizadas de manera semejante.

En el mar, las fuentes de respiraderos hidrotermales accesibles de relativamente alta temperatura se encuentran principalmente en cuatro grandes centros de dispersión geológica en el fondo del mar: cerca de Vancouver, Nueva Guinea, las Islas Galápagos y el Golfo de California. En este último caso, las fuentes hidrotermales se encuentran en la cuenca Wagner frente a Puerto Peñasco, Guaymas, el Canal de Ballenas y la Isla Tiburón. Las estimaciones preliminares muestran que, por un respiradero de 10 cm de ancho y con agua fluyendo a 250° C y 1 m/s, la energía disponible sería de alrededor de 400 TWT. Si sólo una pequeña fracción

de esta energía pudiera ser aprovechada, esto sería una fuente muy prometedora de energía. Sin embargo, sigue habiendo muchas dificultades que superar, como el diseño y amarre de las tecnologías apropiadas.

Las dorsales oceánicas son zonas con flujo de calor extremadamente alto, donde temperaturas que superan los 300° C pueden ser alcanzadas a profundidades someras. Estas altas temperaturas hacen de ellas un buen objetivo para la explotación de energía geotérmica. Por lo tanto, los diseños innovadores para generar electricidad mediante la instalación de un pequeño submarino en la parte superior del respiradero hidrotermal con una planta de ciclo binario se han desarrollado como parte de las actividades del proyecto IMPULSA, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), que se enfoca en la utilización de fuentes de energía renovables para la desalación de agua de mar. Los resultados generados por el proyecto para la explotación de los respiraderos submarinos se han presentado con una descripción de los diseños que incluyen cálculos de la eficacia de cada componente. Las plantas han sido diseñadas con base en los valores típicos de los parámetros de respiraderos hidrotermales, y un cálculo aproximado, se hace sobre la electricidad que podrían generarse a partir de este recurso renovable. La importancia de los respiraderos hidrotermales desde un punto de vista ecológico y biológico restringe la cantidad de áreas que podrían ser utilizadas para generar electricidad sin ningún tipo de perforación y se considera que sólo el 1 % de los sitios ya conocidos puede ser explotado. En tales supuestos conservadores, unos 130,000 MW de electricidad podrían ser generados en todo el mundo. Eso es casi la misma cantidad de energía geotérmica que podría generarse tierra adentro con todas las técnicas actuales y nuevas para generar electricidad. Un resultado importante, obtenido de esta investigación, es que a partir de una fuente hidrotermal se puede producir hasta 20 MW de electricidad con un método simple que no afecta el ecosistema.



---

Capítulo V  
**OLEAJE**

---

*“Un viajero marino tiene incluso una impresión más vívida  
de que el océano está hecho de ondas  
en lugar de materia”*  
**Arthur S. Eddington.**





Es bien sabido que en ciertas circunstancias un tipo de inestabilidad puede surgir en la superficie de separación de dos fluidos cuando hay una diferencia finita entre las velocidades de los dos lados de la superficie [Jeffreys, 1925]. Es por lo anterior que difícilmente se puede encontrar un cuerpo de agua abierto a la atmosfera que no presente ondas en su superficie. Estas ondas son la manifestación de fuerzas actuando sobre el fluido tendiendo a deformarlo en contra de la acción de la gravedad y la tensión superficial, las cuales actúan juntas para mantener el nivel de la superficie del líquido. Por lo tanto se requiere una fuerza de algún tipo, tal sería causada por una ráfaga de viento o una piedra que cae impactando en el agua, para crear ondas. Una vez que estas se crean, las fuerzas de gravedad y tensión superficial se activan permitiendo la propagación de las ondas en la misma forma que la tensión en una cadena causa esta vibre.

Las olas se producen en todos los tamaños y formas, dependiendo de la magnitud de las fuerzas que actúan sobre el agua. Un ejemplo simple es que una piedra pequeña y una gran roca crean ondas de diferente tamaño después de impactar sobre el agua. Además, diferentes velocidades de impacto crean ondas de tamaño diferente, lo que indica que las fuerzas de presión que actúa sobre la superficie del líquido son importantes, así como la magnitud del fluido desplazado. La atracción gravitatoria de la Luna, el Sol y otros cuerpos astronómicos, crea las olas más largas conocidas, las mareas.

Las olas más cortas pueden ser menores de un centímetro de longitud. La longitud de la onda da una idea de la magnitud de las fuerzas que actúan sobre las olas. Por ejemplo, cuanto más larga es la ola, la gravedad es más importante (formado por las contribuciones de la Tierra, la Luna y el Sol) en relación a la tensión superficial [Dean y Dalrymple, 1991].

En la fase inicial de generación de oleaje por viento, la fluctuación turbulenta de la presión atmosférica induce olas pequeñas, de forma casi regular, llamadas ondas capilares. Estas ondas son generalmente inestables y atenúan, debido a la tensión superficial, cuando el viento está en calma. Cuando aumenta la velocidad del viento, las olas crecen y las fuerzas de gravedad son suficientes para apoyar el movimiento ondulatorio. El crecimiento de la ola no es infinito, cuando las olas llegan a su pendiente límite (alrededor de  $1/7$  en aguas profundas), estas rompen en forma de capas blancas (espuma) o derrame o voluta (Massel, 1989) [Banner y Peregrine, 1993] [Massel, 1996].

## V.1. CARACTERIZACIÓN

### V.1.1. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS ONDAS

Los parámetros importantes que describen a las ondas son sus longitudes  $L$  y alturas  $H$ , y la profundidad  $h$  sobre la cual se propagan. Todos los demás parámetros, tales como velocidades y aceleraciones inducidas a las ondas, se pueden determinar teóricamente de estas cantidades. En la figura V.1, un esquema bidimensional del estado de mar ideal (con el oleaje definido por ondas sinusoidales perfectas, con crestas y valles de idéntica forma, un periodo único y un movimiento orbital progresivo), propagándose en dirección  $x$  es mostrado.

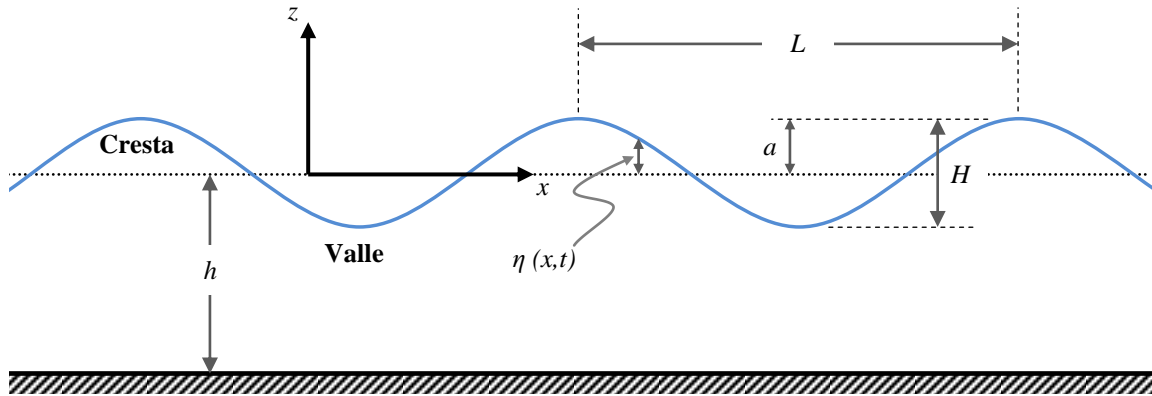


Figura V.1: Parámetros característicos de las ondas

La longitud de la onda,  $L$ , es la distancia horizontal entre dos crestas sucesivas o puntos más altos de la onda, o alternativamente la distancia entre dos valles sucesivos; mientras que la distancia vertical desde la cresta hasta el valle define la altura de ola  $H$ . El período de la onda  $T$ , es el tiempo requerido por dos crestas o valles sucesivos para pasar por un punto en particular, y su inverso es la frecuencia,  $f$ . Entonces, debido a que la onda debe moverse una distancia  $L$  en un tiempo  $T$ , la velocidad de la onda, llamada celeridad  $C$ , es definida como  $C = L/T$ . Mientras la forma de la onda que genera el perfil de la superficie del agua  $\eta$ , viaja con celeridad  $C$ , el agua que comprende la onda no se traslada en la dirección de esta.

El eje de coordenadas que se utiliza para describir el movimiento ondulatorio se localiza en la línea de agua quieta,  $z = 0$ . El fondo del cuerpo de agua se ubica en  $z = -h$ .

### V.1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS OCEÁNICAS

Las ondas que componen un registro de oleaje son de una amplia gama de periodos, alturas y longitudes. De acuerdo con su periodo, fuerza generadora y la cantidad de energía que normalmente portan, se pueden distinguir los tipos de ondas que se presentan en la tabla V.1 y la figura V.2 [Silva, 2005].

Como se ve en la tabla V.1 y la figura V.2, las ondas en el océano pueden ser clasificadas de varias formas; una clasificación usa las fuerzas que generan al oleaje, las cuales a su vez están asociadas con una longitud de onda característica. Así, por ejemplo [Silva, 2005]:

- Las fuerzas meteorológicas (viento, presión del aire) generan el oleaje local y distante
- Los maremotos o terremotos generan grandes ondas conocidas como tsunamis, los cuales normalmente son clasificados como ondas en aguas poco profundas, ya que su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad donde se propagan.
- Las mareas (fuerzas astronómicas) siempre se propagan de acuerdo con su longitud de onda en aguas poco profundas, por lo que son consideradas como ondas largas.

Nombre	Periodo ( $T$ )	Longitud ( $L$ )	Altura ( $H$ )	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 a 0.1 s	2 a 7 cm	1 a 2 mm	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0.1 a 1 s	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 s	De metros a cientos de metros	De centímetros a 15 metros	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 s a 30 min	100 a 200 m	Pequeña	Viento	Gravedad, fuerza de Coriolis
Periodo largo	5 min a 24 h	Puede llegar a ser de escala planetaria	1 a 5 m	Sismos, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad, fuerza de Coriolis
Transmarea	Más de 24 h	-	0 a 12 m	Oscilaciones climáticas	Gravedad, fuerza de Coriolis

Tabla V.1: Clasificación de las ondas por su periodo [Johnson et al., 1978]

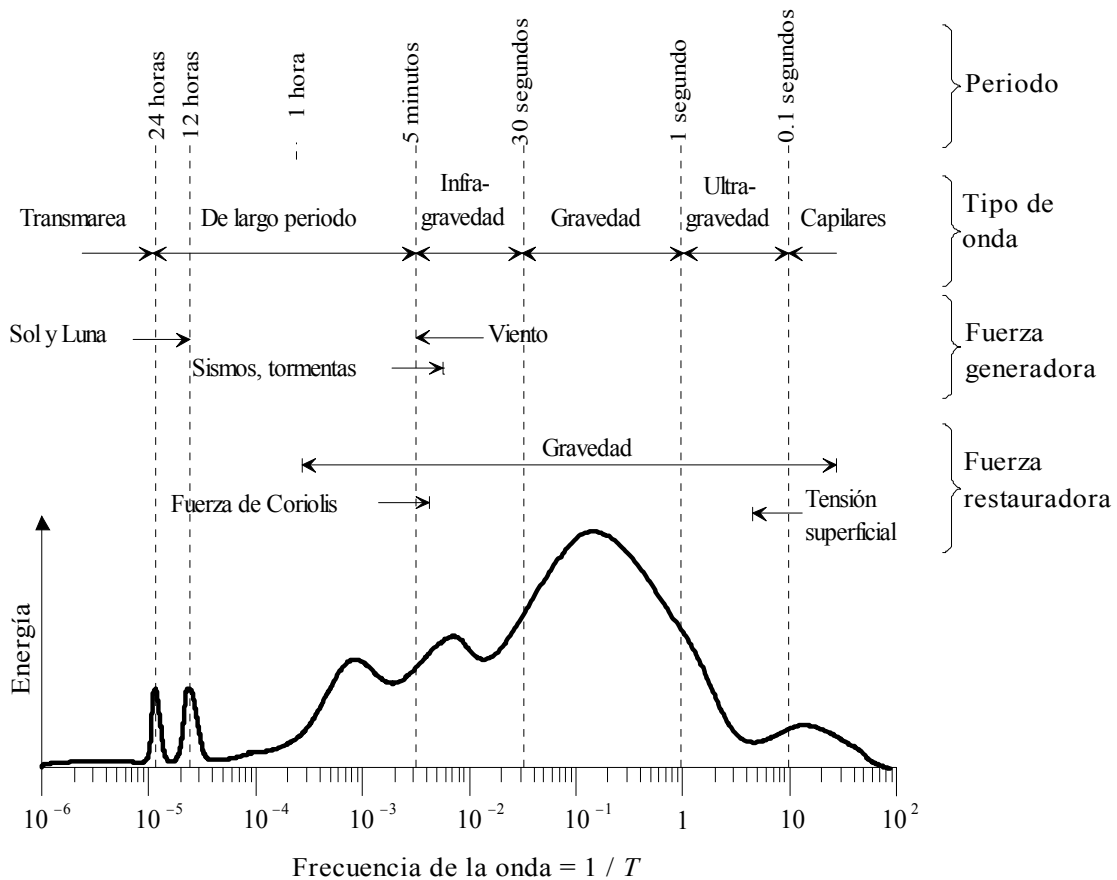


Figura V.2: Periodo-energía de las ondas [Kinsman, 1965]

### V.1.3. CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE

En ingeniería oceanográfica, se llama área de generación (fetch) a la región donde existe transferencia de energía del viento hacia la superficie del mar. Ahí el fenómeno es completamente aleatorio. El oleaje se propaga en diferentes direcciones, aunque la dirección dominante es la del viento. Las olas pueden tener diversas características dependiendo de las fuerzas que influyen en su generación. De acuerdo con su génesis, se suelen distinguir dos tipos extremos de oleaje, entre los cuales existen un sinnúmero de estados intermedios. Se denominan por las palabras inglesas, universalmente aceptadas, *sea* y *swell* o su traducción al español como *oleaje local* y *oleaje distante*, respectivamente [Silva, 2005].

#### V.1.3.1. Oleaje Local o *Sea*

Este tipo de oleaje se produce en la zona de generación en alta mar, donde raramente se aprecian crestas de cierta longitud y es difícil observar un periodo bien definido. Las características que definen este tipo de oleaje son:

- Gran irregularidad, ya que la altura de la superficie líquida es impredecible, carece de periodicidad
- Asimetría o gran desigualdad entre la forma del valle y la cresta de las olas
- Gran peralte de las olas. Las olas presentan una altura relativamente grande para su longitud de onda.

#### V.1.3.2. Oleaje Distante o *Swell*

Cuando el oleaje se propaga y abandona el área de generación ocurren tres fenómenos (Losada y Giménez-Curto, 1978):

- Pierden energía, las olas viajan a expensas de su propia energía (decaimiento)
- El oleaje sufre una doble dispersión. Una angular, en la que las olas se dispersan en todas direcciones, y otra radial, debida a que la velocidad es función directa del periodo, por lo que las olas más largas viajan más rápido que las más cortas. Se produce un filtrado de olas.
- Fenómeno de soldadura, según el cual las ondas de periodos cercanos se fusionan en largas crestas de onda, lo cual origina que la superficie caótica se simplifique. Al envejecer el oleaje y especialmente cuando abandona el área de generación va tendiendo a un oleaje de tipo swell.

Este tipo de oleaje se puede observar sobre la plataforma costera, especialmente en profundidades reducidas, donde a los fenómenos descritos anteriormente se añade el de la

refracción, que hace que las olas tiendan a progresar en forma paralela a las líneas batimétricas. Así, el oleaje que se acerca a la costa es más regular, forma frentes de cresta muy grandes y las diferencias entre periodos y longitudes de onda son mínimas, surge una periodicidad, las direcciones no son tan dispersas, y se presentan ciertas direcciones predominantes. Todo esto proporciona un cierto orden al fenómeno.

#### V.1.4. ESTADO DE MAR

Un estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo en que, y debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo cual produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario [Silva, 2005].

Otra definición es la que establece que el estado de mar representa cada una de las posiciones de la dinámica del oleaje, admitiendo que éstas tienen una variación lo suficientemente lenta para considerar al proceso como estacionario. Así pues, el oleaje puede considerarse formado por dos tipos de variaciones:

- *Variación de periodo corto.* La variación es muy rápida, del orden de segundos, durante la cual el proceso se considera estacionario.
- *Variación de periodo largo.* La variación es lenta, del orden de horas, y en ella evoluciona el estado del mar; hay variación de estado.

##### V.1.4.1. Descripción Estadística Temporal y Espectral de un Estado de Mar

Actualmente existen dos vertientes muy extendidas para el tratamiento de una señal de oleaje, cada una de ellas con sus virtudes y limitaciones, que pueden considerarse complementarias:

- *Descripción estadística temporal del estado de mar,* la cual considera las propiedades estadísticas, parámetros y distribuciones de  $\eta(t)$ , directamente de una serie de tiempo.
- *Descripción estadística espectral del estado de mar,* que toma en cuenta el estudio del espectro y sus propiedades en el dominio de la frecuencia. El espectro o espectro de energía es una forma de representar cómo está distribuida la energía del oleaje en función de las frecuencias que integran una señal en particular.

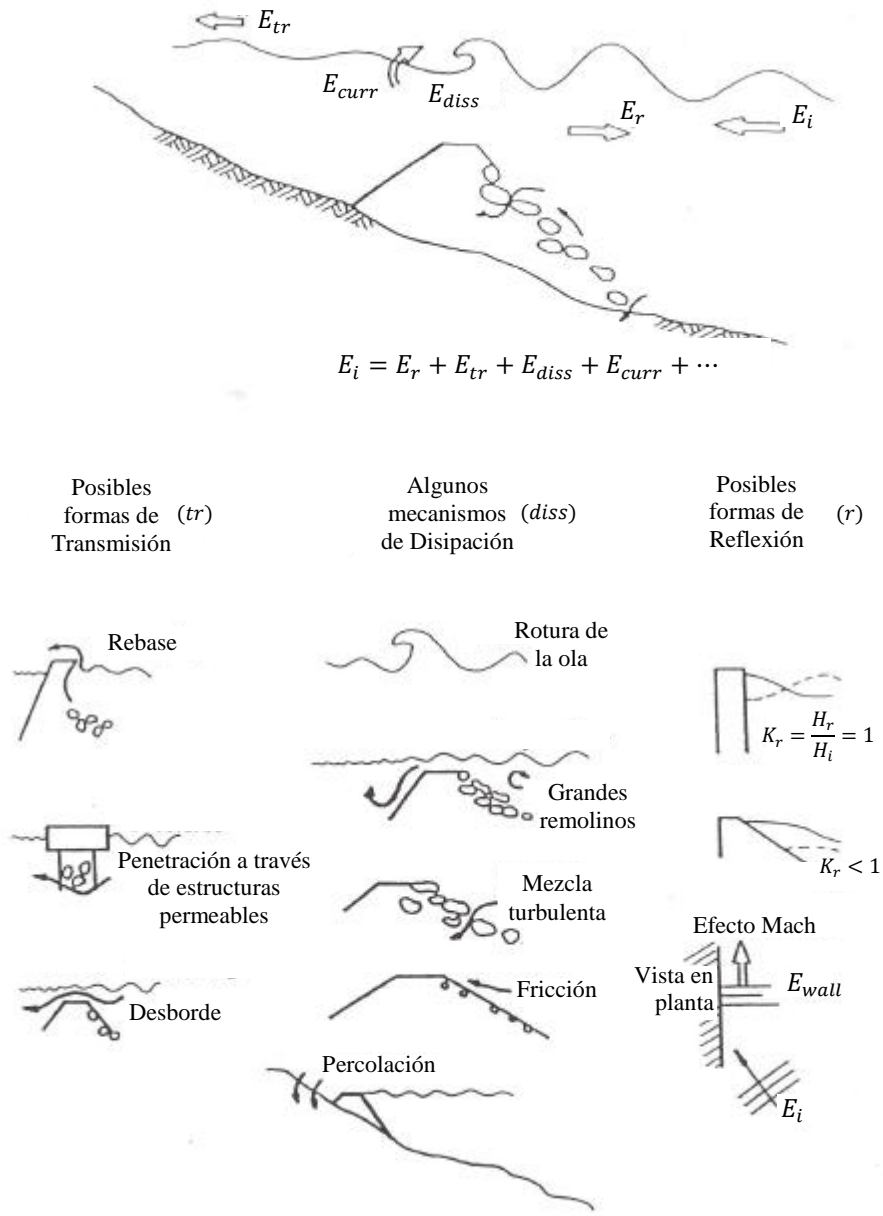
## V.2. INTERACCIÓN OLA-ESTRUCTURA

Desde el punto de vista físico, los procesos costeros pueden ser clasificados como longitudinales (paralelos a la costa) y transversales (perpendiculares a la costa). La esquematización

que se muestra en la figura V.3 visualiza la distinción, con la característica adicional de bidimensionalidad en el plano vertical y horizontal. La energía de la ola incidente  $E$ , se refleja en una estructura  $E_r$ , transmitida a través de ella  $E_t$ , disipada a través de la rotura, la mezcla y la fricción en varios tipos de flujo  $E_{diss}$ , y puede ser utilizada para la generación de las corrientes  $E_{curr}$ , o en otras formas de movimiento. La diversidad de patrones de transmisión, disipación y reflexión producen diversas respuestas sobre la protección de costas (figura V.3) [Pilarczyk y Zeidler, 1996].

La forma en que interactúan las ondas con una estructura, es regida predominantemente por la forma de la estructura misma. Las estructuras rígidas resisten el ataque de la ola a través de mantener una masa muy alta, y por lo tanto una inercia muy elevada. En este sentido, las estructuras actúan casi como una unidad armada que es tan grande que la energía del oleaje debería ser incapaz de moverla. Una estructura rígida puede destruir la energía del oleaje en al menos tres maneras:

- Impacto de las olas sobre la estructura, de manera que se convierte en un gran volumen de aspersión, que se eleva en el aire. Se trata de un mecanismo de destrucción eficiente, pero las fuerzas de impacto son muy altas. Las ondas de choque se inducen en la estructura y estas pueden ser peligrosas, si se transmiten dentro de una base no rígida.
- La onda es casi totalmente reflejada. Este es un proceso mucho más eficiente que el impacto, ya que las fuerzas de onda son mínimas, pero la reflexión completa es por lo general sólo económicamente posible para las olas pequeñas o no extremas. Sin embargo la reflexión del oleaje puede generar peligrosa socavación si la estructura rígida se basa en un fondo marino erosionables. La reflexión del oleaje es muy común en la naturaleza, en líneas de costa rocosas o acantilados.
- La ola es forzada a gastar su energía al abrirse camino a través de una pendiente rígida, “playa” artificial dura. La ola eleva cierto peso de agua en cierta distancia (con sólo romper parcialmente) para gastar su volumen de trabajo potencial. Este es un proceso eficiente, pero sobre una pendiente rígida y lisa, la altura requerida sobre la que se abre camino la ola resulta excesiva. Una pared reflectante en la parte superior de un dique bien inclinado rígido es, pues, una característica común, a menudo aliado con una superficie rugosa o una intensificada pendiente, para aumentar la resistencia sobre la ola al abrirse camino sobre la pendiente.



**Figura V.3:** Mecanismos de onda encontrados en la ingeniería de costas y la interacción del oleaje y la ingeniería costera





---

Capítulo VI

***BLOW-JET,***  
**CONCEPTO DE DISEÑO**

---

*“Su teoría es descabellada,  
pero no lo suficiente para ser correcta”*  
**Niels Henrik David Bohr.**

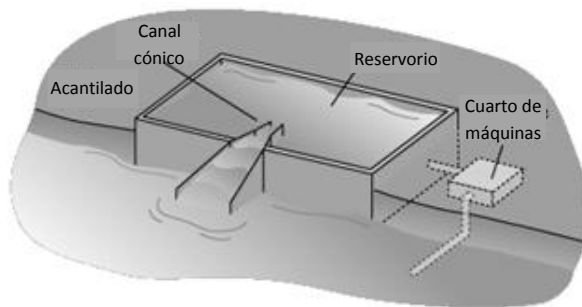


*Blow-Jet*, es el nombre con el cual se bautizó al dispositivo que engrosa la lista de tecnologías de conversión del oleaje. Es un diseño original que parte de pretender optimizar un concepto ya estudiado en México hace años (ver figura VI.1). El concepto busca idealizar mediante un dispositivo, la conducción cerrada (presiones existentes) entre dos orificios, uno de entrada o captación y otro de salida o entrega. Las dimensiones del orificio de entrada deben guardar relación con la altura de la ola incidente, mientras que las del orificio de salida deben ser menores, pues se pretende un aumento significativo en la velocidad, entregando con esto la mayor cantidad de energía cinética posible por medio de un chorro intermitente capaz de accionar un turbogenerador.



**Figura VI.1:** Junio 1983, México D.F. [Repper, 1983]

El desarrollo conceptual puede entenderse como la combinación de dos ideas ampliamente conocidas y funcionales, el TAPCHAN (figuras VI.2 y III.6) y un géiser marino. El *Blow-Jet* difiere del TAPCHAN en dos puntos significativos: el tipo de conducción y la energía que entregan.



**Figura VI.2:** Esquema general del TAPCHAN

Puesto que el concepto del TAPCHAN (TAPered CHANnel) esencialmente consiste en un canal abierto que se va estrechando y en el que las olas entran del lado de la sección más ancha. Conforme las ondas recorren el canal, se amplifican al grado que son capaces de rebasar una estructura de control y caen dentro de un reservorio ubicado a una altura mayor del nivel del mar. En términos energéticos la energía cinética de la ola se ha convertido en energía potencial que a la postre se emplea para generar energía eléctrica.

El fenómeno natural conocido como géiser marino (figura VI.3) y coloquialmente denominado en México como “bufadora” está regido por un concepto muy parecido sino es que idéntico al que se persigue. En un géiser marino se pueden distinguir tres partes esenciales: una caverna de captación del oleaje, una cámara de compresión y un chorro de salida perpendicular a la

superficie del mar. Siendo esta última parte la que le da la espectacularidad al fenómeno y provoca la admiración de quien lo presencia, pues el chorro alcanza alturas impresionantes y generalmente va acompañado de un sonido peculiar; de ahí su mote de bufadora y la inspiración del nombre de nuestro dispositivo: *Blow-Jet*.

En México este fenómeno se presenta a lo largo de la costa del pacífico y su máximo exponente se ubica en Ensenada, Baja California; los 20 metros de altura que alcanza el chorro le otorgan la distinción como el segundo géiser marino más grande del planeta.



(a) Orificio de entrada



(b) Orificio de salida

**Figura VI.3:** Géiser marino

Aunque el géiser marino es la principal inspiración para el diseño del *Blow-Jet*, el estado actual de desarrollo lo hace ser mucho más parecido a una tuba (figura VI.5). Dicho instrumento musical de viento, a pesar de que su funcionamiento es inverso pues la dirección del flujo (de aire en este caso) es del orificio pequeño hacia el grande, posee una geometría que satisface el concepto establecido: conducto cerrado, un orificio pequeño y otro grande. Dos son las razones por la que se decidió comenzar con un diseño similar a este instrumento musical:

1. La simplicidad de la geometría del instrumento en comparación con el géiser marino (sin cámara de compresión ni chorro perpendicular a la salida), lo que permite iniciar una caracterización “más clara”.
2. Después del análisis matemático del perfil hidrodinámico (sección VI.1), se obtiene una función parabólica, similar a la que presenta la tuba.

Adoptado lo anterior, a continuación se presenta el desarrollo analítico del que se partió para el diseño del perfil interior del dispositivo.

## VI.1. MODELO MATEMÁTICO DEL PERFIL HIDRODINÁMICO

El perfil hidrodinámico se determinó considerando la mínima resistencia que ofrece un sólido al flujo de un fluido. Encontrar dicho perfil  $y(x)$  (ver figura VI.4), donde  $l$  es la longitud del perfil y dispositivo y  $R$  es la altura del perfil, es un problema elemental del cálculo variacional, cuyo análisis se simplificó suponiendo que el fluido es un gas cuya densidad es suficientemente pequeña, y que las moléculas se reflejan especularmente en la superficie del

cuerpo. Lo anterior nos permite obtener la siguiente expresión para la componente normal de la presión.

$$p = 2\rho v^2 \sin^2 \theta \quad (\text{VI.1})$$

Aquí  $\rho$  es la densidad del gas,  $v$  es la velocidad del gas respecto al sólido y  $\theta$  es el ángulo entre la velocidad y su componente tangencial. La presión es perpendicular a la superficie, de modo que la componente en el eje  $Ox$  de la fuerza que actúa sobre un anillo de ancho  $(1 + y'^2)^{1/2} dx$  y radio  $y(x)$ , se puede

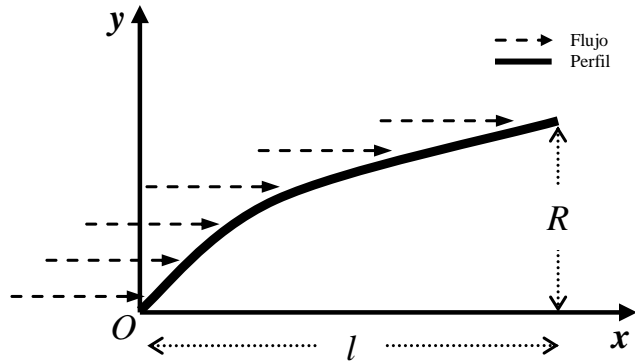


Figura VI.4: Perfil de mínima resistencia

escribir como:

$$dF = 2\rho v^2 \sin^2 \theta \left[ 2\pi y (1 + y'^2)^{1/2} \right] \sin \theta dx \quad (\text{VI.2})$$

La fuerza total que actúa en la dirección positiva del eje  $Ox$  es

$$F = \int_0^l 4\pi\rho v^2 \sin^3 \theta y (1 + y'^2)^{1/2} dx \quad (\text{VI.3})$$

Para simplificar el problema se acepta que

$$\sin \theta = \frac{y'}{(1 + y'^2)^{1/2}} \approx y'$$

Entonces la fuerza de resistencia es

$$F = 4\pi\rho v^2 \int_0^l y'^3 y dx \quad (\text{VI.5})$$

El problema consiste en hallar una función  $y(x)$  en la cual  $F$  toma el mínimo valor posible y que satisfaga las condiciones de contorno

$$y(0) = 0, \quad y(l) = R \quad (\text{VI.6})$$

La ecuación de Euler del funcional (VI.5) es

$$y'^3 - 3 \frac{d}{dx} (y y'^2) = 0 \quad (\text{VI.7})$$

La solución particular  $y = 0$  de esta ecuación no es aceptable en virtud de las condiciones de contorno (VI.6). La ecuación (VI.7) se puede escribir como

$$y'^3 + 3y y' y'' = 0 \quad (\text{VI.8})$$

Multiplicando ambos miembros de (VI.8) por  $y'$  notamos que el primer miembro es  $(y'^3 y)'$ . Integrando hallamos

$$y'^3 y = \tilde{C}_1^3 \quad (\text{VI.9})$$

De aquí resulta

$$y' = \frac{\tilde{C}_1}{\sqrt[3]{y}} \quad e \quad y = (C_1 x + C_2)^{3/4} \quad (\text{VI.10})$$

Utilizando las condiciones de contorno (VI.6), obtenemos

$$C_1 = \frac{R^{3/4}}{l}, \quad C_2 = 0 \quad (\text{VI.11})$$

de donde

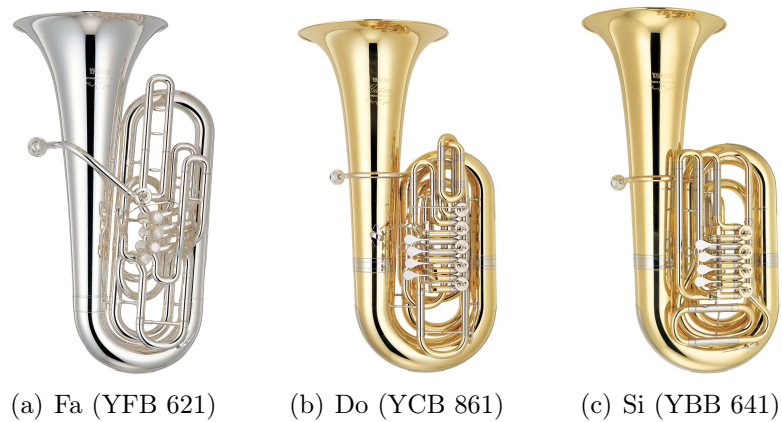
$$y = R \left( \frac{x}{l} \right)^{3/4} \quad (\text{VI.12})$$

es decir, el contorno con extremos fijos dados, para el cual la resistencia del cuerpo es mínima, es una parábola de grado  $3/4$  [Krasnov et al., 2005].

## VI.2. ELECCIÓN DEL PERFIL

La expresión exponencial resultante marca un perfil parabólico que permitió, dada su similitud, tomar como referencia los instrumentos musicales de viento, específicamente la tuba, como forma del perfil interno del dispositivo.

La exactitud que se exige en la fabricación de los instrumentos musicales para la generación de los sonidos deseados, producto del tránsito del fluido (aire) en su interior; al igual que la compatibilidad de las dimensiones del instrumento musical con las del canal de olas (Laboratorio de Costas y Puertos, del Instituto de Ingeniería, UNAM); son aspectos que ratificaron la elección de este parámetro como referencia en la elección del perfil a evaluar.



**Figura VI.5:** Perfiles elegidos

Como parámetro de elección se tomó el sonido emitido por la tuba así como su geometría, eligiendo tres modelos: tuba Fa (YFB-621), tuba Do (YCB-861) y tuba Si (YBB-641).

## VI.3. CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE LOS PERFILES

Con base en las dimensiones de los tres instrumentos elegidos se obtuvieron las respectivas funciones del perfil interior. El cálculo de las funciones consistió en encontrar el valor de  $l$  y  $R$  para sustituirlos en la ecuación (VI.12).

Se determinó  $l$  estableciendo una relación entre el diámetro de la campana y la longitud del tramo recto del que forma parte ésta. Se tomaron estas dos dimensiones directamente de las figuras de las tres tubas del catálogo de Yamaha (ver figura VI.5), de donde también se tomó el diámetro real de la campana (Bell size, Firuga VI.6) de los tres instrumentos para poder establecer la relación y obtener  $l$  mediante una interpolación lineal.

Para fijar el valor de  $R$ , primeramente se eligió un diámetro de orificio de salida igual y

BB <sup>b</sup> Tubas								All photos are approximately in scale.							
Model	Key	Bore size		Bell size		Material	Valves	Finish	Mouthpiece						
YBB-841		20.7mm (0.815")		450mm (17-3/4")		Yellow brass	4 rotary valves	Clear lacquer	67C4						
YBB-841G		20.7mm (0.815")		450mm (17-3/4")		Gold brass									
YBB-641		20.6mm (0.811")		419mm (16-1/2")		Yellow brass									
YBB-645G		20.7mm (0.815")		419mm (16-1/2")		Gold brass									
YBB-631/S	BB <sup>b</sup>	17.5-19.5mm (0.689-0.768")		443mm (17-1/2")		Yellow brass	3 pistons + 1 compensating	Clear lacquer/ Silver-plated*	67						
YBB-621/S		17.5-18.5mm (0.689-0.728")		366mm (14-3/8")			Front 4 pistons								
YBB-321/S		18.5-19.5mm (0.728-0.768")		443mm (17-1/2")			Top 4 pistons								
YBB-201/S		18.5mm (0.728")		443mm (17-1/2")			Top 3 pistons								
YBB-105/S		16.8mm (0.661")		366mm (14-3/8")											

F Tubas								All photos are approximately in scale.							
Model	Key	Bore size		Bell size		Material	Valves	Finish	Mouthpiece						
YFB-822/S	F	19.5mm (0.768")		446mm (17-1/2")		Yellow brass	Front 4 pistons, 1 rotary valve	Clear lacquer/ Silver-plated*	67B4						
YFB-621/S		17.5-18.5mm (0.689-0.728")		366mm (14-3/8")											

C Tubas								All photos are approximately in scale.							
Model	Key	Bore size		Bell size		Material	Valves	Finish	Mouthpiece						
YCB-861		20.7mm (0.815")		450mm (17-3/4")		Yellow brass	5 rotary valves	Clear lacquer	67C4						
YCB-822/S	C	19.5mm (0.768")		500mm (19-1/2")			Front 4 pistons, 1 rotary valve	Clear lacquer/							
YCB-621/S		17.5-18.5mm (0.689-0.728")		366mm (14-3/8")			Front 4 pistons	Silver-plated*							

Figura VI.6: Dimensiones tomadas del catalogo yamaha

comercial para los tres dispositivos. Dicho diámetro se buscó que fuera cercano al diámetro del tubo (Bore size) de los instrumentos (especificado en el catálogo Yamaha, ver figura VI.6). Así, el diámetro comercial elegido corresponde a tubería de acero cédula 40 cuya medida nominal es 3/4" y diámetro interno de 21 mm. El diámetro de la campana se dividió entre dos y se restó la mitad de diámetro interno del orificio de salida (10.5 mm) para obtener el valor de  $R$  en cada caso.

### Fa (YFB 621)

Cálculo de  $l$

$$\frac{l}{366.0 \text{ mm}} = \frac{43 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} \quad \rightarrow \quad l = 629.52 \text{ mm} \approx 630.0 \text{ mm}$$

Cálculo de  $R$

$$R = \frac{366.0 \text{ mm}}{2} - \frac{21.0 \text{ mm}}{2} \quad \rightarrow \quad R = 172.5 \text{ mm}$$

Función del perfil

$$y = 172.5 \left( \frac{x}{630.0} \right)^{3/4} \quad \rightarrow \quad y = 1.37178 (x)^{3/4} \quad (\text{VI.13})$$

### Do (YCB 861)

Cálculo de  $l$



$$\frac{l}{450.0 \text{ mm}} = \frac{40.0 \text{ mm}}{22.0 \text{ mm}} \quad \rightarrow \quad l = 818.18 \text{ mm} \approx 818.0 \text{ mm}$$

Cálculo de  $R$

$$R = \frac{450.0 \text{ mm}}{2} - \frac{21.0 \text{ mm}}{2} \quad \rightarrow \quad R = 214.5 \text{ mm}$$

Función del perfil

$$y = 214.5 \left( \frac{x}{818.0} \right)^{3/4} \quad \rightarrow \quad y = 1.40237 (x)^{3/4} \quad (\text{VI.14})$$

Si (YBB 641)

Cálculo de  $l$

$$\frac{l}{419.0 \text{ mm}} = \frac{35.0 \text{ mm}}{17.0 \text{ mm}} \quad \rightarrow \quad l = 862.65 \text{ mm} \approx 862.0 \text{ mm}$$

Cálculo de  $R$

$$R = \frac{419.0 \text{ mm}}{2} - \frac{21.0 \text{ mm}}{2} \quad \rightarrow \quad R = 199.0 \text{ mm}$$

Función del perfil

$$y = 199.0 \left( \frac{x}{862.0} \right)^{3/4} \quad \rightarrow \quad y = 1.251 (x)^{3/4} \quad (\text{VI.15})$$

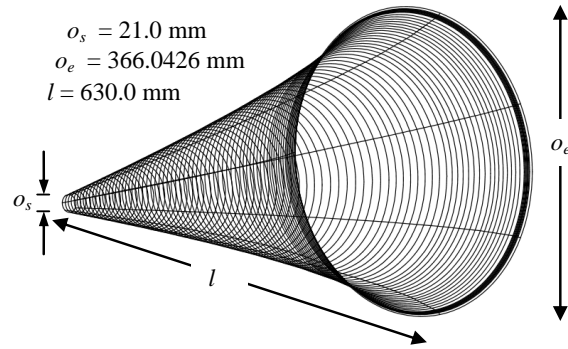
## VI.4. FABRICACIÓN DEL *BLOW-JET*

### VI.4.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PERFILES

Se desarrollaron las funciones (VI.13, VI.14 y VI.15) asignando valores a  $x$  desde uno hasta la  $l$  elegida (ver tabla VI.1) para obtener su correspondiente  $y$ , con lo cual se obtuvieron los perfiles de forma numérica, mismos que se manipularon mediante software para dibujo (AutoCad) hasta lograr la representación gráfica de los *Blow-Jets* (ver figura VI.7).

<i>Blow-Jet</i>	Orificio de salida “ $o_s$ ” [mm]	Orificio de entrada “ $o_e$ ” [mm]	Longitud “ $l$ ” [mm]
1 (Fa)	21.0	366.0426	630.0
2 (Do)	21.0	442.9006	800.0
3 (Si)	21.0	418.3390	860.0

**Tabla VI.1:** Dimensiones de los tres dispositivos



**Figura VI.7:** Geometría del *Blow-Jet* 1 ( $y = 1.37178 x^{3/4}$ )

## VI.4.2. PROCESO CONSTRUCTIVO

### VI.4.2.1. Intento de Fabricación con Acrílico

En un inicio la fabricación del *Blow-Jet* se intentó con acrílico, resultando un procedimiento prácticamente artesanal, laborioso y tardado. Se requería la previa elaboración de un molde en madera minuciosamente tallado para representar el perfil.

Una vez terminado el molde, se calentaba la lámina de acrílico con la finalidad de volverla moldeable, y al ponerla en contacto con el molde de madera y enfriarse (ver figura VI.8), conservara la forma de éste. La construcción mediante este procedimiento obligaba a realizar la fabricación en partes para una posterior unión de las mismas, incrementando en el rango de error que se origina desde la talla del molde.



**Figura VI.8:** Enfriamiento del acrílico en contacto con el molde de madera



**Figura VI.9:** Mitad del *Blow-Jet* en acrílico

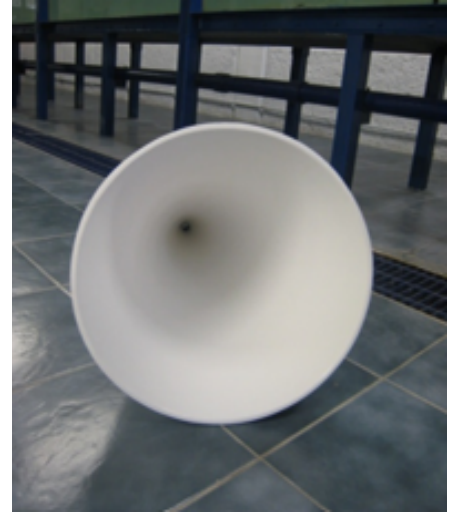
Dada la complejidad, tiempo requerido y escasas de precisión, se decidió abandonar el acrílico y construir el dispositivo de un material más manejable.

**VI.4.2.2. Definitivos en Fibra de Vidrio**

Lo anterior obligó a fabricar los modelos definitivos con fibra de vidrio y de manera industrial. A continuación se muestran imágenes de los modelos actuales de *Blow-Jet*, uno del os cuales es el objeto de los experimentos presentados en esta Tesis. El otro par se encuentra en proceso de prueba en el laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.



**Figura VI.10:** *Blow-Jet* 1, 2 y 3 en fibra de vidrio



**Figura VI.11:** Interior del dispositivo



---

Capítulo VII

***BLOW-JET*, ETAPA DE ANÁLISIS DEL  
PROTOTIPO A ESCALA EN EL  
CANAL DE OLAS**

---

*“Cualquier mago les dirá que los científicos son las personas más fáciles de engañar del mundo[...]. En sus laboratorios, el instrumental es exactamente lo que parece. No hay espejos ocultos, ni compartimentos secretos, ni imanes escondidos [...]. El pesamiento de un científico es racional, se basa en toda una vida de experiencia con un mundo racional. Pero los métodos del mago son irracionales y totalmente ajenos a la experiencia del científico.”*

**Martin Gardner.**



Únicamente el *Blow-Jet* 1 (tabla VI.1) se sometió a pruebas experimentales, por tal motivo, todo lo indicado en el presente capítulo (VII) y el siguiente (Capítulo VIII. ANÁLISIS ENERGÉTICO), está referido a dicho dispositivo.

## VII.1. OBJETIVO DE LOS ENSAYOS

El objetivo principal que se persigue con los ensayos realizados en laboratorio, es el de obtener la caracterización del *Blow-Jet* bajo distintas posiciones y condiciones de oleaje. El fin último es recabar la información necesaria para evaluar la factibilidad de su uso y para optimizar su geometría. Para tal efecto se plantean, como objetivos particulares, la obtención de datos a la entrada y salida del dispositivo energético, tales como: velocidades y alturas de ola.

## VII.2. DETERMINACIÓN DE LOS ENSAYOS

Con base en las dimensiones del dispositivo y pensando en una interacción armónica, se determinaron los estados de mar con los cuales se realizaron ensayos preliminares que permitieron fijar las condiciones de evaluación (tabla VII.1). Siendo los parámetros cambiantes: estado de mar, altura de ola ( $H$ ) y periodo ( $T$ ); y posición del *Blow-Jet*, inclinación ( $I$ ) y fracción sumergida ( $S$ ).

$S$	$I$ [°]	$H$ [m]	$T$ [s]
1/3	0	0.08	0.8
1/2	10	0.12	1.0
2/3	20	0.16	1.2
	30	0.20	1.4
			1.6
			1.8
			2.0

**Tabla VII.1:** Condiciones de evaluación

El máximo de combinaciones posibles ( $3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 7$ ) entre los parámetros determina un total de 336 pruebas, descontando las condiciones:  $H = 0.16$  m con  $T = 0.8$  s y  $H = 0.20$  m con  $T = 0.8$  s y  $T = 1.0$  s, pues el estado de mar no se puede generar (la ola rompe en la generación); quedaron un total de 300 pruebas con mediciones registradas.

### VII.3. ESQUEMA EXPERIMENTAL

Las condiciones a evaluar, las zonas de medición, la instrumentación necesaria y sus restricciones de operación, las limitantes del equipo que fija y soporta al *Blow-Jet* dentro del canal, etc.; todos, son aspectos que establecen la configuración del esquema experimental. La adecuada ubicación de cada uno de los elementos que intervienen de manera directa en la prueba física (dentro del canal) es fundamental para la obtención de información de calidad.

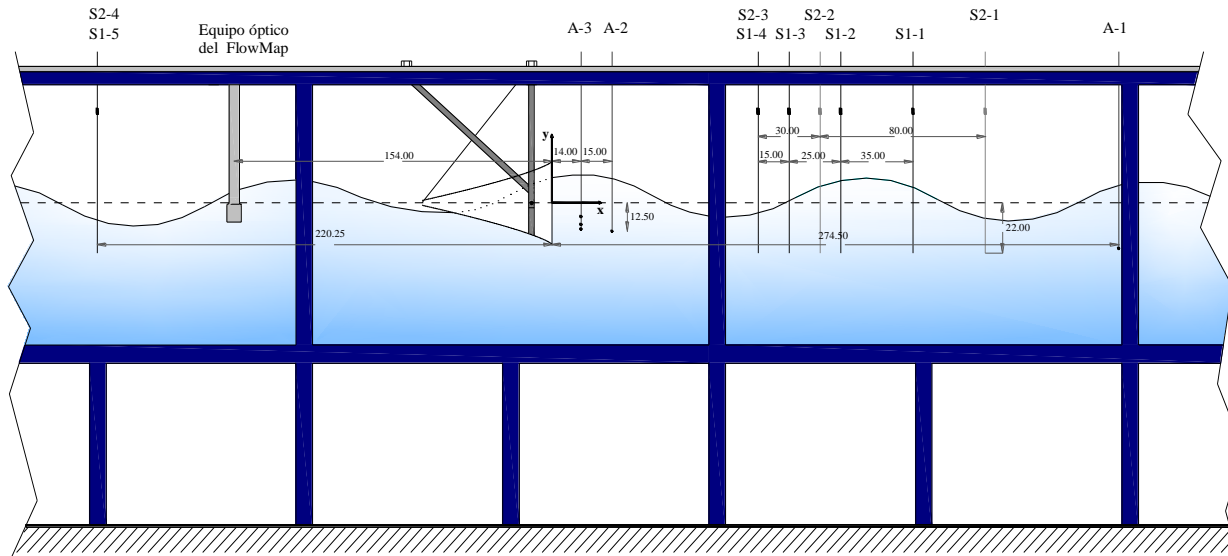


Figura VII.1: Esquema experimental

#### VII.3.1. INSTRUMENTACIÓN PARA MEDICIÓN DE VELOCIDADES

En esta etapa del desarrollo del *Blow-Jet*, importante es conocer la velocidad a la entrada y salida de éste y conociendo el fenómeno que se presenta en cada una de estas dos zonas (oleaje a la entrada y chorro a la salida), se eligieron, de acuerdo al equipo con que cuenta el laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, los instrumentos adecuados: ADVs y FlowMap (ver descripción en Apéndice C).

##### VII.3.1.1. Velocidades a al Entrada

Se emplearon un total de 3 ADVs en los ensayos. Colocando dos en la cercanía del  $o_e$  con una separación de 15 cm en el eje  $x$ . El más próximo se ubicó en  $x = 14$  cm y varió su posición vertical con cada  $S$ :  $y = -11.5$  cm para  $S = 1/3$ ,  $y = -9.5$  cm para  $S = 1/2$  y  $y = -6$  cm para  $S = 2/3$ ; el segundo de estos dos ADVs mantuvo una posición fija durante todos los ensayos en  $x = 29$  cm y  $y = -12.5$  cm. El tercer ADV se utilizó como testigo y su posición también se mantuvo constante en  $x = 2.745$  m y  $y = -20$  cm constante durante las 300 pruebas medidas.



Las coordenadas de ubicación de los vectrinos están referidas al eje coordenado ubicado en el centro del orificio de entrada del *Blow-Jet* mostrado en la figura VII.1.

### VII.3.1.2. Velocidades a la Salida

Las instrucciones 1 y 2 marcadas a seguir en la instalación de un ADV (Apéndice C) descartan su elección para medir la velocidad del chorro a la salida del *Blow-Jet*, por lo cual, se optó por emplear el FlowMap.

De todas las partes que integran el Flow Map, únicamente el equipo óptico, conformado por un tubo que gracias a la configuración de espejos en su interior permite generar la pantalla de luz, integra la prueba física y su posición dentro del canal se localiza en  $x = -1.54$  m  $y = -4.75$  cm (figura VII.1).

La posición del equipo óptico permite proyectar el laser en abanico (formando la pantalla de luz) justo a la mitad del dispositivo, para de esta forma partir longitudinalmente el chorro a la salida. Haciendo posible obtener el trazado de las partículas que integran el chorro mediante la colocación de la cámara del FlowMap en ángulo recto a la pantalla de luz generada, trazado que con un análisis posterior ( VII.6.2 FlowMap) arrojó las velocidades.

## VII.3.2. INSTRUMENTACIÓN PARA OBTENER ALTURAS DE OLA

En el registro de alturas de ola se utilizaron sensores o sondas de nivel. Para lograr la separación de la onda incidente y reflejada, el método utilizado en el programa REFLE (desarrollado por el grupo de costas y puertos) requiere tres sensores cuyas separaciones no deben ser múltiplos y además recomienda un rango en la distancia de separación comprendido dentro del intervalo  $\pi/10 \leq k \Delta x \leq 9\pi/10$  para la obtención de lecturas confiables, por lo que las distancias límite son las siguientes:

$$\Delta x_{min} = \frac{\pi}{10k} \quad (\text{VII.1})$$

$$\Delta x_{max} = \frac{9\pi}{10k} \quad (\text{VII.2})$$

donde,

$\Delta x_{min}$ : separación mínima entre sensores

$\Delta x_{max}$ : separación máxima entre sensores

Las condiciones anteriores nos obligaron a poner dos configuraciones, una para los dos primeros periodos ( $T = 0.8$  s y  $T = 1.0$  s) y otra para los cinco periodos restantes. En ambas

configuraciones se colocó un sensor después del *Blow-Jet* (S1-5 y S2-4) para conocer la altura de ola transmitida ( $H_{tr}$ ) (ver figura VII.1).

En la primera configuración se colocaron un total de 5 sensores, la ubicación de los sensores en forma ordenada (sensor S1-1 al S1-5) fue en  $x = 1.7475$  m,  $x = 1.3975$  m,  $x = 1.1475$  m,  $x = 0.9975$  m, y  $x = -2.2025$  m. Siendo los sensores S1-2, S1-3 y S1-4 los que intervienen en el cálculo de la reflexión y cuyas separaciones quedaron de 25 cm y 15 cm.

Para la segunda configuración únicamente se colocaron 4 sensores:  $x = 2.0975$  m,  $x = 1.2975$  m,  $x = 0.9975$  m, y  $x = -2.2025$  m; los tres sensores ubicados delante del *Blow-Jet* (S2-1, S2-2 y S2-3) tienen separaciones de 80 cm y 30 cm.

El desplazamiento de -14 cm (subir 14 cm los sensores) en la calibración (VII.4.3 WAVE DATA COLLECTOR (WDC) ), así como la fracción sumergida más desfavorable  $S = 1/3$  (-6 cm en el nivel de agua) permitieron fijar la posición de medición de los sensores en  $y = -22.00$  cm en todos los ensayos, garantizando estar sumergidos 2 cm bajo estas condiciones extremas.

### VII.3.3. POSICIÓN DEL *BLOW-JET*

En lo concerniente a la posición del *Blow-Jet*, la fracción sumergida ( $S$ ) está referida al diámetro del orificio de entrada ( $o_e$ ) en su posición horizontal ( $I = 0^\circ$ ). Y la inclinación ( $I$ ) es el ángulo entre el eje del *Blow-Jet* y la horizontal (nivel del agua), ver la figura VII.2. Cabe mencionar que la fracción sumergida se manejó variando la profundidad (nivel de llenado del canal) pues el soporte no permitió modificar la posición vertical del *Blow-Jet*.

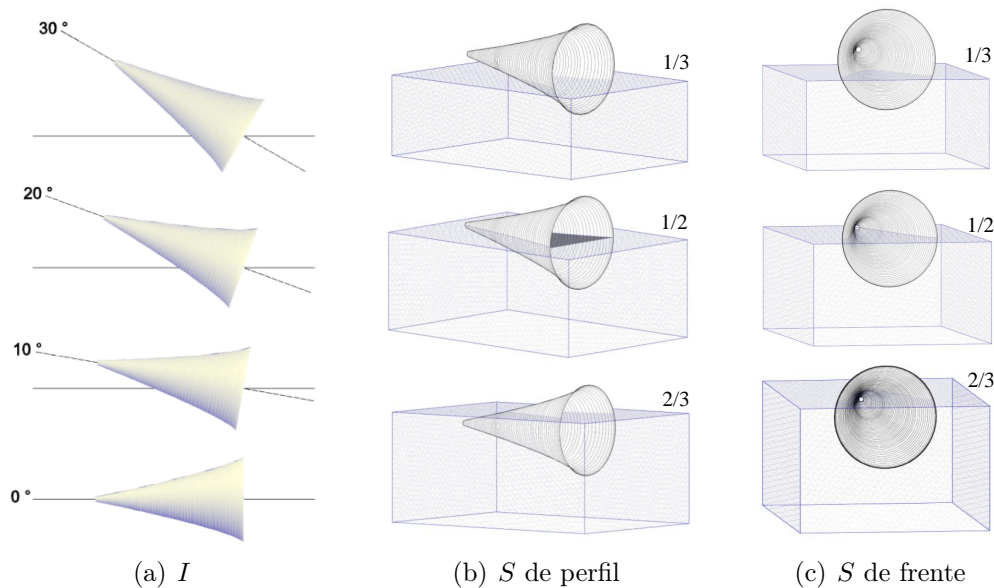


Figura VII.2: Posiciones a evaluar del *Blow-Jet*

## VII.4. CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE EMPLEADO

El software utilizado, tanto para la adquisición de datos mediante la instrumentación de medición así como para la generación de los estados de mar, lo integran: PolySync (ADVs), FlowManager (FlowMap), Wave Data Collector (Sensores de nivel) y HR WaveMaker (Sistema de generación de estados de mar)

### VII.4.1. HR WAVEMAKER

El oleaje bajo el cual se ensayó fue regular. Para generar este tipo de oleaje por medio del Software WaveMaker únicamente se indican:  $h$  [m],  $H$  [m] y  $f$  [Hz]

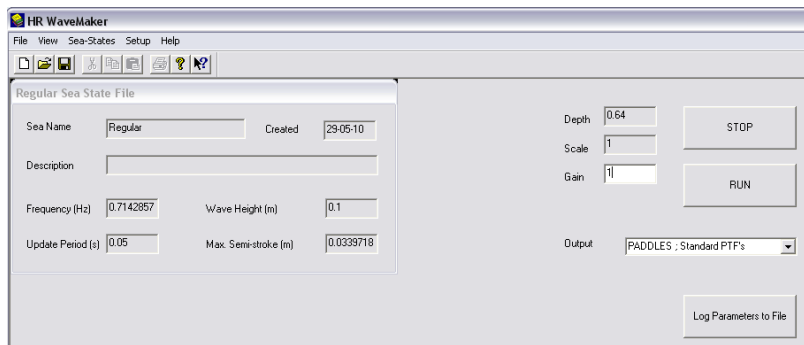


Figura VII.3: Interfaz WaveMaker

### VII.4.2. POLYSYNC

Los ADVs fueron configurados mediante el programa PolySync 1.0.17 (Nortek) para capturar datos con una frecuencia de 80 Hz durante 2 minutos (figura VII.4), y de esta forma tener la historia de las velocidades a la entrada conformada por 9600 velocidades.

El programa PolySync permite sincronizar los ADVs para obtener las velocidades de los tres equipos al mismo tiempo durante las pruebas.

En la figura VII.5 se observa la ventana del software PolySync durante la medición de una prueba (0.16 m, 1.4 s,  $S = 1/2$  y  $I = 0^\circ$ ), en la cual se aprecia el registro de velocidades de los 3 ADVs: COM 5 corresponde al ADV más cercano al *Blow-Jet* (A-3 en la Firuga VII.1), COM 6 es el segundo ADV en la cercanía del *Blow-Jet* (A-2) y COM 7 es el ADV testigo (A-1) que se ubica a más distancia del *Blow-Jet* y mayor profundidad.

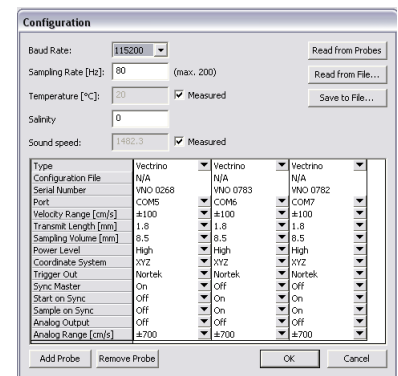


Figura VII.4: Ventana para la configuración de los ADVs



Figura VII.5: Visualización del registro de velocidades durante la medición

### VII.4.3. WAVE DATA COLLECTOR (WDC)



Figura VII.6: Adquisición de datos WDC

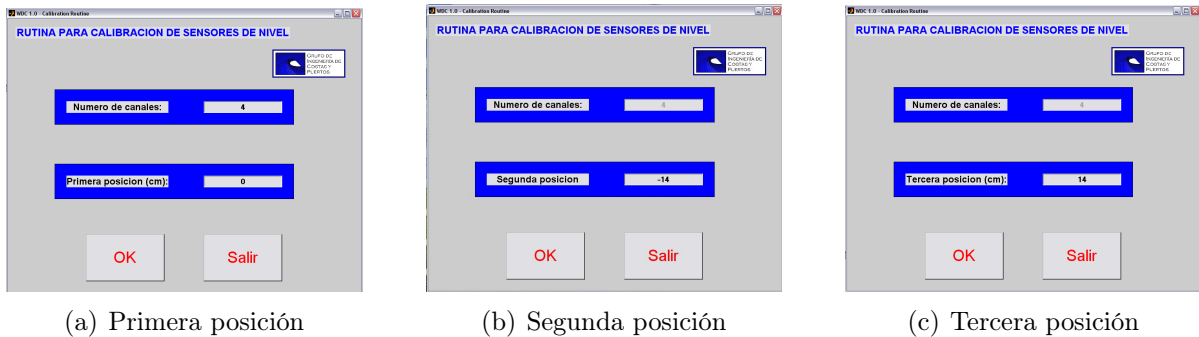
Con una configuración similar a la de los ADVs, los sensores de nivel se programaron para registrar con una frecuencia de 80 Hz, con la limitante de capturar un número de datos múltiplo de 512, se indicó registrar 9728 datos equivalentes a 2.0267 minutos de grabación (figura VII.6).

Previo a la configuración de los sensores de nivel se realiza la calibración de los mismos, proceso igualmente obligado con cada cambio en la profundidad del canal. El procedimiento consiste en registrar tres profundidades variando la posición vertical de los sensores, incluida como primera posición la posición original de medición (0 cm).

Para los ensayos realizados se eligieron -14 y 14 cm como segunda y tercera posición a fin de cubrir los rangos de altura de ola planeados y el procedimiento se realizó en el siguiente orden

particular:

1. Se ubicaban los sensores en la posición original de medición (primera posición).
2. Lo monitores se colocaban en cero por medio de un voltímetro (CD 20V) estando la superficie del agua sin perturbación.
3. Se accedía a la rutina de calibración del programa WDC (figura VII.7(a)) ingresando el número de canales utilizados (5 sensores para la primera configuración y 4 en la segunda) y aceptando (OK) la posición original de medición como la primera posición correspondiente a 0 cm.
4. Automática la ventana (figura VII.7(b)) pide la segunda posición, se indicaba -14 cm, pero no se aceptaba hasta no haber desplazado los sensores verticalmente hacia arriba 14 cm (7 orificios de los soportes de los sensores). Una vez desplazados se aceptaba la segunda posición (OK).
5. La ventana (figura VII.7(c)) pide la tercera y última posición, indicando 14 cm, que de igual forma se aceptaba una vez los sensores se bajaban 14 cm a partir de la primera posición (28 cm a partir de la segunda posición).
6. Proceso que terminaba revisando que el archivo de calibración generado estuviera correcto, esto era que en la columna de coherencia los valores arrojados fueran igual a 1 ( $\pm 0.00009$ ).

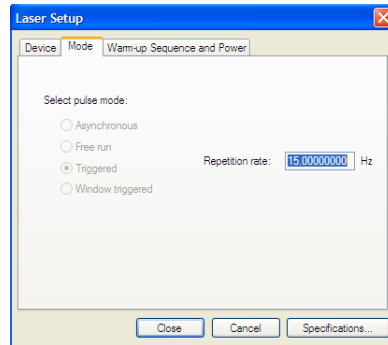


**Figura VII.7:** Interface gráfica del WDC para la rutina de calibración

#### VII.4.4. FLOWMANAGER

La configuración del FlowMap consistió en capturar 60 imágenes con una frecuencia de 15 Hz (figura VII.8), con lo que se logra un registro histórico de 4 segundos de las velocidades del chorro.

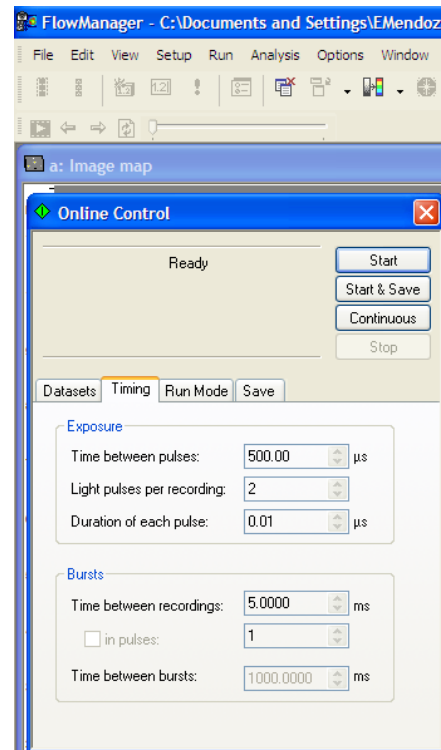
Se configuran 60 grabaciones equivalente a 60 destellos por ráfaga del laser, y únicamente una de éstas ráfagas (figura VII.9). Así también se configuró el tiempo entre pulso, 2 pulsos por destello que originan un par de imágenes por grabación (figura VII.10).



**Figura VII.8:** Configuración de la frecuencia del laser (destellos)



**Figura VII.9:** Número de ráfagas y grabaciones (destellos)



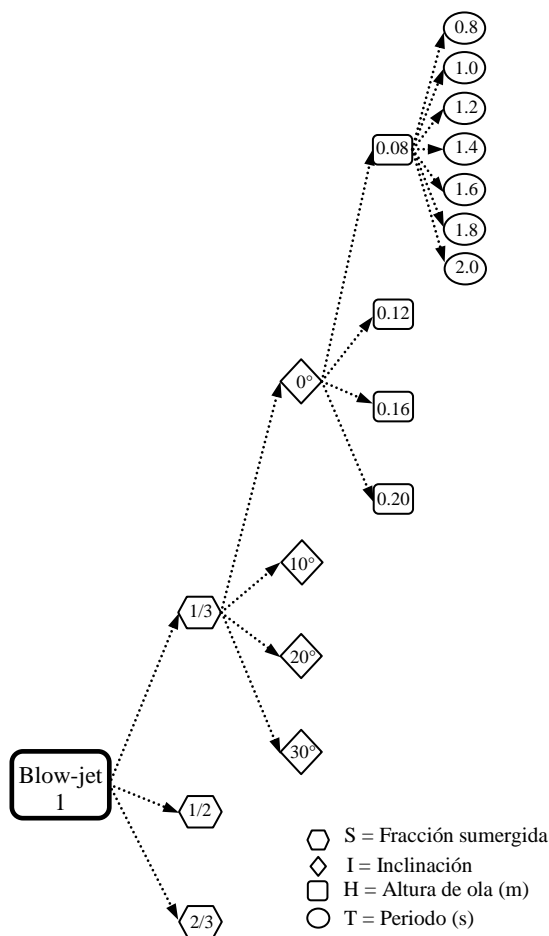
**Figura VII.10:** Tiempo entre pulsos y ráfagas

## VII.5. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS

La secuencia de los ensayos quedó establecida en función de la dificultad que cada parámetro propiciaba, variando en última instancia el parámetro que implicaba mayor complicación por la manipulación de la instrumentación. Dentro de esta cuestión, el soporte que fija el *Blow-Jet* dentro del canal originó, debido a que, como se mencionó anteriormente no permitió el

desplazamiento vertical del *Blow-Jet* así como tampoco una inclinación mayor a  $10^\circ$ , que  $S$  e  $I$  fueran los últimos parámetros en variar.

Al tener que alterar el nivel de llenado del canal, para variar  $S$ , se hace necesaria la calibración de los sensores de nivel, procedimiento que requisita mayor tiempo. La variación de  $I$  ocasiona la reubicación de la cámara del FlowMap y enfocar la lente para captar el chorro. La variación de  $H$  y  $T$  no provocan modificaciones, por tal motivo fue elección propia mantener  $H$  y cambiar  $T$ . Quedando, establecida la secuencia de los ensayos como se indica en el diagrama de la figura VII.11.



**Figura VII.11:** Secuencia de los ensayos

El procedimiento de los ensayos llevado a cabo desde el inicio, se describe a continuación:

1. Llenado del canal hasta el nivel deseado.
2. En el tiempo que demoraba el proceso de llenado, se verificaba la posición correcta del dispositivo, así como de la instrumentación (ADV, sensores de nivel, equipo óptico del FlowMap, cámara del FlowMap y cámara de video), se abría y configuraba el programa de los ADVs al igual que el FlowManager.

3. Procedía el encendido del sistema de generación seguido del calibrado y encendido del sistema de absorción.
4. Un tiempo de espera para la estabilización del agua era obligado antes de continuar con la calibración de los sensores de nivel.
5. Terminado el proceso de calibración de los sensores, se configuraba la adquisición de los datos registrados por éstos.
6. Haciendo uso del software del sistema de generación, se ingresaban los parámetros necesarios para generar el estado de mar requerido:  $h$ ,  $H$  y  $f$
7. Se iniciaba la generación del oleaje.
8. Se enfocaba la lente de la cámara del FlowMap.
9. Dejar un tiempo corto para estabilizar el oleaje.
10. Lo más sincronizado posible se iniciaba la grabación y adquisición de datos con los sensores de nivel y ADVs.
11. Mientras transcurrían los 2 minutos de medición de velocidad de entrada y niveles, se procedía a capturar los 60 pares de imágenes con el FlowMap.
12. Posteriormente se registraban 15 segundos con la videocámara.
13. Al terminar de registrar los datos deseados se suspendía la prueba.

Si la prueba siguiente variaba en relación con la anterior únicamente en  $f$  o  $H$ , el procedimiento se repetía a partir del paso 6 omitiendo el 8; si variaba la  $I$ , se repetía desde el paso 2 (atendiendo solamente lo concerniente) omitiendo el 3, 4 y 5. Al variar  $S$  o iniciar pruebas otro día el procedimiento descrito anteriormente se realizaba completo.

## VII.6. PROCESAMIENTO DE DATOS

### VII.6.1. ADVs

Para determinar la velocidad a la entrada del *Blow-Jet*, se eligió el ADV más cercano al dispositivo (A-3). Una vez grabados y generados los archivos de las pruebas, estos se procesaron haciendo uso del mismo software usado para configurar (PolySync) para convertir los datos en bruto a velocidades (figura VII.12).



La turbulencia, generada por la interacción del oleaje con el *Blow-Jet*, al igual que la presencia de una cantidad considerable de burbujas, ocasionó irregularidades en la medición; las cuales se manifestaron como valores extremos (ruido) en la señal. Lo anterior obligó a la elaboración de un programa (SUAVI), el cual se codificó en FORTRAN y realiza las siguientes funciones: limpia la señal (figura VII.13), eliminando el ruido; obtiene el promedio de las velocidades positivas,  $\bar{v}_e$ ; determina el promedio de las velocidades de las crestas de la señal (promedio de máximos,  $\overline{v_{e\max}}$ ) e indica la velocidad máxima registrada,  $v_{e\max}$ . Los datos procesados de velocidad de entrada se integran en la tabla E.1 Apéndice E.

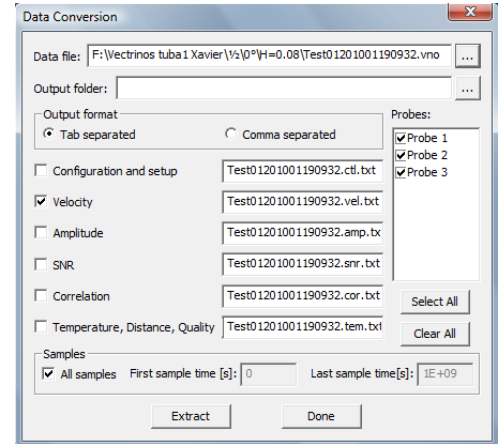


Figura VII.12: Conversión a velocidades

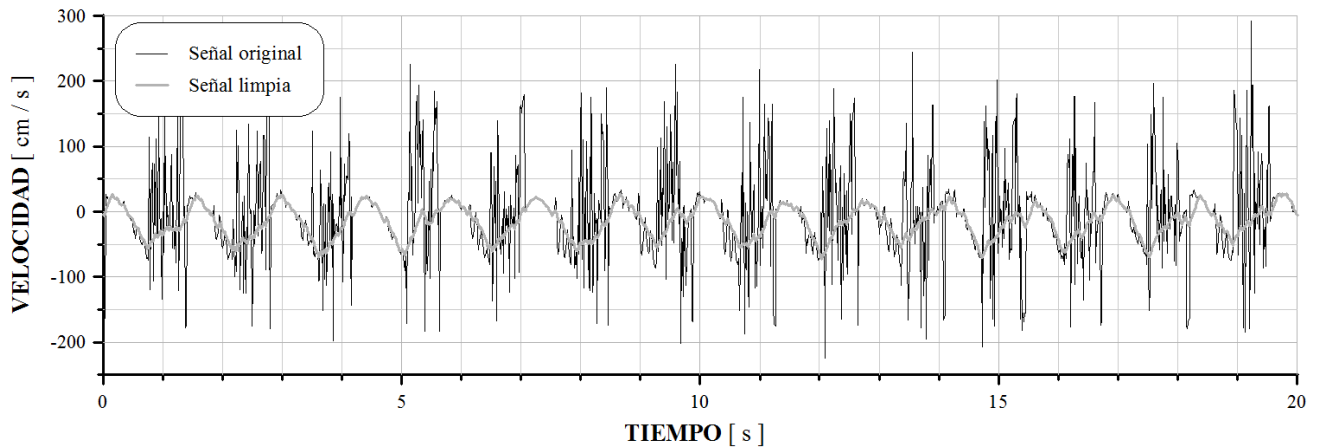


Figura VII.13: Sexta parte de la historia de velocidades a la entrada del *Blow-Jet* (prueba 53)

## VII.6.2. FLOWMAP

Las imágenes capturadas (figura VII.15) se procesaron haciendo uso del programa FlowManager 4.41.11 (Dantec Dynamics). Escalando las imágenes (figura VII.14) antes del análisis, después del cual se obtuvieron los campos o mapas vectoriales de las velocidades (figura VII.16).

Con los campos vectoriales se hicieron los registros históricos de velocidades (figura VII.17) para cada prueba (Apéndice E tablas E.2, E.3 y E.4), lo que originó una matriz final  $M[60,336]$  de 60 filas (60 imágenes por prueba) por 336 columnas (336 pruebas). Con la finalidad de manipular el registro de velocidad de salida, este se dividió en tres matrices ( $M[60,112]$ ), una por cada  $S$ .

Un segundo programa (PROMATRIZ) se realizó en FORTRAN específicamente para leer cada una de las tres matrices y obtener, para cada prueba (columna): el número de chorros que se registraron completos, entendiendo por chorro, más de dos velocidades consecutivas mayores

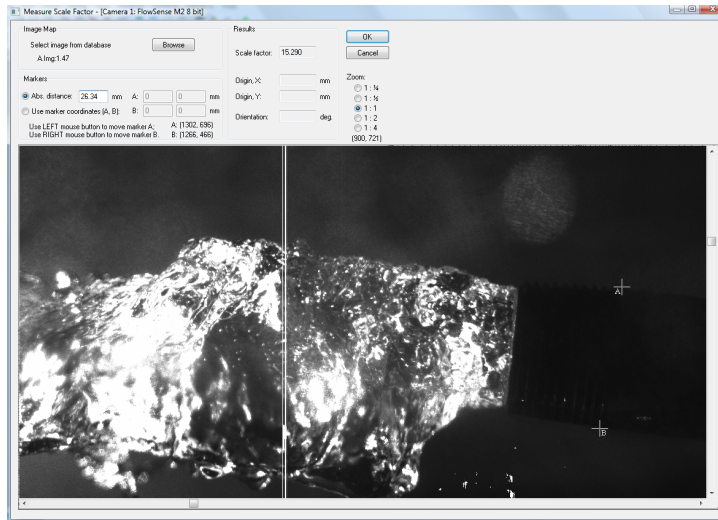


Figura VII.14: Proceso para escalar imagen

a 10 cm/s; el promedio de las velocidades de los chorros,  $\bar{v}_s$ ; el tiempo promedio que dura un chorro,  $t_{chorro}$  y la velocidad máxima,  $v_{s\ max}$ . La totalidad de los datos procesados con el programa PROMATRIZ se anexan en el Apéndice E tabla E.5 .

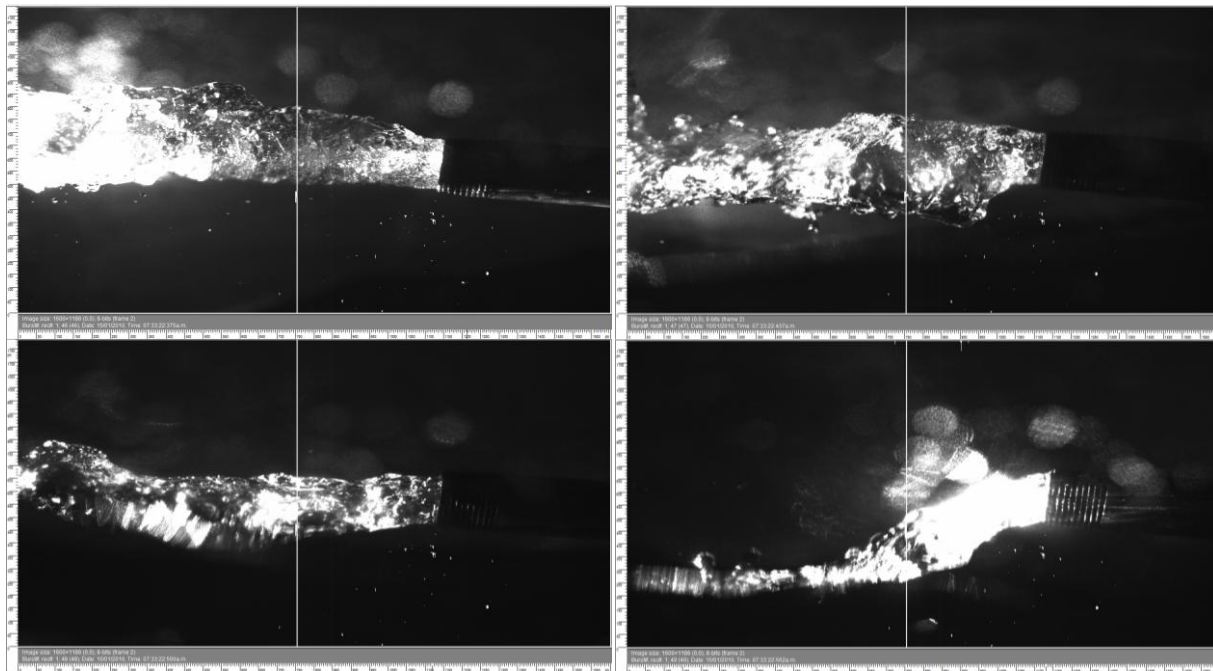


Figura VII.15: Cuatro (46, 47, 48 y 49) de las sesenta imágenes correspondientes al ensayo 53

Se estableció como límite 10 cm/s, pues es la velocidad en la que, de acuerdo con lo observado, se marca la transición entre el funcionamiento con área hidráulica igual al área del orificio de salida, para velocidades mayores y área hidráulica menor al área del orificio de salida, para velocidades menores. Condición que beneficia en el empleo de la continuidad para cálculos energéticos.

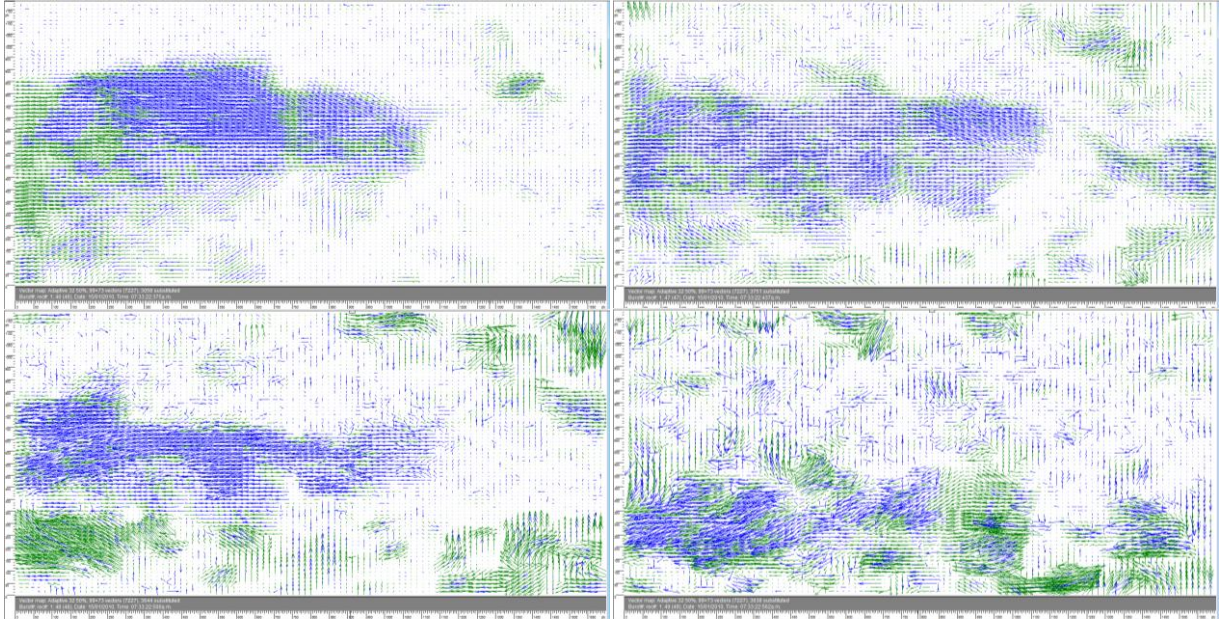


Figura VII.16: Mapas vectoriales correspondientes a las imágenes de la figura VII.15

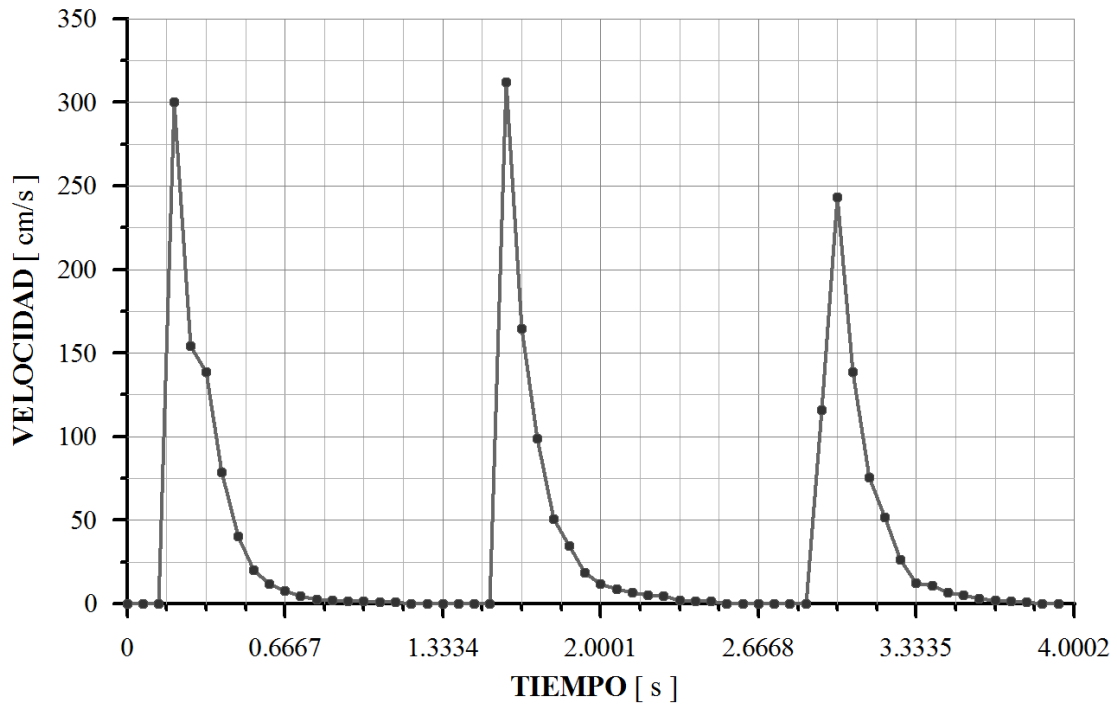


Figura VII.17: Historia de las velocidades de salida (prueba 53)

### VII.6.3. SENSORES DE NIVEL

Los archivos generados por los sensores de nivel registran los voltajes que posteriormente se convirtieron a alturas de ola mediante el programa LEEWDC (Apéndice D tablas D.1, D.2 y D.3), estas alturas de ola se procesan usando el programa REFLE para obtener una gran

cantidad de parámetros de acuerdo a los métodos de Mansard y Goda, como: coeficiente de reflexión; espectros; alturas de ola totales; incidentes, de reflexión; significantes, cuadráticas medias, etc (Apéndice D tablas D.4, D.5 y D.6). Ambos programas han sido codificados por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

---

Capítulo VIII

# ANÁLISIS ENERGÉTICO

---

*“Si tu experimento necesita estadística,  
deberías haber hecho uno mejor”*

**Ernest Rutherford.**



El análisis energético del *Blow-Jet* consiste en comparar la energía total captada,  $TE_e$ , contra la energía cinética entregada,  $KE_s$ , por el dispositivo, pues es esta última la que, se pretende, sea aprovechada por un turbogenerador. Así, se puede establecer la eficiencia hidráulica,  $\eta_H$ , en términos energéticos:

$$\eta_H [\%] = \left( \frac{TE_s}{KE_e} \right) 100 \quad (\text{VIII.1})$$

La naturaleza distinta de ambos fenómenos analizados, el oleaje a la entrada y un chorro a la salida, obligó, el establecer un análisis igualmente distinto para cada fenómeno.

## VIII.1. ENERGÍA A LA ENTRADA (OLEAJE)

El cálculo energético a la entrada del *Blow-Jet* se resume a encontrar la energía total (suma de cinética y potencial) de la porción de ola que entra al dispositivo, para lo cual se hizo el programa TOTAL\_ENERGY.f90.

### VIII.1.1. ENERGÍA CINÉTICA

La teoría lineal de ondas de pequeña amplitud define la energía cinética por unidad de ancho de ola como una función de  $H$  y  $L$ :

$$KE = \frac{\gamma H^2 L}{16} \quad (\text{VIII.2})$$

Con el fin de incrementar la precisión del cálculo se abordó la teoría no lineal de amplitud de onda finita, Stokes de segundo orden.

La teoría de ondas de pequeña amplitud satisface formas linealizadas de las condiciones de contorno cinemática y dinámica, siendo muy bien descrito por la teoría lineal. Sin embargo, las aproximaciones de la teoría lineal no son válidas en el caso de las ondas viajando sobre pendientes pronunciadas. La teoría de Stokes de segundo orden (1847) es una extensión de la teoría lineal de ondas de gran amplitud y se suele indicar una profundidad relativa superior al 0.10 [Dean, 1970] [Taveira y Silva, 2006].

La teoría de segundo orden de Stokes hace un enfoque de perturbaciones a las ondas de amplitud finita que resulta en el perfil de onda de segundo orden:

$$\eta_S(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H^2 k}{16} \frac{\cosh kh}{\sinh^3 kh} (2 + \cosh 2kh) \cos 2(kx - \sigma t), \quad (\text{VIII.3})$$

que se representa como crestas más peraltadas y valles más planos que aquellos de las ondas de primer orden.

La energía cinética por unidad de ancho de ola es evaluada a través de la integración de los campos de velocidad en profundidad y longitud de onda (A.28) usando la relación de dispersión (A.2), dando:

$$KE_S = \frac{\gamma H^2 L}{16} \left( 1 + \frac{9\pi^2 H^2 \cosh 2kh}{16L^2 \sinh^6 kh} \right) \quad (\text{VIII.4})$$

Las expresiones (VIII.2 y VIII.4) no resultaron convenientes en el caso del *Blow-Jet*, pues aunque la ecuación (VIII.4) es más precisa, al incluir  $h$ , el ancho del orificio de entrada (que capta el oleaje) varía respecto de  $z$ , variable que no aparece en las expresiones, por lo que el valor estimado corresponderá a toda la columna de agua ( $h$ ). Es claro que el dispositivo se ubica en la superficie y no capta la energía del fondo, por lo que el cálculo descrito resulta sobre estimado (ver figura VIII.2).

Lo anterior obligó a recurrir al concepto de energía cinética específica, mismo que se describe a continuación.

La energía de las olas regulares por unidad de longitud, en que se define tradicionalmente, se basa en la profundidad media del agua y los parámetros característicos de la onda ( $H$  y  $L$ ) sin ningún tipo de información relativa a los componentes de los campos de velocidad. En consecuencia, el análisis del balance energético y la descripción de la transformación del oleaje, en el caso de la interacción con estructuras costeras, se realiza a través de los parámetros característicos de la onda. Esta definición de energía permite el análisis de la interacción entre las olas y las estructuras costeras consideradas como conjunto. Para conseguir detalles relacionados con la acción de las olas sobre las estructuras, existe la necesidad de conocer la distribución de energía de las olas en función de  $z$ . Para una mejor comprensión de esta interacción, un nuevo concepto de energía cinética es definido a partir de los componentes de los campos de velocidad. Llevando a cabo la integración de la suma de los componentes de velocidad al cuadrado de una longitud de onda para cada nivel, se obtiene lo que se llama energía cinética específica en función de  $z$ :

$$aSKE(z) = \frac{\gamma}{2g} \int_x^{x+L} (u^2 + w^2) dx', \quad (\text{VIII.5})$$

para la que la integración en la vertical resulta en la energía cinética global por unidad de ancho (confrontar las ecuaciones VIII.2 y VIII.4, para teoría lineal y Stokes de segundo orden, respectivamente) [Taveira y Silva, 2006].

El total de la energía cinética específica:



$$SKE_S(z) = \frac{\pi\gamma H^2}{4 \sinh 2kh} \left( \cosh 2k(z+h) + \frac{9\pi^2 H^2}{16L^2 \sinh^6 kh} \cosh 4k(z+h) \right), \quad z \leq -H/2 \quad (\text{VIII.6})$$

$$\begin{aligned} SKE_S(z) = & \frac{\gamma H^2}{16 \sinh 2kh} \left[ 4z_1 \cosh 2k(z+h) \right. \\ & + 2 \sin 2z_1 + \frac{9\pi^2 H^2}{64 \sinh^6 kh} (4z_1 \cosh 4k(z+h) + \sin 4z_1) \\ & \left. + \frac{3Hk}{\sinh^3 kh} (\cosh 3k(z+h) \sin z_1 + \cosh k(z+h) \sin 3z_1/3) \right], \quad -H/2 \leq z \leq H/2 \end{aligned} \quad (\text{VIII.7})$$

Para obtener el valor de  $z_1$ , se define  $\beta$ , la cual es una función de la profundidad relativa,  $h/L$ , y el peralte de ola  $H/L$ :

$$\beta = \frac{Hk}{8} \frac{\cosh kh}{\sinh^3 kh} (2 + \cosh 2kh) \quad (\text{VIII.8})$$

Notar que ésta es siempre positiva. La inversión de la ecuación (VIII.3), representando la superficie de elevación del agua como se predijo por la teoría de Stokes de segundo orden, en orden de  $x$  se tienen dos soluciones.

La primera solución está dada por:

$$x = \frac{1}{k} \left[ \arccos \left( \frac{1}{4\beta} \left( -1 + \sqrt{1 + 8\beta \left( \beta + \frac{2z}{H} \right)} \right) \right) \right] - \frac{\sigma}{k} t \quad (\text{VIII.9})$$

La cual tiene significado físico únicamente para valores de  $\beta$  que satisfacen la siguiente condición:

$$1 + 4\beta \geq \sqrt{1 + 8\beta \left( \beta + \frac{2z}{H} \right)} \geq 1 - 4\beta \quad (\text{VIII.10})$$

Cuando  $z \leq -\sqrt{2}H/2$  otra condición para  $\beta$  debe también ser verificada para ser una solución real, a saber,

$$-\frac{z}{H} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{H^2}{8z^2}} \right) \leq \beta \leq -\frac{z}{H} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{H^2}{8z^2}} \right) \quad (\text{VIII.11})$$

La segunda solución es

$$x = \frac{1}{k} \left[ \arccos \left( \frac{1}{4\beta} \left( -1 - \sqrt{1 + 8\beta \left( \beta + \frac{2z}{H} \right)} \right) \right) \right] - \frac{\sigma}{k} t \quad (\text{VIII.12})$$

La que solo tiene significado físico para valores de  $\beta$  que satisfagan:

$$\sqrt{1 + 8\beta \left( \beta + \frac{2z}{H} \right)} \geq 1 - 4\beta \quad (\text{VIII.13})$$

Junto con las siguientes condiciones cuando  $z \leq -\sqrt{2H}/4$ :

$$-\frac{z}{H} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{H^2}{8z^2}} \right) \leq \beta \leq -\frac{z}{H} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{H^2}{8z^2}} \right) \quad (\text{VIII.14})$$

En aras de simplificar se redefine:

$$z_1 = \arccos \left( \frac{1}{4\beta} \left( -1 + \sqrt{1 + 8\beta \left( \beta + \frac{2z}{H} \right)} \right) \right) \quad (\text{VIII.15})$$

En la región definida por la condición (VIII.10) y (VIII.11). Para la región definida por la condición (VIII.13) y (VIII.14),  $z_1$  es definida como:

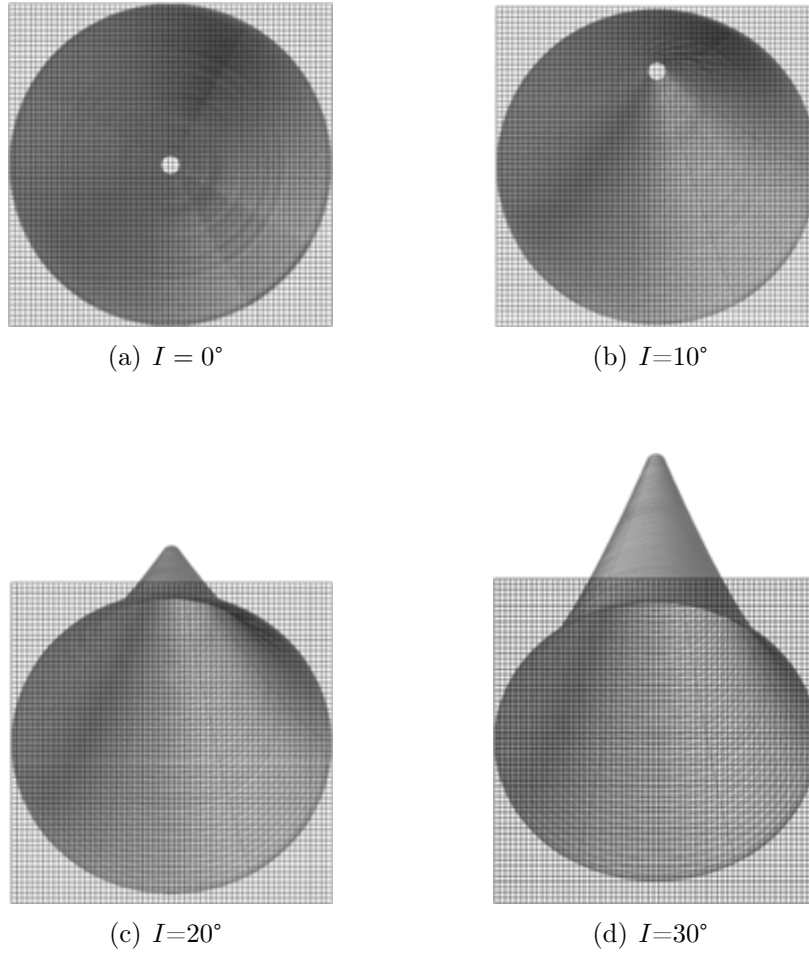
$$z_1 = \arccos \left( \frac{1}{4\beta} \left( -1 - \sqrt{1 + 8\beta \left( \beta + \frac{2z}{H} \right)} \right) \right) \quad (\text{VIII.16})$$

#### VIII.1.1.1. Planteamiento del Programa TOTAL\_ENERGY.f90

El cálculo de la energía captada con base en la energía específica antes deducida, requirió de la elaboración de un programa en FORTRAN que discretiza milimétricamente el área del orificio de entrada del *Blow-Jet* para de esta forma calcular todos los parámetros por milímetro cuadrado e integrarlos posteriormente. El planteamiento fue el siguiente:

Se estableció una malla milimétrica ubicando el origen del sistema coordenado en la esquina inferior izquierda, tomando como referencia cuando el área proyectada es la mayor ( $I=0^\circ$ ).

Se obtuvo el área proyectada del orificio de entrada así como su ecuación de contorno, pues es el área que capta la ola. Dichas áreas se obtuvieron en el AutoCad, como se observa en la figura VIII.1 el área mayor es cuando  $I=0^\circ$  y su ecuación de contorno es la del círculo (VIII.17), para las tres inclinaciones restantes su ecuación de contorno corresponde a la elipse (VIII.18).



**Figura VIII.1:** Áreas proyectadas

$$(x - x_1)^2 + (z - z_1)^2 = r^2 \quad (\text{VIII.17})$$

$$\frac{(x - x_1)^2}{a^2} + \frac{(z - z_1)^2}{b^2} = 1 \quad (\text{VIII.18})$$

Los parámetros  $a$  y  $b$  para la ecuación de la elipse se obtuvieron midiendo directamente en el AutoCad. Con lo anterior, las ecuaciones de contorno de las áreas proyectadas que funcionan como condiciones de frontera durante el cálculo son:

Para  $I = 0^\circ$  se determina  $z(x)$  con:

$$z = \pm \sqrt{r^2 - (x - r)^2} + r \quad (\text{VIII.19})$$

Para las inclinaciones restantes:

$$z = \pm \sqrt{\left[1 - \frac{(x-r)^2}{a^2}\right] b^2 + r}, \quad (\text{VIII.20})$$

tomando  $a$  y  $b$  los siguientes valores en milímetros, para el correspondiente ángulo de inclinación:

$$I = 10^\circ \rightarrow a = 180, b = 183$$

$$I = 20^\circ \rightarrow a = 172, b = 183$$

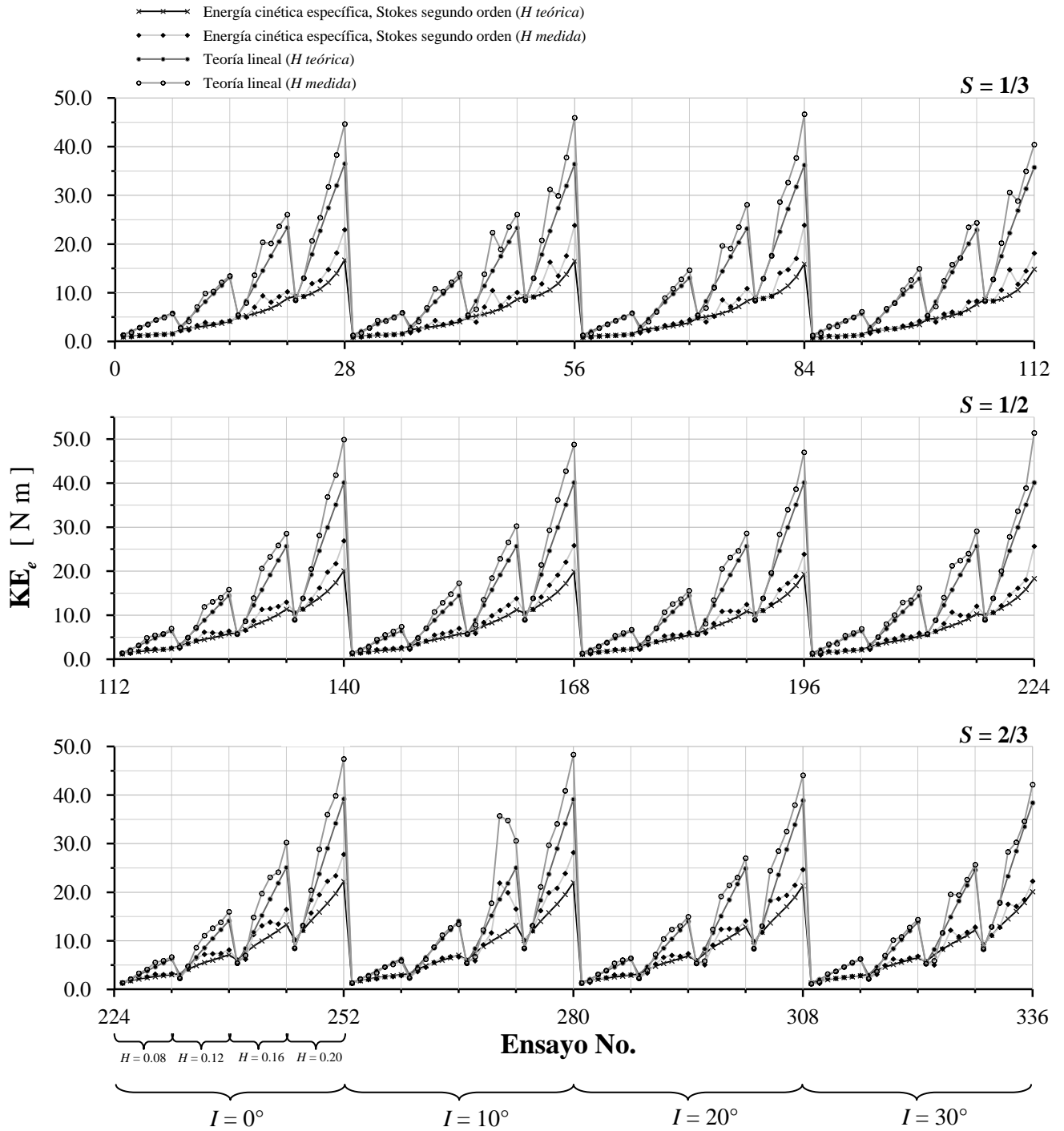
$$I = 30^\circ \rightarrow a = 158.5, b = 183$$

El programa lee un archivo que contiene  $h$ ,  $I$ ,  $H$  y  $T$ . La  $I$  establece la primera condición de frontera, el área proyectada;  $h$  ubica el nivel del agua dentro de la malla, a dicho nivel se le suma la amplitud con lo cual se establece la segunda condición de frontera a cumplir, el área con agua. Establecido lo anterior, el programa analiza cada espacio de la malla recorriendo de abajo hacia arriba columna por columna y realizando los cálculos únicamente en los espacios que se encuentran dentro del área proyectada y con agua.

Los parámetros calculados para cada espacio que cumple con las condiciones de frontera fueron:  $L$ ;  $k$ ; un contador de los espacios que representa el área en  $\text{mm}^2$ ; la suma de las velocidades horizontales de las partículas,  $\sum u_e$ , (A.8); el promedio de la velocidad horizontal de las partículas,  $\overline{u_e}$ ; la suma de las energías cinéticas específicas calculadas con Stokes de segundo orden,  $\sum SK E_{Se}$ , (VIII.6 y VIII.7); el promedio de la energía cinética específica calculadas con Stokes de segundo orden,  $\overline{SK E_{Se}}$ ; la energía cinética determinada a partir de la energía cinética específica calculada con Stokes de segundo orden,  $KE_{Se}$ ; el ancho del dispositivo (ancho de la ola) para el cálculo de la energía con teoría lineal y la energía cinética calculada con teoría lineal,  $KE_{lineal e}$ , (VIII.2)<sup>1</sup>. Los resultados obtenidos en el archivo de salida se exponen en las tablas que conforman el Apéndice F.

---

<sup>1</sup>El subíndice  $e$  indica que el parámetro se determinó a la entrada del *Blow-Jet*



**Figura VIII.2:** Comparación entre  $KE_{lineal_e}$  y  $KE_{S_e}$ , determinadas ambas tanto con alturas de ola medidas ( $H$  medida) como con las alturas de ola teóricas (las ingresadas en el sistema de generación: 0.08, 0.12, 0.16 y 0.20 m)

**VIII.1.2. ENERGÍA POTENCIAL**

La energía potencial:

$$PE = m g d, \quad (\text{VIII.21})$$

Donde:

$PE$ : Energía potencial

$m$ : Masa

$g$ : Aceleración debida a la gravedad

$d$ : Distancia

de la porción de ola que entra al dispositivo se calculó al igual que la energía cinética, de forma discretizada, para toda aquella celda o espacio ( $1 \text{ mm}^2$ ) que cumple con las condiciones de frontera mencionadas, más la condición:

$$z > 0, \quad (\text{VIII.22})$$

pues únicamente,  $a = +H/2$  tiene energía potencial, considerando el nivel medio del mar como referencia.

Para obtener la masa:

$$m = \rho V, \quad (\text{VIII.23})$$

primeramente se calcula el volumen como:

$$V = A L_o \quad (\text{VIII.24})$$

Donde:

$V$ : Volumen

$A$ : Área del espacio o celda analizada =  $1 \text{ mm}^2 = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

$L_o$ : Longitud de la onda en función de  $z$

Para calcular  $L_o$ , se analiza el perfil de la superficie libre del agua (A.5) en la distancia ( $x$ ) deteniéndolo en el tiempo ( $t = 0$ ):

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx) \quad (\text{VIII.25})$$

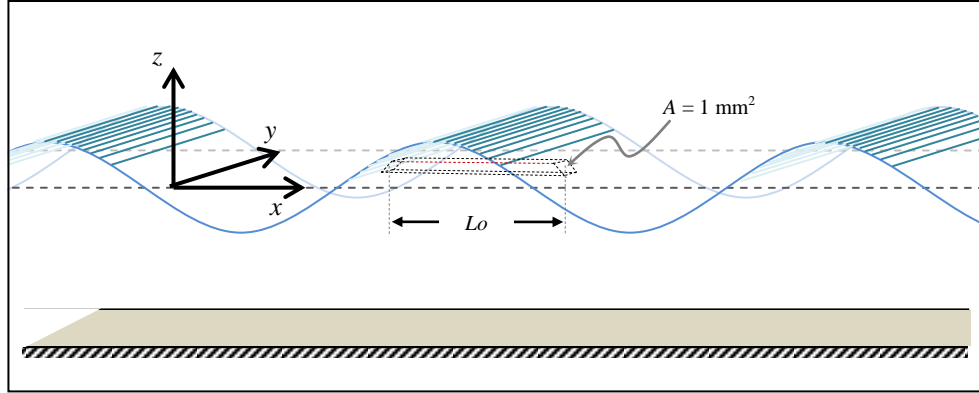


Figura VIII.3: Esquema del volumen discretizado para el cálculo de la energía potencial

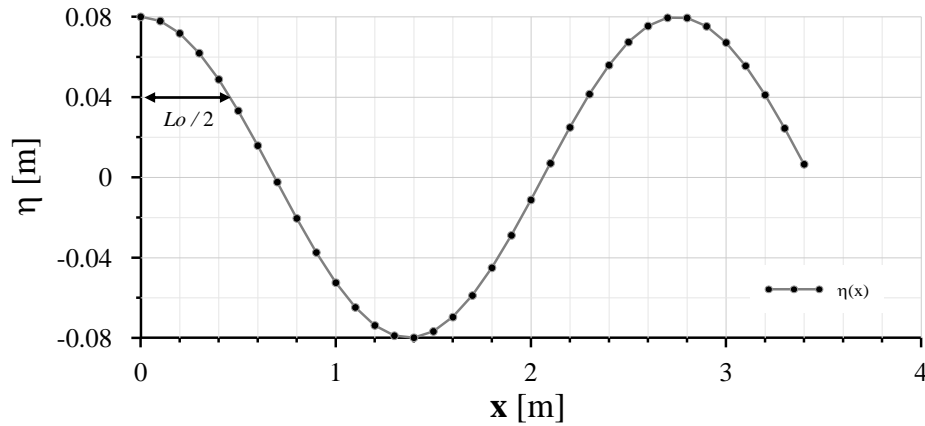


Figura VIII.4: Perfil de la superficie libre detenido en  $t = 0$  ( $H = 0.16$  m,  $T = 1.4$  s y  $L = 2.7487$  m)

Así pues, haciendo  $\eta = z$ , y  $x = Lo$ ,  $Lo$  queda:

$$Lo = \frac{\left[ \arccos \left( \frac{2}{H} z \right) \right] 2}{k} \quad (\text{VIII.26})$$

Con los que la energía potencial para cada celda queda:

$$PE_c = \rho \vee g z \quad (\text{VIII.27})$$

Integrando todas las celdas obtenemos la energía potencial total que capta el *Blow-Jet*. Cuyos resultados (Apéndice F) evidencian lo señalado en A.2 ENERGÍA Y PROPAGACIÓN DE ENERGÍA EN ONDAS PROGRESIVAS, pues la energía potencial es prácticamente igual a la cinética calculada con la teoría lineal (figura VIII.5). La diferencia que se aprecia en  $S = 2/3$ , es debida a que el ancho de ola que entra al dispositivo en la parte superior de éste es mínima y se acrecienta para inclinaciones mayores (se reduce el área de captación como se aprecia en la figura VIII.1) y alturas de ola mayores, pues éstas llegan a rebasar al *Blow-Jet*.

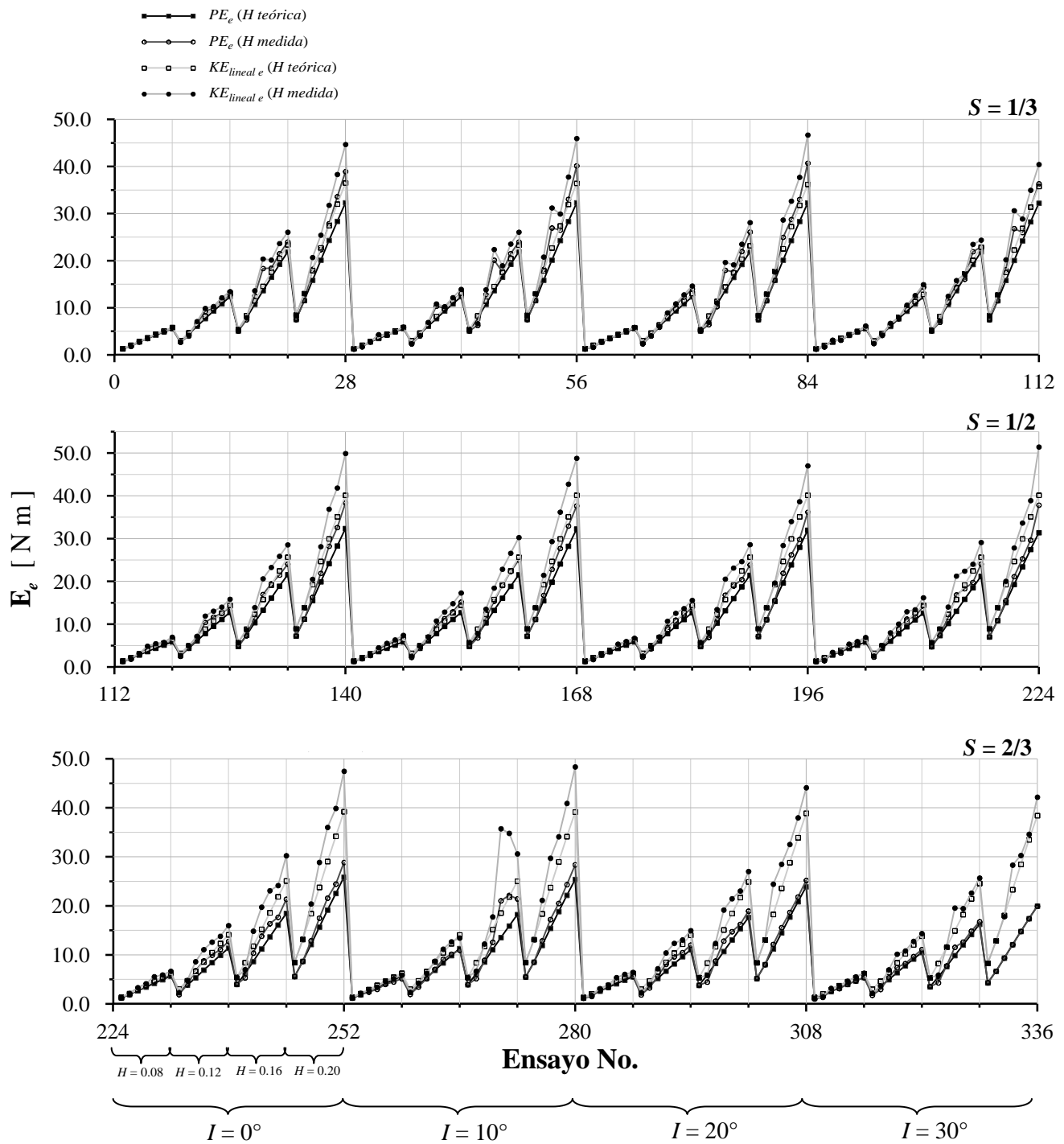


Figura VIII.5:  $PE_e$  contra  $KE_{lineal e}$



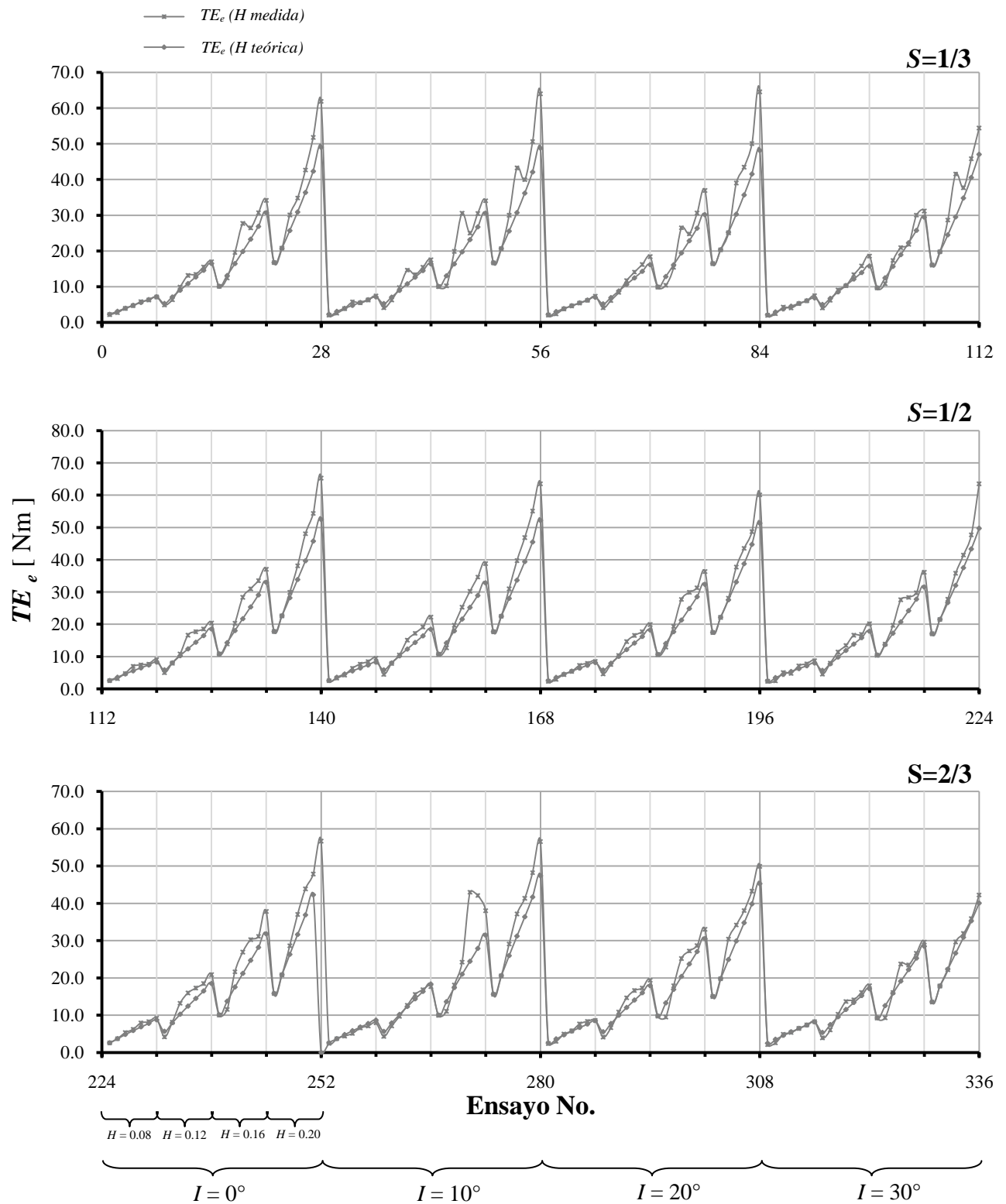


Figura VIII.6:  $TE_e$  calculada con  $H$  medida y  $H$  teórica

## VIII.2. ENERGÍA A LA SALIDA (CHORRO)

El análisis energético a la salida consistió simplemente en aplicar la ecuación de la energía cinética:

$$KE = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{VIII.28})$$

Donde:

$KE$ : Energía cinética

$m$ : Masa

$v$ : Velocidad

A partir de las velocidades de salida procesadas con el programa PROMATRIZ, se obtiene directamente  $v$ , e indirectamente  $m$ . Se realizaron dos cálculos, uno con la velocidad promedio ( $\bar{v}_s$ ) y considerando el tiempo promedio de los chorros y otro con la velocidad máxima ( $v_{s\max}$ ) y el tiempo entre imágenes ( $t = 1/\text{Hz} = 1/15 = 0.06666\text{s}$ ).

Para obtener la masa (VIII.23), primeramente calculamos el volumen a través de la ecuación de gasto o caudal:

$$Q = Atv = \frac{V}{t}, \quad (\text{VIII.29})$$

Donde:

$Q$ : Gasto o caudal

$A$ : Área hidráulica

$V$ : Volumen

$t$ : Tiempo

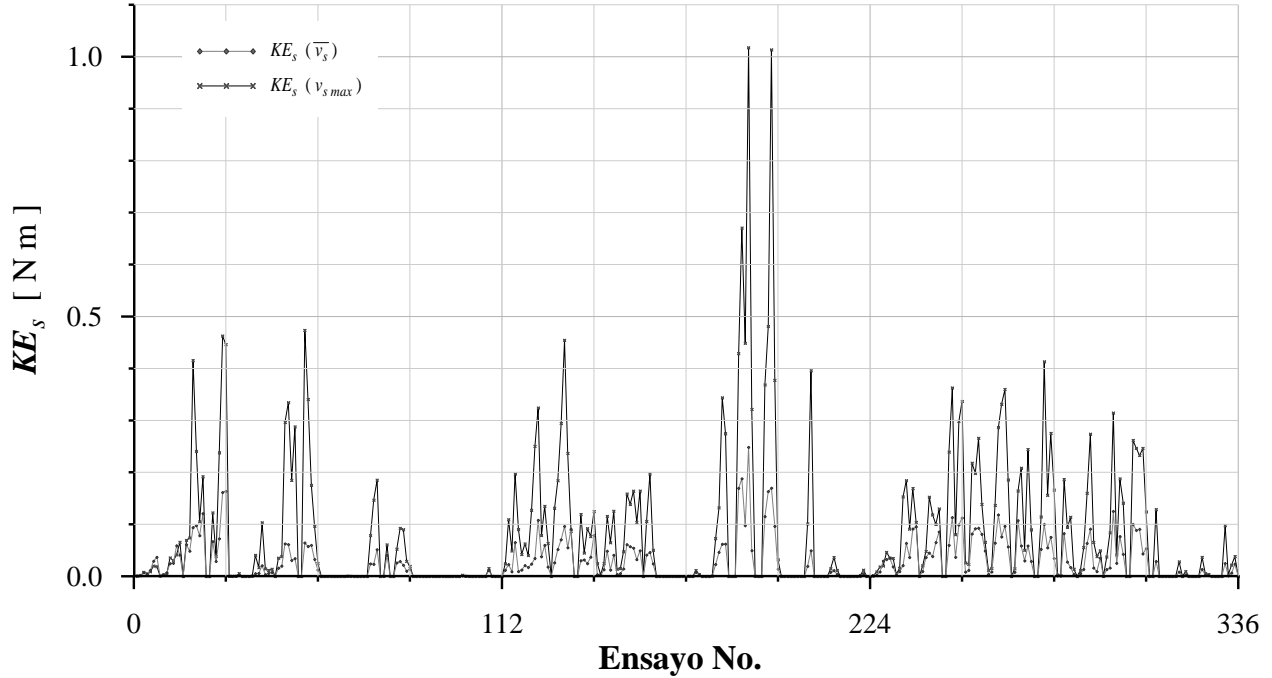
por tanto

$$V = A v t \quad (\text{VIII.30})$$

La figura VIII.7 ilustra la comparación entre la energía cinética,  $KE_s$ , calculada con la velocidad media ( $\bar{v}_s$ ) y la calculada con la velocidad máxima de salida ( $v_{s\max}$ )<sup>1</sup>, mientras que los resultados numéricos de este análisis energético se pueden consultar en el Apéndice F.

---

<sup>1</sup>El subíndice  $s$  indica que el parámetro se determinó a la salida del *Blow-Jet*



**Figura VIII.7:**  $KE_s$  calculada con la velocidad promedio ( $\bar{v}_s$ ) contra la calculada con velocidad máxima ( $v_{s\max}$ )

### VIII.3. EFICIENCIA HIDRÁULICA

Una vez calculada la energía total que capta el *Blow-Jet* ( $TE_e$ ) y la energía cinética entregada con este ( $KE_s$ ), se emplea la ecuación (VIII.1) para determinar la eficiencia hidráulica. En la figura (VIII.8) se muestran dos curvas de eficiencia hidráulica, ambas calculadas con la  $TE_e$  determinada con la altura de ola medida; pero en una de ellas  $KE_s$  fue calculada con la velocidad promedio y el tiempo promedio de chorro y en la otra se usó la velocidad máxima y el tiempo entre imágenes tomadas con el FlowMap (0.06667 s).

Las eficiencias tan bajas obtenidas (figura VIII.8) así como la inquietud por conocer la energía potencial que se tiene a la salida del *Blow-Jet*, propiciaron el cálculo, desarrollado a continuación, de dicha energía potencial, para de esta forma establecer una nueva eficiencia hidráulica como el cociente de  $TE_e$  entre la energía total que sale ( $TE_s$ ).

$$\eta_H [\%] = \left( \frac{TE_s}{TE_e} \right) 100 \quad (\text{VIII.31})$$

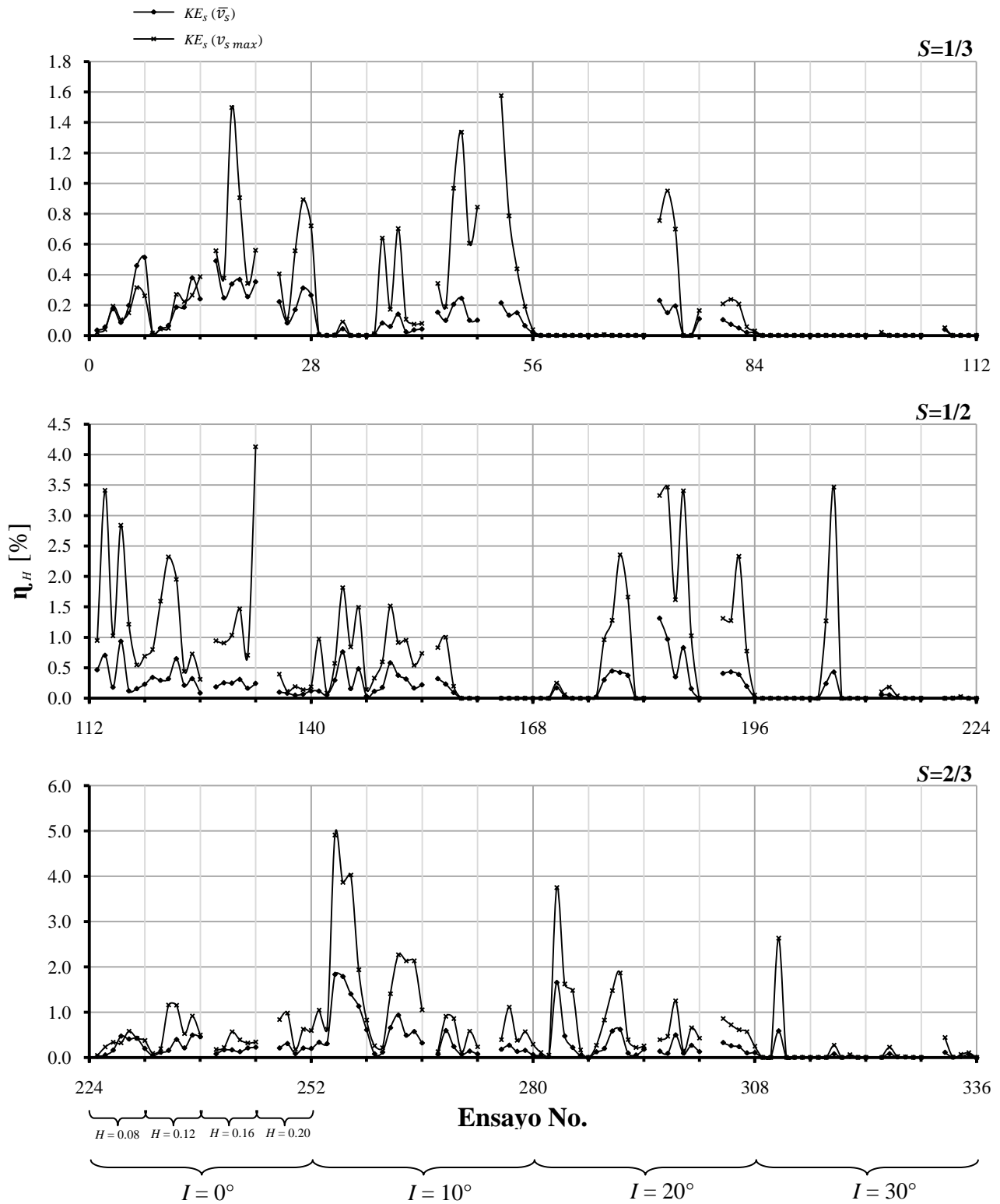


Figura VIII.8:  $\eta_H$  calculada con  $TE_e$  (determinada con  $H$  medida) y  $KE_s$  (determinada con  $\bar{v}_s$  y  $v_{s\max}$ )

### VIII.3.1. ENERGÍA POTENCIAL A LA SALIDA

El cálculo de la energía potencial (VIII.22) a la salida resultó sencillo, reduciéndose a determinar la distancia vertical entre el nivel del agua en calma y la salida del *Blow-Jet*, puesto que  $m$  se determinó durante el cálculo de  $KE_s$ .

Dicha distancia ( $DIS$ ) se cálculo mediante trigonometría y condiciones (considerando  $S$  e  $I$ ) en una hoja de cálculo (Excel) y los valores obtenidos se muestran en las tablas que integran el Apéndice F

La siguiente figura (VIII.9) se aprecia la cantidad de energía cinética y total que se obtiene a la salida ( $TE_s$  y  $KE_s$ ) considerando la velocidad promedio del chorro ( $\bar{v}_s$ ) al igual que la velocidad máxima de éste ( $v_{smax}$ ).

Mientras que en la figura (VIII.10) se muestra una comparación de las  $\eta_H$  determinadas con  $KE_s$  y la determinadas con  $TE_s$ .

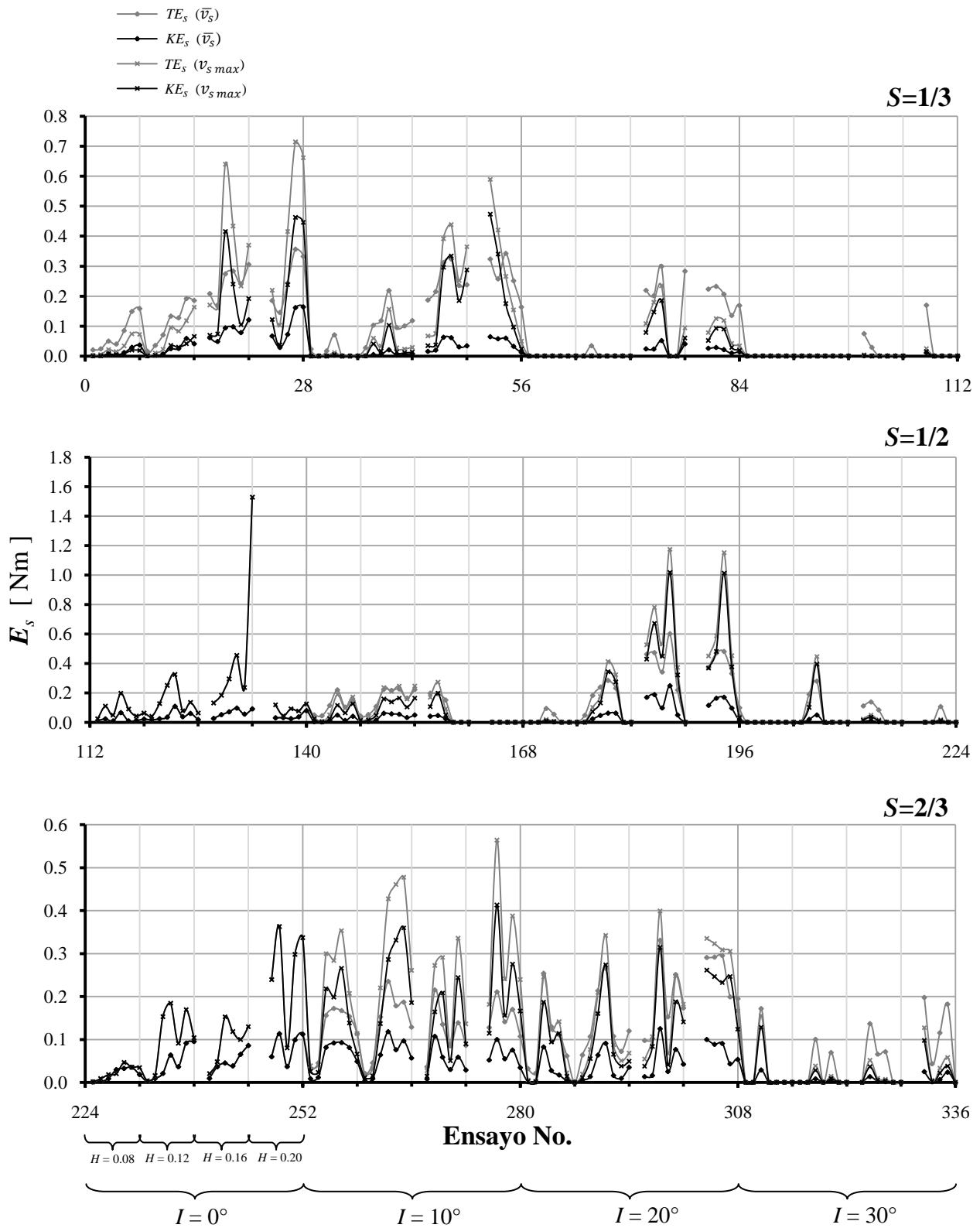


Figura VIII.9: Comparación entre  $KE_s$  y  $TE_s$ , ambas calculadas tanto con  $\bar{v}_s$  como con  $v_{s\ max}$

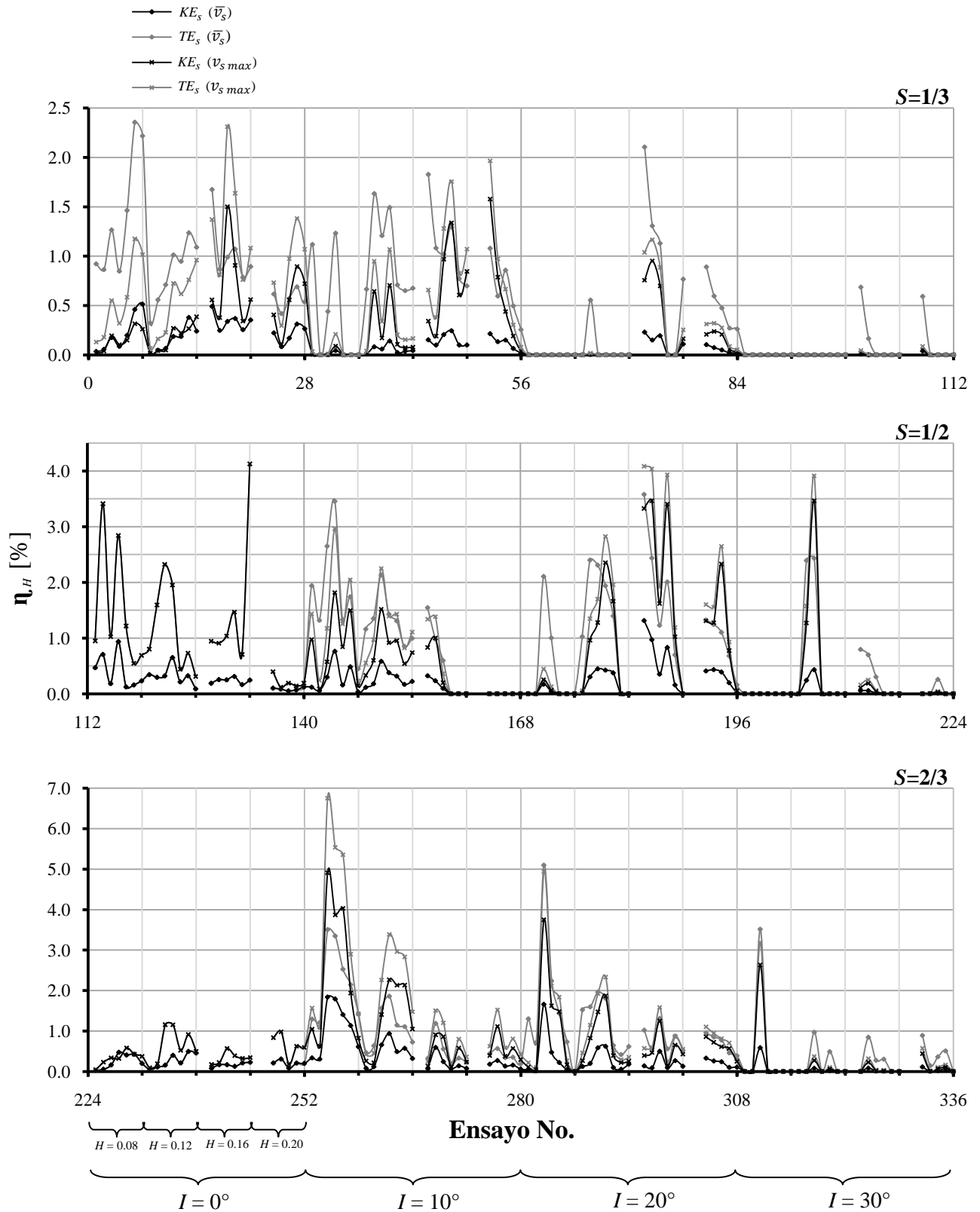


Figura VIII.10:  $\eta_H$  calculada con  $TE_e$  (determinada con  $H$  medida) como denominador y como numerador  $KE_s$  y  $TE_s$  (determinadas con  $\bar{v}_s$  y  $v_{s\ max}$ )





---

Capítulo IX

# RESULTADOS

---

*“Es mi trabajo  
no estar nunca satisfecho”*  
**Wernher von Braun.**



En este capítulo se presenta el resultado del procesado y análisis de los datos adquiridos durante los ensayos. Resultados que son de gran importancia, pues con base en éstos se plantearán las modificaciones pertinentes a futuros diseños, con el fin de incrementar sustancialmente la eficiencia hidráulica.

Los resultados se presentan gráficamente y ordenados de acuerdo a su origen: alturas de ola y velocidades. Finalmente se presentan una serie de gráficas que muestran la influencia de  $L$  y  $H$  en la eficiencia.

## IX.1. ALTURAS DE OLA

### IX.1.1. COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN ( $K_{tr}$ )

Calculando  $K_{tr}$  como:

$$K_{tr} = \frac{H_{tr}}{H_i} \quad (\text{IX.1})$$

Donde:

$H_{tr}$ : Altura de ola transmitida

$H_i$ : Altura de ola incidente

Se tomó la altura de ola significativa ( $H_{1/3}$ ) del sensor ubicado detrás del *Blow-Jet* como  $H_{tr}$  y se le nombró  $H_{tr\ 1/3}$ . La altura de ola incidente empleada para el cálculo fue la altura de ola incidente significativa de Mansard ( $MI\_HS$ ) obtenida con el programa REFLE.f90. Los números correspondientes al cálculo del  $K_{tr}$  se presentan en el Apéndice D tabla D.7.

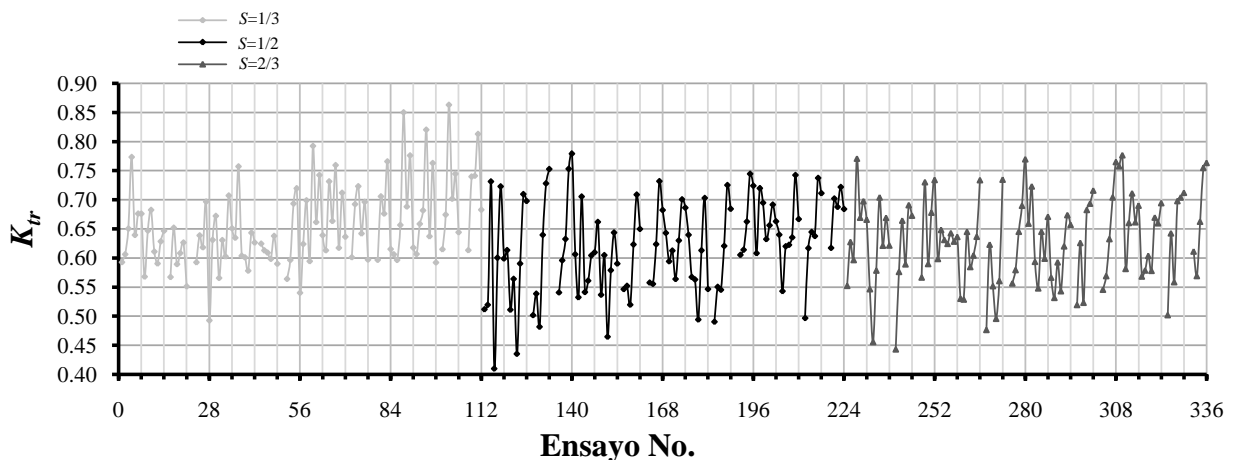


Figura IX.1:  $K_{tr} = (H_{tr\ 1/3}) / (MI\_HS)$

**IX.1.2. EFICIENCIA DE DISIPACIÓN ( $\eta_{diss}$ )**

Un estimado de la eficiencia de disipación se realiza mediante la ecuación:

$$\eta_{diss} [\%] = (1 - K_{tr} - K_r) 100 \tag{IX.2}$$

Donde:

$K_r$ : Coeficiente de reflexión

Se utilizó el  $K_{tr}$  obtenido en el cálculo anterior y el  $K_r$  obtenido con el programa REFLE.f90 ( $M\_ \%CR\_TOT$ ) (ver figura IX.2). Dentro de lo contemplado como disipación se encuentra: la energía que aprovecha el *Blow-Jet*, el impacto absorbido por el *Blow-Jet* y transmitido al soporte, la generación de calor, etc. Por tanto, la eficiencia hidráulica ( $\eta_H$ ) calculada en el Capítulo VIII ANÁLISIS ENERGÉTICO, integra a la eficiencia de disipación.

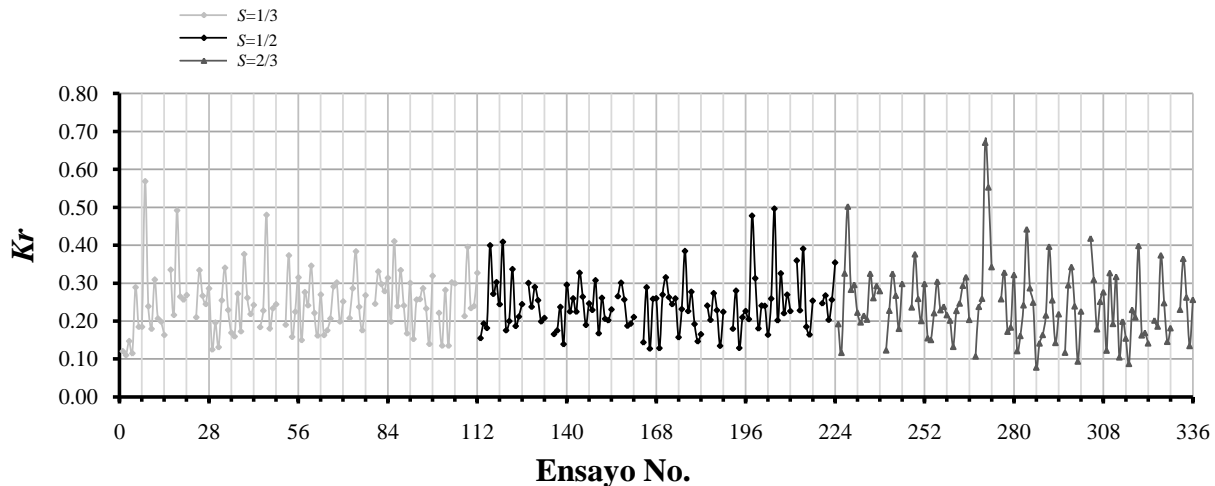


Figura IX.2:  $K_r$

La figura IX.3 establece una comparación gráfica entre la  $\eta_H$ , calculada con  $TE_e$  (determinada con  $H medida$ ) y  $TE_s$  (determinada con  $v_{s max}$ ) y la  $\eta_{diss}$ .

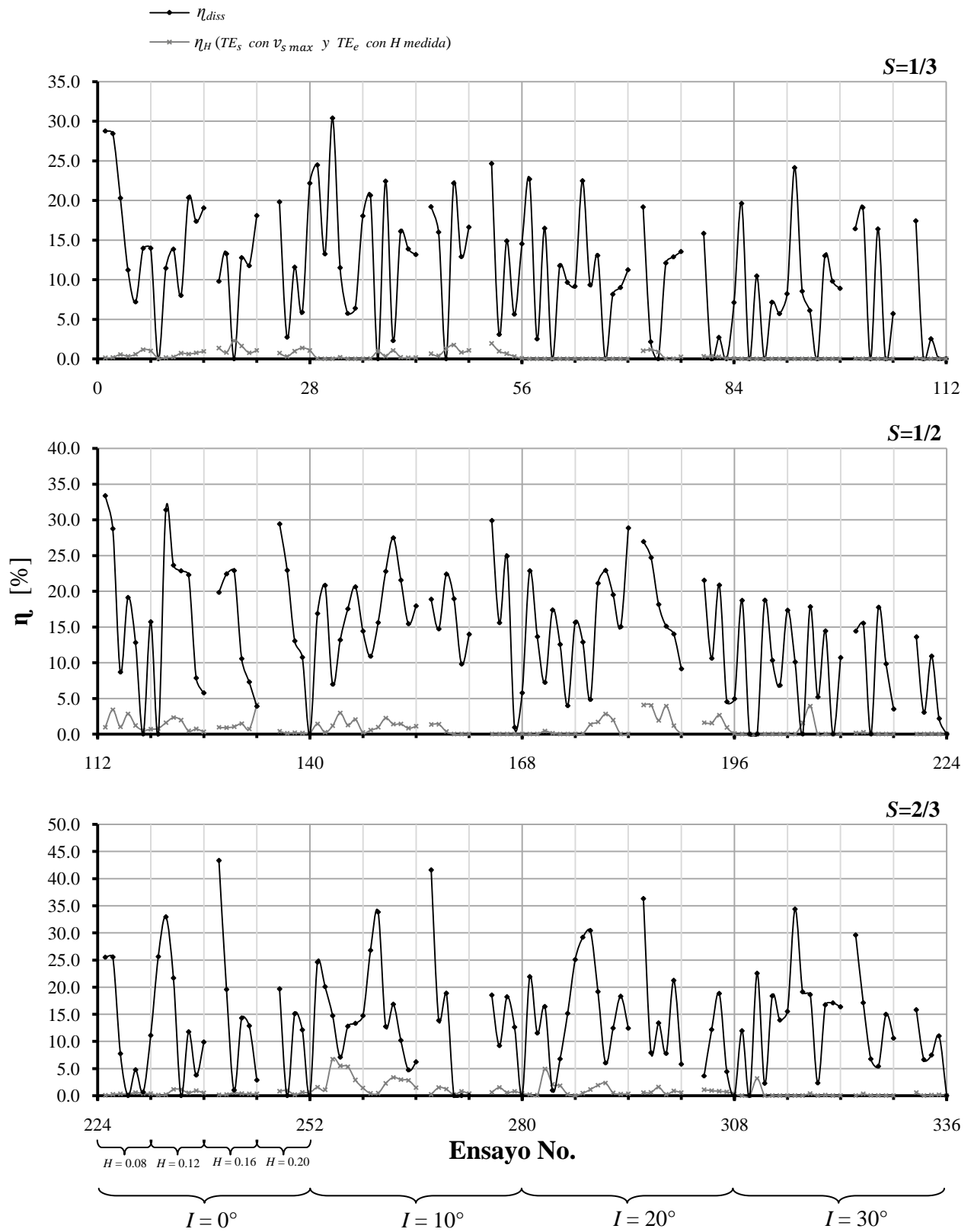


Figura IX.3: Comparación entre la eficiencia hidráulica ( $\eta_H$ ) y la eficiencia de disipación ( $\eta_{diss}$ )

## IX.2. VELOCIDADES

### IX.2.1. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN ( $F.A.$ )

El incremento en la velocidad se determinó mediante:

$$F.A. = \frac{v_s}{v_e} \quad (IX.3)$$

Donde:

$v_s$ : Velocidad de salida

$v_e$ : Velocidad de entrada

Las dos figuras siguientes (IX.4 y IX.5) muestran el comportamiento graficado de las velocidades de entrada y salida, así como su correspondiente  $F.A.$  en un eje secundario. En la primera figura (IX.4) la velocidad de entrada corresponde a la velocidad media medida con los ADVs (velocidad puntual) y calculada con el programa SUAVI.f90 ( $\bar{v}_e$ ), mientras que en la figura IX.5 la velocidad de entrada corresponde a la velocidad horizontal promedio determinada con la ecuación (A.8) a través del programa TOTAL\_ENERGY.f90. ( $\bar{u}$ )

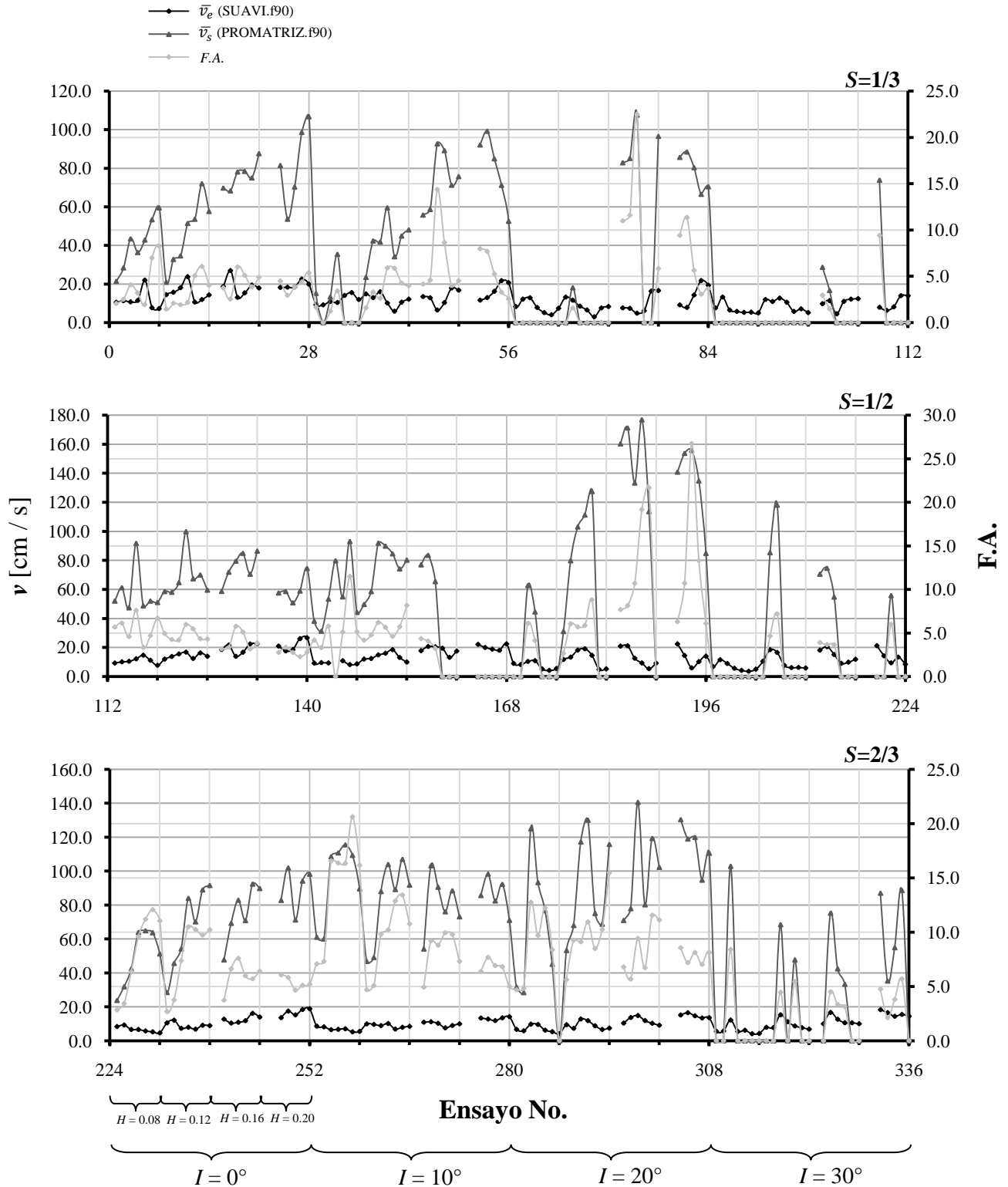


Figura IX.4: F.A. determinado con  $\bar{v}_e$  como velocidad de entrada

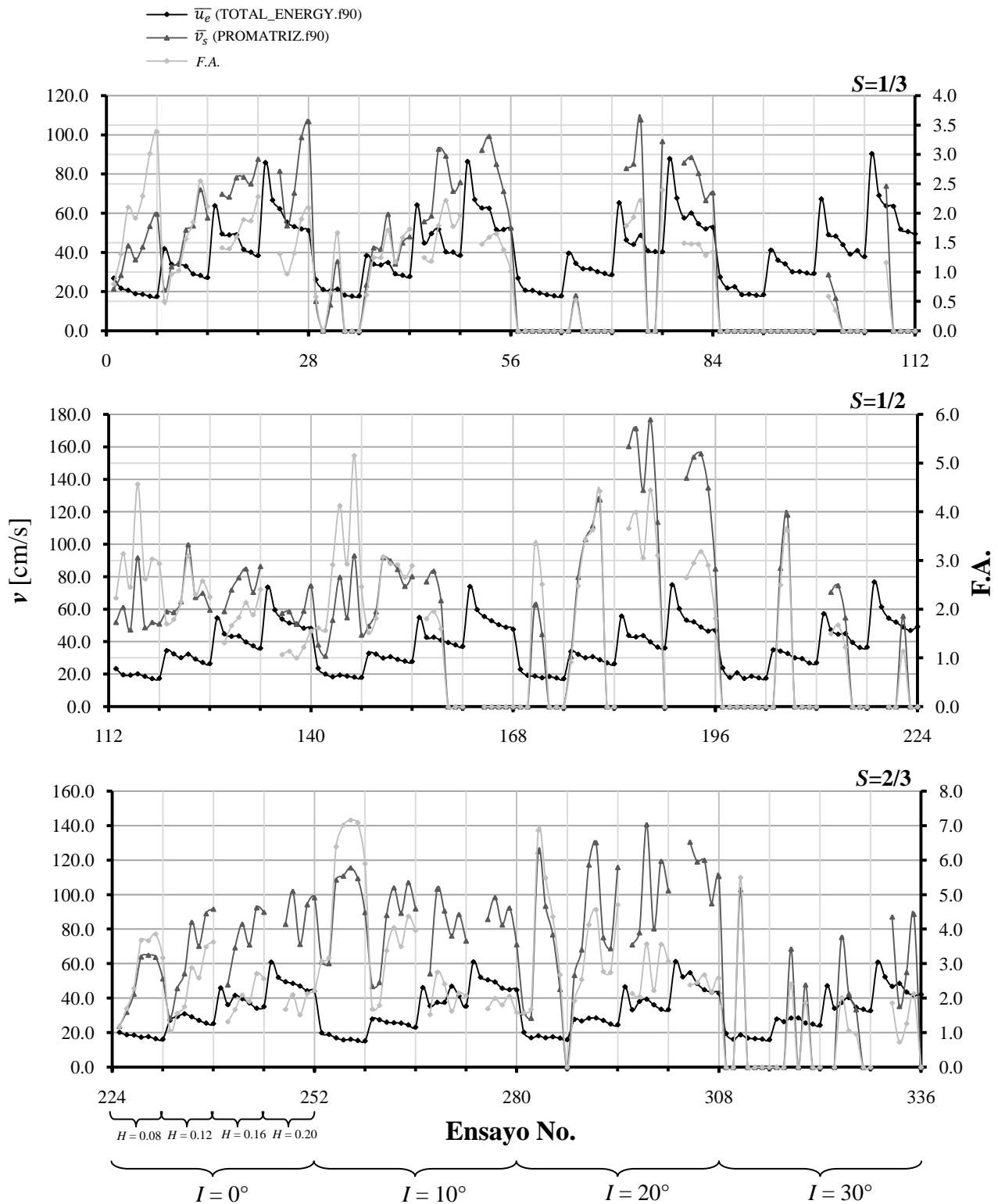


Figura IX.5: F.A. determinado con  $\bar{u}_e$  como velocidad de entrada

### IX.3. INFLUENCIA DE $L$ Y $H$ EN LA EFICIENCIA HIDRÁULICA



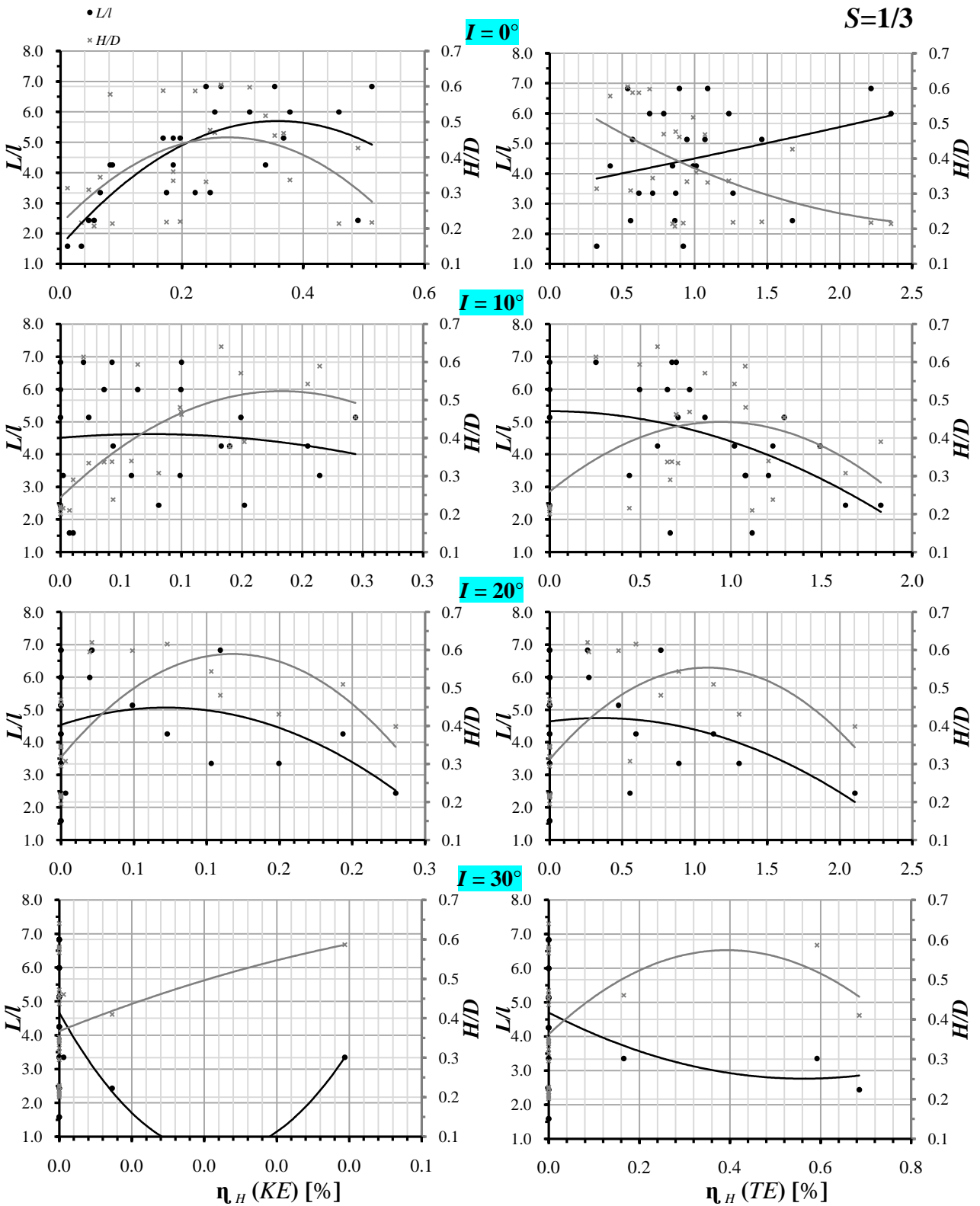


Figura IX.6: Influencia de la longitud de onda y la altura de ola,  $S = 1/3$

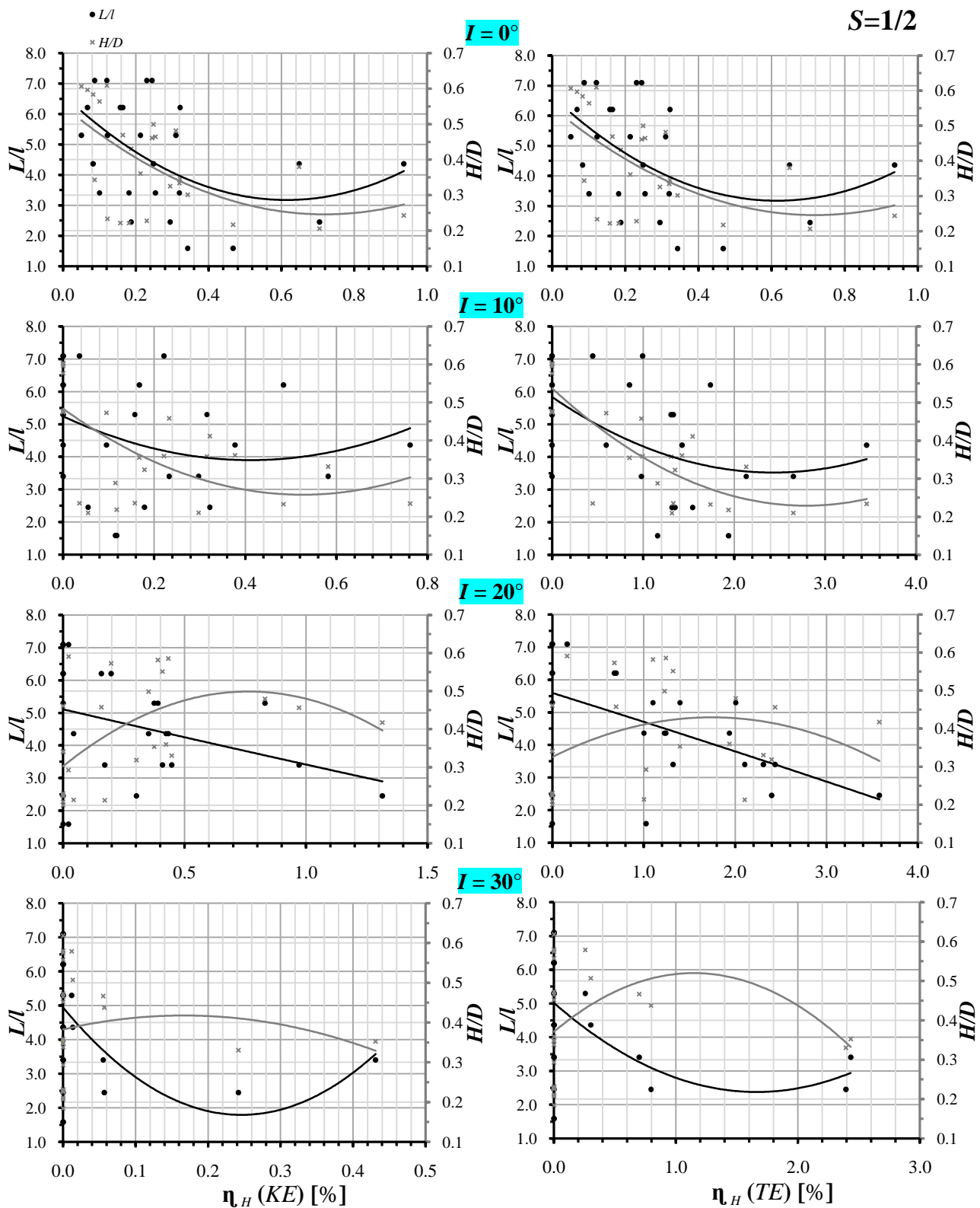


Figura IX.7: Influencia de la longitud de onda y la altura de ola,  $S = 1/2$

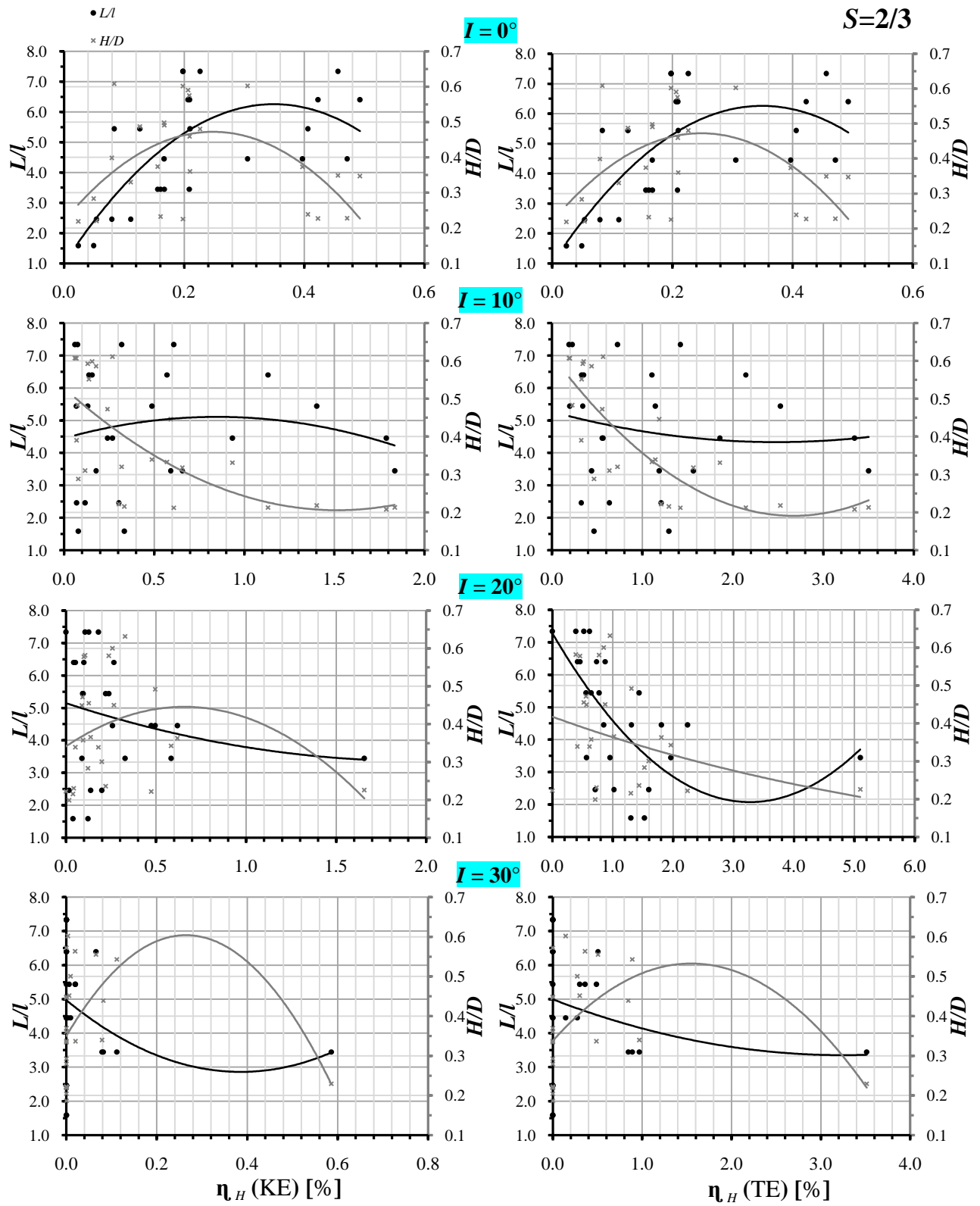


Figura IX.8: Influencia de la longitud de onda y la altura de ola,  $S = 2/3$

El comportamiento de la eficiencia respecto del de la altura de ola y la longitud de onda se representa en las tres figuras anteriores (IX.6, IX.7 y IX.8), una por cada valor de  $S$ . Cada figura contiene 8 gráficas, debido a que se hace la distinción entre las cuatro diferentes inclinaciones del *Blow-Jet*, más aparte se compara la influencia de  $H$  y  $L$  con respecto de dos eficiencias hidráulicas anteriormente determinadas, la primera calculada con  $TE_e$  ( $H$  medida) y  $KE_s$  ( $\bar{v}_s$ ) y la segunda con  $TE_e$  ( $H$  medida) y  $TE_s$  ( $\bar{v}_s$ ).

Las gráficas anteriores demuestran que el fenómeno tiene un comportamiento errático, difícil de representar con una línea de tendencia; las expuestas en las figuras tienen la finalidad de ofrecer una referencia muy general de dicha tendencia. Incluso, lo caprichoso del fenómeno se ratifica en algunas gráficas donde son muy claras las bajas eficiencias para la mayoría de estados de mar, con excepción de uno en particular, por ejemplo la figura IX.8  $I = 20^\circ$  e  $I = 30^\circ$ .

---

Capítulo X  
**DISCUSIÓN**

---

*“Una velada en la que todos los presentes  
estén absolutamente de acuerdo,  
es una velada perdida”*  
**Albert Einstein.**



---

Las figuras VIII.6 y VIII.9 nos permiten determinar la posición con la cual se capta la mayor energía y con la cual se entrega mayor energía, respectivamente.

Para el cálculo realizado con *H teórica* (0.08, 0.12, 0.16 y 0.20 m), la posición que capta la mayor energía es  $S = 1/2$  e  $I = 0^\circ$ ; la cual es distinta a la estimada a partir de  $TE_e$  determinada con *H medida*, pues  $S = 1/3$  e  $I = 20^\circ$  resulta la mejor posición.

El comportamiento gráfico de la Energía de salida o entregada por el *Blow-Jet* es, a diferencia del de la energía de entrada, irregular, característica que dificulta al lector el poder formarse una idea clara del fenómeno. Es claro que la mayor energía se tiene en la posición  $S = 1/2$  e  $I = 0^\circ$ , de igual modo como resulta evidente que en esa posición el resto de las energías son muy bajas (menores a 0.2 Nm en su gran mayoría). Para  $S = 1/2$  e  $I = 20^\circ$  se tienen la segunda y tercer energía más alta.

De lo comentado en los dos párrafos anteriores se deduce que la posición  $S = 1/2$  e  $I = 0^\circ$  concuerdan con  $TE_e$  (*H teóricos*) máxima y  $TE_s$  ( $v_{s\max}$ ) máxima (que es igual a  $KE_s$  máxima). Así como también resulta probable el hecho de que si se determinara la mejor posición de salida por la cantidad total de energía que entrega ésta y no considerando únicamente los valores máximos, dos probables posiciones serían  $S = 2/3$  e  $I = 10^\circ$  y  $S = 1/3$  e  $I = 0^\circ$ .  $I = 30^\circ$  resulta la peor para cualquier  $S$ .

En cuanto a la eficiencia (figura VIII.10), la máxima se registró para  $S = 2/3$ ,  $I = 10^\circ$ ,  $H = 0.08$  m y  $T = 1.2$  s; aunque para  $TE_s$  ( $\bar{v}_s$ ) es  $S = 2/3$ ,  $I = 20^\circ$ ,  $H = 0.08$  m y  $T = 1.2$  s como se observa en la figura IX.8.

Por lo que concierne a la eficiencia de disipación ( $\eta_{diss}$ ), en cuyo cálculo la separación entre el *Blow-Jet* y las paredes del canal influye considerablemente, por lo que se aconseja su interpretación con criterio, las disipaciones más altas se tienen en  $S = 2/3$ ,  $S = 1/2$  y  $S = 1/3$  respectivamente. De acuerdo con la inclinación, la disipación descende a medida que ésta aumenta, así pues, para  $I = 0^\circ$  se tienen las  $\eta_{diss}$  mayores y para  $I = 30^\circ$  las menores, correspondiendo con el área proyectada considerada ésta como un obstáculo.

La importancia del análisis de las velocidades radica en que es un parámetro fundamental en el diseño de la turbina pelton, turbina que se pretende incorporar al sistema completo. Las figuras IX.4 y IX.5 muestran la diferencia que se tiene al calcular la velocidad haciendo uso del ADV, instrumento que mide la velocidad puntual a una determinada profundidad (ver Apéndice C) y calculándola por medio de la ecuación deducida a partir del potencial de velocidades (A.4).

Las velocidades determinadas con el ADV son menores, pues la velocidad que registran es a mayor profundidad, lo que origina factores de amplificación altos comparados con los calculados con la ecuación de la velocidad horizontal (A.8).

Analizando la figura IX.5, debido a que emplea la velocidad calculada de una forma más precisa (discretizada) haciendo uso del programa TOTAL\_ENERGY.f90, se aprecia que el F.A. mayor se tiene en la posición  $S = 2/3$  e  $I = 10^\circ$ , coincidiendo con la posición en la cual se obtiene la máxima eficiencia.





---

Capítulo XI  
**CONCLUSIÓN**

---

*“Se debe hacer todo tan sencillo como sea posible,  
pero no más sencillo”*  
**Albert Einstein.**



---

Simplemente con apreciar el comportamiento del *Blow-Jet* en operación, una modificación en su diseño geométrico resulta evidente, más, considerando la baja eficiencia hidráulica obtenida, hace a dicha modificación obligatoria. En esta modificación se debe contemplar como uno de los objetivos, forzar la salida de la totalidad de la porción de ola captada, por el orificio correspondiente; evitando también la pérdida de energía por impacto en el interior del dispositivo.

La cámara de compresión con que cuenta un géiser marino es fundamental para lograr un chorro potente a la salida, y confiere de prioridad el realizar un análisis de presiones en el interior del *Blow-Jet*, con la finalidad de comprender el fenómeno interno e inferir con mayor certeza la ubicación de un cambio en la geometría del *Blow-Jet* que haga las veces de una cámara de compresión. Conocer la circulación del agua dentro del *Blow-Jet* nos permitiría determinar la mejor ubicación del orificio de salida.



---

Capítulo XII

# FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

---

*“La frase más excitante que se puede oír en ciencia,  
la que anuncia nuevos descubrimientos, no es “¡Eureka!” (¡lo encontré!)  
sino “Es extraño...” ”*

**Isaac Asimov.**



---

A pesar de lo concluido, el *Blow-Jet*, que se encuentra en su etapa inicial, deja ver, a través de un amplio abanico de opciones, un promisorio futuro energético. Algunas de las opciones se exponen a continuación como parte de futuras líneas de investigación.

- El F.A. de la velocidad indica un incremento de ésta nada despreciable, pensando en la adecuación de una turbina tipo Pelton para la generación de energía eléctrica. Abriéndose la opción de integrar tecnología como la electrolisis del agua para la producción de hidrógeno y de esta forma almacenar la energía generada, esto, pensando en la naturaleza estocástica del oleaje y la probable posibilidad de no poder ingresar la energía eléctrica generada de forma directa a la red.
- El diseño sencillo del dispositivo permitiría acoplarse a estructuras de protección (e.g. diques) por construir, amortiguando su costo con el material remplazado, así como en estructuras ya existentes; en ambos casos la estructura serviría de conexión con la obra civil en tierra reduciendo el costo de instalación.
- Con base en su faceta de obstáculo y cualidad disipadora y viendo la posibilidad de tener un zona con potencial turístico y oleaje con alta energía, se podría realizar el estudio para la colocación de una batería de *Blow-Jets* con la finalidad de proteger la playa reduciendo la energía transmitida, permitiendo la circulación del sedimento en el fondo marino para incrementar la playa seca y al mismo tiempo aprovechando energía para generar electricidad.





# APÉNDICES

*“Cuando puedes medir aquello de lo que hablas, y expresarlo con números, sabes algo acerca de ello; pero cuando no lo puedes medir, cuando no lo puedes expresar con números, tu conocimiento es pobre e insatisfactorio: puede ser el principio del conocimiento, pero apenas has avanzado en tus pensamientos a la etapa de la ciencia”*

**William Thomson Kelvin.**



## Apéndice A

# *Propiedades ingenieriles de las ondas progresivas*

---

### A.1. RELACIONES BÁSICAS

En base al análisis de ondas de pequeña amplitud sobre fondo constante, se obtiene la frecuencia angular:

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{A.1})$$

Realizando la separación de la variable profundidad conseguimos obtener la conocida relación de la ecuación de la dispersión:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (\text{A.2})$$

La ecuación (A.2) tiene una solución real e infinitas soluciones imaginarias puras, conocidos como modos evanescentes, para  $k$ .

Aplicando la condición de periodicidad espacial obtenemos el número de onda:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (\text{A.3})$$

El potencial de velocidades (A.4) es una solución general del análisis de onda de pequeña amplitud sobre fondo constante. Considerando la condición dinámica en el nivel medio,  $z = 0$ , se y obteniendo una relación entre el potencial total,  $\Phi(x, z, t)$ , y la superficie libre,  $\eta$ ; tomando en cuenta que se busca una solución periódica de la superficie libre que represente una onda progresiva.

$$\Phi(x, z, t) = \Re \left[ -\frac{ig}{\sigma} a \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{-i(kh-\sigma t)} \right] \quad (\text{A.4})$$

La teoría de ondas de pequeña amplitud es esencialmente una teoría lineal, los términos de inercia convectivos no lineales son considerados pequeños. Es llamada teoría de pequeña amplitud porque las ecuaciones son teóricamente exactas cuando el movimiento tiende a cero. Esta asunción es extremadamente conveniente porque la elevación de la superficie libre puede ser despreciada a priori y tal solución es asumida válida no obstante que el movimiento del oleaje sea diferente de cero. Para la solución del problema planteado, considérese la expansión en series de Taylor solo al primer orden, de una onda viajando en la dirección  $\mathbf{x}(x, y)$  sobre un fondo horizontal.

El tener una expresión analítica del potencial de velocidades permite el desarrollo de una serie de expresiones con aplicación ingenieril. Considérese la expresión de una onda progresiva con desplazamiento de la superficie libre:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (\text{A.5})$$

Que asociada a un potencial de velocidades, ecuación (A.4), considerando las ecuaciones (A.1 y A.3) y operandolas en la ecuación (A.2), la longitud de onda se puede obtener a través de la siguiente expresión:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (\text{A.6})$$

La celeridad se define como la velocidad en que se propaga la forma de la onda, es decir:

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\sigma}{k} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \quad (\text{A.7})$$

La velocidad horizontal de las partículas se puede evaluar a través de la siguiente expresión:

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{agk \cosh k(h+z)}{\sigma \cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (\text{A.8})$$

y la aceleración horizontal, se puede expresar como:

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = agk \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (\text{A.9})$$

La velocidad vertical de las partículas se puede calcular a través de:

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{agk \operatorname{senh} k(h+z)}{\sigma \cosh kh} \operatorname{sen}(kx - \sigma t) \quad (\text{A.10})$$

por lo tanto, la aceleración vertical,

$$a_z = \frac{\partial w}{\partial t} = -agk \frac{\operatorname{senh} k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (\text{A.11})$$

Los desplazamientos de las componentes  $(\zeta, \xi)$  de las partículas del agua pueden ser encontradas integrando la velocidad, ecuaciones (A.8) y (A.10), respectivamente, con respecto al tiempo, tal que el desplazamiento horizontal será

$$\zeta = \int u dt = -a \frac{gk \cosh k(h+z)}{\sigma^2 \cosh kh} \operatorname{sen}(kx - \sigma t) = -a \frac{\cosh k(h+z)}{\operatorname{senh} kh} \operatorname{sen}(kx - \sigma t) \quad (\text{A.12})$$

y el desplazamiento vertical

$$\xi = \int w dt = a \frac{gk \operatorname{senh} k(h+z)}{\sigma^2 \cosh kh} \cos(kx - \sigma t) = a \frac{\operatorname{senh} k(h+z)}{\operatorname{senh} kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (\text{A.13})$$

El campo de presiones asociado a una onda progresiva se puede determinar resolviendo la condición dinámica de superficie libre, ecuación de Bernoulli (A.14), la cual se obtiene considerando la segunda ley de Newton, y asumiendo que el fluido es incompresible y el flujo es irrotacional.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad (\text{A.14})$$

Evaluando la ecuación (A.14) para cualquier profundidad  $z$ , así como en la superficie libre  $\eta$ , donde la presión es considerada igual a cero, y reteniendo sólo los términos lineales. Además de hacer intervenir la condición cinemática al primer orden de superficie libre, se obtiene que la presión es igual a:

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (\text{A.15})$$

donde el primer término de la derecha representa la presión hidrostática, la cual existiría aún sin la presencia del movimiento oscilatorio, mientras que el segundo representa la presión dinámica  $P_D$ . Esta última puede ser expresada de la siguiente forma:

$$p_D = p + \rho g z = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (\text{A.16})$$

Tras examinar la propagación de un grupo de ondas y considerando dos trenes de oleaje de la misma altura propagándose en la misma dirección con frecuencias y número de onda ligeramente diferentes, estas pueden ser superpuestas para llegar a la expresión de la celeridad de grupo:

$$C_g = nC = \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (\text{A.17})$$

## A.2. ENERGÍA Y PROPAGACIÓN DE ENERGÍA EN ONDAS PROGRESIVAS

La energía total de una ola tiene dos componentes: energía potencial, resultado del desplazamiento de la superficie libre, y; la energía cinética, debida al movimiento de las partículas. La energía total y su transmisión son de gran importancia para determinar como el oleaje cambia al propagarse hacia aguas más someras, la energía requerida para generarlas, y la potencia disponible para los dispositivos de extracción de la energía del oleaje.

### A.2.1. ENERGÍA POTENCIAL

La energía potencial es el resultado del desplazamiento de la masa de agua desde una posición de equilibrio en contra de un campo gravitatorio. Para su derivación considérese la figura A.1, la energía potencial de una columna de fluido con masa  $dm$ , relativa a él fondo es:

$$d(PE) = dm g \bar{z} \quad (\text{A.18})$$

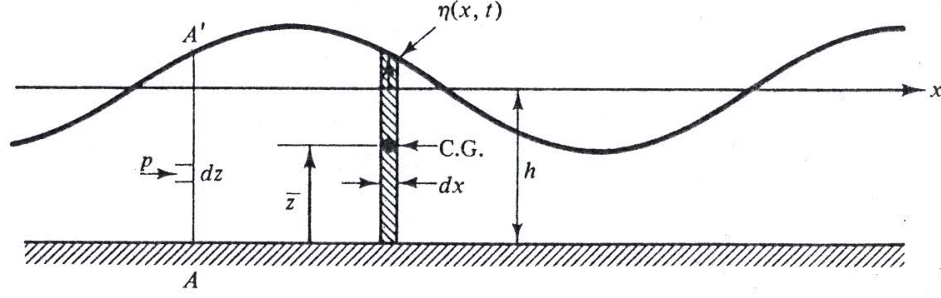
donde  $\bar{z}$  es la distancia vertical a él centro de gravedad de la masa, y puede ser escrita como:

$$\bar{z} = \frac{h + \eta}{2} \quad (\text{A.19})$$

y el diferencial de masa por anchura unitaria es:

$$dm = \rho (h + \eta) dx \quad (\text{A.20})$$

El promedio sobre una longitud de onda de la energía potencial de una onda progresiva de altura  $H$  es:



**Figura A.1:** Definición esquemática para la determinación de la energía potencial

$$(\overline{PE})_T \equiv \frac{1}{L} \int_x^{x+L} d(PE) = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{(h + \eta)^2}{2} dx \quad (\text{A.21})$$

$$= \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \left[ \frac{1}{2} (h^2 + 2\eta h + \eta^2) \right] dx \quad (\text{A.22})$$

El subíndice  $T$  significa que se está considerando la energía potencial del volumen total de agua. Usando la ecuación (A.5), el promedio de la energía potencial es:

$$(\overline{PE})_T = \frac{\rho g}{L} \left( \frac{1}{2} h^2 L + h \int_x^{x+L} \eta dx + \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \eta^2 dx \right) \quad (\text{A.23})$$

Integrando la ecuación (A.23), se obtiene que la energía potencial es:

$$(\overline{PE})_T = \rho g \frac{h^2}{2} + \rho g \frac{H^2}{16} \quad (\text{A.24})$$

La energía potencial debida al oleaje es la diferencia entre la energía potencial con el oleaje presente y la energía que hubiera sin la presencia del oleaje, esto es:

$$(\overline{PE})_{oleaje} = (\overline{PE})_T - (\overline{PE})_{w/o} \quad (\text{A.25})$$

$$\overline{PE} \equiv (\overline{PE})_{oleaje} = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (\text{A.26})$$

### A.2.2. ENERGÍA CINÉTICA

La energía cinética se debe al movimiento de las partículas del agua; la energía cinética asociada a una pequeña sección de fluido con masa  $dm$  es:

$$d(KE) = dm \frac{u^2 + w^2}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + w^2}{2} \quad (\text{A.27})$$

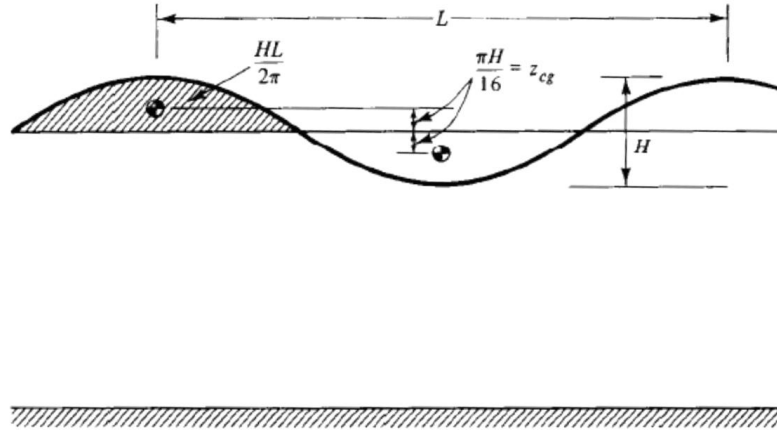
Para encontrar la energía media por unidad de área,  $d(KE)$ , la ecuación (A.27) se debe integrar sobre la profundidad y sobre una longitud de onda, tal que:

$$\overline{KE} = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} dz dx \quad (\text{A.28})$$

Sustituyendo las ecuaciones (A.8) y (A.10) en la ecuación (A.28), se obtiene que:

$$\begin{aligned} \overline{KE} = \frac{\rho}{2L} \left( \frac{gHk}{2\sigma} \frac{1}{\cosh kh} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \left[ \cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx - \sigma t) \right. \\ \left. + \sinh^2 k(h+z) \sin^2(kx - \sigma t) \right] dz dx \quad (\text{A.29}) \end{aligned}$$

Usando identidades trigonométricas, la ecuación (A.29) puede ser expresada como:



**Figura A.2:** Determinación de la energía potencial como resultado del incremento de masa de agua en el área del valle a el área de la cresta

$$\begin{aligned} \overline{KE} = \frac{\rho}{2L} \left( \frac{gHk}{2\sigma} \frac{1}{\cosh kh} \right)^2 \\ \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta \approx 0} \frac{1}{2} \left[ \cosh 2k(h+z) \cos 2(kx - \sigma t) \right] dz dx \quad (\text{A.30}) \end{aligned}$$

Integrando la ecuación (A.30) se obtiene:



$$\overline{KE} = \frac{1}{16}\rho g H^2 \quad (\text{A.31})$$

Por tanto, la energía cinética tiene la misma magnitud que la energía potencial, lo cual es característico de un sistema conservativo. La energía media total por unidad de área de una ola es la suma de la energía cinética y de la energía potencial. Denotando como E a la energía media total por superficie unitaria de superficie:

$$E = \overline{KE} + \overline{PE} = \frac{1}{8}\rho g H^2 \quad (\text{A.32})$$

El total de energía por onda y por unidad de longitud es entonces simplemente

$$E_L = \frac{1}{8}\rho g H^2 L \quad (\text{A.33})$$

Es importante hacer notar que ni la energía cinética media ni la energía potencial media (sobre una longitud) por área unitaria depende de la profundidad del agua de la longitud de onda, pero son proporcionales a el cuadrado de la altura de ola.



## Apéndice B

### *Canal de olas*

---

El equipo fundamental del laboratorio de Costas y Puertos es el canal de oleaje, en el cual se realizaron los ensayos, y a este lo integran:

#### B.1. ESTRUCTURA PROPIA DEL CANAL

Canal de sección rectangular, 0.8 m de ancho y 1.2 m de altura, con 38 m de largo; el cual se eleva 0.8 m sobre el nivel del piso gracias a su estructura de acero PTR, conformada por marcos inferiores a cada metro para soporte del fondo los mismos que cada 2 m se extienden para contención de las paredes; laminas de vidrio templado de 2 cm de espesor conforman uno de los costados del canal y 4 m del otro, el resto del otro costado al igual que el fondo están contruidos en base a placas de acero inoxidable.



**Figura B.1:** Canal de olas (*Instituto de Ingeniería UNAM*)

## B.2. SISTEMA DE GENERACIÓN DE ONDAS

Este es un sistema de HR Wallingford, conformado por un generador de tipo pistón (pala hidráulica) que consiste en una placa de acero de sección igual a la del canal sostenida por un riel horizontal y accionada por medio de un motor eléctrico de pasos, el cual a su vez es controlado mediante un programa sintetizador de onda.

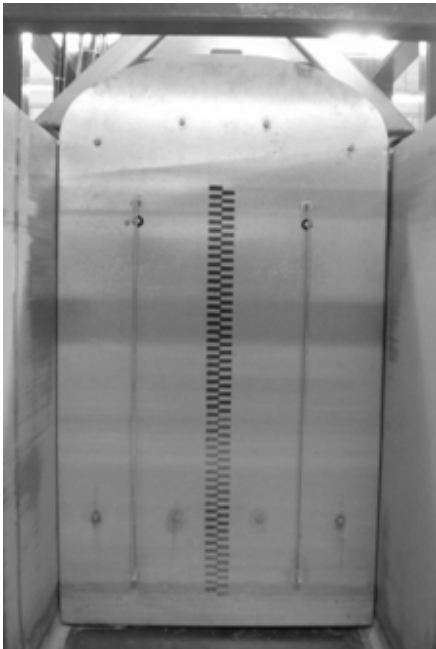


Figura B.2: Pala hidráulica

El objetivo de este programa escrito y desarrollado por HR Wallingford es el de controlar los elementos mecánicos que integran el sistema de generación de ondas para simular una amplia gama de estados de mar usados en la modelación física tanto en aguas profundas (offshore) como en aguas someras (nearshore)

El programa, controlado por medio de una interface gráfica amigable, genera oleaje regular (sinusoidal) e irregular (aleatorio) usando dos métodos para este último, el de ruido blanco filtrado digitalmente en tiempo real y la suma de ondas sinusoidales también en tiempo real.

El oleaje irregular (aleatorio) producido mediante la suma de ondas sinusoidales usa una de las dos formas espectrales estándar, JONSWAP y Pierson-Moskowitz. Muchas otras definiciones espectrales usadas con menos frecuencia pueden ser ingresadas, usando la opción *user-defined*, como una serie de densidades espectrales separadas por un incremento de frecuencia constante [Beresford, 2003].

La pala puede alcanzar un máximo desplazamiento de 80 cm, a una velocidad límite de 0.81 m/s con una fuerza máxima de 3.5 KN.

### B.2.1. SISTEMA DE ABSORCIÓN

El sistema de generación cuenta con un sistema de absorción dinámica de la onda cuyo propósito es evitar que las ondas que son reflejadas desde un modelo sean re-reflejada por la pala de generación.

Las olas son generadas por el movimiento de la pala hacia atrás y hacia delante. La relación entre la altura de ola creada por un cierto movimiento de la pala es conocida como la función de transferencia.

La absorción de las ondas reflejadas por un modelo se logra midiendo la altura de las olas en la pala, por medio de un sensor que consiste en dos barras montadas en la cara de la pala que forman una sonda de conductividad, y modificando la señal demandada al sistema de generación,

dependiendo de si la altura de las olas de la pala es mayor o menor de la esperada.

La señal demandada al generador de olas es generalmente una señal de posición. Para lograr la absorción se convierte la señal de la altura de las olas en un Posición Equivalente de la Pala (Equivalent Paddle Position) dividiendo la señal por la función de transferencia. La diferencia entre la señal del EPP y la señal demandada se debe a la onda reflejada en el modelo.

## B.3. INSTALACIÓN PARA LA INSTRUMENTACIÓN

La instalación para la instrumentación está conformada básicamente por unos rieles tubulares (B.3(a)) sobre las paredes del canal para montar los instrumentos (sensores de nivel, velocímetros, soporte de rayo láser, base para estación total o sistema de grabación, soporte del *Blow-jet*, etc.) y una canaleta metálica (B.3(b)) sujeta del techo y suspendida sobre el canal, con la finalidad de contener todo el cableado de la instrumentación y soportar en ocasiones instrumentos de poco peso como lo son los monitores de los micro-molinetes.



(a) Rieles tubulares



(b) Canaleta metálica

**Figura B.3:** Instalación para la instrumentación

## B.4. SISTEMA DE LLENADO Y VACIADO

Integrado por 3 bombas (B.4(a)) de 10 Hp con tubería de 3" de diámetro y una cisterna con capacidad de 48 m<sup>3</sup>; es un sistema pensado en el uso responsable del agua, puesto que al vaciar el canal, el agua retorna a la cisterna después de un previo y opcional proceso de filtrado, obligando el reúso de este recurso. Este sistema permite una capacidad de respuesta controlable (B.4(b)) del llenado y vaciado, que puede ir del extremo más lento al más rápido, debido a que dispone de un sistema de válvulas y las bombas cuentan con regulador de potencia.



(a) Bombas



(b) Caja de control

**Figura B.4:** Sistema de bombeo

## Apéndice C

# *Instrumentación*

---

### C.1. ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV)

El ADV con que cuenta el laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería es marca NORTEK AS de nombre vectrino, se trata de un velocímetro acústico de alta resolución, el cual es capaz de medir en una amplia variedad de aplicaciones: turbulencia, mediciones de la capa límite, mediciones en la zona de rompientes, y mediciones en zonas de flujo bajo; ya sea en un entorno de laboratorio o en el océano, tanto turbulencia como velocidad del agua en 3D.



**Figura C.1:** Vectrino dentro del canal de olas

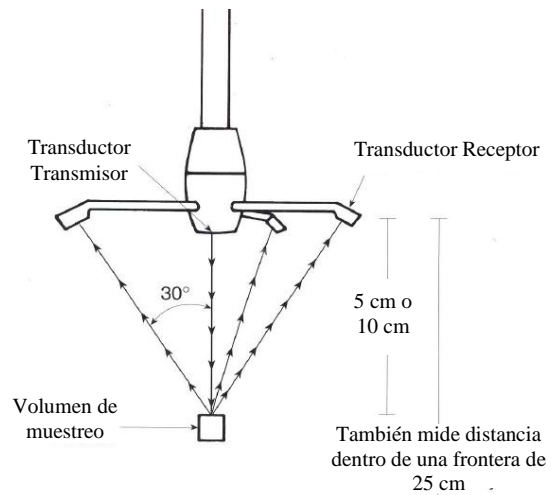
El vectrino usa el efecto Doppler para medir la velocidad de un fluido. El efecto Doppler es el cambio en el tono que se escucha cuando el origen de un sonido o el oyente está en movimiento. El vectrino transmite pares cortos de pulsos de sonido, escucha sus ecos, y, en última instancia, mide el cambio en el tono o frecuencia del sonido devueltos [HR Wallingford].

Rango superior de velocidad: La velocidad máxima horizontal es aproximadamente 6 m/s y 1.5 m/s en la vertical.

Rango superior de profundidad: La profundidad estándar es de 200 m.

Instrucciones que se deben seguir al montar el vectrino:

1. Asegurarse de que no hay obstáculos entre el sensor y el punto focal (volumen de muestreo), ubicado a unos 5 cm de los transductores.
2. Considerar los efectos de objetos grandes en el mismo flujo. Una regla básica es que los objetos perturban el flujo dentro de un campo de 10 diámetros de distancia del objeto. La perturbación del flujo es mayor directamente aguas abajo en la estela detrás del objeto.
3. Todos los transductores acústicos deben estar sumergidos durante la recolección de datos. El hecho de que el vectrino esté funcionando cuando los transductores estén fuera del agua no le causa ningún daño, pero los datos recolectados no tendrán sentido.



**Figura C.2:** Esquema de funcionamiento del vectrino

4. La mejor calidad se logra si la dirección de flujo principal es perpendicular al eje de transmisión. Que el flujo desemboque directamente en el eje de transmisión se debe evitar.
5. Asegurarse de que su estructura de montaje sea estable. Pequeñas vibraciones en la estructura de montaje puede generar grandes aceleraciones en los datos [Nortek AS, 2009].

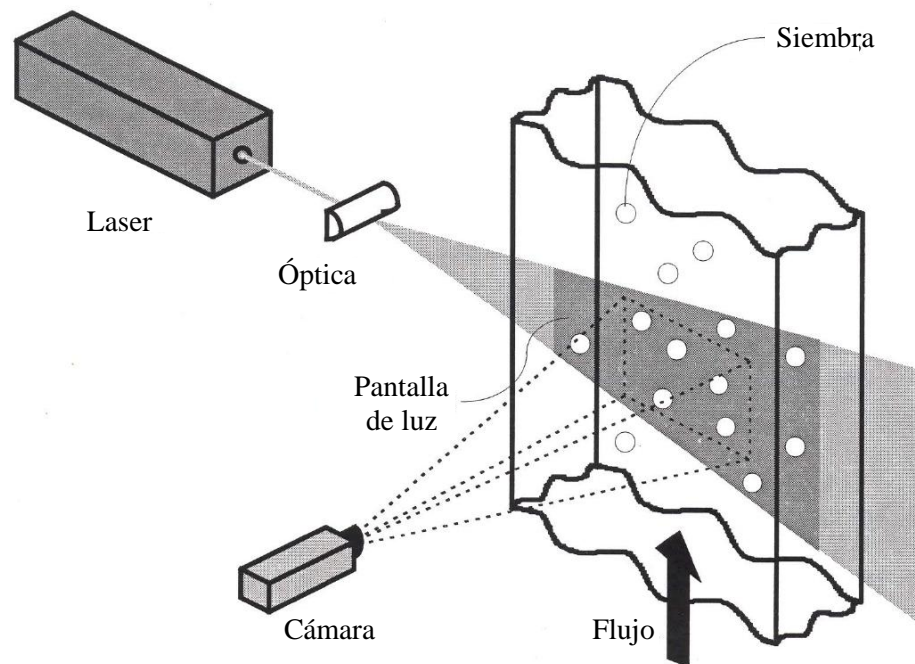
## C.2. FLOWMAP

FlowMap es el nombre comercial de una gama de productos de la marca DANTEC DYNAMICS que han sido diseñados y construidos especialmente para la obtención de mediciones instantáneas de velocidad de todo un campo, utilizando la técnica *Particle Image Velocimetry* (PIV), dicha técnica se basa en la conocida ecuación:

$$velocidad = \frac{distancia}{tiempo} \quad (C.1)$$



En PIV la propiedad realmente medida es la distancia recorrida por partículas en el flujo dentro de un intervalo de tiempo conocido. Estas partículas se agregan al flujo, a esta acción se le conoce como siembra. Diferentes tipos de siembra se utilizan dependiendo de la naturaleza del flujo que se investigue. El tipo de siembra de partículas, es elegida para seguir el flujo, con el fin de detectar su movimiento, un área del campo de flujo es iluminada por una pantalla de luz. La pantalla de luz, que es generada por un láser y un sistema de componentes ópticos, no es continuo/permanente, sino mediante pulsos para producir un efecto estroboscópico, congelando el movimiento de la partículas sembradas. El tiempo entre los pulsos de luz es el denominador en la ecuación (C.1).



**Figura C.3:** Principios básicos del PIV

Para detectar la posición del sembrado de partículas iluminado, una cámara CCD (*Charge Coupled Device*) es colocada en ángulo recto a la pantalla de luz, y las posiciones de las partículas van a aparecer en forma de manchas de luz sobre un fondo oscuro en cada fotograma o cuadro de la cámara. La pantalla de luz intermitente y la cámara están sincronizadas de manera que la posición de la partícula en el instante del pulso de luz número 1 se registran en el fotograma 1 de la cámara, y las posiciones de las partículas del pulso 2 quedan en el cuadro 2.

Las imágenes de la cámara se dividen en regiones rectangulares denominadas áreas de interrogación o regiones de interrogación, y para cada una de estas áreas de interrogación la imagen del primer y segundo pulso de la pantalla de luz se correlacionan para producir un desplazamiento vectorial medio de la partícula. Hacer esto para todas las regiones de interrogación produce un mapa vectorial de los desplazamientos medios de partículas. Dividiendo el tiempo conocido entre las dos imágenes capturadas, los vectores de desplazamiento se convierten en un mapa denominado de vectores de velocidad en bruto.

Algoritmos de validación se puede aplicar a los mapas vectoriales en bruto, de modo que

los valores extremos, vectores erróneos, pueden ser detectados y eliminados, formando así, un nuevo mapa vectorial validado, además de conservar el mapa vectorial en bruto para posteriores análisis.

Así pues, el proceso de adquisición de datos se lleva a cabo en cinco etapas principales: siembra, iluminación, grabación, procesamiento y análisis del campo de flujo.

El procesamiento y análisis se realizan por medio del programa FlowManager. Este programa es una base de datos visual que realiza el seguimiento de los datos registrados, lineamientos y la configuración experimental. El análisis de datos está disponible en la opción “Analysis” dentro del menú de FlowManager. Además de funcionar como base de datos el programa FlowManger también controla el procesamiento mediante una conexión en línea con el menú del FlowMap. La comunicación con el procesador es desempeñada cargando la información de configuración y controladores del dispositivo de la librería del dispositivo (parte de FlowManager) y del software del procesador [Dantec Dynamics, 2002].

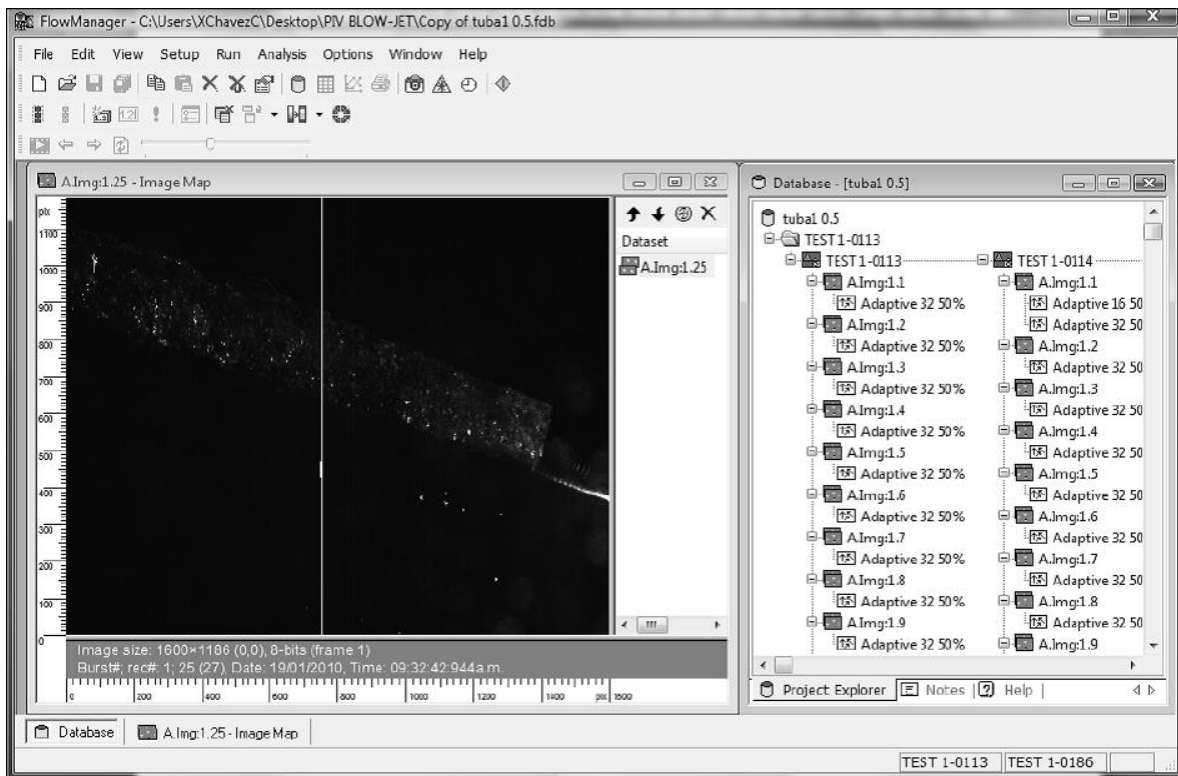


Figura C.4: Interface gráfica del FlowManager

### C.3. SENSORES DE NIVEL (MONITORES DE LAS SONDAS DE ONDA)

El monitor de la sonda de onda es un dispositivo simple y confiable para la medición de los niveles de agua, que opera en el principio de medición de la corriente que fluye en una sonda sumergida, la cual consiste en un par de alambres de acero inoxidable paralelos.

La corriente que fluye entre los cables de la sonda es proporcional a la profundidad de inmersión y esta corriente se convierte en una tensión de salida proporcional a la profundidad de inmersión instantánea.

La tensión de salida puede ser calibrada en términos de altura de ola, variando la profundidad de inmersión de la sonda, estando el agua tranquila (sin perturbaciones), una cantidad conocida y observando el cambio en el nivel de la señal de salida. Controlando la profundidad mediante un soporte especial de la sonda, basando la precisión en una serie de orificios espaciados cada 20 mm.

Cada monitor de onda contiene la sonda de activación y circuitos de detección para el funcionamiento de la sonda de onda. Además de esto cada monitor contiene los circuitos necesarios para compensar la resistencia del cable de conexión de la sonda, que de otra manera introduciría errores de linealidad. En el laboratorio se cuenta con 12 monitores de onda, los cuales se están repartidos en dos consolas, una con capacidad para 8 monitores (figura C.6) y otra pequeña para los 4 restantes, ambas consolas estas provistas con los conectores de entrada y salida necesarios para los monitores de las sondas de onda [HR Wallingford].



**Figura C.5:** Sondas de onda



**Figura C.6:** Consola para 8 monitores de las sondas de onda



## Apéndice D

# *Datos procesados con los programas LEEWDC y REFLE*

---

Las tablas que integran este apéndice, corresponden a los datos procesados a partir de las mediciones tomadas con los monitores de las sondas de onda.

Las primeras tres tablas (D.1, D.2 y D.3), una por cada  $S$ , contienen las alturas de ola y periodos arrojados por el programa LEEWDC.

Las tres tablas siguientes (D.4, D.5 y D.6), igualmente una por cada  $S$ , muestran parámetros obtenidos al usar el programa REFLE, omitiendo los correspondientes al método de Goda, pues arroja valores demasiado altos a los esperados, eligiendo y mostrando por lo antes mencionado, los parámetros calculados con el método de Mansard.

La última tabla (D.7) corresponde al cálculo del coeficiente de transmisión,  $K_{tr}$ , para cuyo análisis se utilizó la altura de ola significantes,  $H_{tr1/3}$ , del sensor ubicado detrás del dispositivo (S1-5 y S2,4) calculada mediante el programa LEEWDC y la altura de ola incidente significativa de Mansard,  $MI_{HS}$ , calculada con REFLE.



No.	S	h [m]	T [s]	H [m]	f [Hz]	HORA	Archivo [txt]	T canal 1 [s]										H canal 2 [cm]										T canal 3 [s]										H canal 4 [cm]										T canal 5 [s]																	
								H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100								
1		0.80	1.25000	15:28:00	20100326T151849	8.1355	8.3531	8.4292	8.6191	8.8872	0.8004	0.7992	0.7975	0.7958	0.7875	8.3119	8.563	8.6626	8.8701	9.1001	0.8007	0.7997	0.7998	0.8017	0.8125	7.947	8.2371	8.323	8.5257	8.7524	8.8008	0.7997	0.8003	0.7967	0.8	7.8679	8.1378	8.2268	8.4222	8.8861	0.8007	0.7993	0.7975	0.7958	0.7875	6.3531	6.562	6.6398	6.8387	7.0406	0.801	0.7995	0.7997	0.7983	0.7875	6.2068	6.4439	6.4981	6.6149	6.7559	1.0006	0.9998	0.9984	0.9948	1.0

Tabla D.1: Alturas de ola (H) y periodos (T), S = 1/3 [LEEWDIC]

APÉNDICE D. DATOS PROCESADOS CON LOS PROGRAMAS LEEWDC Y REFLE

No.	S	h [m]	I [°]	H [m]	f [Hz]	HORA	Archivo [txt]	H canal 1 [cm]										T canal 1 [s]										H canal 2 [cm]										T canal 2 [s]										H canal 3 [cm]										T canal 3 [s]										H canal 4 [cm]										T canal 4 [s]										H canal 5 [cm]										T canal 5 [s]									
								H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100																														
113		0.80	12.5000	12:22:00	20100126T122243	8.3993	8.7899	8.9474	9.2267	9.6033	0.8000	0.8007	0.8008	0.8017	0.8	8.1303	8.5222	8.7008	8.9611	9.162	0.8005	0.7987	0.7995	0.8	0.7875	8.1832	8.6134	8.8112	9.1747	9.7812	0.8006	0.8001	0.8015	0.8	0.8	0.8	7.8258	8.24	8.4086	8.8046	9.3166	0.8008	0.7993	0.7985	0.7983	0.8125	4.847	5.526	5.7336	6.2543	6.6553	0.7674	0.8024	0.8034	0.7975	0.8	0.8	0.8	4.9884	5.4821	5.5386	5.8431	6.4474	0.9836	0.9907	0.9952	0.9917	0.9625																																							

Tabla D.2: Alturas de ola (H) y periodos (T), S = 1/2 [LEEWDC]



No.	S	h [m]	I [°]	H [m]	T [s]	HORA	Archivo [txt]	H canal 1 [cm]										T canal 1 [s]										H canal 2 [cm]										T canal 2 [s]										H canal 3 [cm]										T canal 3 [s]										H canal 4 [cm]										T canal 4 [s]									
								H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100	H med	H 1/2	H 1/3	H 1/10	H 1/100	T med	T 1/2	T 1/3	T 1/10	T 1/100																														
225		0.80	1.25000	09:02:00	20100120T1090220	9.3557	10.1363	10.4097	11.0747	12.0554	0.8005	0.738	0.7903	0.785	0.763	9.1624	9.8655	10.1206	10.6534	11.155	0.8008	0.7966	0.7946	0.7884	0.775	7.5518	8.2832	8.5997	9.3537	9.9977	0.8002	0.7925	0.7942	0.7858	0.775	7.8052	8.4769	8.7557	9.5066	10.7576	0.8007	0.7953	0.7935	0.7883	0.8	5.3634	6.0571	6.2633	6.7882	7.3987	0.7905	0.7987	0.7949	0.7842	0.7375	5.1605	6.4543	7.1672	8.3893	10.4513	0.8089	0.1063	0.0992	0.1049	0.1433																						

Tabla D.3: Alturas de ola (H) y periodos (T), S = 2/3 [LEEWDC]

APÉNDICE D. DATOS PROCESADOS CON LOS PROGRAMAS LEEWDC Y REFLE

No.	S	h	I	H	T	f	MANSARD														MANSARD																							
							M_%CR_TOT	M_%CR_PIC	S1_ERMS	S1_HRMS	S1_HS	S1_T1	S1_T2	S1_TP	S2_ERMS	S2_HRMS	S2_HS	S2_T1	S2_T2	S2_TP	S3_ERMS	S3_HRMS	S3_HS	S3_T1	S3_T2	S3_TP	MR_ERMS	MR_HRMS	MR_HS	MR_T1	MR_T2	MR_TP	MI_ERMS	MI_HRMS	MI_HS	MI_T1	MI_T2	MI_TP	MT_ERMS	MT_HRMS	MT_HS	MT_T1	MT_T2	MT_TP
1		0.80	1.25000				11.9816	6.23241	2.76324	7.81561	11.064	0.78844	0.78797	0.78959	2.72974	7.72088	10.9299	0.78775	0.7873	0.78959	2.67592	7.56663	10.71437	0.78831	0.78789	0.78959	0.35528	0.94832	1.34246	1.91673	1.14012	0.78959	2.7983	7.91478	11.20438	0.79544	0.79158	0.78959	2.7123	7.67153	10.86003	0.78788	0.78847	0.78959

Tabla D.4: Parámetros obtenidos a partir de la separación de las ondas incidente y reflejada, S = 1/3 [REFLE]

No.	S	h	I	H	T	f	MANSARD														MANSARD																						
							M_%CR_TOT	M_%CR_PIC	S1_ERMS	S1_HRMS	S1_HS	S1_T1	S1_T2	S1_TP	S2_ERMS	S2_HRMS	S2_HS	S2_T1	S2_T2	S2_TP	S3_ERMS	S3_HRMS	S3_HS	S3_T1	S3_T2	S3_TP	MR_ERMS	MR_HRMS	MR_HS	MR_T1	MR_T2	MR_TP	MI_ERMS	MI_HRMS	MI_T1	MI_T2	MI_TP	MT_ERMS	MT_HRMS	MT_HS	MT_T1	MT_T2	MT_TP
113				0.80	1.25000	15.50374	12.53991	2.64199	7.47269	10.57855	0.78794	0.78741	0.78959	2.80392	7.93069	11.2269	0.78824	0.7877	0.78959	2.64049	7.46731	10.57904	0.78786	0.7872	0.78959	0.4355	1.23179	1.74375	1.06267	0.89051	0.78959	2.80902	7.9451	11.24731	0.79356	0.79059	0.78959	2.61902	7.4077	10.48655	0.78852	0.78824	0.78959
114				1.00	1.00000	16.86695	16.86695	3.9445	8.61114	12.19017	0.97083	0.96681	0.97283	2.72663	7.71209	10.91744	0.96629	0.96299	0.97283	2.54524	6.65879	10.42973	0.96363	0.95945	0.97283	0.51356	1.45767	2.05163	1.38655	1.07587	0.95945	2.66412	7.35227	11.06713	0.97488	0.97202	0.97283	2.962	8.37779	11.85984	0.97426	0.97824	0.97283
115				1.20	0.83333	18.16884	11.76959	2.82191	7.08156	11.28982	1.22597	1.20574	1.26036	3.02124	8.54537	12.09706	1.22602	1.20807	1.26036	2.66266	7.53114	10.66129	1.22192	1.19895	1.26036	0.52073	1.47286	2.08502	0.84891	0.7075	0.61139	2.86608	8.1065	11.47579	1.26295	1.25248	1.26036	2.71524	7.67302	10.86214	1.23274	1.21743	1.26036
116				1.40	0.71429	19.36225	27.29223	3.80759	10.76949	15.24559	1.29545	1.29249	1.39216	2.62719	7.41927	12.03023	1.27584	1.29616	1.39216	2.61655	7.40072	10.47697	1.27062	1.29086	1.39216	1.25766	3.5572	5.03567	1.01782	0.92094	1.39216	3.1471	8.19035	12.6001	1.36892	1.33674	1.39216	3.76184	10.65015	15.07695	1.33276	1.30652	1.39216
117				1.60	0.59524	20.55556	81.01448	3.90965	8.74167	12.74966	1.64981	1.551	1.70033	2.80809	8.19939	11.60728	1.64147	1.68521	1.70033	2.75317	7.78715	11.02371	1.61946	1.53528	1.70033	0.80012	2.31966	3.28378	2.58082	1.26317	1.63084	3.80411	12.0882	1.752	1.61825	1.70033	3.11299	8.80487	12.46411	1.68873	1.60185	1.70033	
118				1.80	0.55556	20.24871	20.8802	2.68036	7.58521	10.73217	1.41617	1.31017	1.6281	3.13686	8.87238	12.55999	1.40848	1.42083	1.6281	3.18924	9.02052	12.7697	1.535	1.45588	1.6281	0.86726	2.45299	3.47252	0.9593	0.81947	0.84549	2.86711	8.10941	11.47091	1.60038	1.52525	1.6281	2.5482	7.20739	10.29298	1.55159	1.48178	1.6281
119				2.00	0.50000	24.42018	10.44182	2.68185	7.58541	10.73812	1.76894	1.66142	1.87619	3.13632	8.87086	12.55784	1.65943	1.47878	1.87619	3.20077	9.05316	12.7697	1.535	1.45588	1.87619	0.72033	2.0374	2.2874	1.34599	0.90777	0.62939	2.94074	8.34311	11.81074	1.76833	1.76465	1.87619	2.6734	7.54453	10.68025	1.57759	1.70391	1.87619
120				0.80	1.25000	40.8277	39.86442	3.82646	10.82285	15.3213	0.82196	0.80676	0.85542	3.70348	10.47504	14.82875	0.81732	0.80162	0.85542	3.8147	10.78959	15.27404	0.82537	0.80943	0.85542	1.59407	4.50872	6.38266	0.47566	0.45298	0.42178	3.89913	11.0284	15.61211	0.78646	0.75454	0.85542	3.85154	10.8938	15.42157	0.82987	0.81811	0.85542
121				1.00	1.00000	17.55353	5.87113	4.0573	11.47579	16.24544	1.04506	1.03872	1.0597	4.18652	11.84127	16.76283	1.02971	1.01518	1.0597	4.17757	11.51755	16.76283	1.02562	1.01052	1.0597	0.73943	2.09143	2.99068	0.37164	0.37567	0.40157	4.21243	11.91456	16.86659	1.05881	1.04468	1.0597	4.07235	11.51834	16.30568	1.04783	1.04259	1.0597
122				1.20	0.83333	19.9333	17.96676	4.27574	12.09363	17.12008	1.14169	1.12591	1.1716	4.32557	12.22889	17.31156	1.15973	1.15288	1.1716	4.14049	11.6084	16.43317	1.13502	1.11790	1.1716	0.86416	2.44421	3.46009	0.64279	0.61103	0.57391	4.32224	12.22513	17.30624	1.15625	1.14494	1.1716	4.14308	11.7184	16.58889	1.16194	1.15684	1.1716
123				1.40	0.71429	23.68685	24.70844	5.10015	14.42541	20.42101	1.26593	1.24737	1.29412	4.25757	12.04269	17.04797	1.17953	1.13521	1.29412	4.20615	10.50178	17.06848	1.24851	1.22912	1.29412	1.6557	4.68001	6.6294	0.81242	0.7415	0.66667	4.91406	13.90161	19.6795	1.22463	1.17447	1.29412	5.01157	14.17486	20.06632	1.26093	1.25899	1.29412
124				1.60	0.62500	18.69971	11.894	4.54185	12.84629	18.18557	1.59461	1.57519	1.61983	4.58218	12.96035	18.34704	1.59011	1.56761	1.61983	4.40491	12.45896	17.05225	1.55386	1.56137	1.61983	0.87325	2.46991	3.49648	0.74771	0.76714	0.76183	4.66684	13.20829	18.69803	1.61863	1.59512	1.61983	4.4843	12.68351	17.95513	1.50776	1.54808	1.61983
125				1.80	0.55556	21.17342	13.14062	4.19814	11.87426	16.80934	1.51641	1.46193	1.61983	4.79399	13.56511	19.30314	1.55984	1.51641	1.61983	4.76001	11.64333	19.67959	1.63251	1.60803	1.61983	0.94569	2.67481	3.48153	0.76202	0.80543	0.8412	4.46639	12.63287	17.88344	1.63608	1.6031	1.61983	4.4843	16.20285	15.90768	1.52861	1.61983	1.61983
126				2.00	0.50000	24.45087	12.5907	3.86818	10.94987	15.4882	1.77221	1.68311	1.86667	4.71758	13.49607	19.10541	1.75938	1.66929	1.86667	4.98795	11.48065	19.97175	1.82315	1.8053	1.86667	1.08522	3.07314	4.31542	0.76807	1.1922	1.86667	4.44368	12.56802	17.79248	1.89653	1.83282	1.86667	3.83801	10.85552	15.36737	1.80533	1.73993	1.86667
127				0.80	1.25000	30.04294	18.47921	4.77005	13.94174	19.09928	1.03467	1.02421	1.0597	2.87869	12.76987	22.70982	1.01208	1.00464	1.0597	2.86632	11.67068	18.47921	1.01208	1.00464	1.0597	1.67608	4.74968	6.71104	0.28149	0.84004	0.52078	5.57986	15.79988	22.38316	1.06717	1.02325	1.0597	4.81795	13.62722	19.29107	1.05449	1.05449	1.0597
128				1.00	1.00000	23.76189	11.20378	5.97608	16.90291	23.92823	1.13808	1.122	1.1716	6.03101	17.05827	24.14817	1.13187	1.11317	1.1716	5.56483	15.79973	22.2816	1.13999	1.12486	1.1716	1.428	4.03899	5.71771	0.29437	1.112	0.57391	6.00982	16.99776	24.06251	1.20961	1.1792	1.1716	5.74708	16.25519	23.0113	1.16159	1.15673	1.1716
129				1.20	0.83333	25.97125	16.93024	6.48831	18.35171	25.9792	1.24115	1.22052	1.28105	6.50713	16.88953	23.9003	1.19644	1.18706	1.28105	6.61018	16.01196	22.6889	1.25231	1.2352	1.28105	1.87398	5.90043	6.73542	0.73619	0.67266	0.65993	6.46533	18.2667	25.872	1.22077	1.18004	1.28105	6.3064	17.83718	25.25081	1.22997	1.25907	1.28105
130				1.40	0.62500	25.48694	7.06282	6.18622	17.49276	24.79661	1.58654	1.45404	1.65289	6.93517	15.71805	24.79904	1.58761	1.55132	1.65289	5.7984	16.40034	23.21678	1.51191	1.44825	1.65289	1.58867	4.49343	6.31052	0.45808	0.85703	1.65289	6.23326	17.63031	24.95796	1.70803	1.64402	1.65289	5.99836	16.96592	24.01743	1.62867	1.61436	1.65289
131				1.60	0.55556	18.99104	10.53636	5.64126	15.95588	22.58759	1.52419	1.47223	1.61983	6.15416	18.50118	26.19079	1.58116	1.56116	1.61983	6.45217	16.00777	25.88668	1.59115	1.58289	1.61983	1.20776	3.41605	4.83586	0.71058	0.71839	0.8412	6.07187	17.73313	24.31176	1.64773	1.61171	1.61983	5.48242	15.50663	21.95161	1.61179	1.65848	1.61983
132				1.80	0.50000	20.81672	11.20992	5.30067	14.99256	21.22388	1.82594	1.78609	1.86667	6.31025	17.84809	25.26626	1.79164	1.73861	1.86667	6.79184	19.21023	27.19454	1.77972	1.73452	1.86667	1.24176	3.51222	4.97199	0.20701	1.33107	1.86667	5.96519	16.8721	23.88462	1.86206	1.81667	1.86667	5.2439	14.832	20.96659	1.83429	1.8017	1.86667
133				0.80	1.25000	16.56112	11.20307	7.55695	21.37429	30.25804	1.22617	1.20845	1.25444	7.73906	21.88938	30.98722	1.22441	1.20705	1.25444	7.4541	21.08337	29.84621	1.2237	1.20699	1.25444	1.20835	3.41774	4.83825	0.78288	0.68525	0.61449	7.29633	20.63715	29.21452	1.24687	1.23429	1.25444	7.3932	20.91113	29.60238	1.23622	1.22168	1.25444
134				1.00	1.00000	17.44725	11.20307	8.06421	22.89435	31.96871	1.35876	1.34062	1.38562	8.06421	22.89435	31.96871	1.35876	1.34062	1.38562	7.85289	21.96871	31.96871	1.35876	1.34062	1.38562	1.20835	3.41774	4.83825	0.78288	0.68525	0.61449	7.29633	20.63715	29.21452	1.24687	1.23429	1.25444	7.3932	20.91113	29.60238	1.23622	1.22168	1.25444
135				1.20	0.83333	18.16884	11.76959	2.82191	7.08156	11.28982	1.22597	1.20574	1.26036	3.02124	8.54537	12.09706	1.22602	1.20807	1.26036	2.66266	7.53114	10.66129	1.22192	1.19895	1.26036	0.52073	1.47286	2.08502	0.84891	0.7075	0.61139	2.86608	8.1065	11.47579	1.26295	1.25248	1.26036	2.71524	7.67302	10.86214	1.23274	1.21743	1.26036
136				1.40	0.71429	19.36225	27.29223	3.80759	10.76949	15.24559	1.29545	1.29249	1.39216	2.62719	7.41927	12.03023	1.27584	1.29616	1.39216	2.61655	7.40072																						

APÉNDICE D. DATOS PROCESADOS CON LOS PROGRAMAS LEEWDC Y REFLE

No.	S	h [m]	I [°]	H [m]	T [s]	f [Hz]	MANSAARD		MANSAARD																																	
							M_%CR_TOT	M_%CR_PIC	S1_ERMS	S1_HRMS	S1_HS	S1_T1	S1_T2	S1_TP	S2_ERMS	S2_HRMS	S2_HS	S2_T1	S2_T2	S2_TP	S3_ERMS	S3_HRMS	S3_HS	S3_T1	S3_T2	S3_TP	MR_ERMS	MR_HRMS	MR_HS	MR_T1	MR_T2	MR_TP	MI_ERMS	MI_HRMS	MI_T1	MI_T2	MI_TP	MT_ERMS	MT_HRMS	MT_HS	MT_T1	MT_T2
225		0.80	1.25000		19.2451	17.49545	3.14572	8.9745	12.59547	0.78123	0.78078	0.7833	2.55805	7.23526	10.24244	0.78053	0.78004	0.7833	2.6022	7.36014	10.41923	0.7793	0.77872	0.7833	0.54493	1.5413	2.1819	0.76414	0.76085	0.7833	2.83191	8.00696	11.38898	0.7823	0.78208	0.7833	3.00255	8.4925	12.02223	0.78188	0.78156	0.7833

Tabla D.6: Parámetros obtenidos a partir de la separación de las ondas incidente y reflejada, S = 2/3 [REFLE]

No.	S	h	I	H	T	f	MI_HS	H <sub>tr</sub> 1/3	K <sub>tr</sub>	No.	S	h	I	H	T	f	MI_HS	H <sub>tr</sub> 1/3	K <sub>tr</sub>	No.	S	h	I	H	T	f	MI_HS	H <sub>tr</sub> 1/3	K <sub>tr</sub>	
		[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]	[cm]	[cm]				[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]	[cm]	[cm]				[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]	[cm]	[cm]		
1		0.80	1.25000	11.20438	6.63980	0.59261				113	0.80	1.25000	11.24731	5.75360	0.51155					225	0.80	1.25000	11.33980	6.26330	0.55237					
2		1.00	1.00000	10.71965	6.49810	0.60619				114	1.00	1.00000	10.66713	5.53860	0.51922					226	1.00	1.00000	11.41881	7.16720	0.62767					
3		1.20	0.83333	11.29884	7.34850	0.65038				115	1.20	0.83333	11.47579	8.39580	0.73161					227	1.20	0.83333	12.04666	7.18880	0.59675					
4	0.08	1.40	0.71429	11.08216	8.57290	0.77350				116	1.40	0.71429	12.601	5.15920	0.40943					228	0.08	1.40	0.71429	11.80562	9.01390	0.77115				
5		1.60	0.62500	11.36497	7.26700	0.63942				117	1.60	0.62500	12.0882	7.25740	0.60037					229	1.60	0.62500	12.37458	8.28530	0.66954					
6		1.80	0.55556	11.08948	7.49850	0.67618				118	1.80	0.55556	11.47991	8.30130	0.72312					230	1.80	0.55556	11.71700	8.22050	0.69784					
7		2.00	0.50000	11.2438	7.60120	0.67603				119	2.00	0.50000	11.81074	7.07290	0.59885					231	2.00	0.50000	11.6873	7.78500	0.66611					
8		0.80	1.25000	16.25689	9.23070	0.56774				120	0.80	1.25000	15.61211	9.57670	0.61341					232	0.80	1.25000	14.67437	8.02140	0.54663					
9		1.00	1.00000	16.00367	10.35340	0.64694				121	1.00	1.00000	16.86659	8.61510	0.51078					233	1.00	1.00000	17.09389	7.79250	0.45573					
10		1.20	0.83333	17.83225	12.17120	0.68254				122	1.20	0.83333	17.30624	9.75870	0.56388					234	1.20	0.83333	19.36347	11.20500	0.57867					
11	0.12	1.40	0.71429	18.66071	11.39950	0.61088				123	1.40	0.71429	19.6795	8.55810	0.43487					235	0.12	1.40	0.71429	19.33174	13.61890	0.70448				
12		1.60	0.62500	17.32119	10.22480	0.59031				124	1.60	0.62500	18.69803	11.03740	0.59030					236	1.60	0.62500	18.65136	11.58970	0.62139					
13		1.80	0.55556	17.42891	10.95310	0.62844				125	1.80	0.55556	17.88344	12.69480	0.70986					237	1.80	0.55556	17.99091	12.04210	0.66934					
14	0	2.00	0.50000	17.18324	11.11190	0.64667				126	2.00	0.50000	17.79248	12.41850	0.69796					238	2.00	0.50000	18.07605	11.28270	0.62175					
15		0.80	1.25000							127	0.80	1.25000								239	0.80	1.25000								
16		1.00	1.00000	22.08936	12.52580	0.56705				128	1.00	1.00000	22.33816	11.20020	0.50139					240	1.00	1.00000	20.65476	9.15210	0.44310					
17		1.20	0.83333	24.70042	16.10120	0.65186				129	1.20	0.83333	24.06251	12.95520	0.53840					241	1.20	0.83333	25.41743	14.64940	0.57635					
18	0.16	1.40	0.71429	26.79712	15.78780	0.58516				130	1.40	0.71429	25.8872	12.46320	0.48144					242	0.16	1.40	0.71429	25.79072	17.06610	0.66455				
19		1.60	0.62500	24.2927	14.75070	0.60821				131	1.60	0.62500	24.95706	15.36500	0.63968					243	1.60	0.62500	25.24076	17.13920	0.64585					
20		1.80	0.55556	24.3273	15.23870	0.62640				132	1.80	0.55556	24.31176	17.0580	0.72828					244	1.80	0.55556	23.79363	16.44220	0.69112					
21	0	2.00	0.50000	23.92001	13.18100	0.55104				133	2.00	0.50000	23.88462	17.95440	0.75301					245	2.00	0.50000	24.86334	16.75450	0.67310					
22		0.80	1.25000							134	0.80	1.25000								246	0.80	1.25000								
23		1.00	1.00000							135	1.00	1.00000								247	1.00	1.00000								
24		1.20	0.83333	30.43225	18.02920	0.59244				136	1.20	0.83333	29.21452	15.78980	0.54048					248	1.20	0.83333	29.79361	16.88470	0.56672					
25	0.20	1.40	0.71429	29.9382	19.12130	0.63869				137	1.40	0.71429	30.23304	18.01390	0.59583					249	0.20	1.40	0.71429	31.18859	22.78740	0.73063				
26		1.60	0.62500	30.46222	18.82920	0.61812				138	1.60	0.62500	31.41768	19.87400	0.63257					250	1.60	0.62500	31.51723	18.59210	0.58990					
27		1.80	0.55556	30.96838	21.57800	0.69678				139	1.80	0.55556	30.91156	23.28920	0.75341					251	1.80	0.55556	30.57131	20.73640	0.67826					
28	0	2.00	0.50000	31.32054	15.42550	0.49250				140	2.00	0.50000	31.50888	24.60890	0.77951					252	2.00	0.50000	31.14785	22.67770	0.73442					
29		0.80	1.25000	10.87187	6.86020	0.63100				141	0.80	1.25000	11.29521	6.84790	0.60627					253	0.80	1.25000	11.15659	6.67730	0.59856					
30		1.00	1.00000	10.38294	6.97970	0.67223				142	1.00	1.00000	10.85844	5.77920	0.53223					254	1.00	1.00000	11.48547	7.44790	0.64846					
31	0.08	1.20	0.83333	11.16463	6.31280	0.58516				143	1.20	0.83333	10.88432	7.68940	0.70564					255	0.08	1.20	0.83333	11.39220	14.53920	0.66455				
32		1.40	0.71429	12.3598	7.77830	0.63058				144	1.40	0.71429	12.11636	6.55650	0.54113					256	1.40	0.71429	10.75776	6.17129	0.62460					
33		1.60	0.62500	11.1033	6.68980	0.60251				145	1.60	0.62500	12.19376	6.83800	0.56078					257	1.60	0.62500	11.29563	7.26240	0.64294					
34		1.80	0.55556	11.09366	7.84630	0.70728				146	1.80	0.55556	12.04619	7.28020	0.60436					258	1.80	0.55556	11.01085	6.96580	0.62852					
35	0	2.00	0.50000	11.39427	7.41570	0.65083				147	2.00	0.50000	12.17227	7.41980	0.60957					259	2.00	0.50000	10.98997	6.98880	0.63630					
36		0.80	1.25000	15.03466	9.54140	0.63463				148	0.80	1.25000	14.93264	9.88460	0.66195					260	0.80	1.25000	14.92882	7.91530	0.53025					
37		1.00	1.00000	15.95899	12.08560	0.75729				149	1.00	1.00000	16.73297	9.97760	0.53652					261	1.00	1.00000	16.0802	8.50340	0.52881					
38		1.20	0.83333	17.61217	10.63100	0.60362				150	1.20	0.83333	17.16359	10.38070	0.60481					262	1.20	0.83333	16.4811	10.63470	0.64527					
39	0.12	1.40	0.71429	19.56794	11.75710	0.60083				151	1.40	0.71429	18.71211	8.68860	0.46433					263	0.12	1.40	0.71429	17.15397	10.06060	0.58474				
40		1.60	0.62500	17.42622	10.01380	0.57796				152	1.60	0.62500	18.54757	10.73510	0.57879					264	1.60	0.62500	17.57803	10.60780	0.60452					
41		1.80	0.55556	17.4617	11.23300	0.64329				153	1.80	0.55556	18.39335	11.83980	0.64370					265	1.80	0.55556	17.25017	10.98910	0.63682					
42	10	2.00	0.50000	17.30003	10.96180	0.62639				154	2.00	0.50000	18.59001	10.97130	0.59017					266	10	2.00	0.50000	16.59113	12.17990	0.73412				
43		0.80	1.25000							155	0.80	1.25000								267	0.80	1.25000								
44		1.00	1.00000	20.23771	12.63770	0.62446				156	1.00	1.00000	21.30742	11.63850	0.54622					268	1.00	1.00000	20.22385	9.63740	0.47654					
45		1.20	0.83333	24.91814	15.27270	0.61291				157	1.20	0.83333	23.73075	13.09680	0.55189					269	1.20	0.83333	23.10895	14.40170	0.62326					
46	0.16	1.40	0.71429	28.11664	17.12030	0.60890				158	1.40	0.71429	24.48616	12.71910	0.51944					270	0.16	1.40	0.71429	24.48623	15.51260	0.55184				
47		1.60	0.62500	23.54151	14.08320	0.59823				159	1.60	0.62500	24.7303	15.41160	0.62319					271	1.60	0.62500	31.42875	15.58800	0.49575					
48		1.80	0.55556	24.29857	15.49790	0.63781				160	1.80	0.55556	24.64311	17.47200	0.70900					272	1.80	0.55556	28.58766	16.02610	0.56060					
49	0	2.00	0.																											



## Apéndice E

### *Velocidades procesadas*

---

Lo concerniente a las velocidades procesadas, tanto a la entrada como a la salida, se anexan en las tablas a continuación presentadas.

Las velocidades a la entrada medidas con el tercer ADV (A-3) y procesadas con el programa SUAVI.f90 se incluyen en la primera tabla (E.1); ésta contiene: velocidad media de entrada,  $\bar{v}_e$ ; velocidad promedio de las crestas (máximos,  $\overline{v_{e\max}}$ ) y velocidad máxima,  $v_{e\max}$ .

El historial de velocidades de los chorros de salida obtenidos a partir del FlowMap se distribuyen en tres tablas (E.2, E.3 y E.4), correspondiendo cada una de éstas a un valor de  $S$ .

Finalmente dentro de la tabla E.5 se concentra el procesado de los historiales de velocidad realizado con el programa PROMATRIZ.f90, consistente en calcular: el número de chorros; tiempo promedio del chorro,  $t_{\text{chorro}}$ ; velocidad promedio de salida,  $\bar{v}_s$  y velocidad máxima de salida,  $v_{s\max}$ .

# APÉNDICE E. VELOCIDADES PROCESADAS

No.	S	h	I	H	T	f	$\bar{v}_e$	$\overline{v_{e\ max}}$	$v_{e\ max}$	No.	S	h	I	H	T	f	$\bar{v}_e$	$\overline{v_{e\ max}}$	$v_{e\ max}$	No.	S	h	I	H	T	f	$\bar{v}_e$	$\overline{v_{e\ max}}$	$v_{e\ max}$
		[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]			[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]			[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]
1	0.80	1.25000	10.46171	20.37000	22.30000					113	0.80	1.25000	9.18184	18.49000	19.30000					225	0.80	1.25000	8.40757	17.47000	18.30000				
2	1.00	1.00000	11.30461	22.40241	24.32411					114	1.00	1.00000	10.00335	18.80000	20.30000					226	1.00	1.00000	9.31751	20.96000	22.40000				
3	1.20	0.83333	10.68936	21.88000	25.00000					115	1.20	0.83333	10.36993	19.10000	21.90000					227	1.20	0.83333	6.67653	22.19101	32.10000				
4	1.40	0.71429	11.42101	23.20000	25.00000					116	1.40	0.71429	12.09167	30.58128	45.71278					228	1.40	0.71429	6.67006	18.46000	20.80000				
5	1.60	0.62500	22.06520	49.12244	54.70000					117	1.60	0.62500	14.61463	40.03226	47.10000					229	1.60	0.62500	5.80664	20.69649	25.60000				
6	1.80	0.55556	7.63775	30.39087	56.70000					118	1.80	0.55556	9.09387	34.98876	47.40000					230	1.80	0.55556	5.28412	20.50770	31.70000				
7	2.00	0.50000	7.02574	18.92000	33.70000					119	2.00	0.50000	7.63249	25.46218	42.30000					231	2.00	0.50000	4.64476	16.66195	20.50000				
8	0.80	1.25000	14.41036	27.03000	29.80000					120	0.80	1.25000	11.88496	24.6273	26.60000					232	0.80	1.25000	10.59538	22.89000	24.40000				
9	1.00	1.00000	15.71271	32.19743	43.00000					121	1.00	1.00000	13.69191	25.83000	27.40000					233	1.00	1.00000	12.16993	31.26995	42.20000				
10	1.20	0.83333	18.06225	34.51000	38.50000					122	1.20	0.83333	15.45378	35.20000	41.80000					234	1.20	0.83333	7.35478	22.40866	27.60000				
11	1.40	0.71429	23.77857	67.83499	87.80000					123	1.40	0.71429	16.73176	47.14000	66.90000					235	1.40	0.71429	8.01240	29.76236	48.26767				
12	1.60	0.62500	10.59663	26.70946	36.07450					124	1.60	0.62500	12.35391	36.04519	48.25191					236	1.60	0.62500	6.89337	25.36340	40.13397				
13	1.80	0.55556	11.89956	29.71000	36.90000					125	1.80	0.55556	16.18308	40.99846	61.80000					237	1.80	0.55556	9.15819	31.36920	36.20000				
14	2.00	0.50000	14.31504	33.88274	45.50000					126	2.00	0.50000	13.86867	36.67209	52.20000					238	2.00	0.50000	8.97709	26.82305	34.51526				
15	0.80	1.25000								127	0.80	1.25000								239	0.80	1.25000							
16	1.00	1.00000	18.69706	46.10360	59.90000					128	1.00	1.00000	18.51700	37.85000	41.00000					240	1.00	1.00000	12.78788	35.16043	39.20000				
17	1.20	0.83333	26.98467	62.18000	80.20000					129	1.20	0.83333	21.58615	61.77025	71.30000					241	1.20	0.83333	10.46791	34.31713	41.70000				
18	1.40	0.71429	13.02226	25.36038	38.30000					130	1.40	0.71429	13.81382	35.27555	48.80000					242	1.40	0.71429	10.93295	34.89773	60.15092				
19	1.60	0.62500	15.36914	45.20000						131	1.60	0.62500	16.67192	44.22966	56.50000					243	1.60	0.62500	11.82897	35.55670	41.90000				
20	1.80	0.55556	19.45159	41.81437	47.20000					132	1.80	0.55556	22.58086	55.00000	65.90000					244	1.80	0.55556	16.20205	46.42223	59.20000				
21	2.00	0.50000	17.92344	41.18080	48.10000					133	2.00	0.50000	22.63900	57.01057	65.90000					245	2.00	0.50000	14.03887	41.07212	53.28512				
22	0.80	1.25000								134	0.80	1.25000								246	0.80	1.25000							
23	1.00	1.00000								135	1.00	1.00000								247	1.00	1.00000							
24	1.20	0.83333	18.21008	62.36101	71.86709					136	1.20	0.83333	20.93659	54.11932	70.98935					248	1.20	0.83333	13.65788	38.33466	44.34661				
25	1.40	0.71429	18.31391	41.04925	46.50000					137	1.40	0.71429	17.55424	47.40754	61.15030					249	1.40	0.71429	17.53257	51.33262	60.00000				
26	1.60	0.62500	18.40188	43.55000	46.50000					138	1.60	0.62500	18.48926	49.67163	57.84656					250	1.60	0.62500	15.31806	42.20369	58.39088				
27	1.80	0.55556	22.52581	54.93000	62.30000					139	1.80	0.55556	26.02061	56.09674	64.20000					251	1.80	0.55556	18.48695	48.53000	58.60000				
28	2.00	0.50000	19.89576	57.50511	66.50000					140	2.00	0.50000	26.65757	66.66619	77.10000					252	2.00	0.50000	18.94098	48.59903	63.93514				
29	0.80	1.25000	9.22788	18.54000	23.10000					141	0.80	1.25000	9.14391	18.82000	20.50000					253	0.80	1.25000	8.64359	17.59000	19.90000				
30	1.00	1.00000	9.13443	18.57339	21.90000					142	1.00	1.00000	9.46818	17.86000	19.90000					254	1.00	1.00000	8.23533	18.40280	20.70000				
31	1.20	0.83333	13.67236	25.36038	38.30000					143	1.20	0.83333	9.23910	15.74877	19.60000					255	1.20	0.83333	6.55892	14.91000	16.50000				
32	1.40	0.71429	10.36914	30.43943	41.21987					144	1.40	0.71429	11.00000	16.67192	24.29966					256	1.40	0.71429	11.82897	35.55670	41.90000				
33	1.60	0.62500	14.02826	36.44000	41.30000					145	1.60	0.62500	10.76633	30.81227	49.42269					257	1.60	0.62500	7.07709	21.43193	37.10000				
34	1.80	0.55556	15.52017	41.76196	55.30000					146	1.80	0.55556	8.10801	24.22529	41.85292					258	1.80	0.55556	5.30559	17.09000	23.00000				
35	2.00	0.50000	11.92194	31.17000	41.30000					147	2.00	0.50000	8.60899	24.01405	34.10000					259	2.00	0.50000	5.55900	19.01939	48.68136				
36	0.80	1.25000	14.81583	32.75175	38.50000					148	0.80	1.25000	19.25880	25.41669	29.30000					260	0.80	1.25000	9.97599	21.55000	29.00000				
37	1.00	1.00000	12.86531	30.07000	38.40000					149	1.00	1.00000	12.32795	23.60000	25.40000					261	1.00	1.00000	9.68116	27.34000	37.90000				
38	1.20	0.83333	15.94359	50.69701	61.70000					150	1.20	0.83333	14.80279	33.38000	37.80000					262	1.20	0.83333	8.98473	33.46615	25.60000				
39	1.40	0.71429	10.09953	26.06754	46.99537					151	1.40	0.71429	15.95098	46.08615	70.20000					263	1.40	0.71429	10.19711	26.29000	30.00000				
40	1.60	0.62500	5.82989	18.43902	21.35360					152	1.60	0.62500	18.38704	41.62636	55.20000					264	1.60	0.62500	6.93543	23.91000	32.00000				
41	1.80	0.55556	10.34577	26.80314	35.20000					153	1.80	0.55556	12.99887	39.09225	53.70000					265	1.80	0.55556	7.97861	26.60000	38.30000				
42	2.00	0.50000	12.12033	30.81000	36.80000					154	2.00	0.50000	9.84224	27.74383	32.95958					266	2.00	0.50000	8.53485	25.43659	35.50000				
43	0.80	1.25000								155	0.80	1.25000								267	0.80	1.25000							
44	1.00	1.00000	13.45615	36.50288	45.50393					156	1.00	1.00000	17.73213	33.70000	34.70000					268	1.00	1.00000	10.97804	28.18000	34.30000				
45	1.20	0.83333	12.82620	40.91586	63.92928					157	1.20	0.83333	20.63715	50.20000	58.40000					269	1.20	0.83333	11.23143	29.89000	31.00000				
46	1.40	0.71429	6.44969	23.40455	34.95272					158	1.40	0.71429	20.37834	50.20630	75.50000					270	1.40	0.71429	10.30908	30.40000	34.00000				
47	1.60	0.62500	10.31555	23.85994	27.09938					159	1.60	0.62500	19.41046	57.37999	91.26328					271	1.60	0.62500	7.65536	27.06877	49.59385				
48	1.80	0.55556	17.88037	38.05198	42.80000					160	1.80	0.55556	13.08859	45.38353	65.78														











No.	S	h	I	H	T	f	cho	t <sub>chorro</sub>	v <sub>r</sub>	v <sub>smax</sub>	No.	S	h	I	H	T	f	cho	t <sub>chorro</sub>	v <sub>r</sub>	v <sub>smax</sub>	No.	S	h	I	H	T	f	cho	t <sub>chorro</sub>	v <sub>r</sub>	v <sub>smax</sub>		
		[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]		[s]	[cm/s]	[cm/s]			[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]		[s]	[cm/s]	[cm/s]			[m]	[°]	[m]	[s]	[Hz]		[s]	[cm/s]	[cm/s]		
1		0.80	1.25000	2	0.4667	214.3071	336.000				113		0.80	1.25000	4	0.5000	520.0233	1280.000				225		0.80	1.25000	7	0.2667	285.5714	468.000					
2		1.00	1.00000	2	0.4000	284.0433	462.675				114		1.00	1.00000	4	0.5833	612.1486	2134.000				226		1.00	1.00000	6	0.3667	319.3030	916.000					
3		1.20	0.83333	2	0.5000	434.5740	879.000				115		1.20	0.83333	4	0.4833	473.7828	1633.000				227		1.20	0.83333	2	0.6667	424.7500	1171.000					
4		1.40	0.71429	2	0.5000	363.6133	759.000				116		0.80	1.40	0.71429	4	0.5000	917.6667	2600.000				228		0.80	1.40	0.71429	2	0.6667	639.8000	1251.000			
5		1.60	0.62500	1	0.8667	428.4154	917.600				117		1.60	0.62500	3	0.4667	487.4286	2004.000				229		1.60	0.62500	2	0.7000	649.9048	1614.000					
6		1.80	0.55556	1	1.1333	533.6683	1211.250				118		1.80	0.55556	3	0.5111	520.0435	1533.000				230		1.80	0.55556	2	0.8000	637.8333	1465.000					
7		2.00	0.50000	2	1.0333	595.3027	1184.000				119		2.00	0.50000	2	0.9333	510.2618	1773.000				231		2.00	0.50000	2	0.8000	513.2917	1453.000					
8		0.80	1.25000	2	0.3667	209.4955	419.750				120		0.80	1.25000	5	0.5667	585.6948	1529.000				232		0.80	1.25000	3	0.5333	285.4167	700.000					
9		1.00	1.00000	2	0.5000	327.9200	626.000				121		1.00	1.00000	3	0.7111	581.0344	2246.000				233		1.00	1.00000	5	0.5600	457.2143	1118.000					
10		1.20	0.83333	1	0.9333	346.2643	751.500				122		1.20	0.83333	3	0.7566	647.3294	2815.000				234		1.20	0.83333	2	0.7667	542.5217	2389.000					
11		1.40	0.71429	2	1.0667	514.7181	1469.150				123		0.80	1.40	0.71429	3	0.6444	998.1896	3069.000				235		0.80	1.40	0.71429	2	0.6333	841.2105	2542.000			
12		1.60	0.62500	2	0.9667	536.1339	1388.250				124		1.60	0.62500	2	0.7333	673.6454	1913.000				236		1.60	0.62500	3	0.6222	702.2857	2009.000					
13		1.80	0.55556	2	0.9333	720.4097	1543.500				125		1.80	0.55556	2	1.0333	699.9709	2291.000				237		1.80	0.55556	2	0.7667	890.8696	2470.000					
14		2.00	0.50000	1	1.2667	986.3442	1803.450				126		2.00	0.50000	2	0.5000	595.5067	1780.000				238		2.00	0.50000	2	0.7667	917.0909	2099.000					
15		0.80	1.25000	2	0.3667	209.4955	419.750				127		0.80	1.25000	5	0.5667	585.6948	1529.000				239		0.80	1.25000	3	0.5333	285.4167	700.000					
16		1.00	1.00000	2	0.5000	327.9200	626.000				128		1.00	1.00000	4	0.7667	586.7805	2270.000				240		1.00	1.00000	4	0.5000	477.8833	1218.000					
17		1.20	0.83333	2	0.9000	683.3519	1875.000				129		1.20	0.83333	3	0.8222	719.2973	2541.000				241		1.20	0.83333	3	0.6444	693.3793	1621.000					
18		1.40	0.71429	2	1.1667	781.4971	3333.000				130		1.40	0.71429	2	0.8333	794.8800	2971.000				242		1.40	0.71429	3	0.4667	829.8571	2387.000					
19		1.60	0.62500	1	1.2000	784.4000	2777.000				131		1.60	0.62500	2	0.9333	848.9286	3434.000				243		1.60	0.62500	2	0.6333	710.0000	2192.000					
20		1.80	0.55556	2	1.1000	750.1900	2108.000				132		1.80	0.55556	2	0.9333	705.1500	2763.000				244		1.80	0.55556	3	0.4889	925.1500	2073.000					
21		2.00	0.50000	2	1.0667	876.1563	2576.000				133		2.00	0.50000	2	0.8333	864.4520	5146.000				245		2.00	0.50000	2	0.7000	899.2857	2261.000					
22		0.80	1.25000	2	0.3667	209.4955	419.750				134		0.80	1.25000	5	0.5667	585.6948	1529.000				246		0.80	1.25000	3	0.5333	285.4167	700.000					
23		1.00	1.00000	2	0.5000	327.9200	626.000				135		1.00	1.00000	3	0.7566	647.3294	2815.000				247		1.00	1.00000	5	0.5600	457.2143	1118.000					
24		1.20	0.83333	3	0.7333	815.1061	2216.000				136		1.20	0.83333	2	0.9333	576.0214	2196.000				248		1.20	0.83333	3	0.6222	829.1179	2773.000					
25		1.40	0.71429	2	1.1000	536.4788	1500.000				137		1.40	0.71429	2	0.9333	586.2036	1587.000				249		1.40	0.71429	2	0.6333	1020.1840	3186.000					
26		1.60	0.62500	2	1.2333	703.2811	2768.000				138		1.60	0.62500	2	1.1000	508.2364	2016.000				250		1.60	0.62500	2	0.6000	713.2778	1926.000					
27		1.80	0.55556	2	1.0000	986.2133	3455.000				139		1.80	0.55556	2	1.0667	589.2813	1897.000				251		1.80	0.55556	2	0.7000	942.8524	2984.000					
28		2.00	0.50000	2	0.8000	1067.4210	3413.000				140		2.00	0.50000	2	1.1333	744.6676	2231.000				252		2.00	0.50000	2	0.7000	983.7143	3108.000					
29		0.80	1.25000	1	0.2667	151.5250	208.000				141		0.80	1.25000	5	0.3200	381.3459	1300.000				253		0.80	1.25000	9	0.2148	611.7931	1321.000					
30		1.00	1.00000	0	0.0000	0.0000	0.000				142		1.00	1.00000	3	0.3556	312.3938	634.000				254		1.00	1.00000	6	0.3111	601.2143	1276.000					
31		1.20	0.83333	3	0.2222	132.9740	172.000				143		1.20	0.83333	2	0.5000	533.3000	1300.000				255		1.20	0.83333	3	0.3778	1086.1770	2688.000					
32		1.40	0.71429	3	0.3333	354.5533	771.000				144		1.40	0.71429	2	0.5667	797.4000	2174.000				256		1.40	0.71429	3	0.4000	1108.8890	2605.000					
33		1.60	0.62500	0	0.0000	0.0000	0.000				145		1.60	0.62500	2	0.4333	549.0769	1793.000				257		1.60	0.62500	3	0.3556	1156.5630	2872.000					
34		1.80	0.55556	0	0.0000	0.0000	0.000				146		1.80	0.55556	2	0.3000	930.4445	2237.000				258		1.80	0.55556	2	0.3667	1094.6360	2310.000					
35		2.00	0.50000	0	0.0000	0.0000	0.000				147		2.00	0.50000	2	0.2333	442.1429	1069.000				259		2.00	0.50000	2	0.4000	897.3333	1803.000					
36		0.80	1.25000	4	0.2000	235.0583	348.000				148		0.80	1.25000	4	0.2500	496.9333	1099.000				260		0.80	1.25000	8	0.2000	468.6250	1005.000					
37		1.00	1.00000	4	0.4000	423.7875	1533.000				149		1.00	1.00000	4	0.4167	585.5200	3615.000				261		1.00	1.00000	4	0.4167	491.7200	1111.000					
38		1.20	0.83333	3	0.4667	418.2267	1144.000				150		1.20	0.83333	3	0.4667	918.5667	2418.000				262		1.20	0.83333	3	0.3556	880.9600	2301.000					
39		1.40	0.71429	3	0.5778	595.2562	2094.000				151		1.40	0.71429	3	0.4667	898.7619	2311.000				263		1.40	0.71429	3	0.6222	1040.8930	2944.000					
40		1.60	0.62500	2	0.4667	341.7679	1086.500				152		1.60	0.62500	2	0.5333	845.7750	2445.000				264		1.60	0.62500	2	0.6333	893.2105	3091.000					
41		1.80	0.55556	2	0.3667	449.2573	1008.000				153		1.80	0.55556	2	0.4667	742.0714	2100.000				265		1.80	0.55556	2	0.4667	1070.9290	3177.000					
42		2.00	0.50000	1	0.4000	480.8333	1072.000				154		2.00	0.50000	2	0.5667	802.0000	2446.000				266		2.00	0.50000	2	0.4333	919.0000	2548.000					
43		0.80	1.25000	2	0.3667	209.4955	419.750				155		0.80	1.25000	5	0.5667	585.6948	1529.000				267		0.80	1.25000	3	0.5333	285.4167	700.000					
44		1.00	1.00000	3	0.5333	557.8250	1462.000				156		1.00	1.00000	4	0.5333	769.6250	2120.000				268		1.00	1.00000	6	0.2889	542.1539	1088.000					
45		1.20	0.83333	3	0.5778	587.0769																												



## Apéndice F

### *Energía*

---

Los cálculos realizados durante el análisis energético se incluyen en la siguiente relación tabular dividida, por su extensión en filas, en tres tablas correspondiendo cada una de éstas a un valor de  $S$ .

En el sentido de las columnas presenta una separación en tres secciones: energía que entra, energía que sale y eficiencias.

Dentro de la energía que entra, se presentan los valores de los parámetros correspondientes a los dos cálculos realizados con el programa TOTAL\_ENERGY.f90, uno con las alturas de ola teóricas ( $H$ ) y otro con las alturas de ola medidas ( $H$  medida); con dicho programa se obtiene la energía captada por el *Blow-Jet*, además de incluir el cálculo de la velocidad horizontal de las partículas,  $\bar{u}_e$ .

En la sección de energía que sale se incluye: el tiempo promedio del chorro y las velocidades promedio ( $\bar{v}_s$ ) y máxima ( $v_{smax}$ ) obtenidas con el programa PROMATRIZ; la distancia vertical del nivel del agua al chorro, para el cálculo de la energía potencial; así como el gasto, volumen y masa igualmente requeridos para calcular la energía cinética y potencial de salida. Las energías cinética, potencial y total se calcularon con base en la velocidad promedio y en la velocidad máxima.

La últimas ocho columnas corresponden a las eficiencias, las cuales representan todas las combinaciones posibles entre las dos  $TE_e$  calculadas (con  $H$  medida y teórica) y  $KE_s$  ( con  $\bar{v}_s$  y  $v_{smax}$ ) así como  $TE_s$  ( con  $\bar{v}_s$  y  $v_{smax}$ ).





No.	S	h	I	H	H mediana	T	T [Hz]	MEDIDAS											ENERGÍA QUE SALE											TEÓRICOS											EFICIENCIAS											MEDIDAS											TEÓRICOS										
								MEDIDAS											ENERGÍA QUE SALE											TEÓRICOS											EFICIENCIAS											MEDIDAS											TEÓRICOS										
								L [m]	h [m]	H [m]	T [s]	T [Hz]	$\Sigma v_{rms}$ [m/s]	$\Sigma SK_{E_{med}}$ [N/m]	$KE_{E_{med}}$ [N/m]	ANCHO [m]	$KE_{E_{med}}$ [N/m]	$PE_{E_{med}}$ [N/m]	$TE_{E_{med}}$ [N/m]	$\Sigma v_{rms}$ [m/s]	$\Sigma SK_{E_{med}}$ [N/m]	$KE_{E_{med}}$ [N/m]	ANCHO [m]	$KE_{E_{med}}$ [N/m]	$PE_{E_{med}}$ [N/m]	$TE_{E_{med}}$ [N/m]	$v_{rms}$ [m/s]	$Q$ [m²/s²]	$V$ [m³/s]	$m$ [kg]	$KE_{E_{med}}$ [N/m]	$PE_{E_{med}}$ [N/m]	$TE_{E_{med}}$ [N/m]	$v_{rms}$ [m/s]	$Q$ [m²/s²]	$V$ [m³/s]	$m$ [kg]	$KE_{E_{med}}$ [N/m]	$PE_{E_{med}}$ [N/m]	$TE_{E_{med}}$ [N/m]	$v_{rms}$ [m/s]	$Q$ [m²/s²]	$V$ [m³/s]	$m$ [kg]	$KE_{E_{med}}$ [N/m]	$PE_{E_{med}}$ [N/m]	$TE_{E_{med}}$ [N/m]																										
1								0.07915	0.80	1.25000	0.9979	6.2964	45109	12334.640	0.26701	942114.9	20.88530	0.942115	0.34577	1.32525	1.29176	2.23388	1.9979	6.2964	45109	12334.640	0.27189	962966.7	21.34755	0.96297	1.35394	1.29176	2.25473	0.4667	214.3071	336.0000	0.0600	0.21431	0.00007	0.000034	0.03836	0.00077	0.01981	0.02058	0.39600	0.00011	0.000008	0.00194	0.00043	0.00249	0.00291	0.03460	0.92142	0.01905	1.3047	0.03428	0.01290	0.01887	1.2926	0.0338	0.88047	0.03898	0.01870	0.00943	0.0748	0.0354	0.0147						

Tabla F.1: Análisis energético, S = 1/3







# Bibliografía

---

- [Alcorn y Lewis, 2008] **Alcorn, R. y T. Lewis** (2008). *Future Energy Chapter 8, Wave Energy*, Trevor M. Letcher, Elsevier. Linacre House, Hordan Hill, Oxford OX2 8DP. pp. 129-144. ISBN 978-0-08-054808-1.
- [Banner y Peregrine, 1993] **Banner, M.L. and D.H. Peregrine** (1993). “Wave Breaking in Deep Water”. *Annual Review of Fluid Mechanics*. Vol. 25, January 1993, pp. 373-397.
- [Bazán y Fernández, 2008] **Bazán-Perkins S.D. y Fernández-Zayas J.L.** (2008). “Evaluation of Mexico’s 1975-2000 energy plan”. *Energy Economics*, Vol. 30, No. 5, September 2008, pp. 2569-2586.
- [Belessiotis y Delyannis, 2000] **Belessiotis, V. y E. Delyannis** (2000). “The history of renewable energies for water desalination”. *Desalination*, Vol. 128, No. 2, April 2000, pp. 147-159.
- [Beresford, 2003] **Beresford, P J** (2003). *HR Wave Maker generation control program. Software Manual*. Report IT 453 (Issue 5), August 2003 HR Wallingford Ltd. Howbery Park, Wallingford, Oxon OX10 8BA, UK.
- [Bixby, 1963] **Bixby, W.** (1963). *WAVES Pathways of Energy*. David McKay and company, inc. New York.
- [Boud, 2003] **Boud, R.** (2003). *Wave and Marine Current Energy*. AEA Technology Future Energy Solutions, UK Department of Trade and Industry.
- [Breeze, 2005] **Breeze, P.** (2005). *Power Generation Technologies*. Newnes Elsevier, Linacre House, Hordan Hill, Oxford OX2 8DP. pp. 204-218. ISBN 978-0-7506-6313-7.
- [Cohen, 1982] **Cohen, R.** (1982). “Energy from the ocean”. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 307, 1982, pp. 405-437.
- [Dantec Dynamics, 2002] **Dantec Dynamics** (2002). *Flow Manager software and Introduction to PIV Instrumentation. Software Users guide*. Dantec Dynamics, September 2002, Tonsbakken 18, DK-2740 Skovlunde, Denmark.
- [Dean, 1970] **Dean, R.G.** (1970). “Relative Validities of Water Wave Theories”. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE*. Vol. 96, No. 1, February 1970, pp. 105-119.

- [Dean y Dalrymple, 1991] **Dean, R.G. y R.A. Dalrymple** (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific Publishing, Advanced Series on Ocean Engineering: v. 2. ISBN 9810204205.
- [Duckers, 1995] **Duckers, L.** (1995). “Wave power-wave, tidal and low-head hydro technologies”. *Power Engineering Journal*, Vol. 9, No. 4, June 1995, pp. 164-172.
- [Duckers, 2000] **Duckers, L.** (2000). “Wave Power”. *Engineering Science and Education Journal*, Vol. 9, No. 3, June 2000, pp. 113-122.
- [Falcão, 2010] **Falcão, A. F. O.** (2010). “Wave energy utilization: A review of the technologies”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 3, April 2010, pp. 899-918.
- [Fuller, 1978] **Fuller, R.D.** (1978). “Ocean Thermal Energy Conversion”. *Ocean Management*, Vol. 4, No. 2-4, December 1978, pp. 241-258.
- [Huacuz, 2005] **Huacuz, J. M.** (2005). “The road to green power in Mexico-reflections on the prospects for the large-scale and sustainable implementation of renewable energy”. *Energy Policy*, Vol. 33, No. 16, November 2005, pp. 2087-2099.
- [HR Wallingford] **HR Wallingford**. *Equipment and Instrumentation for Physical Models and Field Measurements*. HR Wallingford Ltd. Howbery Park, Wallingford, Oxon OX10 8BA, UK.
- [Jeffreys, 1925] **Jeffreys, H.** (1925). “On the Formation of Water Waves by Wind”. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 107, No. 742, February 1925, pp. 189-206.
- [Johnson et al., 1978] **Johnson, R.R.; E.P.D. Mansard y J. Ploeg** (1978). “Effects of wave grouping on breakwater stability”. *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering* 1978, pp. 2228-2243.
- [Khan y Bhuyan, 2009] **Khan, J. y G.S. Bhuyan** (2009). *Ocean Energy: Global Technologies Development Status*. Report prepared by Powertech Labs for the IEA-OES, British Columbia, Canada, V3W 7R7.
- [Khan et al., 2009] **Khan, M.J.; G. Bhuyan; M.T. Iqbal y J.E. Quaicoe** (2009). “Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review”. *Applied Energy*, Vol. 86, No. 10, October 2009, pp. 1823-1835.
- [Kinsman, 1965] **Kinsman, B** (1965), *Wind waves*, Printice-Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey.
- [Krasnov et al., 2005] **Krasnov, M. L.; A. I. Kiseliov y G. I. Makárenko** (2005). *Cálculo variacional. Breve exposición de material teórico y problemas con soluciones detalladas. Serie “Curso de matemáticas superiores en problemas resueltos”*. URSS. ISBN 5-354-01100-0 ISBN-13: 9785354011001.

- [Lopes, 2009] **Lopes, R. C.** (2009). “On the concept of energy: History and philosophy for science teaching”. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, Vol. 1, No. 1, 2009, pp. 2648-2652.
- [Massel, 1996] **Massel, S. R.** (1996). *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction*. World Scientific Publishing, Advanced Series on Ocean Engineering: v. 11. ISBN 9810216866.
- [McKay, 2009] **McKay, D. JC** (2009). *Sustainable Energy - Without hot air*, UIT Cambridge. Cambridge, England CB4 1GQ. pp. 73-75. ISBN 978-1-906860-01-1 (hardback).
- [Nortek AS, 2009] **Nortek AS** (2009). *Vectrino Velocimeter. User guide*. Nortek AS, Vangkroken 2, NO-1351 RUD, Norway.
- [OECD/IEA, 2006] **OECD/IEA.** (2006). *Renewable Energy: RDD Priorities*. Actis, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France. ISBN 92-64-10955-2.
- [OECD/IEA, 2007] **OECD/IEA.** (2007). *Renewables in Global Energy Supply*. IEA, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.
- [OECD/IEA, 2009] **OECD/IEA.** (2009). *Key World Energy Statistics*. STEDI MEDIA, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.
- [OES/IA, 2009] **OES/IA.** (2009). *Annual Report*. A Brito-Melo and J. Huckerby, Wave Energy Centre, Av. Manuel da Mai, 36, r/c Dt°, 1000-201, Lisbon, Portugal.
- [O Rourke et al., 2010] **O Rourke, F.; F. Boyle y A. Reynolds** (2010). “Tidal energy update 2009”. *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, February 2010, pp. 398-409.
- [Pardo, 1993] **Pardo, C.J. A.** (1993). *Las Fuentes de Energía*. Editorial Síntesis, Vallehermoso, 32-28015 Madrid, España. ISBN 84-7738-197-6.
- [Pilarczyk y Zeidler, 1996] **Pilarczyk, K. W. y R. B. Zeidler** (1996). *Offshore Breakwaters and Shore Evolution Control*. A.A. Balkema, Rotterdam, printed in Netherlands. ISBN 90 5410 627 1.
- [Plocek y Laboy, 2009] **Plocek, T.J. y M. Laboy** (2009). “Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): Technical Viability, Cost Projections and Development Strategies”. *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, 4-7 May 2009.
- [Post et al., 2007] **Post, J. W.; J. Veerman; H. V.M. Hamelers; G. J.W. Euverink; S. J. Metz; K. Nymeijer y C. J.N. Buisman.** (2007). “Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis”. *Journal of Membrane Science*, Vol. 288, No. 1-2,1, February 2007, pp. 218-230.
- [Queens University Belfast, 2002] **Queens University Belfast** (2002). *Islay Limpet Wave Power Plant*, Queens University Belfast, BT9 5AG.
- [Repper, 1983] **Repper, L.** (1983). “Energía del Oleaje”. En: *Información Científica y Tecnológica*. Vol. 5 (82) pp. 18-19.

- [Silva, 2005] **Silva, R.C.** (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Serie Docencia, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México D.F. ISBN 970-32-2813-5.
- [Taveira y Silva, 2006] **Taveira, P. F. y Silva R.** (2006). “Specific kinetic energy concept for regular waves”. *Ocean Engineering*, Vol. 33, No. 10, July 2006, pp. 1283-1298.



*“He redactado esta carta más extensa de lo usual  
porque carezco de tiempo para escribirla más breve”*

**Blaise Pascal.**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO