



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**PUESTA EN MARCHA DE CANAL CON GENERADOR DE OLAS Y  
CARACTERIZACION HIDRODINAMICA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**CESAR ANTONIO GUZMAN MARDONES**

**PROFESOR GUÍA:  
YARKO NIÑO CAMPOS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS  
JAVIER VASQUEZ ALVAREZ**

**SANTIAGO DE CHILE  
DICIEMBRE 2006**

**INDICE DE CONTENIDOS****PÁGINA**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
1.1.1	GENERALES	3
1.1.2	ESPECÍFICOS	3
1.1.3	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	3
<b>2</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN:</b>	<b>5</b>
2.1.1	BREVE HISTORIA DE MODELOS HIDRÁULICOS	5
<b>2.2</b>	<b>OLEAJE:</b>	<b>7</b>
<b>2.3</b>	<b>MECÁNICA DEL OLEAJE</b>	<b>9</b>
<b>2.4</b>	<b>TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE</b>	<b>12</b>
<b>2.5</b>	<b>TEORÍAS ANALÍTICAS NO LINEALES DE OLEAJE</b>	<b>17</b>
2.5.1	OLA SOLITARIA	17
2.5.2	TEORÍA CNOIDAL DEL OLEAJE	18
2.5.3	TEORÍA DE FUNCIÓN DE CORRIENTE DEL OLEAJE	19
<b>2.6</b>	<b>TEORÍAS DE OLEAJE IRREGULAR</b>	<b>22</b>
<b>2.7</b>	<b>HIDRODINÁMICA DE ESTUARIOS</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>25</b>
3.1.1	METODOLOGÍA:	25
3.1.2	ANÁLISIS DE ANTECEDENTES:	25
3.1.3	MEDICIONES EXPERIMENTALES:	25
3.1.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES:	25
<b>3.2</b>	<b>EFFECTOS CONSIDERADOS</b>	<b>26</b>
<b>3.3</b>	<b>SIMILITUD DE VARIABLES</b>	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>PRIMERA APROXIMACIÓN A ANÁLISIS DE ESCALAS</b>	<b>29</b>
<b>3.5</b>	<b>MODELOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS</b>	<b>30</b>
3.5.1	ANÁLISIS DIMENSIONAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	30
3.5.2	REQUISITOS DE SIMILITUD HIDRODINÁMICOS	31
3.5.3	REQUISITOS DE SIMILITUD DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	32
3.5.4	MODELOS DE SEDIMENTOS DE FONDO MÓVIL DOMINADOS POR TRANSPORTE DE FONDO.	33
<b>3.6</b>	<b>ANÁLISIS COMPARATIVOS DE ESCALAS</b>	<b>37</b>
<b>3.7</b>	<b>ENFOQUE Y ESCALAS SELECCIONADAS</b>	<b>39</b>
<b>3.8</b>	<b>DISTORSIONES INDUCIDAS POR EL MODELO DE ESCALAS SELECCIONADO</b>	<b>41</b>
<b>3.9</b>	<b>ELEMENTOS DEL CANAL</b>	<b>43</b>
<b>3.10</b>	<b>INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DEL CANAL</b>	<b>49</b>
<b>3.11</b>	<b>EXPERIENCIAS EN EL MODELO.</b>	<b>49</b>

3.11.1	CALIBRACIONES	49
3.11.2	EXPERIENCIAS SIN CAUDAL Y CON OLEAJE:	50
3.11.3	EXPERIENCIAS CON CAUDAL Y CON OLEAJE:	50

## **4 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS** **52**

<b>4.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>52</b>
<b>4.2</b>	<b>CALIBRACIÓN DEL GENERADOR DE OLEAJE.</b>	<b>52</b>
<b>4.3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA</b>	<b>63</b>
4.3.1	ESTACIONALIDAD.	64
4.3.2	ANÁLISIS ESPECTRAL	68
4.3.3	AUTO CORRELACIONES Y CORRELACIONES CRUZADAS DE LAS VELOCIDADES	73
4.3.4	DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE VELOCIDAD HORIZONTAL	76
4.3.5	ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO	79
4.3.6	NÚMERO DE REYNOLDS	81
4.3.7	ANÁLISIS EN PROTOTIPO	83
4.3.8	ANÁLISIS ADIMENSIONAL E INTEGRACIÓN DE RESULTADOS	85
4.3.9	COMPARACIÓN ENTRE PARÁMETROS OBJETIVOS Y REGISTRADOS	93

## **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:** **95**

<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>95</b>
5.1.1	CALIBRACIÓN DEL GENERADOR DE OLEAJE	95
5.1.2	CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA	96
<b>5.2</b>	<b>RECOMENDACIONES A CERCA DE LOS FUTUROS ESTUDIOS EN EL CANAL</b>	<b>98</b>

## **6 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS:** **100**

<b>INDICE DE TABLAS</b>	<b>PÁGINA</b>
<i>Tabla 3.1 : Matriz de experiencias a realizar</i> .....	51
<i>Tabla 4.1 : Matriz de Calibraciones</i> .....	53
<i>Tabla 4.2: Comparación teorías de a través de perfiles de velocidad horizontal.</i> .....	79
<i>Tabla 4.3: Resumen de número de número Reynolds por fases</i> .....	82
<i>Tabla 4.4: Experiencias registradas en el modelo</i> .....	83
<i>Tabla 4.5: Experiencias escaladas en el prototipo</i> .....	84
<i>Tabla 4.6: Experiencias escaladas en el prototipo según Froude y distorsiones.</i> .....	84

<b>INDICE DE FIGURAS</b>	<b>PÁGINA</b>
--------------------------	---------------

<b>Figura 1.1:</b> Esquema conceptual.....	2
<b>Figura 2.1:</b> Esquema de distribución de energía del oleaje de acuerdo a las frecuencias, Leblond y Mysack (1978).....	8
<b>Figura 2.2:</b> Sistema de referencia.....	10
<b>Figura 2.3:</b> Clasificación de régimen de oleaje según la profundidad relativa.....	14
<b>Figura 2.4:</b> Trayectoria de partículas de fluido en una ola progresiva en Aguas Someras.....	14
<b>Figura 2.5:</b> Trayectoria de partículas de fluido en una ola progresiva en Aguas Profundas.....	15
<b>Figura 2.6:</b> Desarrollo de la capa límite de fondo.....	16
<b>Figura 2.7:</b> Perfil de ola de la onda solitaria.....	18
<b>Figura 2.8:</b> Perfiles de ola de la teoría Cnoidal.....	19
<b>Figura 2.9 :</b> Rangos de aplicabilidad de teorías de oleaje. CEM 2001.....	21
<b>Figura 3.1:</b> Perfil vertical de amplitud de orbitales de trayectoria en Prototipo $d=8.5$ m, $T=4$ s, $H=0.68$ m.....	42
<b>Figura 3.2:</b> Perfil vertical de amplitud de orbitales de trayectoria en Modelo, $h=0.17$ m, $T=3.15$ s, $H=0.014$ m.....	43
<b>Figura 3.3:</b> Esquema del modelo experimental, vista longitudinal.....	46
<b>Figura 3.4:</b> Esquema del modelo experimental, vista en planta.....	47
<b>Figura 3.5:</b> Esquema del modelo experimental, vista longitudinal.....	48
<b>Figura 4.1:</b> Análisis de estacionalidad de la serie de altura de olas para $T_p=5.1$ [s].....	54
<b>Figura 4.2:</b> Extracto de serie de tiempo de altura de ola medida en el canal.....	55
<b>Figura 4.3:</b> Espectro de altura de oleaje medido en el canal.....	56
<b>Figura 4.4:</b> Calibración del Período Peak del oleaje.....	57
<b>Figura 4.5:</b> Calibración del Altura del oleaje.....	58
<b>Figura 4.6:</b> Adimensionales del oleaje.....	59
<b>Figura 4.7:</b> Teorías asociadas a números adimensionales del oleaje, CEM 2001.....	60
<b>Figura 4.8:</b> Calibración final del generador de olas.....	61
<b>Figura 4.9:</b> Altura de ola como función del período peak.....	62
<b>Figura 4.10:</b> Adimensionales del Oleaje, Límite Operacional de la Paleta.....	63
<b>Figura 4.11:</b> Análisis de estacionalidad de la serie de velocidades para $T_p=3.15$ [s].....	64
<b>Figura 4.12:</b> Análisis cualitativo de los datos registrados.....	66
<b>Figura 4.13:</b> Perfil adimensional de ola registrada.....	67
<b>Figura 4.14:</b> Correlación entre velocidad registrada y la altura de la columna de agua.....	68
<b>Figura 4.15:</b> Espectro de velocidades, $T=3.15$ s, $v=0$ m/s, $z=1.85$ cm.....	69
<b>Figura 4.16:</b> Espectro de velocidades, $T=2.43$ s, $v=0$ cm/s, $z=1.85$ cm.....	70
<b>Figura 4.17:</b> Espectro de velocidades, $T=3.15$ s, $v=6.3$ , $z=1.85$ cm.....	71
<b>Figura 4.18:</b> Comparación de espectro de altura de ola medido y JONSWAP.....	73
<b>Figura 4.19:</b> Función de Auto-Correlación de velocidad, $T=2.7$ s, $v=0$ m/s, $z=2.85$ cm.....	74
<b>Figura 4.20:</b> Función de Correlación Cruzada de velocidad, $T=2.7$ s, $v=0$ m/s, $z=2.85$ cm.....	75
<b>Figura 4.21:</b> Esquema de la ola analizada.....	76
<b>Figura 4.22:</b> Comparación Perfil de velocidades, $T=2.7$ s, $v=0$ cm/s.....	77
<b>Figura 4.23:</b> Comparación Perfil de velocidades, período 2.43 s, velocidad 4.9 cm/s.....	78
<b>Figura 4.24:</b> Perfil de energía cinética turbulenta, período 2.43 s, velocidad 4.9 cm/s.....	80
<b>Figura 4.25:</b> Perfil de energía cinética turbulenta, período 3.15 s, velocidad 6.3 cm/s.....	81
<b>Figura 4.26:</b> Velocidades media por fase. Experiencias 1,2 y 3.....	87
<b>Figura 4.27:</b> Velocidades por fase adimensionales. Experiencias 4 a 9.....	88
<b>Figura 4.28:</b> Velocidad adimensional en función del período. Experiencias 1 a 3.....	89
<b>Figura 4.29 :</b> Velocidad adimensional en función del período. Experiencias 1 a 3.....	89
<b>Figura 4.30:</b> Energía cinética turbulenta adimensional en función del período. Experiencias 4 a 9.....	90
<b>Figura 4.31:</b> Energía cinética turbulenta adimensional en función del período adimensional. Experiencias 4 a 9.....	91

**Figura 4.32:** *Energía cinética turbulenta adimensional en función del período adimensional.*  
*Experiencias 1 a 3.* ..... 92  
**Figura 4.33:** *Comparación períodos peak objetivo y medido.*..... 93  
**Figura 4.34:** *Comparación velocidades de corriente objetivo y medido.*..... 94

# 1 Introducción

La capa límite béntica es una delgada zona del flujo que se ubica en el fondo de los cuerpos de agua y es una de las zonas de la columna de agua que tiene mayor importancia hidrodinámica y ambiental ya que en ella se disipa gran cantidad de energía cinética, y debido a que de sus características depende directamente el intercambio de masa con los sedimentos del fondo, lo que determina las condiciones tróficas y de calidad de toda la columna de agua. Si bien es cierto el análisis de la hidrodinámica de la capa límite béntica no será llevado a cabo en este estudio, sino en posteriores, es importante mencionarla debido a que el desarrollo de una metodología experimental para realizar dicho análisis es una de las motivaciones de esta memoria.

Dentro del contexto del proyecto FONDECYT 1040494 “*Turbulencia y Transporte en la capa límite béntica de Lagos y Estuarios, Estudio de Terreno y Modelación*”, se propuso realizar un estudio acerca del comportamiento de la capa límite béntica en estuarios, en términos del transporte de solutos entre los sedimentos del fondo y la columna de agua, para lo cual es indispensable construir una instalación experimental.

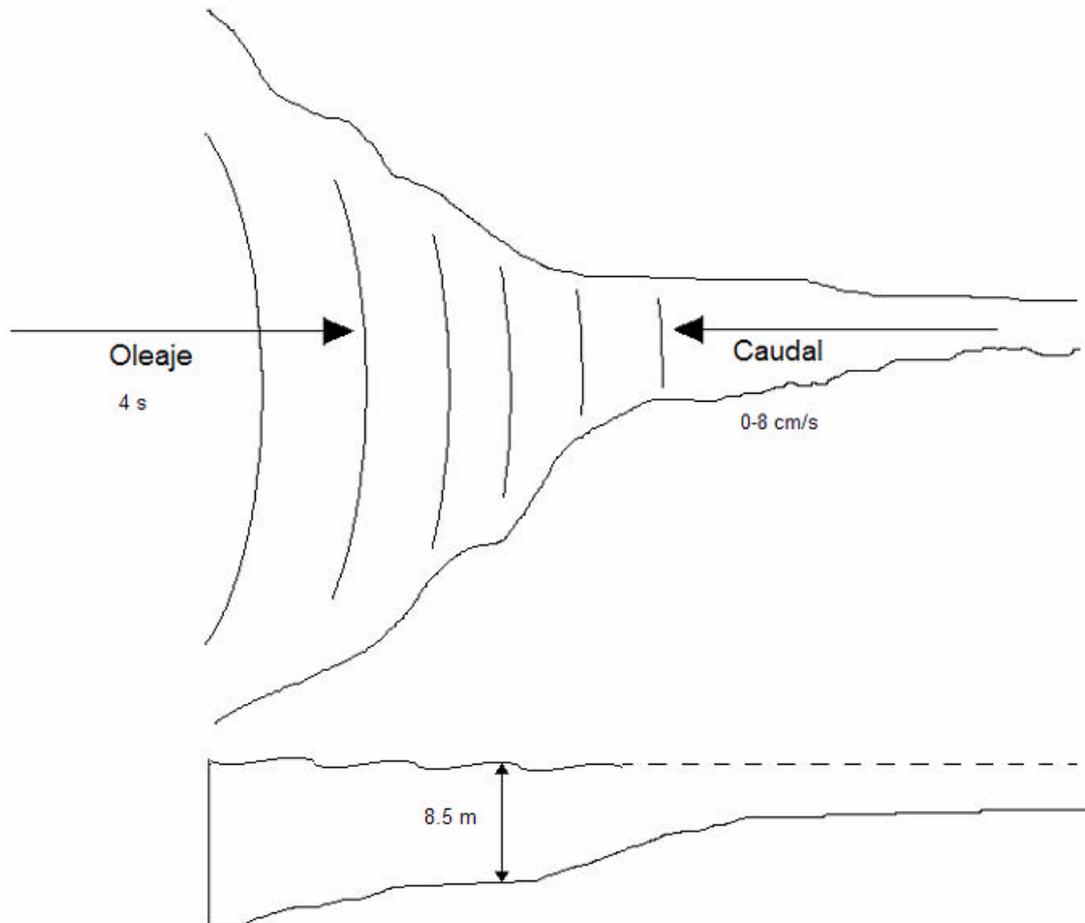
Los estuarios son sistemas de transición entre los ríos y el mar, en los cuales las concentraciones de sustancias disueltas, como contaminantes, oxígeno disuelto, materia orgánica, nutrientes y sólidos en suspensión que allí se encuentran, están sujetas a la interacción de las fuerzas marítimas y fluviales, resultando en un delicado y complejo balance, que es el que se propone estudiar en esta memoria, en las condiciones que se detallan en el párrafo siguiente.

Haciendo un escalamiento a condiciones naturales, la instalación permite simular una condición de estuario de 8.5 metros de profundidad, con velocidades medias del flujo contrarias a la de propagación del oleaje del orden de 0 a 8 cm/s, oleaje *sea* (de generación local por efecto del viento) de 4 segundos de período, en una zona de oleaje no rompiente. La Figura 1.1 muestra un esquema conceptual del sistema en estudio.

Para este estudio se acondicionó una instalación experimental en el laboratorio “Francisco Javier Domínguez” del Departamento de Ingeniería Civil, consistente en un canal con generador de oleaje capaz de producir un oleaje regular, generar un flujo en dirección contraria a la de propagación del oleaje y representar la dinámica de los sedimentos, ya que posee un fondo móvil de arena. La instalación experimental permite llevar a cabo estudios preliminares de hidrodinámica de estuarios y transporte de masa en este tipo de sistemas.

Al igual que la Capa Límite Béntica, la dinámica de los sedimentos no será analizada en esta memoria, sin embargo se entrega la plataforma experimental para su futuro estudio y constituye parte importante de la motivación del estudio.

Es importante mencionar que el estudio sienta un precedente en el estudio de la interacción de la capa límite béntica con la hidrodinámica de estuarios, ya que a nivel nacional no hay información al respecto, como tampoco existe una instalación experimental esta naturaleza.



*Figura 1.1: Esquema conceptual*

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Generales**

Construir y poner en marcha una instalación experimental para realizar estudios relacionados con la ingeniería costera, la hidrodinámica de estuarios y el transporte de sedimentos o contaminantes en este tipo de sistemas, y de este modo hacer un aporte a estudios ambientales que requieran de herramientas más sofisticadas para entender la hidrodinámica de estuarios y la dinámica de la capa límite béntica en estos sistemas.

### **1.1.2 Específicos**

Diseñar e implementar un canal con un generador de olas en el Laboratorio Francisco Javier Domínguez, del Departamento de Ingeniería Civil.

Implementar una interfaz eléctrica y computacional que permita controlar remotamente las frecuencias del oleaje e inducir un oleaje regular unidireccional al cuerpo de agua.

Calibrar la instalación experimental y eliminar efectos de borde como la reflexión del oleaje en los extremos, a través del análisis de los resultados obtenidos con los procedimientos citados en la metodología.

Construir curvas de operación de la instalación experimental, es decir, rangos mínimos y máximos de operación en función de parámetros adimensionales del oleaje.

Caracterizar la hidrodinámica de la interacción ola/flujo a través análisis de perfiles de velocidad y de energía cinética turbulenta entre otros.

### **1.1.3 Estructura de la Memoria**

La memoria está organizada en 6 capítulos. El primero presenta las motivaciones, los objetivos y un resumen del estudio que se llevó a cabo.

El Capítulo 2, Revisión Bibliográfica, es una revisión de los antecedentes teóricos relacionados con el tema que está en estudio y consta principalmente de información asociada a las teorías de oleaje.

En el Capítulo 3, Procedimientos de Experimentación, se detalla la instalación experimental que se adaptó y utilizó para la ejecución del estudio, se hace una revisión de los antecedentes teóricos relacionados con las escalas del modelo, y se introduce las experiencias a realizar.

Por su parte el Capítulo 4, Presentación y discusión de resultados, presenta los datos obtenidos producto de las mediciones realizadas en la instalación experimental.

El Capítulo 5, Conclusiones, es una síntesis de los resultados y conclusiones obtenidos en la memoria y los análisis derivados de ellos. Presenta además recomendaciones para futuros estudios que se lleven a cabo en la instalación experimental.

Por último, el Capítulo Anexos, especifica algunos detalles de los capítulos de la memoria, detalles que fueron pospuestos a este capítulo por su relevancia secundaria. En este capítulo se mencionan la calibración de los instrumentos y detalles del sistema eléctrico del generador de oleaje.

## 2 Revisión Bibliográfica

### 2.1 Introducción:

La generación de oleaje en laboratorios nace como una herramienta estudiar el comportamiento de estructuras costeras y su interacción con el mar desde una perspectiva más empírica, debido a la complejidad de la hidrodinámica presente en este tipo de fenómenos. Los generadores de oleaje han evolucionado desde aparatos puramente mecánicos, capaces de producir sólo un oleaje monocromático, a complejos sistemas hidráulicos controlados a través de computadores, que permiten generar oleajes policromáticos y que incluso son capaces de absorber activamente el oleaje.

#### 2.1.1 Breve historia de modelos hidráulicos

Se cree que Leonardo da Vinci fue el primero en estudiar fenómenos hidráulicos de manera científica. En el siglo XVI Da Vinci describió y esquematizó varios fenómenos, como perfiles de chorros y patrones de velocidad en vórtices, a través de la observación visual durante experimentos.

El primer acercamiento teórico a lo que hoy conocemos como criterios de similitud, fue realizado por Isaac Newton, el cual formuló la regla de velocidades correspondientes. Esta regla determina la razón de velocidades existente en condiciones similares en distintas escalas, para fenómenos ligados a la gravedad.

El primer modelo en hidráulica escala conocido fue desarrollado por John Smeaton en 1752-1753, Sus esfuerzos estaban destinados a determinar el funcionamiento de ruedas y molinos de agua.

En 1852 Fredinand Reech expresó por vez primera lo que hoy es conocido como criterio de similitud de Froude. Desarrolló una regla para convertir velocidades y fuerzas entre modelo y prototipo cuando estudiaba la resistencia dinámica de buques con la ayuda de modelos.

Froude en 1870, realizó mediciones con modelos de buques en un estanque de pruebas. Los datos obtenidos del modelo fueron analizados utilizando reglas similares a la Reech.

El primer modelo de lecho móvil probado en un río conocido, es atribuido al francés Louis J. Fargue en 1875. Fargue construyó un modelo de una sección del río Garonne, en su modelo el fondo era fijo y arena era dispuesta sobre el fondo.

Osborn Reynolds, en 1885, condujo mediciones un modelo de fondo móvil de arena del río Mersey. Su modelo era de una escala muy pequeña, siendo su escala vertical 33 más grande que la escala horizontal. Reynolds usó arena de tamaño natural en sus experimentos.

El trabajo de Reynolds fue continuado por Vernon Harcourt quien utilizó arena y materiales más livianos como carbón vegetal.

El primer laboratorio hidráulico construido en estados Unidos fue fundado en 1887 en la Universidad de Lehigh por Mansfield Merrimen y el primer laboratorio diseñado para realizar experiencias en modelos con fondo móvil comenzó a funcionar en 1898 en Dresden, Alemania, bajo la dirección de Hurbert Engels.

Con el cambio de siglo, la necesidad de solucionar un gran número problemas asociados a la regulación de ríos, determinó un aumento en los estudios con modelos hidráulicos. Muchos números adimensionales han sido descubiertos basados en argumentos físicos derivados de la física Newtoniana, y el principal requisito es que estos números sean iguales en el prototipo y en el modelo.

Una manera más formal de determinar los números adimensionales relevantes en un modelo se desarrolló en la década del 20 con el advenimiento del análisis dimensional.

Desde entonces hasta nuestros días muchos laboratorios hidráulicos se han fundado en el mundo entero. En Estados Unidos muchas universidades mantienen laboratorios hidráulicos, uno de los más notables es el de Iowa, fundado en 1918.

En 1914 el Instituto de Ingeniería Hidráulica fue fundado en Hanover, Alemania. Este laboratorio se rebautizó como el instituto Franzius en 1936 en honor a su fundador.

El Laboratorio Hidráulico de Delft fue fundado en 1927, una de sus principales misiones ha sido ayudar a desarrollar protecciones adecuadas para las inundaciones costeras de los países bajos.

En 1932 el Beach Erosion Board (que luego pasó a llamarse Coastal Engineering Research Center en 1963) construyó en Estados Unidos algunas de las primeras instalaciones destinadas al estudio de las olas y sus efectos.

Con el fin de la segunda guerra mundial muchos países establecieron laboratorios nacionales de hidráulica entre ellos se puede mencionar: El Hydraulics Laboratory of the National Research Council, fundado en Canada en 1945; el Port and Harbor Instituto de Investigación, fundado en Japón en 1946; el Laboratorio D`Hydraulique, fundado en Francia en 1946; la Estación de Investigación Hidráulica, fundada en Inglaterra en 1947; y el instituto Danés de Hidráulica, fundado en 1946. [Hughes, 1993]

En Chile, el 14 de Noviembre 1967 se fundó el Instituto Nacional de Hidráulica (INH) el cual está encargado, mediante la ejecución de estudios, investigaciones y proyectos, de garantizar seguridad, eficiencia y economía a las obras de infraestructura hidráulica proyectadas. El INH es el único laboratorio que cuenta con un canal bidimensional de olas, que se utiliza para la modelación de obras civiles, el cual tiene un generador que es activado a través de un sistema servo hidráulico y permite una absorción activa del oleaje, a través de un Software, que al igual que la paleta, fueron adquiridos al Danish Hydraulic Institute (DHI).

## **2.2 Oleaje:**

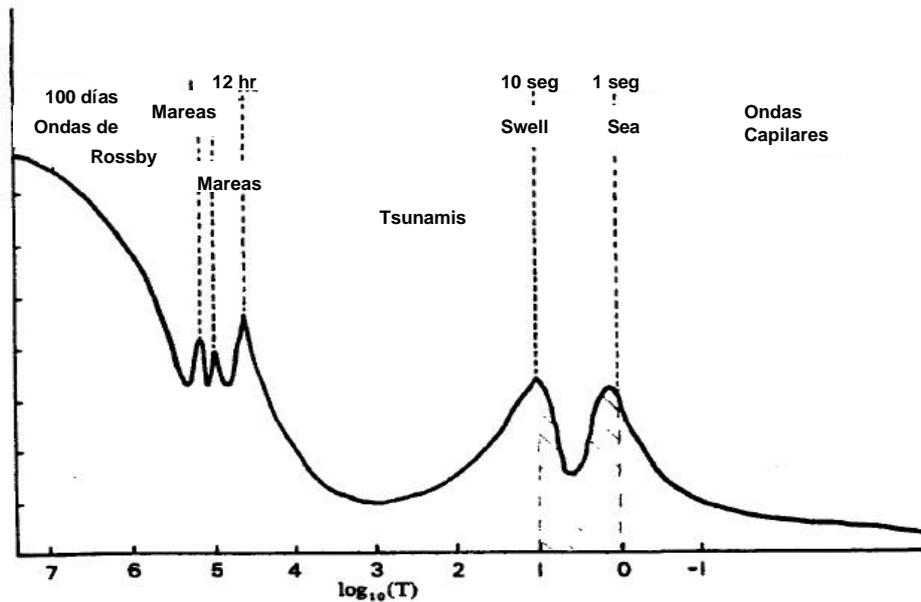
Las olas son un tipo de onda. Una onda es una propagación de una perturbación (o información) entre dos puntos en un medio en equilibrio. La particularidad de esta propagación es que no se transmite (de manera relevante) el medio, sino que la perturbación transmite sólo información. Es posible que la onda cambie su magnitud y su velocidad de propagación, sin embargo sigue aún siendo reconocible, en tanto represente una perturbación en alguna propiedad del medio. Para que la onda exista propiamente tal es necesario que se cumplan tres requisitos: a) El medio debe estar en equilibrio, b) debe existir una perturbación que modifique ese estado de equilibrio y c) debe existir una fuerza que restablezca ese equilibrio.

Si bien es cierto el oleaje depende de la fuerza que lo genera, también depende de las propiedades del fluido y de la fuerza restauradora del equilibrio.

Las fuerzas perturbadoras que generan oleaje en el océano son principalmente meteorológicas, como gradientes de presión atmosférica o esfuerzos de corte inducidos por la acción de los vientos, existe también una fuerza generadora asociada a movimientos tectónicos en el fondo del océano. Las fuerzas restauradoras son las de viscosidad y las de gravedad.

Debido a la que las fuerzas perturbadoras tienen un amplio rango de frecuencias y el océano tiene un tiempo de respuesta particular, estas respuestas son, también, en un amplio rango de frecuencias. La Figura 2.1 muestra un esquema, construido por Le Blond y Mysack (1978), de la distribución energía del oleaje de acuerdo a sus frecuencias.

A continuación se hace una descripción de los diferentes tipos de olas desde las de menor a las de mayor frecuencia.



**Figura 2.1:** Esquema de distribución de energía del oleaje de acuerdo a las frecuencias, Leblond y Mysack (1978)

Debido a la rotación de la tierra se producen desviaciones en las corrientes marinas que establecen oscilaciones en un plano horizontal sobre una latitud específica. Estas ondas son conocidas como Ondas Planetarias o de Rossby y explican comportamientos del clima a gran escala.

Condiciones climáticas extremas como tormentas, aumentan las variaciones de las mareas sobre los niveles predichos por las tablas de mareas. Este aumento se desarrolla por una baja de presión atmosférica, lo cual levanta el nivel del mar (una disminución de un milibar de la presión atmosférica implica un aumento de un cm en el nivel del mar). Esta condición, sumada, a los vientos que soplan en los centros de bajas presiones producen *Storm Surges*.

Las mareas tienen periodos de 12 y 24 horas aproximadamente, las fuerzas que las generan están asociadas a la diferencia local de la fuerza gravitacional producida por la tierra y la luna (y el sol), además de una fuerza inducida por la rotación terrestre. Debido a la magnitud de su período la marea se propaga por aguas profundas y está afecta a fenómenos de Coriolis, resonancia y fondo. Las fuerzas restauradoras son las de gravedad y la de Coriolis, asociada a la rotación de la tierra.

Algunas olas se pueden generar en la interfaz de dos capas del océano de distinta densidad, estas olas reciben el nombre de ondas internas. Por lo general es más fácil producir olas internas que olas en la interfaz aire-agua, ya que en este último caso la diferencia de densidades es mayor, por lo que se requiere una mayor cantidad de energía para perturbar el sistema y producir olas de similar amplitud que de ondas internas. La fuerza que restaura el equilibrio una vez ocurrida la perturbación es la fuerza de gravedad.

Un tipo muy particular de olas son los *Tsunami* (ola de puerto en japonés), se producen por actividad sísmica o volcánica en el fondo del mar. Un *Tsunami* se comporta como una onda de marea y se producen generalmente en el océano Pacífico, ya que ahí hay una gran actividad sísmica. Su velocidad de propagación alcanza los 800 km/h y a medida que se acerca a la costa se peralta y comienza a viajar más lento. La ola que finalmente golpea la costa es muy grande, trae consigo una gran cantidad de energía y puede alcanzar con facilidad los 25 a 30 m de altura.

Olas de generación local, llamadas *sea*, y las olas de *swell* tienen períodos similares, pero difieren en su naturaleza. Mientras que las olas de generación local, son aún afectadas por el viento que las genera, las olas tipo *swell* no son afectadas por el campo de vientos que las generó y han viajado desde muy lejos hasta el lugar en cuestión. Las olas tipo *sea* son muy irregulares y un oleaje de este tipo tiene muchas direcciones, períodos y alturas. Las olas tipo *sea* suelen tener valles largos y crestas cortas. Las olas de tipo *swell*, a diferencia de las tipo *sea*, son más regulares, con crestas y períodos más largos, con apariencia sinusoidal y por lo general viajan en una sola dirección. La fuerza restauradora de este tipo de olas es nuevamente la fuerza gravitacional. En el desarrollo de la memoria se refiere al oleaje corto como oleaje tipo *sea*, de períodos menores 8 segundos; y a oleaje largo como oleaje de naturaleza *swell* de períodos de 16 o más segundos

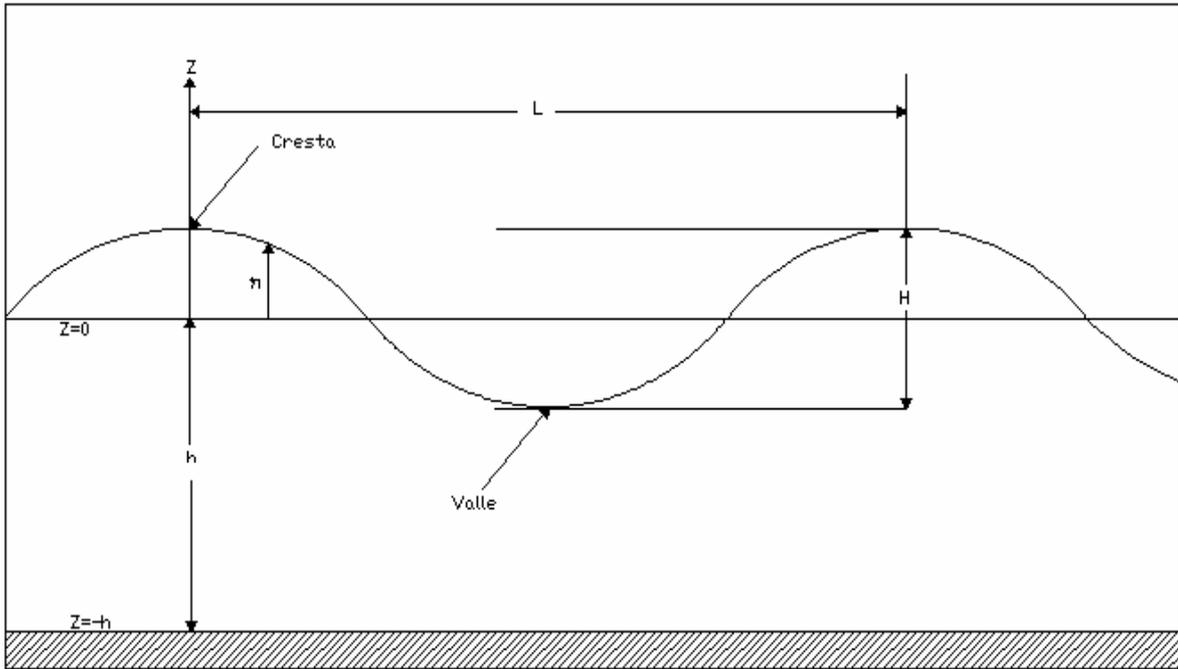
Finalmente las olas de mayor frecuencia, son las olas capilares, las cuales tienen períodos del orden de 0.1 segundos, y pueden ser generadas por suaves brisas. Su fuerza restauradora es la tensión superficial.

### **2.3 Mecánica del Oleaje**

El oleaje es un fenómeno hidrodinámico de transmisión de energía. Además de presentar una mecánica complicada, tiene un factor aleatorio asociado a su génesis. Su generación natural está asociada a la variación del esfuerzo de corte inducido por los campos de velocidades ejercidos por los vientos sobre un cuerpo de agua.

A continuación se hace una revisión de las ecuaciones y principios, matemáticos y físicos, que intervienen en la mecánica del oleaje.

Para iniciar el análisis teórico es necesario fijar las condiciones de borde del problema, la figura 2.2 muestra el sistema de referencia que se utiliza.



**Figura 2.2:** Sistema de referencia.

En las ecuaciones que siguen a continuación se utilizará la siguiente nomenclatura:

- $\frac{Df}{Dt}$  : Derivada total (material) de la función  $f$
- $\rho$  : Densidad del fluido
- $\phi$  : Potencial de velocidades
- $\underline{u}$  : Velocidad vectorial
- $u$  : Componente horizontal de velocidad
- $w$  : Componente vertical de velocidad
- $p$  : Presión local
- $g$  : Aceleración de gravedad
- $\nu$  : Viscosidad cinemática del fluido.
- $L$  : Longitud de la ola.
- $T$  : Período de la ola.
- $h$  : Profundidad.
- $H$  : Altura de la ola desde el valle hasta la cresta.
- $\eta$  : Desnivelación instantánea de la ola.
- $z$  : Eje vertical que apunta hacia arriba y tiene su origen en el nivel medio de agua.
- $x$  : Eje horizontal que apunta en la dirección de propagación del oleaje.
- $t$  : Tiempo.

Consideremos la ecuación de continuidad (o de conservación de masa) en dos dimensiones:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad 2.1$$

Para efectos del análisis consideremos al agua como un fluido incompresible (lo que es una buena aproximación de la realidad), de esta manera el término de la izquierda de la ecuación es eliminado. Si además consideramos que el fluido es irrotacional (lo cual es una buena aproximación de la naturaleza en las zonas no inmediatas al fondo [I. Shames, 1995]), es posible determinar un potencial de velocidades, es decir existe una función  $\phi$  tal que:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad 2.2$$

O reemplazando en la ecuación (2.1)

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad 2.3$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de Laplace.

Por otro lado, suponiendo flujo irrotacional, la ecuación de conservación de momentum (ecuaciones de Euler) para el sistema en cuestión tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad 2.4$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad 2.5$$

Considerando la existencia del potencial de velocidades, y la ecuación de continuidad, las ecuaciones de Euler se pueden transformar en la ecuación de Bernoulli.

$$z \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{2g} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2g} \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = cte. \quad 2.6$$

Volviendo al problema en cuestión, las condiciones de borde son 4:

La primera condición de borde está asociada a la velocidad vertical en el fondo y es equivalente a decir que el flujo que pasa a través del fondo es nulo

• Condición de impermeabilidad en el fondo:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=h} = 0 \quad 2.7$$

La segunda condición de borde tiene relación con el hecho que las partículas que están en la superficie del agua permanecen en ella.

Condición cinemática en la superficie:

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial z} \right|_{z=\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad 2.8$$

La tercera condición de borde da cuenta de la conservación de energía en la superficie a través de la ecuación de Bernoulli.

Condición dinámica de superficie ( $p=0$ ):

$$z \Big|_{z=\eta} = \frac{1}{2g} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \eta}{\partial z} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad 2.9$$

La cuarta, y última condición de borde, denota la condición periódica que tienen las olas.

Condición de periodicidad en los bordes laterales:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x}(x, z, t) = \frac{\partial \eta}{\partial x}(x + nL, z, t) \quad 2.10$$

Donde  $n$  es un número entero.

## 2.4 Teoría Lineal del Oleaje

La Teoría Lineal de Oleaje (T.L.O. en adelante) como su nombre lo indica es una simplificación de la teoría del oleaje. Debido a la complejidad que presenta la resolución del sistema anteriormente expuesto, es que la T.L.O. propone descartar los términos no lineales de las ecuaciones anteriores. Esta hipótesis es fuerte, sin embargo gran parte del oleaje de la naturaleza tiene características lineales.

De esta manera, se ven modificadas dos condiciones de borde:

La condición cinemática en la superficie:

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial z} \right|_{z=\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad 2.11$$

Y la condición dinámica de superficie:

$$z \Big|_{z=\eta} = \frac{1}{g} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad 2.12$$

Mientras que la condición de impermeabilidad del fondo y de periodicidad de los bordes laterales no sufren modificaciones.

Considerando el ángulo de fase  $\phi = kx - \omega t$ . Donde  $k = \frac{2\pi}{L}$ , es el número de ola y  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  es la frecuencia angular. Despreciando los elementos de orden mayor o igual que 2, es posible resolver el potencial de velocidades:

$$\phi = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad 2.13$$

Por lo tanto las velocidades horizontales,  $u$ , y vertical  $w$ , al igual que las aceleraciones horizontal y vertical, se derivan del potencial de velocidades:

$$u = \frac{H}{2} \frac{\cosh \frac{2\pi}{L}(z+h)}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \cos(\phi) \quad 2.14$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega^2 \frac{\cosh \frac{2\pi}{L}(z+h)}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \sin(\phi) \quad 2.15$$

$$w = \frac{H}{2} \frac{\sinh \frac{2\pi}{L}(z+h)}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \sin(\phi) \quad 2.16$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega^2 \frac{\sinh \frac{2\pi}{L}(z+h)}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \cos(\phi) \quad 2.17$$

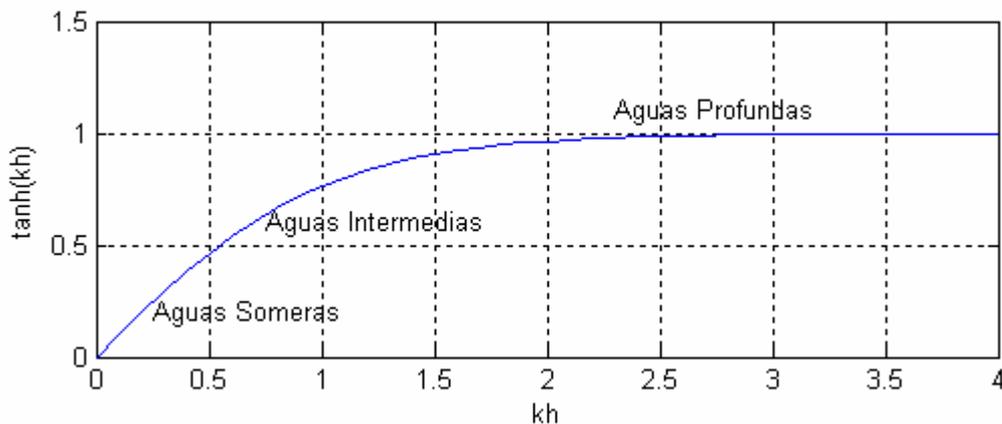
También es posible conocer la celeridad,  $C = L/T = \omega/k$ , de la ola y la longitud,  $L$ , de ella.

$$C^2 = \frac{g}{T^2} \tanh(kh) \quad 2.18$$

$$L = \frac{g}{2\omega^2} T^2 \tanh(kh) \quad 2.19$$

La ecuación (2.19) es conocida como relación de dispersión o de Airy.

Dependiendo del adimensional  $kh$  se pueden definir tres zonas en las cuales se desarrolla el oleaje, como lo muestra la figura 2.3.



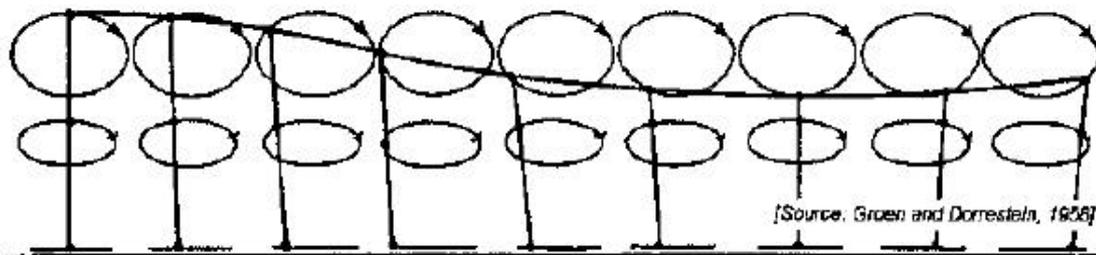
**Figura 2.3:** Clasificación de régimen de oleaje según la profundidad relativa

En cuanto a las trayectorias de las partículas éstas tienen la siguiente forma:

$$\frac{(x - x_1)^2}{\frac{H \cosh(k(h - z))^2}{2 \sinh(kh)}} + \frac{(z - z_1)^2}{\frac{H \sinh(k(h - z))^2}{2 \sinh(kh)}} = 1 \quad 2.20$$

Para aguas someras estas trayectorias quedan caracterizadas por elipses que mantienen su amplitud horizontal en toda la columna y disminuyen su amplitud vertical hiperbólicamente hasta producir un movimiento sólo en la horizontal, la ecuación (2.21) presenta la trayectoria que siguen las partículas en aguas someras, lo que gráficamente se puede observar en la Figura 2.4

$$\frac{(x - x_1)^2}{1} + \frac{(z - z_1)^2}{k(h - z)} = \frac{H}{2kh} \quad 2.21$$



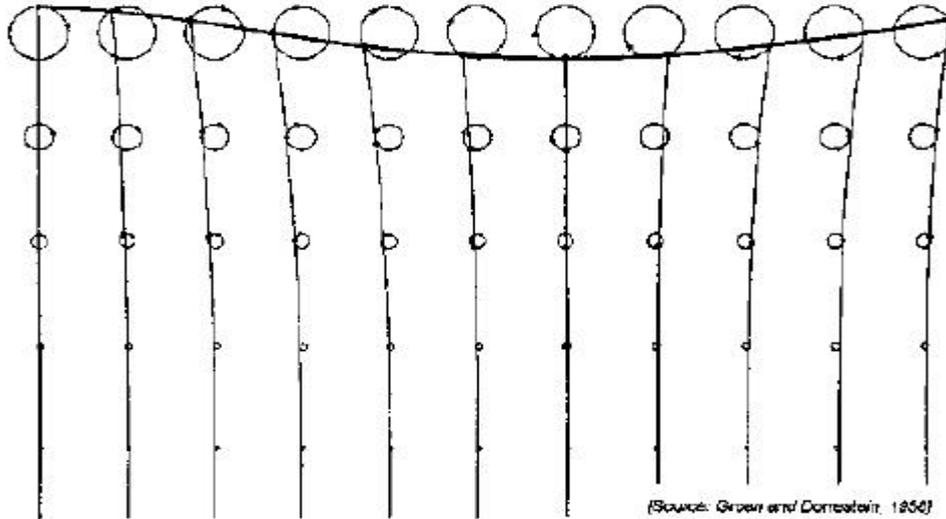
**Figura 2.4:** Trayectoria de partículas de fluido en una ola progresiva en Aguas Someras.

Si la profundidad es grande, lo que se denomina aguas profundas, las trayectorias se transforman en círculos que disminuyen exponencialmente de diámetro y el movimiento queda representado por la siguiente ecuación:

$$(x - x_1)^2 + (z - z_1)^2 + \left(\frac{H}{2} e^{kz_1}\right)^2$$

2.22

que se ilustra en la Figura 2.5



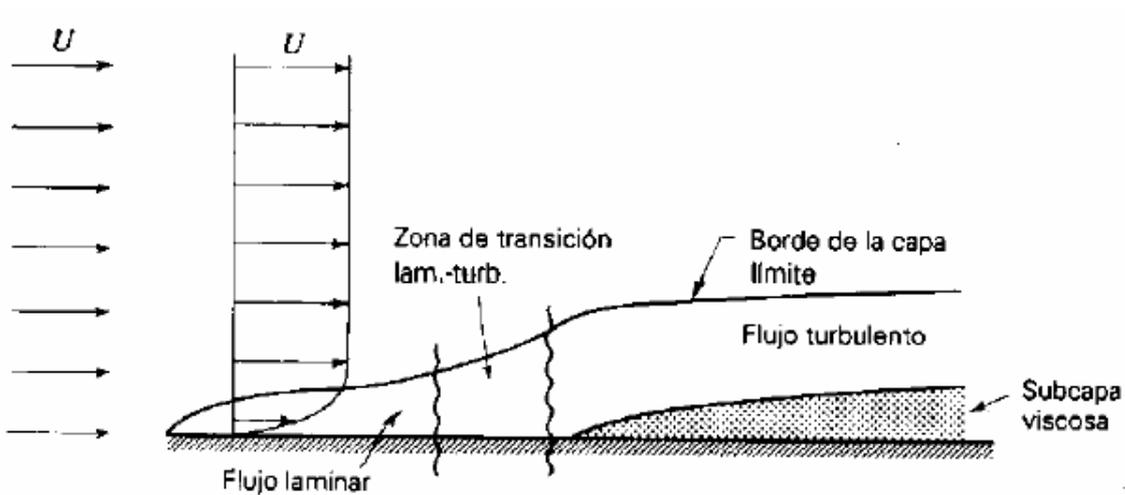
**Figura 2.5:** Trayectoria de partículas de fluido en una ola progresiva en Aguas Profundas

El operador  $\nabla^2$  de la ecuación de Laplace, es un operador lineal, por consiguiente si dos potenciales son solución de la ecuación de Laplace, entonces su suma también lo es.

El potencial de velocidades de una ola progresiva viajando en el mar corresponde a la ecuación (2.13), luego bastaría sólo conocer el potencial del río que desemboca en el mar para, una vez sumados ambos potenciales, tener la solución del potencial para un estuario ideal.

Sin embargo la teoría de flujo potencial no es capaz de representar un flujo uniforme en un río, es decir, no es capaz de representar el perfil de velocidades presentes en el fluido, debido a que este es de tipo rotacional y por lo tanto no representable mediante un potencial. Este enfoque sólo permite conocer el potencial de un flujo constante, sin embargo se pueden hacer ciertas aproximaciones con el objeto de dar cuenta de la transmisión de momento que determina la hidrodinámica del flujo y por lo tanto los fenómenos de transporte (tanto vertical como horizontal) en la columna de agua.

Consideremos la Figura 2.6 en la cual se observa un flujo que se desplaza sobre un fondo sólido (placa lisa). El análisis arroja como resultado que la pared está en el rango de hidrodinámicamente lisa a transición lisa-rugosa, ya que considerando una velocidad media del orden de 20 veces la velocidad de corte, se obtienen espesores de la subcapa viscosa de 0.3 a 0.5 mm.



**Figura 2.6:** Desarrollo de la capa límite de fondo

La región laminar comienza en el borde del fondo y aumenta paulatinamente su espesor, luego se alcanza una transición de flujo laminar a turbulento con engrosamiento consiguiente de la capa límite. A medida que se acerca a la frontera sólida en la región turbulenta, se suprime la turbulencia hasta que los efectos viscosos dominan, lo que conduce a la subcapa viscosa en contacto con la pared sólida.

Estos efectos se producen en las cercanías de la placa sólida, en una capa delgada de fluido, el resto de la columna tiene una capa límite plenamente desarrollada, por lo que se puede suponer que el resto del fluido tiene un perfil de velocidad constante. En esta zona el potencial del flujo puede ser definido como:

$$\phi_{Rio} = ex \tag{2.23}$$

Donde  $x$  es la dirección horizontal y  $e$  la velocidad horizontal. Luego sumando este potencial con el potencial del oleaje se obtiene el potencial de velocidades presentes en un estuario donde la capa límite es de pequeño espesor, la dirección positiva es la de la propagación del oleaje.

$$\phi = \frac{H g}{2} \frac{\cosh(z-h)}{\sinh(h)} \sin(\omega t - kx) + ex \tag{2.24}$$

Luego la velocidad en el eje horizontal se modifica de la siguiente manera:

$$u = \frac{H}{2} \frac{\cosh\left(\frac{z-h}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{h}{L}\right)} \cos(\omega t - kx) + e \tag{2.25}$$

La aceleración en el eje horizontal no se modifica, al igual que la velocidad y la aceleración en el eje vertical.

Considerando un análisis similar al realizado anteriormente para el caso sin corriente, o considerando un sistema relativo a la velocidad de la corriente que se desplaza con la velocidad y dirección de ésta, se puede determinar una relación de dispersión:

$$(C + e)^2 = \frac{g}{k} \tanh(kh) \quad 2.26$$

De la relación 2.25 se desprenden dos observaciones: i) El largo de ola es el mismo en los dos sistemas; y ii) el período aparente  $T'$  (relativo al sistema en movimiento) se relaciona con el período,  $T$ , del sistema fijo a través de la relación (2.26).

$$T = \frac{T'}{(1 + e/C)} = T' \left(1 + \frac{e}{C}\right) \quad 2.27$$

Donde  $C'$  representa la celeridad relativa al sistema en movimiento que es igual a la suma de la velocidad de la corriente y la celeridad de la en un sistema fijo sin corriente. Este efecto se cuantificará en el capítulo de análisis de resultados.

## 2.5 Teorías Analíticas No Lineales de Oleaje

La T.L.O. se define como una teoría de oleaje en la cual los términos  $\frac{h}{L}$  de ordenes mayores o iguales a 2 son despreciables en comparación al término de orden 1. En la naturaleza las olas tienen una esbeltez,  $H/L$ , del orden de 0.05 a 0.08, por lo que la T.L.O. representa bien la mayoría de los casos. A continuación se presentan tres teorías analíticas para oleaje de amplitud finita en aguas someras y una teoría no lineal aplicable a aguas someras y aguas profundas.

### 2.5.1 Ola Solitaria

La llamada ola solitaria de Boussinesq, tiene la particularidad que todo el perfil de la ola es positivo. Con este tipo de teoría es posible trabajar en la zona rompiente del oleaje, como lo hizo Munk en 1949 superponiendo olas solitarias. El perfil de la ola se muestra en la ecuación 2.28 y en la Figura 2.7:

$$\eta = a \operatorname{sech}^2 \sqrt{\frac{3}{4} \frac{a}{h^3}} x \quad 2.28$$

Donde  $a$  es la amplitud de la ola en el infinito y  $h$  es la profundidad.

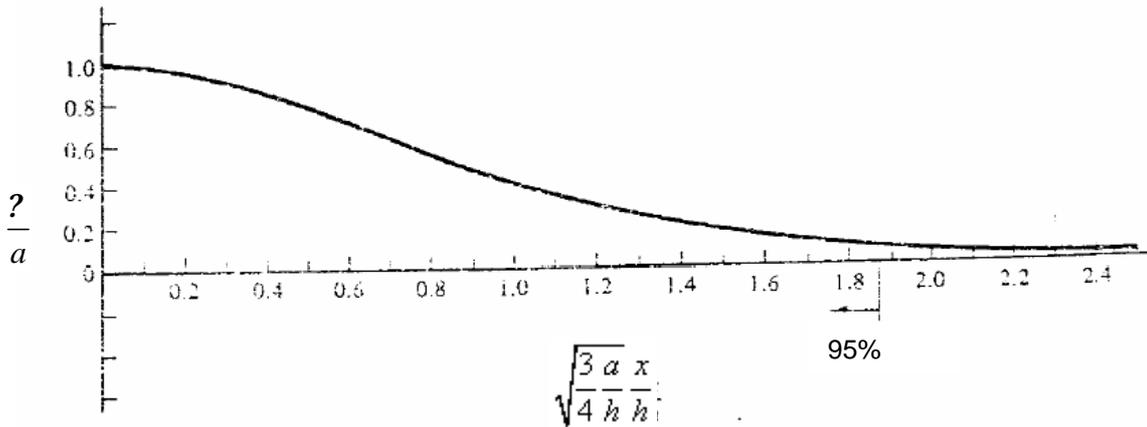


Figura 2.7: Perfil de ola de la onda solitaria

Donde  $a$  es la amplitud de la ola desde el nivel de aguas quietas hasta el peak. El marcador 95% indica que en ese punto se encuentra (al lado izquierdo de él) el 95% de la masa de agua que tiene la Ola.

### 2.5.2 Teoría Cnoidal del oleaje

Esta teoría permite, a diferencia de la anterior, caracterizar olas periódicas en aguas someras. Fue desarrollada por Korteweg y Devries en 1895. Este oleaje tiene la singularidad de reducirse a la teoría de ola solitaria, en un extremo de su dominio, y de quedar determinada por cosenos en el otro, llenando el vacío que queda entre la T.L.O. y la teoría de ola solitaria. Recibe este nombre ya que fue formulado en términos de la función elíptica de Jacobi,  $Cn(u)$ . La ecuación 2.28 muestra el perfil de la ola determinados con la teoría Cnoidal del oleaje.

$$\eta = a \operatorname{Cn}^2 \left( \sqrt{\frac{3ax}{4h}} \right) \quad 2.29$$

Donde  $\eta = a/h$ ,  $\xi = \sqrt{h/L^3}$ ,  $\xi = \frac{1}{\sqrt{1+S}}$ ,  $S = 1 + F^2$ ,  $F = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{ga}{C^2}$  y

$$C = \sqrt{\frac{gh}{1 + \frac{a}{h} \frac{1}{\xi^2}}}$$

$$\sqrt{\frac{3ax}{4h}}$$

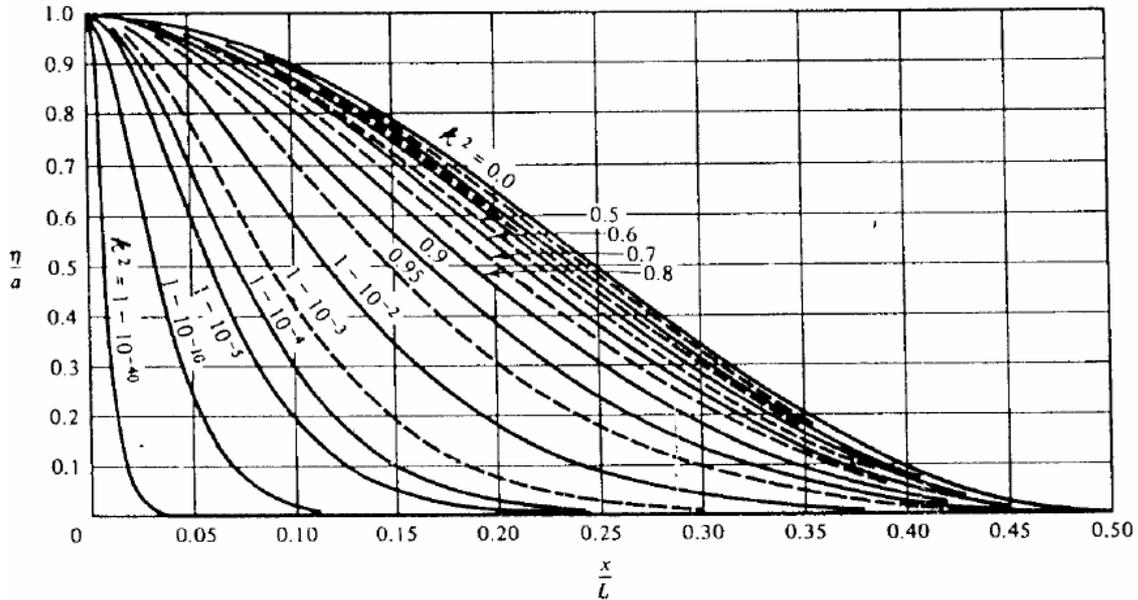


Figura 2.8: Perfiles de ola de la teoría Cnoidal

En la Figura 2.8, se observan distintos perfiles de ola determinados con la teoría Cnoidal del oleaje

### 2.5.3 Teoría de Función de Corriente del oleaje

Las teorías no lineales anteriormente expuestas representan de mejor, o peor, manera distintos condiciones de oleaje. La teoría de función de corriente (o *Stream Función*) es la más ampliamente utilizada debido a su amplio rango de validez y sus buenos resultados.

Se define la función de corriente de un flujo como la función que es ortogonal a la función potencial (en caso de existir ésta) en todo punto, de esta manera la relación (2.30) presenta la función de corriente para un sistema como el de la Figura 2.2:

$$\psi = \frac{H g}{2} \frac{\sinh(z/h)}{\cosh(h/h)} \cos(x - t) \quad 2.30$$

Si se considera que el sistema se mueve con la celeridad de la ola, la relación (2.30) se transforma en la (2.31):

$$\psi = Cz \frac{H g}{2} \frac{\sinh(z/h)}{\cosh(h/h)} \cos(x) \quad 2.31$$

Este cambio de coordenadas tiene la ventaja de reducir el número de variables, ya que el sistema es ahora estacionario. La función de corriente, al igual que el potencial de velocidades, satisface la ecuación de Laplace

$$\nabla^2 \psi = 0 \quad 2.32$$

A continuación se revisan las condiciones de borde para la función de corriente:

• Condición de impermeabilidad en el fondo:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad 2.33$$

• Condición cinemática en la superficie:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{z=h} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad 2.34$$

Esta condición se satisface perfectamente, ya que la superficie es una línea de corriente por definición.

• Condición dinámica de superficie libre ( $p=0$ ):

$$z \Big|_{z=h} = \frac{1}{2g} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{2g} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \text{cte.} \quad 2.35$$

• Condición de periodicidad en los bordes laterales:

$$\psi(x, z) = \psi(x+L, z) \quad 2.36$$

El método de resolución de esta teoría consiste en descomponer el sistema de ecuaciones a través de números adimensionales (como el número de ola, la profundidad adimensional, la altura adimensional, etc.), para luego resolver iterativamente cada orden de precisión de la teoría. La solución de orden 1 conduce a la solución de la T.L.O. Para una revisión en detalle del método se recomienda revisar la referencia [Dean & Dalrymple, 1998]. La solución del sistema tiene la siguiente forma:

$$\psi = Cz \sum_{n=1}^N X(n) \sinh(nk(z-h)) \cos(nkx) \quad 2.37$$

Donde  $X(n)$  son constantes que se calculan iterativamente y que están ligadas a la condición dinámica de superficie libre, la cual no ha sido incluida hasta esta parte en el análisis.

Puede observarse que  $X(1) = \frac{Hg}{g} \frac{1}{\sinh(kh)}$ , de manera de satisfacer la T.L.O. Las

velocidades en los ejes  $x$  e  $y$  se calculan como las derivadas espaciales cruzadas de la función de corrientes, como lo muestran las relaciones (2.38) y (2.39):

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial z} = C \sum_{n=1}^N X(n) \cosh(nk(z+h)) nk \cos(nkx) \quad 2.38$$

$$w = \frac{\partial \psi}{\partial x} = \sum_{n=1}^N X(n) \sinh(nk(z+h)) \sin(nkx) nk \quad 2.39$$

El Coastal Engineering Manual publicado en el 2001 (CEM en adelante) propone la Figura 2.9., parametrizada en función de adimensionales, para analizar que teoría utilizar en cada caso.

Debido a que esta figura está orientada a oleaje de generación natural, que es tiene características distintas al oleaje generado en el laboratorio, en el Capítulo V, se discutirá la validez y representatividad de esta figura. Sin embargo es una herramienta útil para determinar la naturaleza del oleaje.

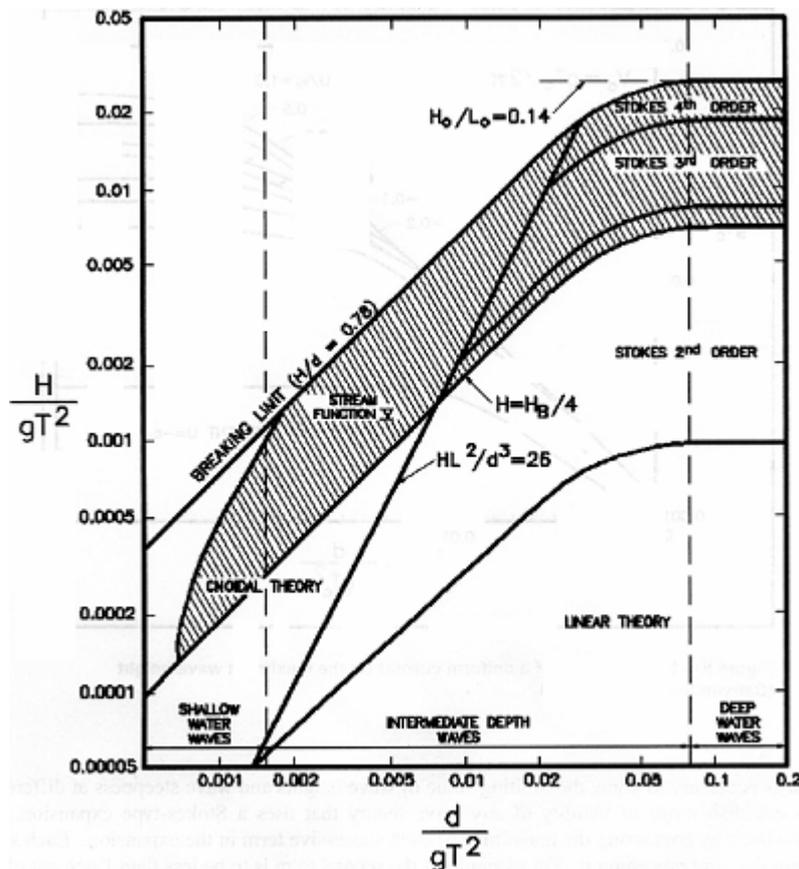


Figura 2.9 : Rangos de aplicabilidad de teorías de oleaje. CEM 2001

## 2.6 Teorías de Oleaje Irregular

El oleaje real dista mucho de ser olas de un solo periodo y dirección, es una composición de múltiples direcciones y frecuencias. Un tratamiento que se le da al oleaje es a través de distribuciones de probabilidad estadística, a continuación se hace una pequeña revisión de las teorías más conocidas y utilizadas.

La distribución de amplitud de Ola de Rayleigh (1873) es una de las más utilizadas y tiene la singularidad que representa muy bien oleaje con una banda angosta de frecuencia espectral (narrow banded frequency spectrum), es decir, un oleaje que concentra su energía en un rango de frecuencias angosto. La probabilidad de que la cresta de una ola (altura mayor de una ola singular, ver Figura 2.2)) sea más alta que H es:

$$P(h > H) = e^{-2\left(\frac{h}{H}\right)^2} \quad 2.40$$

Otro enfoque del oleaje real corresponde al enfoque espectral Este tiene algunas variantes dependiendo del origen del oleaje. Es necesario definir el parámetro  $T_1 = 2\sqrt{\frac{m_0}{m_1}}$ , donde  $m_n = \int_0^\infty S_\omega(\omega) \omega^n d\omega$  y  $S_\omega$  es la densidad espectral.

Para oleajes plenamente desarrollados el espectro que representa mejor la distribución de la energía con respecto a la frecuencia es el espectro de Bretschneider, mejor conocido como Pierson-Moskowitz (1969) modificado de dos parámetros, el cual tiene la siguiente densidad espectral.

$$S_\omega(\omega) = \frac{173H_{1/3}^2}{T_1^4} e^{-\frac{692}{T_1^4} \omega^4} \quad 2.41$$

Donde  $T_1 = 0.772T_p = 3.86\sqrt{H_{1/3}}$ ,  $T_1$  se determina a través de los momentos estadísticos del espectro y  $H_{1/3}$  es el promedio de altura de ola del tercio superior de la serie de tiempo de altura (que es el mismo

Otro espectro es el JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), que corresponde a un estado de mar limitado por Fetch, es decir, un oleaje de generación local. Su densidad espectral tiene una forma parecida a la de Pierson-Moskowitz.

$$S_\omega(\omega) = \frac{320H_{1/3}^2}{T_1^4} e^{-\frac{1950}{T_1^4} \omega^4} \gamma^A \quad 2.42$$

Donde  $\gamma = 3.3$

$$A = \exp\left[-\frac{w}{\sqrt{2}}\right]$$

$$f_p \approx \frac{2\pi}{T_p} \approx 0.09 \text{ s}^{-1}$$

$$0.09 \text{ s}^{-1}$$

$$f_p \approx 0.07$$

Ambos espectros representan la distribución de la densidad espectral (energía asociada a una banda de frecuencia infinitesimal) con la frecuencia, sin embargo hay otra variable de interés que hasta ahora no ha sido considerada, la dirección.

En una misma banda de frecuencia es posible que las olas se propaguen en distintas direcciones. Para dar cuenta de las distintas direcciones es necesario construir un espectro direccional. Una manera de hacerlo consiste en aplicar método de Longuet-Higgins (1963) a una serie de tiempo para obtener una densidad de energía espectral como función de la frecuencia y la dirección.

Gracias a los avances tecnológicos los generadores de olas actualmente son capaces de generar este tipo de oleaje, ingresando como parámetro para su generación no un período o una dirección, sino una distribución espectral.

## 2.7 Hidrodinámica de Estuarios

Las zonas de los ríos, donde el cauce (en algunos casos) se ensancha en las proximidades del océano y en las cuales el agua dulce proveniente de las cuencas hidrográficas se mezcla con el agua salada del mar, reciben el nombre de estuarios.

Estos sistemas son, en algunos casos, dinámicos y sus cambios morfológicos están asociados a la estacionalidad del aporte de sedimentos por parte del cauce que forma el estuario o a eventos extremos de caudal. Este es el caso del río Amazonas en Brasil o del río Misisipi en Estados Unidos.

Sobre el cuerpo de agua que conforma el estuario, interactúan un gran número de fuerzas de diversa naturaleza y magnitud siendo, quizás, la del cauce que desemboca en el mar, las de flujo y reflujo de marea y del oleaje las más relevantes. Sin embargo es importante mencionar otras fuerzas que también afectan la dinámica de los sedimentos del estuario:

La aceleración de gravedad ejerce una fuerza vertical en dirección al fondo del lecho, haciendo que las partículas en suspensión tengan una componente en la trayectoria descendente, la importancia relativa de ésta, depende de la masa del sedimento, es decir, de su tamaño. Esta variable es conocida como velocidad de sedimentación o de caída.

La aceleración de Coriolis generada por la rotación de la tierra provoca una fuerza que es proporcional al seno de la latitud en la que se encuentra y desvía hacia la izquierda, en el hemisferio sur (mirando la tierra con el polo norte arriba y el polo sur abajo), y hacia la derecha, en el hemisferio norte, la trayectoria de los cuerpos. Esta variable es relevante sólo si el sistema es lo suficientemente grande como para que la longitud característica del cuerpo de agua sea mayor o igual a la longitud de la onda de Coriolis.

La fuerza de gravedad, a través de las mareas, hace subir y bajar el nivel del mar regularmente, con un período de 12 horas aproximadamente (en la mayoría de los casos), durante las cuales la dinámica del movimiento del cuerpo de agua cambia casi diametralmente, debido a que en la fase vaciante el mar se recoge y la profundidad media del mar disminuye, mientras que en la fase llenante el mar se adentra en el continente aumentando su profundidad media, lo que afecta la dinámica del flujo, y provocando que en algunas ocasiones entre agua de mar al estuario.

La batimetría, el viento, la presión atmosférica y la temperatura determinan y modifican el oleaje y las corrientes locales, las cuales movilizan masas de aguas y sedimentos través de la costa.

Eventos climatológicos extremos, como temporales o efectos de El Niño o La Niña, que modifican las temperaturas del mar, las características atmosféricas y por lo tanto las corrientes locales y el oleaje.

La salinidad y eventuales químicos vertidos al sistema ejercen un rol coagulante, estabilizando las cargas eléctricas que tienen los sedimentos, luego aglutinando las partículas y haciéndolas más pesadas, facilitando su decantación y posterior depositación en el fondo del lecho.

La rugosidad del fondo ejerce un esfuerzo de corte sobre la capa de sedimentos que está decantándose, dependiendo de la naturaleza de estas rugosidades, se facilita o dificulta la resuspensión o depositación de partículas de sedimento en el fondo del lecho.

Finalmente la operación de puertos, debido a la circulación de buques que provoca movimientos en la columna de agua y particularmente induce agitación en la parte inferior de la columna, ya que en algunos puertos ubicados en estuarios la profundidad es apenas suficiente para que el buque pueda realizar las operaciones necesarias.

Es importante mencionar que dentro de las operaciones asociadas a los puertos se considera el dragado, el cual consiste en remover parte de los sedimentos que se encuentran en el fondo, demás está decir que ésta práctica afecta a la dinámica del cuerpo de agua y de los sedimentos.

## **3 Procedimiento de Experimentación**

### **3.1 Introducción**

Los procedimientos que se utilizaron en este estudio se sistematizaron a medida que se fueron realizando pruebas preliminares, de manera que todos los datos registrados que sirven de materia prima para los análisis fueron medidos tomando en cuenta las mismas consideraciones. Los detalles del procedimiento de muestreo se detallan en el desarrollo del capítulo.

#### **3.1.1 Metodología:**

Para llevar a cabo los objetivos, tanto generales como específicos, fue necesario realizar tres tareas principales: Análisis de antecedentes, Mediciones experimentales y Análisis computacional de los resultados obtenidos en las experiencias.

#### **3.1.2 Análisis de Antecedentes:**

Para diseñar el canal y sus componentes mecánicos fue necesario revisar la literatura técnica existente al respecto que se cita en las referencias. Adicionalmente se visitó el Instituto Nacional de Hidráulica, el cual cuenta con un canal generador de olas bidimensional. Este análisis ya fue presentado en el capítulo anterior.

#### **3.1.3 Mediciones Experimentales:**

El objetivo de las mediciones consistió en calibrar el canal y permitir una buena y eficiente operación de él, además de caracterizar la hidrodinámica del sistema. Estas mediciones se realizaron básicamente con dos instrumentos, los cuales se detallan en extenso en el Anexo II Calibración de los instrumentos de medición del canal:

ADV (Acoustic Doppler Velocimeter): Permite obtener mediciones puntuales de velocidad del flujo en las tres dimensiones con una tasa de medición de 50 hz.

Sensor Dinámico de Nivel: Permite determinar la altura de la columna de agua en un punto, con una tasa de medición de 10 Hz.

#### **3.1.4 Análisis de resultados experimentales:**

Para efectos del análisis de los resultados se cuenta con herramientas computacionales tales como MatLab, que permitieron transformar los registros digitales de los instrumentos en campos de velocidades y parametrizaciones de las ondas.

Los códigos que conforman las rutinas se encuentran el en Anexo VI: Rutinas de calibración y análisis.

### 3.2 Efectos Considerados

Dada la cantidad y complejidad de los fenómenos hidrodinámicos que se manifiestan en los estuarios, es imposible dar cuenta de todos ellos en el modelo físico sobre el que se trabajó. Por este motivo sólo algunas características naturales de los estuarios serán consideradas en este análisis. Debido a limitaciones en los recursos que fueron destinados al proyecto, al tiempo con el que se cuenta para realizar este estudio o simplemente porque están fuera de los alcances que este estudio tiene por fin. A continuación se hace referencia a los fenómenos que no fueron considerados y las razones que llevaron a descartarlos de este análisis:

**Efecto de Coriolis:** Se descartó debido a la debilidad de la fuerza que genera, a pesar de que es posible generarlo estableciendo una diferencia relativa en la rugosidad de fondo [Vergara, 1993], de manera de producir una aceleración en la dirección deseada, sin embargo requiere de una calibración acuciosa. Estos efectos son relevantes a escalas suficientemente grandes y generalmente se estudian en mesas rotatorias.

**Corrientes Locales:** Las corrientes locales, como su nombre lo indican, son muy específicas del lugar que se está estudiando. Debido a que no es el objetivo de esta memoria realizar un estudio de alguna zona del litoral en particular, se descartaron del análisis. A pesar de que un análisis más acabado podría considerar el efecto de corrientes transversales a la dirección de propagación del oleaje (en caso de hacerlo se hace necesario definir arbitrariamente direcciones y magnitudes de ellas), dentro de las variables que esta memoria considera estudiar, no figura la de las corrientes.

**Mareas:** Si bien es cierto, las mareas tienen un efecto importante en los fenómenos dinámicos que se desarrollan en las desembocaduras de los ríos en el mar, en el modelo físico no se instaló un dispositivo que las reprodujera, debido a que el objetivo de esta memoria se limita a relacionar los efectos del oleaje con los de un flujo uniforme. Los efectos de las mareas, afectan a procesos que tienen una escala temporal comparable con el período de ellas, de manera que se puede desvincular de los efectos del oleaje. Exceptuando el efecto que tiene la profundidad y las velocidades de la corriente que se induce, que en el modelo se pueden manejar independientemente.

**Batimetrías:** Al igual que las corrientes locales, la batimetría y las condiciones climáticas son relativas al lugar de estudio. Como se mencionó anteriormente no se considera dentro de los objetivos de esta memoria realizar un estudio del comportamiento hidrodinámico de un estuario en un punto específico de la costa, sino realizar una aproximación a los fenómenos hidrodinámicos que afectan la capa límite béntica. Se consideró como batimetría de fondo una pendiente constante de 1 ‰ (0.001)

**Eventos Climatológicos Extremos:** Debido a que no es el objetivo de esta memoria examinar la respuesta de la columna de agua frente a un cambio extremo de las condiciones atmosféricas, no se consideró esta variable dentro del análisis.

#### Intrusión Salina:

Esta variable no se incluyó dentro del análisis realizado en esta memoria, sin embargo se está considerando en estudios paralelos a éste. Este efecto tiene la limitante de no considerar la diferencia de densidad y los efectos hidrodinámicos de ésta (como la cuña salina), sin embargo se consideró al momento de definir la escala del modelo.

Operación de Puertos: Debido a la arbitrariedad de esta variable, no se incluyó en el modelo físico.

En resumen el modelo físico que se construyó y calibró, considera los siguientes efectos:

#### Caudal:

El caudal, y por lo tanto la velocidad del flujo, es regulado a través de una bomba que recircula caudal desde aguas abajo del generador de olas.

#### Oleaje:

El generador de olas y la interfaz computacional desarrollada permite regular automáticamente la longitud de ola y su período, mientras que la altura de ola se controla por la amplitud del movimiento de la paleta. De esta manera, se puede controlar todas las variables relevantes del oleaje. En este estudio se consideró sólo una amplitud de movimiento de la paleta, dejando abierta la posibilidad de variar este parámetro en futuros estudios.

#### Efectos de Fondo:

El fondo del canal está conformado por un lecho móvil. En el desarrollo del capítulo se detallan las razones que determinaron su elección. En el Anexo V, Composición del fondo del canal, se detalla la naturaleza de éste. Se consideró como batimetría de fondo una pendiente constante de 1 ‰ (0.001)

### **3.3 Similitud de Variables**

Básicamente, similitud significa la condición de tener la misma forma o semejanza geométrica. De esta manera la similitud puede ser definida como la condición por la cual las variables naturales que afectan un fenómeno son modificadas debido a que representan parámetros que describen formas o proporciones en el fenómeno. Como consecuencia encontrar los requerimientos de similitud corresponde a encontrar las variables naturales que definen el sistema [Ipsen, 1960]

El prototipo se define como el sistema existente en la naturaleza que se quiere modelar, mientras que el modelo es la representación en laboratorio del prototipo.

Las escalas son las razones que existen entre una variable en el prototipo y su correspondiente en el modelo.

Cuando se realiza una comparación con respecto a la similitud geométrica se definen lados, superficies y volúmenes homólogos. La similitud geométrica implica una relación constante para cualquier longitud  $L$ , esta relación es denominada escala longitudinal. En el caso de un modelo sin distorsión espacial, la escala geométrica es llamada escala geométrica. Existen modelos con escalas espaciales distorsionadas, en los cuales se privilegia una u otra dirección en función de la variable que se quiere preservar.

Cuando la comparación entre el prototipo y modelo es con respecto a un movimiento, se habla de similitud cinemática. Se utiliza esta condición de similitud cuando se requiere que los patrones de forma de los flujos del modelo y el prototipo sean iguales en cualquier tiempo, es decir que, hay similitud en el movimiento de los sistemas. La relación de velocidades entre el modelo y prototipo debe ser constante y es denominada escala de velocidades. La similitud geométrica es una condición necesaria, pero no suficiente para que se cumpla con la similitud cinemática.

Para que el modelo y el prototipo se comporten en forma similar se debe satisfacer además la condición de similitud dinámica. Es necesario tomar en consideración la acción de fuerzas sobre las partículas de un fluido, tales como fricción, tensión superficial, gravedad o peso, fuerzas de inercia, de Coriolis, etc. Lo anterior implica que la relación de fuerzas entre el prototipo y el modelo también debe ser constante, estableciéndose así la escala dinámica de fuerzas. Esto en rigor no es posible, de manera que se acepta que sólo las fuerzas más relevantes del prototipo se reproduzcan a escalas en el modelo y que otras fuerzas poco importantes en el prototipo no se manifiesten de manera significativa en el modelo.

Considerando que la propagación del oleaje y el movimiento del flujo en un río responden básicamente a la acción de fuerzas gravitacionales, mientras que las fuerzas viscosas y las de tensión superficial prácticamente no influyen en el fenómeno, la condición que controla la escala del modelo es la condición de similitud de Froude [Vergara, 1993]. Para poder despreciar los efectos viscosos es necesario que el régimen del flujo sea turbulento, con números de Reynolds del orden de  $3 \cdot 10^3$  tanto en el modelo como en el prototipo, lo cual hace necesario considerar la condición de similitud de Reynolds.

Considerando la condición de similitud de Froude y del número de Reynolds entre el modelo y el prototipo; y remplazando una en otra, se obtiene la relación

$$(Re)_M = \frac{(Re)_P}{\lambda_L^{3/2}} = 3 \cdot 10^3 \quad 3.1$$

Donde los subíndices M y P están asociados al modelo y al prototipo respectivamente, y  $\lambda_L = L_P/L_M$  representa la escala geométrica (que en el caso del modelo es igual a la geométrica ya que no hay distorsión espacial).

Esta relación se cumple para factores de escala geométrica menores que 60 [Briso, 2003]. El canal sobre el que se acondicionó el modelo físico, fue construido anteriormente al inicio del estudio que está en curso, de manera que no fue posible modificar las dimensiones del mismo, exceptuando una extensión de dos metros en la zona que aloja al generador de oleaje. Esta limitación física motivó la definición de la escala del modelo, la cual se determinó considerando que la altura de agua máxima que permite el canal es de 0.3 m

Es importante mencionar que las experiencias y el modelo se idearon considerando similitud espacial (sin distorsión), es decir, la escala vertical y horizontal  $\lambda_x$  y  $\lambda_y$  son iguales entre sí.

### 3.4 Primera aproximación a análisis de escalas

Un primer análisis de las escalas es el análisis según la condición de similitud de Froude. Tanto en el prototipo como en el modelo ambos números adimensionales deben ser iguales:

$$\frac{F_{r_P}}{F_{r_M}} = \frac{\frac{v_P^2}{g h_P}}{\frac{v_M^2}{g h_M}} = 1 \quad 3.2$$

Para que la condición de la ecuación se cumple, es necesario que:

$$v = \sqrt{g \lambda_L} \quad 3.3$$

Donde  $\lambda_g$  corresponde a la escala de aceleración de gravedad,  $\lambda_v$  es la escala de velocidades y  $\lambda_L$  corresponde a la escala de longitudes del modelo. Considerando que la escala de la aceleración de gravedad  $\lambda_g = 1$ , la escala de velocidades y la escala de longitudes quedan ligadas, a través de la condición de similitud de Froude, por la ecuación (3.4):

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_L} \quad 3.4$$

Esta escala corresponde también a la escala de tiempos, por lo tanto la escala de períodos de ola, considerando una escala geométrica tentativa  $L \approx 50$ , es  $\sqrt{50} \approx 7$ .

Es importante notar que esta escala tiene la particularidad de no inducir distorsiones geométricas en el modelo ya que la longitud de la onda generada tiene la misma escala geométrica que las variables espaciales del modelo, así como también la profundidad o la longitud del estuario.

A continuación se revisan enfoques más completos de escalas para este tipo de sistemas, los siguientes enfoques consideran variables, como el período de la ola y el tipo de fondo.

### **3.5 Modelos de Transporte de Sedimentos**

Este estudio está orientado a los fenómenos hidrodinámicos asociados a la dinámica de la capa límite benthica, la cual está vinculada a los sedimentos que conforman el lecho y a la resistencia que estos inducen en el cuerpo de agua. En futuros estudios a realizarse en la instalación se espera estudiar la transferencia de masa entre el fondo, constituido por el sedimento, y la columna de agua.

Los modelos de transportes de sedimentos se dividen en fondo fijo y fondo móvil. Este estudio está orientado a un sistema de fondo fijo, en el modelo se eligió arena para representar el fondo del estuario.

#### **3.5.1 Análisis Dimensional de Transporte de Sedimentos**

Existen dos puntos de vista para determinar los parámetros relevantes para el transporte de sedimentos en sistemas con oleaje:

El proceso de transporte de sedimentos está determinado principalmente por un flujo unidireccional y secundariamente por oleaje añadido.

El proceso de transporte de sedimentos está determinado principalmente por el oleaje y secundariamente por corrientes unidireccionales.

Kamphuis (1975) señaló que se aplican diferentes escalas dependiendo de qué suposición se asuma. Además, señala que el oleaje es el factor determinante en el transporte de sedimentos en este tipo de sistemas, por lo tanto un modelo de transporte litoral (no de rompiente) de sedimentos costero, es básicamente un modelo de oleaje corto que incorpora relaciones empíricas entre la acción del oleaje y el transporte de sedimentos. Una vez realizado este análisis se superponen corrientes unidireccionales al modelo de oleaje.

Los parámetros relevantes que están involucrados en sistemas de transporte de sedimentos costeros han sido mencionados por varios autores, entre ellos Kamphuis (1985) y Dalrymple (1989), y son:

**Parámetros Hidrodinámicos:**

- H: Altura de Ola.
- T: Período de Ola.
- L: Longitud de Ola.
- h: Profundidad Local.
- g : Aceleración de Gravedad.
- $k_s$ : Rugosidad del Fondo.
- $\lambda$  : Longitud Característica.
- $u$  : Velocidad del flujo.
- $\rho$  : Densidad del Fluido.
- $\nu$  : Viscosidad Cinemática del Fluido.
- $\tau_0$ : Esfuerzo de Corte en el Fondo.

**Parámetros del Sedimento:**

- D : Diámetro del Sedimento.
- $\rho_s$  : Densidad del Sedimento.
- $w$  : Velocidad de Caída del Sedimento.

Se puede argumentar que la velocidad de caída del sedimento no es una variable independiente, ya que depende del tamaño, la densidad, la forma, etc. El esfuerzo de corte en el fondo, no es un parámetro del sedimento ni del fluido, sino que es un parámetro del flujo.

**3.5.2 Requisitos de Similitud Hidrodinámicos**

Los parámetros hidrodinámicos pueden ser escritos como un conjunto de números adimensionales relevantes de muchas maneras. Kamphuis (1985) considera el siguiente conjunto de adimensionales:

$$H \lambda f \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{z}{L}, \frac{k_s}{L}, T \sqrt{\frac{g}{L}}, \frac{\tau_0}{\rho \sqrt{gL}} \tag{3.5}$$

A este conjunto de variables es necesario agregar la cantidad  $\frac{\tau_0}{\rho h}$ . Se desconocen las relaciones entre todas las variables, por lo tanto es necesario que todas las variables adimensionales se mantengan semejantes en el modelo y en prototipo.

Los primeros 5 números adimensionales están asociados a la geometría del sistema, al mantener estas cantidades semejantes entre el prototipo y el modelo se asegura que las condiciones hidrodinámicas y la geometría del modelo no se distorsionen.

Si el sexto número permanece constante, la escala de rugosidad de fondo entre el y el prototipo permanece constante. Esto se cumple aproximadamente en los modelos con oleaje, si la capa límite permanece en la región de rugosidad turbulenta.

El séptimo adimensional se puede escribir como  $T/\sqrt{L/g}$ , donde  $\sqrt{L/g}$  es proporcional al período de un movimiento armónico (oleaje) provocado por la fuerza de gravedad. Esto significa que mantener la misma escala de tiempo relativo en el prototipo y el modelo requiere que la hidrodinámica del sistema sea escalada con la condición de similitud de Froude.

El octavo número adimensional  $v/\sqrt{gL}$  es el número de Reynolds del flujo, donde la velocidad es representada por  $\sqrt{gL}$ . Es necesario que este número se mantenga en el modelo y en el prototipo. La similitud de Froude y de Reynolds no son compatibles, es decir, no es posible cumplir ambas condiciones simultáneamente.

Los efectos viscosos no serán considerados en el modelo, es difícil justificar su ausencia en el análisis para la dinámica de sedimentos en la capa límite del modelo. Sólo queda asegurar que el flujo es turbulento en las cercanías del fondo. Esta hipótesis se verifica en el Capítulo 4.

El último número  $\frac{\rho_0}{\rho h}$ , que se agregó aparte, está relacionado con el esfuerzo de corte y la escala vertical del sistema; y representa la pérdida friccional por unidad de longitud. Además incluye el peso específico, que lo liga con la densidad del fluido.

### 3.5.3 Requisitos de Similitud del Transporte de Sedimentos

Algunos parámetros del flujo combinados ciertos parámetros físicos de los sedimentos pueden ser agrupados para obtener un conjunto de cantidades adimensionales representativas de los fenómenos en transporte en los sistemas en estudio. Kamphius (1991) definió los siguientes adimensionales como relevantes para este análisis:

$$S \sim f \frac{v_* d}{\nu}, \frac{\rho_s}{\rho} \frac{v_*^2}{gd}, \frac{\rho_s}{\rho} \frac{v_*}{d}, \frac{\rho_s}{\rho} \frac{v_*}{\nu} \tag{3.6}$$

Donde:

$v_*$  = Velocidad de Corte ( $\sqrt{\tau_0/\rho}$ )

$\rho_s$  = Peso Específico Sumergido del Sedimento ( $(\rho_s - \rho)g$ )

El primer número de la relación (3.6), es el número de Reynolds de la partícula ( $Re_*$ ), y el segundo es el número de Froude densimétrico ( $F_*$ ). Estos dos números adimensionales son los parámetros de los ejes de la curva de Shields.

El tercer adimensional corresponde a la densidad relativa (o gravedad específica) y la cuarta cantidad adimensional es la longitud relativa. Kamphuis (1985) determinó que para modelos de oleaje de corto período la longitud característica,  $\lambda$ , debe ser la amplitud relativa de la ola promedio.

El quinto parámetro es la velocidad relativa de caída,  $V_r = \frac{V}{v_*}$ .

Para una completa similitud en el transporte de sedimentos los valores de los 5 adimensionales deben mantenerse semejantes entre el modelo y el prototipo. Generalmente esto no se cumple en otra escala que no sea la del prototipo, sin embargo, es posible formular grupos de números adimensionales que permitan lograr una similitud incompleta que sea de utilidad.

A continuación se hace una revisión de la teoría relacionada con la modelación de transportes de sedimentos en fondo móvil, dominados por transporte de fondo en sistemas con oleaje.

#### **3.5.4 Modelos de Sedimentos de Fondo Móvil Dominados por Transporte de Fondo.**

Del total de sedimentos transportados, existen dos categorías: Transporte de Fondo y Transporte en Suspensión, a pesar de que no existe una clara distinción entre ambas, se pueden diferenciar por los mecanismos implicados en el transporte. Según Fredsøe y Deigaard (1992), esta distinción se puede hacer de la siguiente manera:

El transporte de fondo es definido como la fracción de la carga sólida total que está más o menos continuamente en contacto con el fondo, por lo tanto el transporte de fondo debe ser determinado casi exclusivamente por el esfuerzo de corte efectivo que actúa directamente sobre el fondo de arena.

El transporte en suspensión es la fracción del transporte total que se mueve sin estar en contacto continuo con el fondo, como resultado de la agitación por la turbulencia del fluido.

Como se mencionó anteriormente el esfuerzo de corte es fundamental al momento de definir el transporte de fondo, Hughes (1995) define dos escalas de esfuerzo de corte, relacionadas con la capa límite:

##### **3.5.4.1 Esfuerzo de corte en el fondo debido a olas cortas**

A pesar que la similitud no se cumple para modelar fuerzas viscosas, la derivación de requisitos de las ecuaciones de movimiento indican que los procesos disipativos viscosos asociados a la turbulencia estarían en similitud en un modelo geoméricamente

no distorsionado escalado según la condición de similitud de Froude. Debido a que la viscosidad no es un parámetro en la deducción de los esfuerzos de corte de Reynolds.

Kamphuis (1973) formuló algunas consideraciones para las escalas de la rugosidad en capas límites turbulentas, para oleajes cortos. El factor de fricción,  $f_w$ , es independiente del número de Reynolds, y tiene la siguiente forma:

$$f_w = 0.47 \frac{k_s}{a}^{3/4} \quad 3.7$$

El factor de fricción para sistemas con oleaje se define como:

$$f_w = \frac{2 \tau_{0,max}}{\rho U_{max}^2} \quad 3.8$$

Donde:

$a$  : Amplitud orbital de la ola en el borde superior de la capa límite.

$U$  : Velocidad orbital de la ola en el borde superior de la capa límite.

Según Kamphuis (1973) la ecuación (3.7), es válida sólo en el rango  $a/K_s \geq 100$ , que corresponde al rango de oleaje corto. Combinando las ecuaciones (3.7) y (3.8); y tomando las razones de escalas, se obtiene:

$$\frac{\tau_{0,ola}}{\rho U_{max}^2} = 0.47 \left( \frac{k_s}{a} \right)^{3/4} \quad 3.9$$

Si se considera que el modelo ha sido escalado según el criterio de Froude, para un modelo geoméricamente no distorsionado, la escala de velocidades en el borde superior de la capa límite será la misma que la escala de velocidades en la zona superior a la capa límite que es considerada invíscida, de esta manera:

$$U_{max} = U \sqrt{g L} \quad 3.10$$

Además la escala de amplitud orbital será la misma que la escala de longitud, por lo tanto  $a_p = L$ , lo que se traduce en:

$$\frac{\tau_{0,ola}}{\rho U_{max}^2} = 0.47 \left( \frac{k_s}{L} \right)^{3/4} \quad 3.11$$

Donde  $U = \sqrt{g L}$ .

Esto deriva en la escala de velocidades que se presenta en la relación 3.12





Este enfoque permite escalar el transporte de sedimento, a diferencia de los enfoques anteriores que escalan esfuerzos de corte.

Manteniendo esta cantidad igual en el prototipo y en el modelo, y considerando que el esfuerzo de corte crítico,  $\tau_c$ , no varía entre el modelo y el prototipo, se deriva la siguiente escala de velocidades que se presenta en la relación (3.21).

$$U \propto \sqrt{\rho_R \rho_{d_s}} \quad 3.21$$

Donde  $\rho_R$  es la escala de la densidad específica  $\rho_R \propto \frac{R_P}{R_M}$  y  $\rho_{d_s}$  es la escala del tamaño del sedimento  $\rho_{d_s} \propto \frac{d_{SP}}{d_{SM}}$ .

### 3.6 Análisis comparativos de Escalas

Debido a que el modelo sobre el cual se trabajó tiene dimensiones ya definidas y no corresponde a ningún prototipo en particular, el ejercicio del escalamiento de variables no está orientado a definir la escala del canal a ensayar en laboratorio, sino al revés, a definir la escala del prototipo que corresponde al modelo en cuestión.

Considerando que el agua del mar tiene una densidad de  $\rho_{Estuario} \approx 1.022 \text{ gr/cm}^3$  que el agua dulce del río que descarga en el estuario y la del laboratorio (modelo) tiene una densidad de  $\rho_m \approx 1.0 \text{ gr/cm}^3$ ; que el estuario (prototipo) tiene una densidad que es el promedio del agua dulce y del agua de mar; y que la densidad de los sedimentos es la misma en el prototipo y en el modelo e igual a  $\rho_s \approx 2.65 \text{ gr/cm}^3$ . La densidad del agua del prototipo es igual a  $\rho_p \approx 1.0175 \text{ gr/cm}^3$ , el valor de la escala de la densidad es  $\rho \approx 1.0175$  y el valor de la escala de la densidad específica es  $\rho_R \approx 0.97$ .

La herramienta preliminar que se consideró en el análisis de escalas fue la T.L.O. La decisión acerca de qué enfoque tomar está sujeta a dos condiciones, a saber: La condición de T.L.O; y la condición de aguas someras de la T.L.O. En el desarrollo de este estudio se evaluará la validez de estas hipótesis.

La primera exige que la ola sea lo menos esbelta posible, es decir, que la razón H/L (recordar que H es la altura de la ola de cresta a valle) sea pequeña. Esta condición se cumplió para todas las olas que se estudiaron teóricamente en el análisis de escala (período entre 4 y 22 segundos)

El segundo requerimiento se refiere a la condición de aguas someras, que está asociado al producto  $kh$  (recordar que h es la profundidad del nivel medio de aguas) la cual debe

ser menor que  $\frac{?}{10}$  para asegurar que el régimen sea de aguas someras, como el presente en un estuario.

Existe otra restricción que no está asociada a criterios teóricos, sino a las dimensiones del canal, ya que es impracticable manejar olas del orden de 5 metros de longitud en un canal de 10 metros. Esto derivó en la imposibilidad de estudiar oleaje largo y restringió la investigación al análisis de oleaje corto.

El primer enfoque, de Froude, a pesar que representa bien los fenómenos turbulentos, fue dejado de lado debido a que contiene muy poca información y no incorpora el oleaje en el análisis, sin embargo se utilizará como parámetro para contrastar el modelo elegido con uno sin distorsión

El enfoque de olas y corrientes combinado arroja escalas longitudinales del orden de 200, lo cual según la referencia [Huges, 1991], no es apropiado para modelos de esta naturaleza, ya que los efectos de escalas asociados a la interacción del fondo con el cuerpo de agua se distorsionan significativamente.

Al igual que el análisis combinado, el enfoque de corrientes o olas largas fue eliminado del análisis debido a que además de no tener una relación directa con la naturaleza del estudio, no cumple con el rango de  $a_?/?_s$ .

El análisis de Kamphuis tiene, además de los requerimientos mencionados anteriormente, restricciones para el rango de  $a_?/?_s$  el cual debe ser menor que 100.

El parámetro fue determinado con la relación 2.20 (trayectorias de partículas de fluido), con el espesor de la capa límite considerado como  $100\frac{u^*}{?}$ , con  $u^*$  calculado a través del perfil de velocidades de Keulegan, con una velocidad típica de escurrimiento 8 [cm/s] (Espinoza, 2006) y con  $?? 1.306 \cdot 10^{?6}$  [m<sup>2</sup>/s], que corresponde a la viscosidad a 10° C.

Para los enfoques de capacidad de transporte y de Kamphuis se analizaron 1440 combinaciones de escalas y dimensiones de manera de obtener un conjunto de casos factibles para experimentar. Los casos estudiados fueron los siguientes:

Escala geométrica : 40, 45, 50  
Escala del Sedimento : 0.25, 0.5, 0.75, 1.25.... ,4\*  
Alturas en modelo : 0.15, 0.2, 0.25 cm  
Período en modelo : 4, 6, 8, 10, 12, ... ,22\* s

Donde el símbolo \* denota que las series presentan el mismo espaciamiento entre casos hasta el último número.

El análisis de las escalas asociadas al enfoque de Kamphuis arrojó que no existen casos posibles que cumplan con todas las restricciones simultáneamente. Sin embargo es posible flexibilizar los requerimientos permitiendo algunos casos que están en la frontera de las restricciones, por ejemplo permitiendo que el parámetro  $kh$  sea mayor a  $\frac{?}{10}$ , lo cual significa estudiar casos en el rango de profundidades intermedias.

El análisis de capacidad de transporte, a diferencia del enfoque de Kamphuis, no presenta restricciones extras, por lo que se encontraron más casos posibles de experimentar.

Es importante mencionar que el análisis de Kamphuis fue deducido a partir de leyes de esfuerzo de corte para oleaje con corrientes superpuestas y contiene mayor información, ya que permite manejar las escalas del tamaño del sedimento y longitudinal del modelo independientemente (ver relación 3.17). El análisis de capacidad de transporte, si bien es cierto, modela bien la capacidad del flujo de transportar el sedimento, no se hace cargo de la diferencia existente entre las escalas de esfuerzo de corte inducidos por la corriente y por el oleaje. Además es criterio de capacidad de transporte se utiliza para escalar transporte de sedimentos, no rugosidades.

### **3.7 Enfoque y escalas seleccionadas**

El proyecto FONDECYT 1040494 “*Turbulencia y Transporte en la capa límite béntica de Lagos y Estuarios, Estudio de Terreno y Modelación*”, requiere en sus sucesivas etapas el estudio del intercambio de masa entre la capa límite béntica y el resto de la columna de agua.

La decisión acerca de que sedimento utilizar fue motivada por el contexto experimental que otorga el proyecto FONDECYT ya que en futuros estudios se requiere que el sedimento no se suspenda.

Sin perjuicio de lo anterior, el análisis de escalas considerando la capacidad de transporte de sedimentos está ya realizado, de manera que posteriores estudios puedan utilizar esta memoria como herramienta tanto teórica, en cuanto al análisis de escalas, como experimental, en cuanto a la puesta en marcha del canal.

La escala del modelo se determinó a través del enfoque de olas cortas. De esta manera, considerando los casos factibles de este análisis, la escala geométrica del modelo es 50. Lo cual es consistente con Hughes (1991) que propone escalas espaciales entre 40 y 50 en modelos bidimensionales de fondo móvil con oleaje. No se consideró un rango de

escalas geométricas ya que el análisis realizado arrojó sólo pequeñas variaciones entre una y otra escala geométrica, diferencias que están en el rango de presión del instrumento.

Las escalas de sedimentos se seleccionaron tomando en cuenta las capacidades del modelo, ya que éste representa un régimen de ola no rompiente, en el cual es muy difícil encontrar sedimentos de tamaño mayor a 0.5 mm, debido a que la agitación no es suficiente para movilizarlos hasta esa zona. Considerando que el tamaño de sólidos dispuestos en el canal es de 0.5 mm, las escalas de sedimentos seleccionadas son 0.5, 0.75 y 1; esto se traduce en el prototipo en sedimentos de tamaño 0.25, 0.375 y 0.5 mm.

Una vez determinadas estas dos escalas, longitudinal y de tamaño del sedimento, la escala de velocidades, queda definida para cada caso, y consecuentemente la escala de períodos del modelo.

Lamentablemente el único período modelado es de 4 segundos. Esto se debe a que, si bien es cierto, es posible aumentar el período hasta 8 segundos, el aumento se logra a través del incremento de la escala del grano hasta 4, que se traduce en prototipo en un grano de tamaño 2 mm. Esta situación no es consistente conceptualmente con el modelo, ya que se representarían playas de arenas demasiado gruesas.

La profundidad del modelo, para efectos del análisis (no de la calibración), es constante e igual de 17 cm (recordar que el canal tiene 30 cm de profundidad y que el fondo móvil de sedimentos tiene un espesor de 5 cm), ya que al igual que sucede con los períodos, se pueden alcanzar profundidades mayores, pero con tamaños de grano mayores. Sin embargo debido a la escalas geométrica seleccionada, la profundidad del prototipo alcanza los 8.5 m.

La altura de ola del modelo se mantendrá en un valor cercano a 2 cm, lo que significa alturas de olas en el prototipo que van desde 0.54 a 0.9 m. La altura de la ola del modelo es bastante pequeña, se definió de esa manera para cumplir con el criterio de T.L.O.

Las longitudes de olas alcanzan magnitudes que van desde 2.9 a 3.9 m en el modelo, esto significa olas de 24 y 23 m en el prototipo. Es importante mencionar que en las experiencias en que exista flujo contrario a la dirección de propagación del oleaje, esta longitud se verá modificada, disminuyendo su magnitud debido al cambio de celeridad que induce el flujo en dirección contraria provoca una refracción que disminuye la longitud de la ola. Este efecto será cuantificado en el Capítulo 4, Presentación y discusión de resultados.

Es importante mencionar que todos los casos estudiados se encuentran en el rango de validez de la T.L.O.

La hipótesis de que el oleaje generado por la paleta en el canal es lineal se evaluará en el Capítulo IV, Presentación y discusión de resultados.

### 3.8 Distorsiones inducidas por el modelo de escalas seleccionado

La única escala de velocidades que no provoca una distorsión geométrica entre la longitud de la ola y las espaciales (profundidad y longitud) es la escala de velocidades de Froude. Por lo tanto se considerará la distorsión como la razón entre el parámetro escalado según el enfoque de Froude y el parámetro escalado según el enfoque de Kamphuis.

La escala utilizada, es decir el enfoque de Kamphuis, produce una distorsión, como se muestra a continuación. La ecuación de dispersión de Airy está dada por:

$$L \approx \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) \quad 3.22$$

Considerando un cambio de escala según el enfoque de Kamphuis,

$$L^* \approx \frac{g}{2\pi} \frac{T}{\rho_d^{1/2} \rho_{geo}^{1/8} \rho_d^{3/8}} \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h \frac{\rho_L}{\rho_{geo}}\right) \quad 3.23$$

Donde  $\rho_{geo}$  es la escala geométrica,  $\rho_\rho$  es la escala de densidades,  $\rho_d$  es la escala de tamaño de sedimento y  $L^*$  es la longitud de la ola distorsionada por los efectos de la escala seleccionada, la relación 3.23 se puede escribir como:

$$L^* \approx \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h \frac{\rho_L}{\rho_{Long}}\right) \frac{1}{\rho_\rho^{1/4} \rho_{Long}^{3/4} \rho_d} \quad 3.24$$

Se consideró la distorsión como la razón entre la longitud de ola de un modelo escalado geoméricamente con la condición de similitud de Froude y la longitud de la ola escalada con el modelo de escalas seleccionado. Las distorsiones, estimadas a través del análisis lineal anterior, alcanzan el valores del orden de 7 en el modelo con escala geométrica iguala a 50. Estos valores de distorsiones son sólo estimativos, las distorsiones reales se detallan en el Capítulo 4.

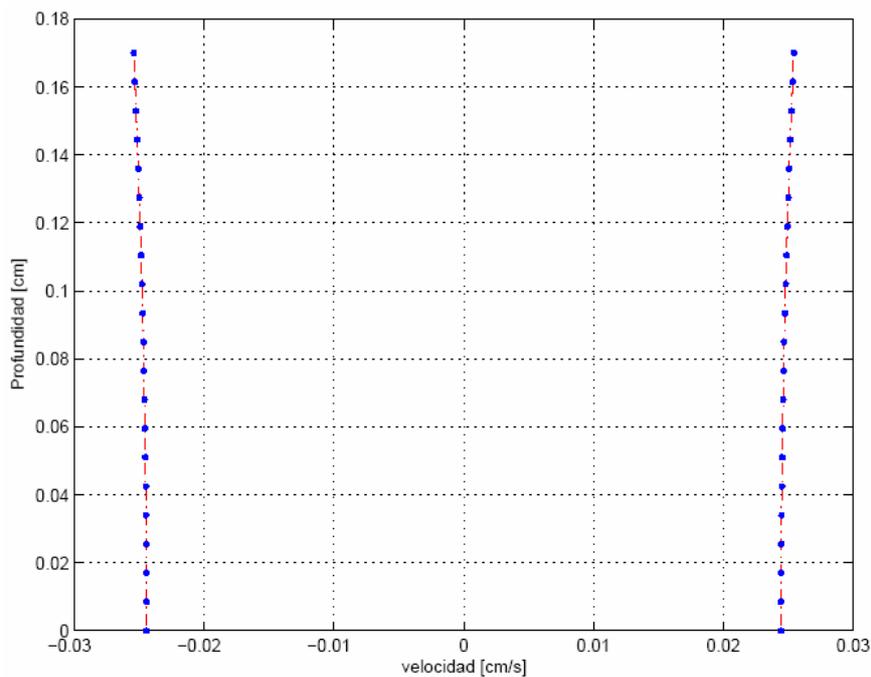
Los valores de las distorsiones de la longitud de onda, son muy altos, sin embargo no es posible encontrar escalas que cumplan con todos los requisitos y que logren una distorsión menor. El efecto que tiene esta distorsión se evaluará en la sección de análisis de resultados.

Es importante mencionar que esta distorsión produce que la longitud de ola del prototipo sea menor en comparación con la del modelo. Esto último provoca que el valor del número de ola, se encuentre en el rango intermedio en el prototipo, mientras que en el modelo el régimen definido es de aguas someras.

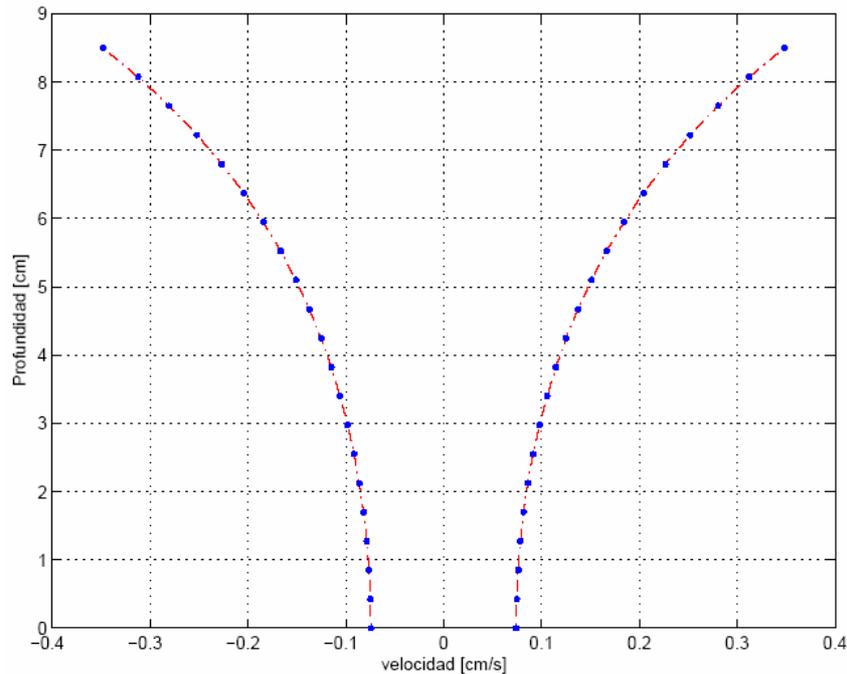
Este cambio de régimen no induce una inconsistencia en el modelo, ya que las trayectorias de las partículas de fluido (orbitales) de ambos regímenes presentan una geometría elíptica. Esta situación queda de manifiesto en la Figuras 3.1 y 3.2, en las cuales se contrastan los perfiles teóricos de trayectorias elípticas para ambas situaciones. Se observa que ambos perfiles de velocidades tienen una geometría hiperbólica, sin embargo el perfil de amplitud de orbitales de trayectorias del modelo es mucho más pronunciado que el del prototipo.

Este efecto se debe a distorsión de la escala de la longitud de ola y significa que en el modelo, que se encuentra en régimen de aguas someras, el movimiento de las partículas es mayor que el que debiera ser en el prototipo, que se encuentra en régimen de aguas intermedias.

Es decir, el movimiento de las partículas es amplificado al pasar del prototipo al modelo. Este efecto es importante al momento de evaluar los registros obtenidos y será discutido con mayor profundidad en el Capítulo 4, Presentación y discusión de resultados.



**Figura 3.1:** Perfil vertical de amplitud de orbitales de trayectoria en Prototipo  $d=8.5$  m,  $T=4$  s,  $H=0.68$  m.



**Figura 3.2:** Perfil vertical de amplitud de orbitales de trayectoria en Modelo,  $h=0.17m$ ,  $T=3.15s$ ,  $H=0.014 m$

### 3.9 Elementos del Canal

A continuación se hace una revisión de los elementos físicos que constituyen el modelo en el orden en que el agua circula por el modelo, la Figuras 3.3 y 3.4, muestran la disposición espacial de los elementos dentro de la instalación experimental.

#### Sentina:

Es un reservorio de agua que cuenta con dos niveles de distinta profundidad con una capacidad total de  $33.75 m^3$ , de los cuales, sólo  $19.5 m^3$  pueden ser utilizados por el modelo, debido a que la bomba tiene su aducción en el fondo del estanque superior.

#### Bomba de Alimentación de Caudal:

La bomba que alimenta el canal es una ASEA mot 3, tiene una alimentación eléctrica trifásica (380V y 12A) y un consumo de 6KW. El caudal es regulado a través de una válvula que se encuentra en la salida de la bomba.

#### Tubería de Alimentación:

Una tubería de PVC de 110 mm de diámetro y 12 m de longitud conecta la bomba con el estanque de carga.

**Estanque de carga:**

Recibe el agua proveniente de la sentina a través de la Tubería de Alimentación y la entrega al sistema. Su volumen permite regular el flujo que entra al canal, de manera que las variaciones de carga ocasionadas por la bomba no afecten el desempeño del modelo.

**Aquietador de aguas:**

Consiste en una rejilla doble, que contiene en su interior gravas de distinto diámetro. Su objetivo, como su nombre lo indica, es eliminar la agitación que trae el flujo producto de la salida de la alimentación y la entrada en el estanque de carga.

**Alineador de Flujo:**

Esta conformado por una serie de tubos de PVC de 20 mm diámetro, cuyo objetivo es eliminar flujos helicoidales, para un rápido desarrollo de la capa límite en el canal.

**Generador de Olas:**

El generador de olas fue adquirido por laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil, y está conformado por dos partes: a) El motor, y b) dos reguladores de frecuencia, uno análogo y otro digital. Este dispositivo fue modificado durante la memoria, ya que el controlador del generador original estaba subdimensionado eléctricamente, de manera que fue necesario construir uno nuevo frente a las reiteradas fallas eléctricas que sufrió.

El nuevo regulador de frecuencias se diseñó y construyó para efectos del modelo con información de los requerimientos eléctricos del controlador original. Tiene un diseño eléctrico robusto que permite un mejor control tanto digital como análogo. Su funcionamiento así como las especificaciones eléctricas se detallan en el Anexo I, Funcionamiento del generador de oleaje

La estructura que soporta el generador de olas permite al dispositivo de generación variar la profundidad a la que la paleta actúa en un rango de 24 cm.

Al término del canal existe un Vertedero de Pared Triangular, que tiene la función de devolver el agua a la sentina a través de una pequeña canaleta.

**Trampa de Sedimentos:**

Capta y conduce los sedimentos, en caso en que exista transporte, a la Bomba de Recirculación de Sedimentos. Consiste en una rejilla que atrapa los sólidos y deja pasar el agua, que es enviada al reservorio del Vertedero de Pared Triangular.

**Bomba de Recirculación de Sedimentos:**

El fondo del canal está conformado por un lecho móvil que es recirculado a través de esta bomba, en caso de que exista transporte, de manera que los sólidos que sean

arrastrados en la dirección del flujo, aguas abajo del generador de olas, sean recuperados y devueltos al sistema.

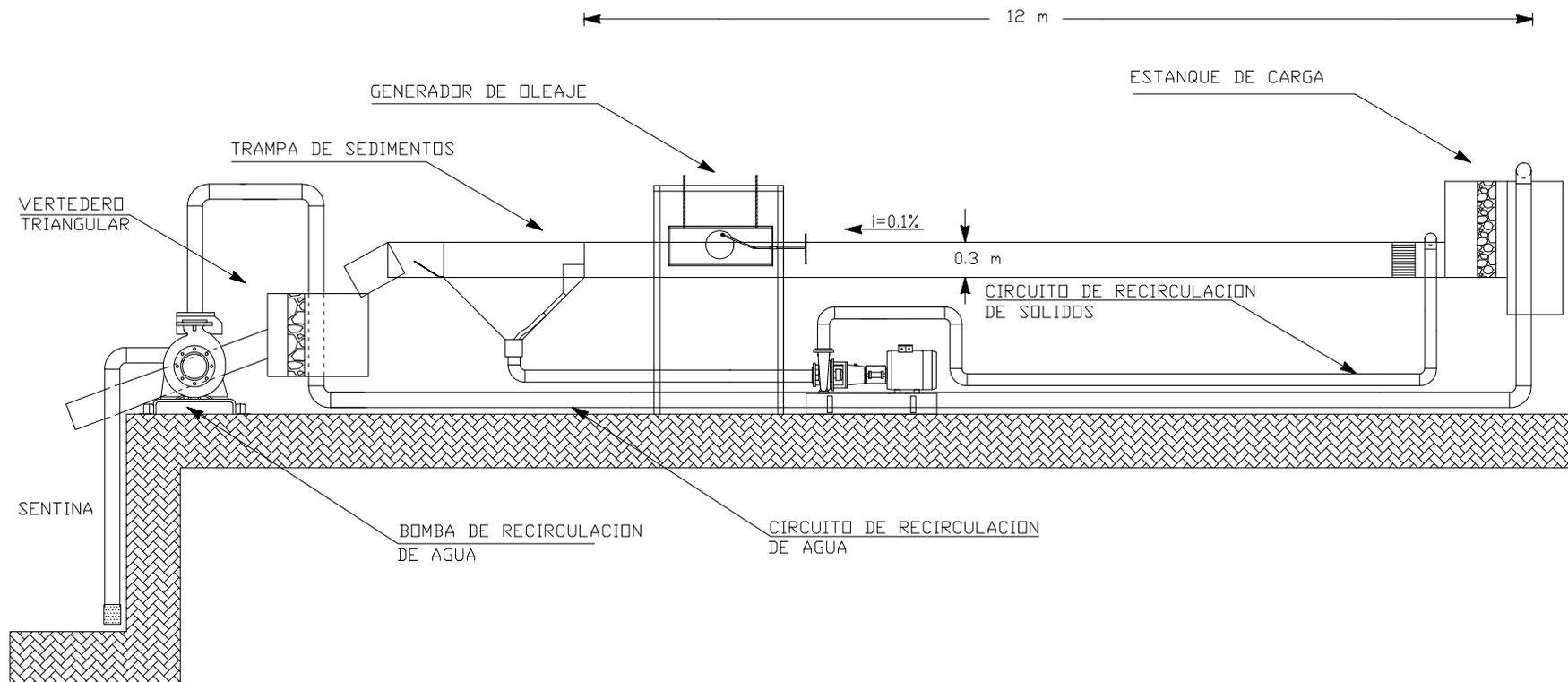
Los instrumentos de medición fueron dispuestos en el canal como lo muestra la Figura 3.5.

La bomba es una Pedrollo HF/6. Tiene una alimentación eléctrica trifásica (380V y 6A) y un consumo de 2.2KW. El caudal es regulado a través de una válvula que se encuentra en la salida de la bomba.

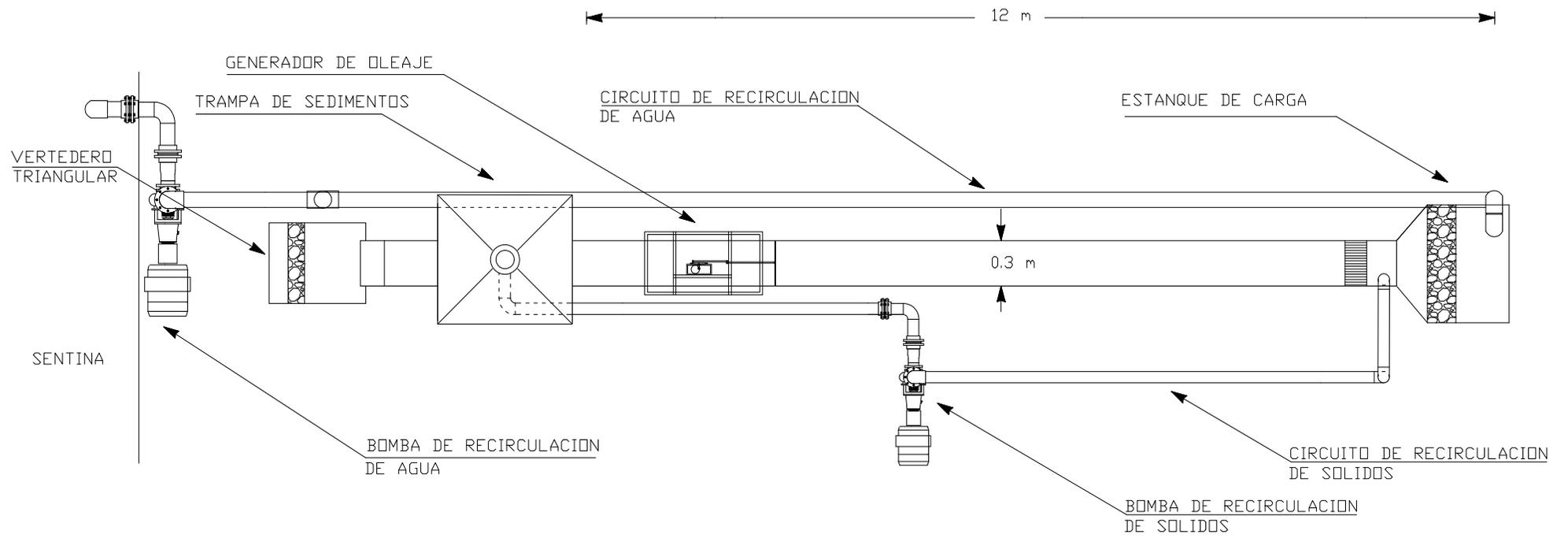
Debido a que esta memoria no considera transporte de sedimentos, esta bomba fue utilizada para generar la corriente que se opone al oleaje, ya que permite un mejor control del caudal.

Tubería de Recirculación de Sólidos:

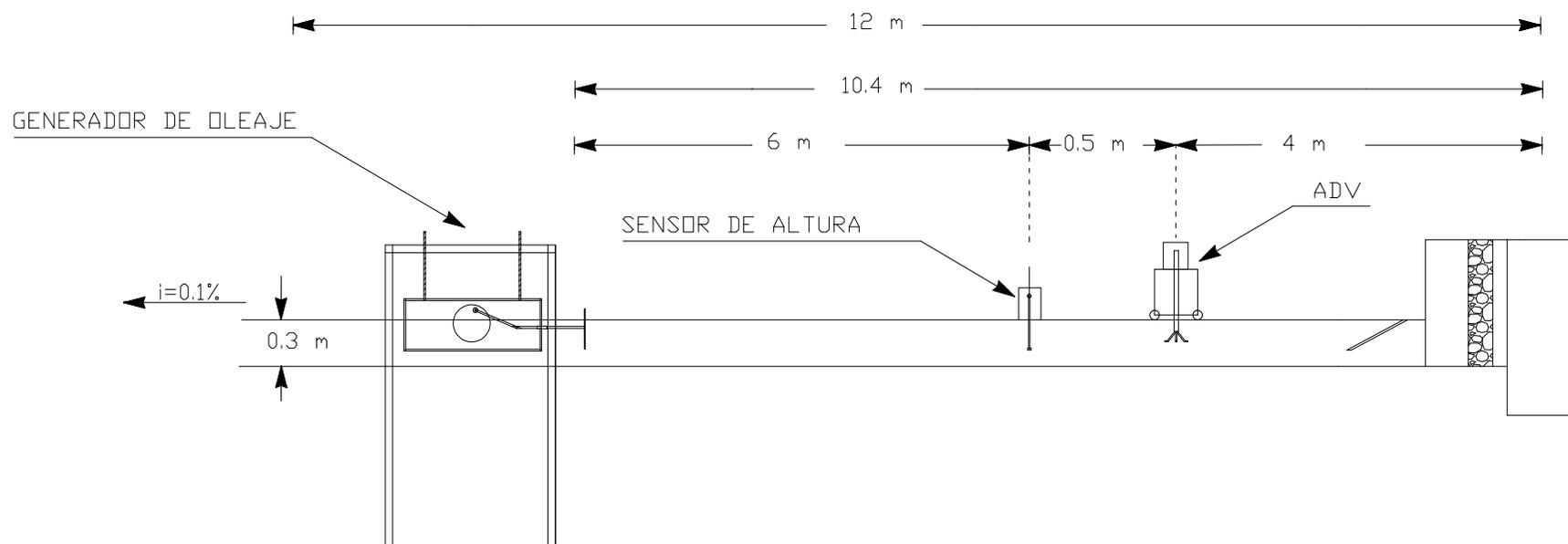
Una tubería de PVC de 110 mm de diámetro y 12 m de longitud conecta la bomba de recirculación de sólidos con el difusor que se encuentra aguas arriba del alineador de flujo.



**Figura 3.3:** Esquema del modelo experimental, vista longitudinal.  
El esquema no tiene escala



**Figura 3.4:** Esquema del modelo experimental, vista en planta.  
El esquema no tiene escala



**Figura 3.5:** Esquema del modelo experimental, vista longitudinal.  
El esquema no tiene escala

Difusor de Sólidos:

Su función es permitir que el caudal sólido, en caso de que exista, entre al canal de manera uniforme.

### **3.10 Instrumentos de medición del canal**

#### **Medición de Altura de agua:**

El instrumento para medir la altura de la columna de agua es una aplicación del Software Datastudio que mide indirectamente la altura a través del dispositivo Armfield H-40 y de la interfaz Pasco SW750, Permite medir con una frecuencia de muestreo de 10 HZ. Su calibración y funcionamiento se detalla en el Anexo II: Calibración de los instrumentos de medición del canal.

#### **Medición de Velocidad:**

El sensor de velocidad que se utilizó para las experiencias en el canal es un MicroADV Sontek y su interfaz Sontek MicroADV. Este dispositivo permite medir con una frecuencia de muestreo de 50 Htz la velocidad en los tres ejes. En el Anexo II se detalla su funcionamiento.

#### **Medición de Caudal de recirculación:**

El caudal de recirculación se midió a través de una placa orificio y un manómetro de mercurio, que se encuentran aguas abajo de la bomba de recirculación de sedimentos. Permite una estimación indirecta del gasto sólido.

Su calibración y funcionamiento se detalla en el Anexo II. La capacidad del canal para transportar sólidos no fue desarrollada en este estudio.

#### **Medición de Gasto Líquido:**

El caudal circulación de agua entre el canal y la sentina fue medido con un vertedero de pared triangular, que se ubica aguas debajo de la trampa de sedimentos. Su calibración y funcionamiento se detalla en el Anexo II.

### **3.11 Experiencias en el Modelo.**

Básicamente las experiencias que se realizaron en el modelo se pueden dividir en tres tipos: a) Calibraciones, b) Experiencias sin Caudal con Oleaje, y c) Experiencias con Caudal y con Oleaje.

#### **3.11.1 Calibraciones**

Sistema de Medición de Caudal de recirculación: Placa orificio.

Curva de descarga del vertedero triangular.

Generador de oleaje: Curva voltaje v/s Frecuencia.

Altura de ola inducida por el generador de oleaje.  
Dispositivo de medición de altura de escurrimiento.

### **3.11.2 Experiencias sin Caudal y con Oleaje:**

Eliminación de efectos de borde: Reflexión.  
Construcción de perfil de velocidades.  
Caracterización de la ola.

### **3.11.3 Experiencias con Caudal y con Oleaje:**

Construcción de perfil de velocidades.  
Caracterización de la ola.

Las experiencias que se realizaron en el modelo son 9, y están compuestas por una matriz de mediciones en 3 escalas de sedimentos, 0.5, 0.75 y 1; y en 3 velocidades de escurrimiento del flujo, estas velocidades son 0, 4 y 8 m/s en prototipo.

La Tabla 3.1 detalla las experiencias a realizar en el modelo.

Es importante mencionar que los valores de los parámetros son teóricos y se verán modificados en el modelo, los valores obtenidos a través de las mediciones experimentales y sus implicancias se estudian en detalle en el siguiente Capítulo.

*Tabla 3.1 : Matriz de experiencias a realizar*

Experiencia	Escala				Prototipo						Modelo					
	?L	?d	??	?T	h [m]	T [s]	L [m]	H [m]	u [cm/s]	d [mm]	h [m]	T [s]	L [m]	H [m]	u [cm/s]	d [mm]
1	50	0.5	1.02	1.27	8.5	4	24.0	0.69	0	0.25	0.17	3.15	3.8	0.01	0	0.5
2	50	0.75	1.02	1.48	8.5	4	24.0	0.80	0	0.375	0.17	2.70	3.2	0.02	0	0.5
3	50	1	1.02	1.65	8.5	4	24.0	0.90	0	0.5	0.17	2.43	2.9	0.02	0	0.5
4	50	0.5	1.02	1.27	8.5	4	24.0	0.69	4	0.25	0.17	3.15	3.8	0.01	3.1	0.5
5	50	0.75	1.02	1.48	8.5	4	24.0	0.80	4	0.375	0.17	2.70	3.2	0.02	2.7	0.5
6	50	1	1.02	1.65	8.5	4	24.0	0.90	4	0.5	0.17	2.43	2.9	0.02	2.4	0.5
7	50	0.5	1.02	1.27	8.5	4	24.0	0.69	8	0.25	0.17	3.15	3.8	0.01	6.3	0.5
8	50	0.75	1.02	1.48	8.5	4	24.0	0.80	8	0.375	0.17	2.70	3.2	0.02	5.4	0.5
9	50	1	1.02	1.65	8.5	4	24.0	0.90	8	0.5	0.17	2.43	2.9	0.02	4.9	0.5

En la Tabla 3.1, ?L es la escala de longitudes, ?d es la escala de tamaño del sedimento, ?? es la escala de densidades, ?T es la escala temporal y u es la velocidad de la corriente que tiene dirección contraria a la de propagación del oleaje.

## **4 Presentación y discusión de resultados**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Las series de tiempo, registradas por los instrumentos en el laboratorio, fueron procesadas íntegramente a través de las rutinas construidas en ambiente MatLab para estos fines.

Se construyeron dos rutinas que trabajan por separado, una procesa los datos que entrega el sensor de altura y la otra los datos que entrega el ADV. Ambas rutinas procesan los datos reconociendo las crestas, los valles y los nodos. Luego separan cada ola y extraen los valores máximos y mínimos. Una vez conocidos estos valores se calculan estadísticos como promedios de crestas y valles, energías cinéticas turbulentas y números de Reynolds.

Es importante mencionar que los dispositivos de medición nunca se movieron de su posición.

### **4.2 CALIBRACIÓN DEL GENERADOR DE OLEAJE.**

El Generador de Oleaje, como se mencionó anteriormente, está conformado por el motor, la paleta y por el controlador de voltaje. Este último es regulado a través del Software LabView. El controlador de voltaje es un dispositivo electrónico que permite entregar al motor un voltaje amplificado y regulado remotamente. En el Anexo I se explica en detalle el funcionamiento eléctrico del controlador.

Las experiencias realizadas están compuestas por una serie de combinaciones de períodos de ola y de corrientes en sentido contrario a la propagación del oleaje. Por este motivo la calibración del generador de oleaje se llevó a cabo para distintos escenarios de oleaje, corriente y altura del nivel medio de aguas, los cuales se detallan en la Tabla 4.1. A pesar que las experiencias realizadas en esta memoria sólo contemplan una altura de escurrimiento, la calibración consideró 3 profundidades.

**Tabla 4.1 : Matriz de Calibraciones**

Calibración	Profundidad [m]	Velocidad Corriente [cm/s]
1	0.13	0
2	0.13	3
3	0.13	6
4	0.15	0
5	0.15	3
6	0.15	6
7	0.17	0
8	0.17	3
9	0.17	6

Previo a la toma de datos fue necesario calibrar el sistema que genera la corriente en contra del sentido de propagación del oleaje. El dispositivo utilizado fue la bomba de recirculación de sedimentos, la cual permite generar un amplio rango de velocidades. La calibración propiamente tal se detalla en el Anexo II.

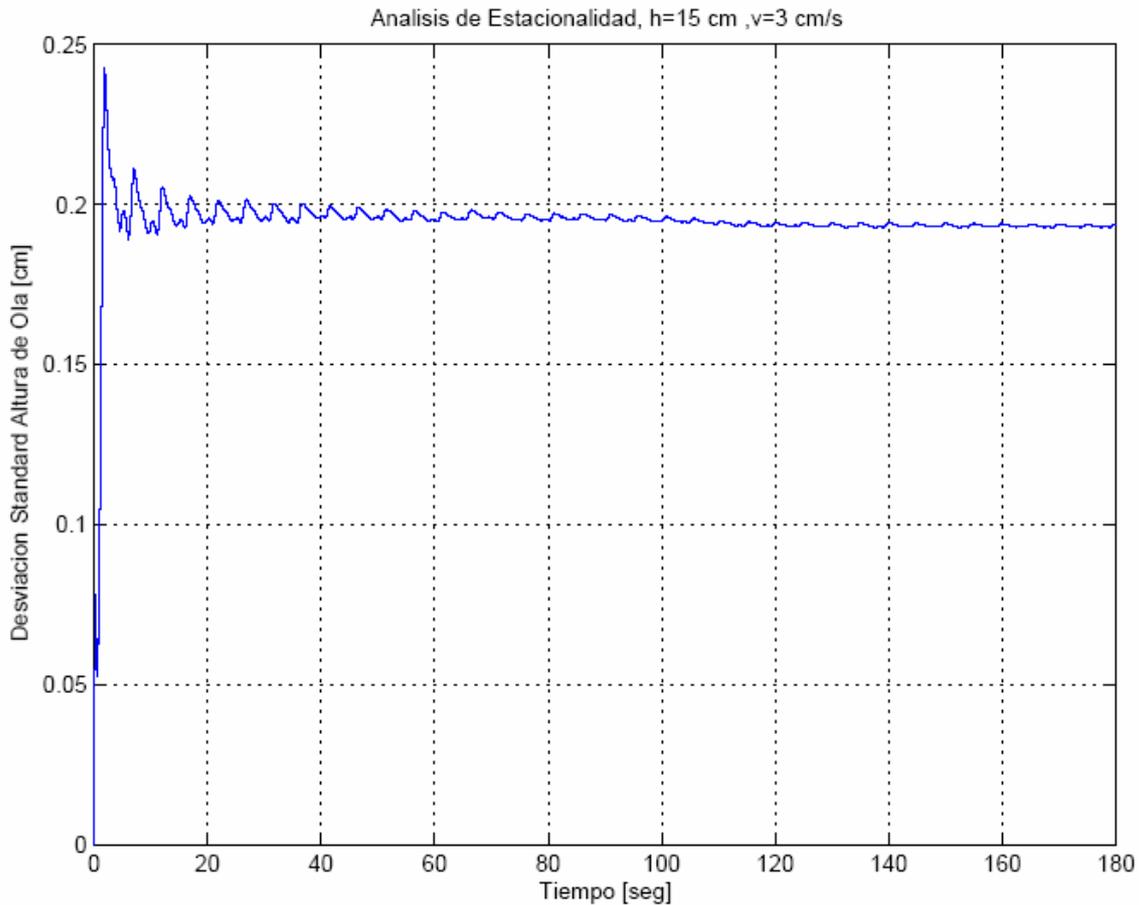
Otro elemento que fue definido previo a la toma de datos fue la playa de absorción de oleaje. Se realizaron pruebas variando el ángulo de inclinación de la playa y también cambiando su rugosidad. Los detalles de estas pruebas se pueden observar en el Anexo III: Eliminación de efectos de borde: Playa de Absorción. Es necesario mencionar que debido a que las calibraciones que se realizaron en el canal tienen distinto período y altura de aguas, no fue posible encontrar una disposición de la playa que fuera óptima para cada una de ellas. Por lo tanto la posición vertical, tamaño, rugosidad y ángulo de la playa de disipación de oleaje no fueron modificados durante la calibración del instrumento, esto con objeto de no introducir más variables en el análisis. La disposición utilizada fue: Playa de 1.2 metros, pendiente de 9° y recubrimiento de grava de aproximadamente 1 a 2 cm de dimensión máxima.

Para determinar el tiempo apropiado que debe tener cada registro de altura de ola para que sea representativo de las condiciones de oleaje, se realizó un análisis de estacionalidad de una serie tiempo de alturas de ola. A través del estudio del comportamiento del momento de segundo orden (Desviación Estándar) de la serie de velocidades en función del tiempo transcurrido. Un registro típico se presenta en la Figura 4.1, donde se observa que para tiempos mayores a un minuto la desviación estándar de la serie de velocidades no varía, es decir, se alcanza el régimen estacionario. Cada punto de la curva representa la desviación estándar de la desnivelación instantánea de la superficie, acumulada hasta el tiempo correspondiente.

El tiempo estimado de medición fue de 3 minutos, y se consideraron 5 minutos iniciales de establecimiento del sistema.

Cada calibración, entendiendo a ésta como el registro de la altura de ola, en función del voltaje, para una altura de escurrimiento y corriente, está constituida por 13 voltajes, de 0.35 a 0.95 Volts con un paso de 0.05 Volts. Entre cada registro, de cada calibración, se permitió un tiempo de reposo (sin oleaje) del sistema de

aproximadamente 5 minutos. Paralelamente antes de empezar cada medición se corroboró con el registro de velocidades que el cuerpo de agua estuviera en reposo o que la velocidad no fluctuara a causa de oleaje residual. Para las calibraciones que consideraron velocidad de escurrimiento distinta de cero, la corriente no fue detenida, permitiendo así una reestabilización más rápida del sistema.



**Figura 4.1:** Análisis de estacionalidad de la serie de altura de olas para  $T_p=5.1$  [s]

Se calibró el sensor de voltaje que mide la altura de columna de agua considerando 4 pares (altura de la columna, voltaje), antes y después de cada medición, de manera de medir con mayor fidelidad durante la experiencia la altura de oleaje reproducida por la paleta. Este procedimiento es de vital importancia ya que el sensor de altura es sensible a los cambios de temperatura del cuerpo de agua. La relación lineal entre el voltaje al cual se somete y la altura de escurrimiento cambia tanto en la pendiente como en el coeficiente de posición, registrando variaciones de hasta un 30% en la pendiente y aproximadamente un 10% en el coeficiente de posición, en registros realizados en horas de la mañana y de la tarde.

Las series de voltaje registradas a través del sensor, fueron transformadas a series de altura a través de las calibraciones anteriores y posteriores a cada medición. Los coeficientes de posición y pendientes obtenidos fueron promediados de manera de obtener valores más certeros de altura de ola.

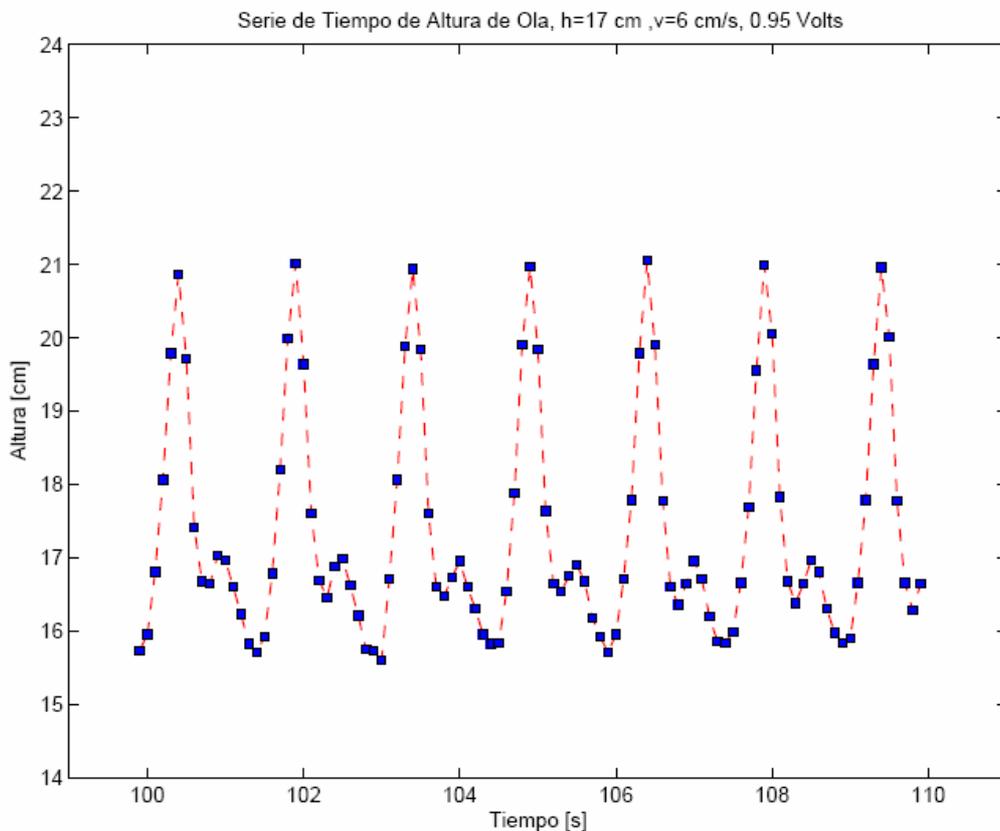
La Figura 4.2, muestra una parte del registro de alturas obtenido para una profundidad media de 17 cm, una corriente de 6 cm/s en dirección contraria a la dirección de

propagación del oleaje y un Voltaje de control de la paleta de 0.95 Volts. Cada punto representa una medición de altura de la columna de agua realizada con una frecuencia de muestreo de 10 Hz.

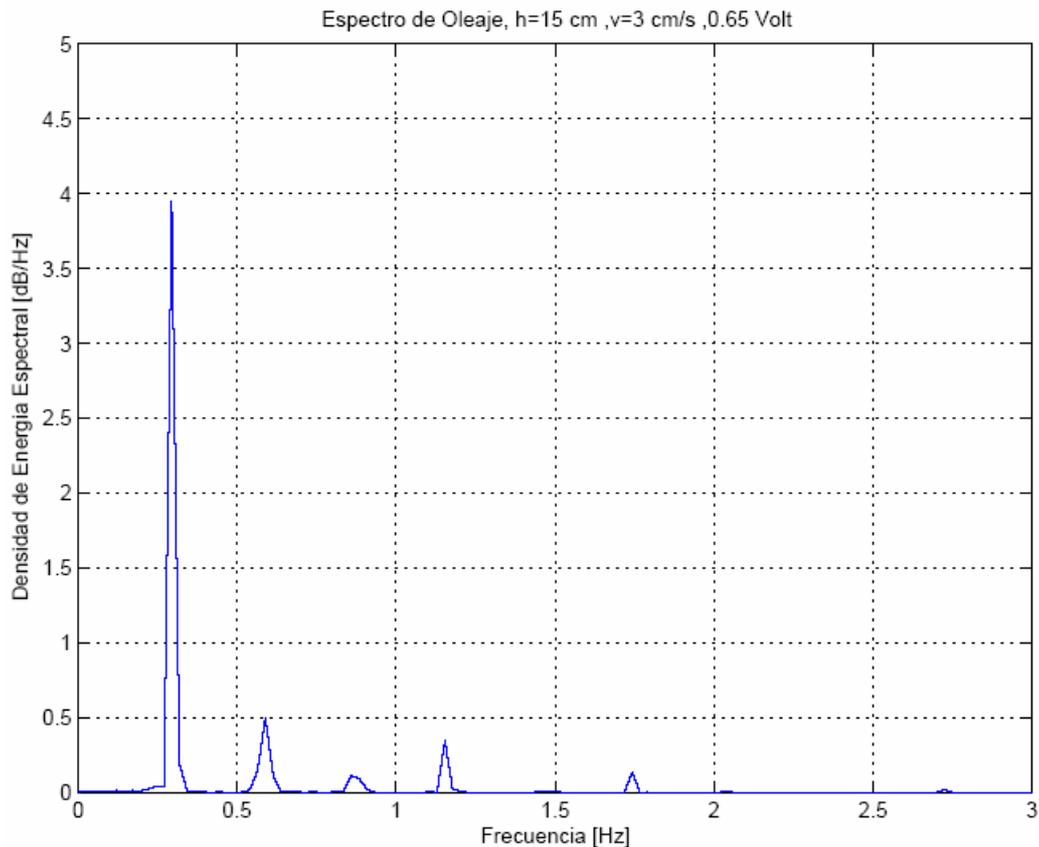
Se aprecia claramente en este registro la existencia de un segundo peak de mucho menor amplitud que el primero, este segundo peak tiene el mismo período que el peak mayor, por lo que se asume está asociado al oleaje que la playa de absorción no es capaz de disipar, es decir, al oleaje reflejado.

Una vez registradas las series de altura de ola, se extrajo información a través de una rutina en ambiente MatLab que reconoce y separa cada ola, de manera de extraer parámetros como la altura de la ola, la frecuencia peak y adimensionales que son de interés para caracterizar la naturaleza del oleaje, además de estadísticos que permiten el análisis de la calidad de los datos registrados

Paralelamente la rutina construye el espectro del oleaje y extrae la frecuencia peak del registro. En la Figura 4.3 se presenta el espectro de oleaje de la calibración asociada a una altura de 15 cm, velocidad de corriente 3 cm/s y voltaje igual a 0.65 Volt. Las series fueron estudiadas a través del software MATLAB, con una ventana rectangular y un bin de 512 datos. En todas las series analizadas en este estudio se consideraron los mismos parámetros.



**Figura 4.2:** Extracto de serie de tiempo de altura de ola medida en el canal.

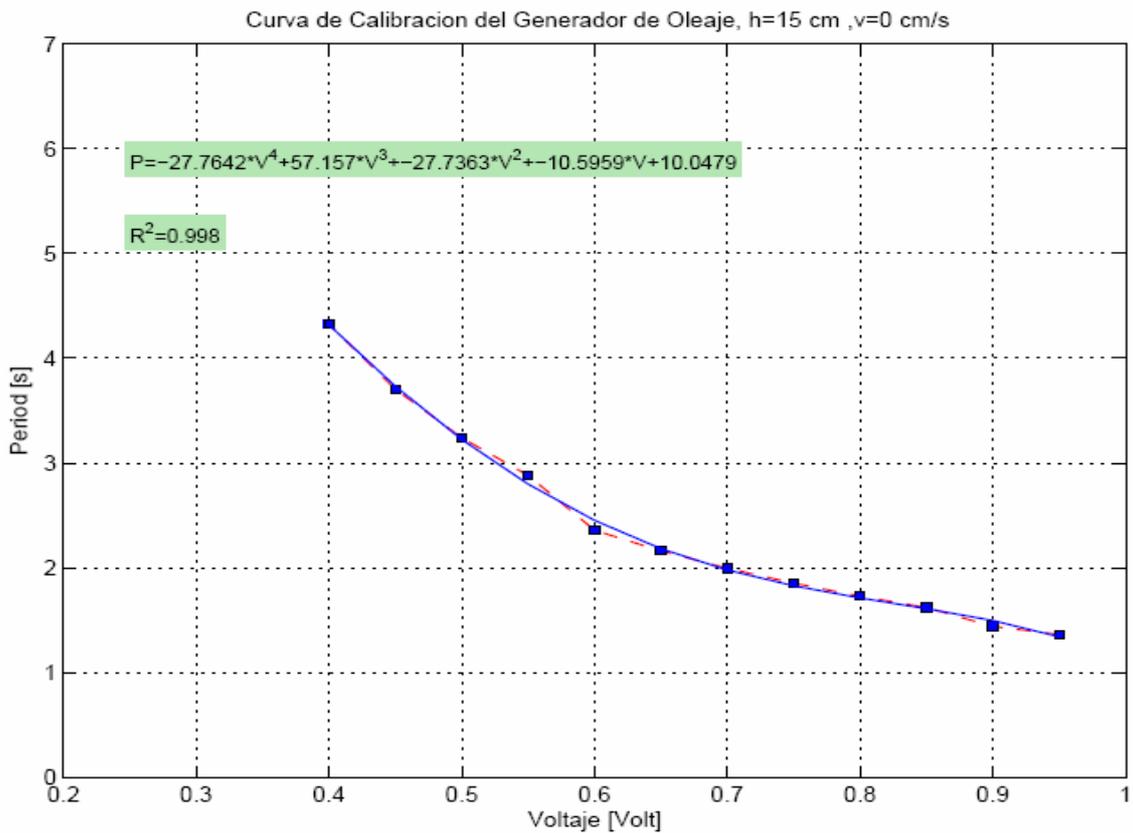


**Figura 4.3:** Espectro de altura de oleaje medido en el canal.

Para cada calibración la rutina construye el espectro y extrae la frecuencia peak. Luego esta información se presenta en forma gráfica como calibración del período peak. Se puede observar que en la Figura 4.3, existen otros peaks secundarios, los cuales están asociados a fenómenos como la reflexión.

Es importante destacar que esta rutina se programó para realizar los análisis de la serie de tiempo de alturas y queda a disposición de futuros memoristas que utilicen el canal o que realicen estudios afines con la naturaleza de esta memoria.

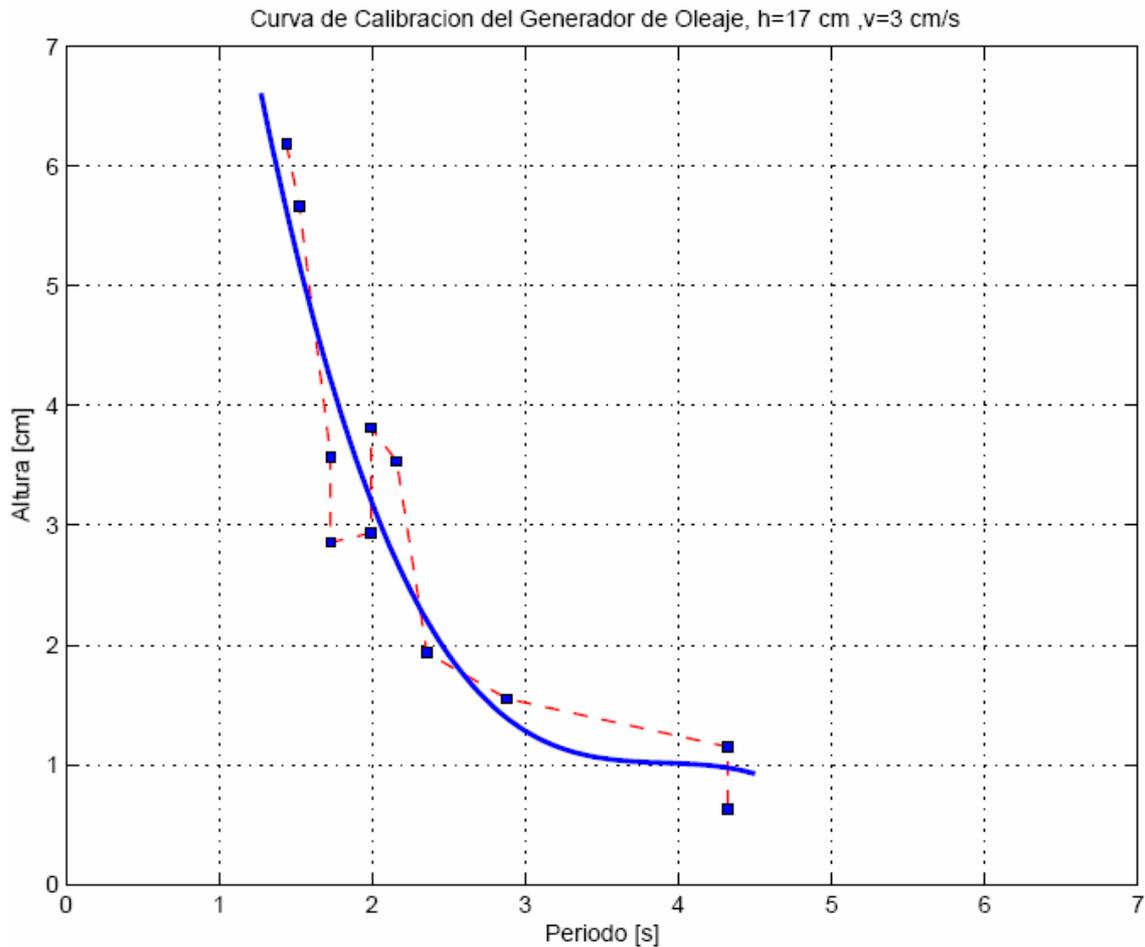
Una vez analizados los registros se calibró para cada uno de los escenarios mencionados anteriormente en la Tabla 4.1. La Figura 4.4 muestra la calibración del período con respecto al voltaje, correspondiente a una profundidad de 15 cm y al caso sin corriente. Se utilizó un polinomio de orden cuatro para la calibración del período respecto del voltaje.



**Figura 4.4:** Calibración del Período Peak del oleaje

Todas las calibraciones de períodos realizadas presentaron el mismo comportamiento, una disminución no lineal del período conforme aumenta el voltaje.

El análisis de las series de alturas de oleaje arrojó, como era de esperarse, una relación inversa entre las alturas de ola y el período, como se observa en la Figura 4.5, la cual fue registrada con una profundidad de 17cm y una corriente de 3 cm/s.

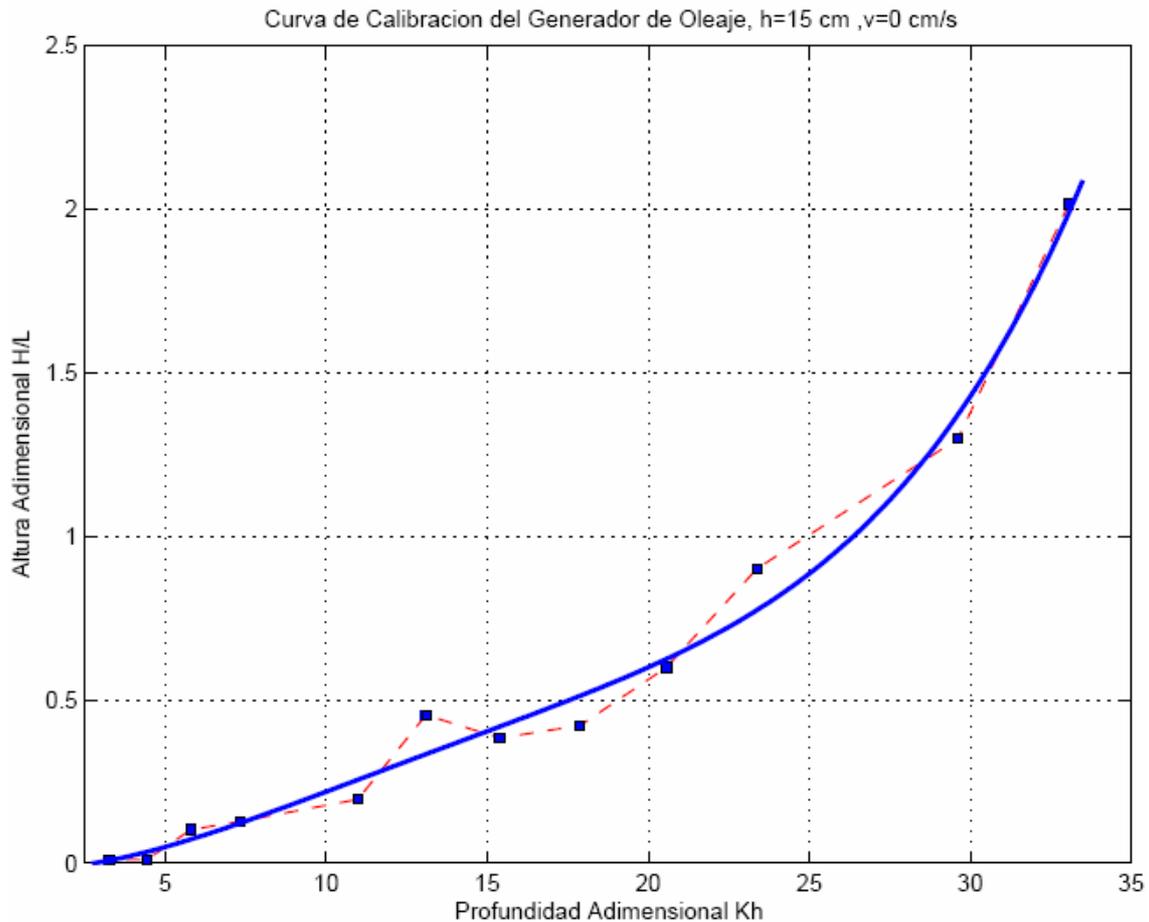


**Figura 4.5:** Calibración del Altura del oleaje

Para todas las series se observó el mismo comportamiento. Debido a que el *Stroke* o desplazamiento de la paleta permaneció constante durante las experiencias realizadas en el canal, la altura de oleaje está ligada al período del mismo. Sin embargo debido a fenómenos como la reflexión esta relación no se presenta de manera tan directa, no obstante se observa claramente la dependencia inversa entre la altura del oleaje y el período.

Además para cada registro se calculó la altura adimensional ( $H/L$ ) y profundidad adimensional ( $2\lambda/L$ ). En la Figura 4.6, se grafican ambas variables, para el registro correspondiente a 15 cm de profundidad y sin corriente.

La profundidad adimensional fue obtenida tomando en cuenta la longitud de ola calculada con la T.L.O; en el siguiente capítulo se discutirá la validez de este supuesto.



**Figura 4.6:** Adimensionales del oleaje

Es importante mencionar la relevancia que tiene esta la Figura 4.6, sumada a las otras 8 (una por calibración), ya que la línea que une los puntos define el límite operacional de la paleta, es decir, el dispositivo de generación de oleaje no es capaz de generar oleaje cuyas altura adimensional y profundidad adimensional se encuentran en el área superior del gráfico.

El límite operacional del dispositivo de generación de oleaje se definió considerando las nueve calibraciones.

Según el Coastal Engineering Manual del año 2001 (CEM en adelante) se puede distinguir entre teorías aplicables a distintos oleajes según la Figura 4.7, en la cual se puede apreciar los puntos rojos que representan las series de oleajes reproducidas en las calibraciones. Si bien es cierto el CEM no incluye la variable corriente en la Figura 4.7, esta gráfica es una herramienta útil y sencilla para conocer aproximadamente la naturaleza del oleaje.

Debido a que las series de oleaje reproducidas en el laboratorio no están comprendidas dentro de una sola teoría de oleaje, se compararon las series registradas con dos teorías:

La T.L.O. y la Teoría de Dean o de función de corriente, que permite de manera relativamente sencilla construir, por ejemplo, perfiles de distribución de velocidades.

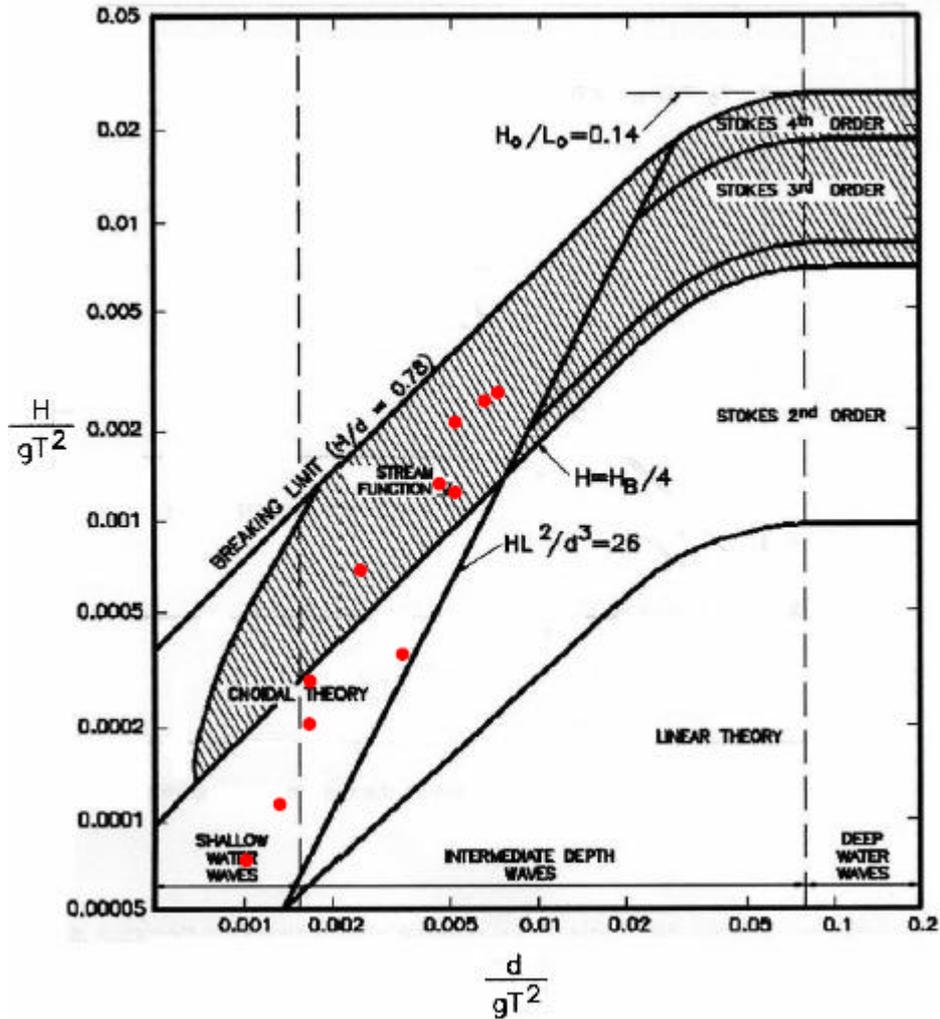


Figura 4.7: Teorías asociadas a números adimensionales del oleaje, CEM 2001.

En el desarrollo del capítulo, se contrastan ambas teorías con los resultados obtenidos. Se consideraron sólo estas dos teorías debido a la amplia aplicabilidad de ambas, y a que una representa un enfoque lineal y la otra un enfoque no lineal.

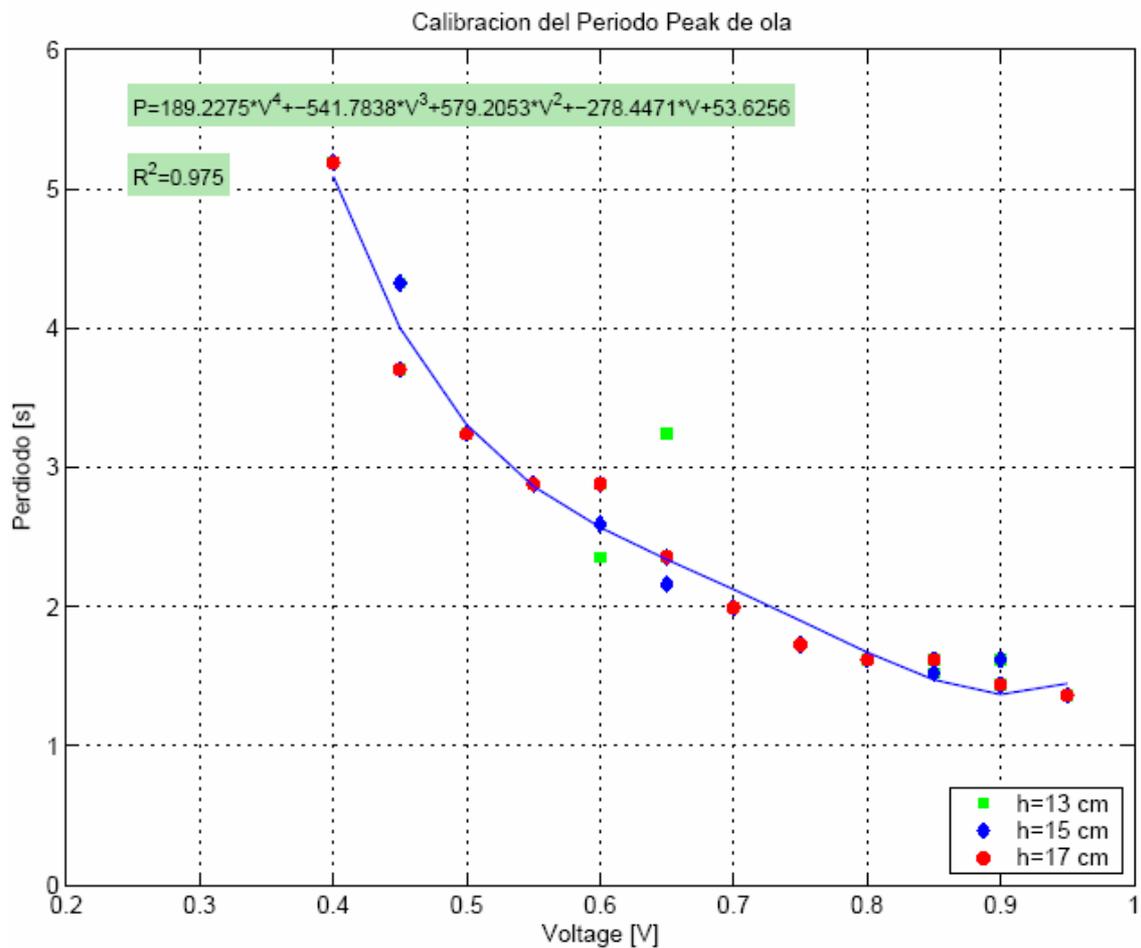
Debido a que el *Stroke* o recorrido de la paleta es fijo (para todas las experiencias realizadas, no obstante es posible modificarlo introduciendo un cambio en la instalación experimental, ver Anexo I) el parámetro de control del oleaje es el período.

En el Capítulo 2 se hizo mención al período aparente y al período real en un sistema de oleaje con corrientes. Estudiando las diferencias existentes entre ambos, a través de la T.L.O; se observa que para el caso de mayor velocidad de la corriente (Experiencia 7, 6. 3m/s), la diferencia entre el período aparente y el real no supera el 5%, debido a lo cual, para todos efectos prácticos, la calibración del período no depende de la velocidad de la corriente.

Es importante mencionar que las profundidades tampoco afectan la calibración del período, por lo tanto se recomienda utilizar sólo una calibración, y no una por cada condición experimental. Esto último queda de manifiesto en la Figura 4.8, en la cual se presentan todas las calibraciones, separadas por alturas del nivel medio de aguas.

En el siguiente gráfico existen muchos puntos de las series de datos que están superpuestos, lo que valida la hipótesis de que la calibración es independiente de las velocidades y de la altura, en el rango que se realizó la calibración.

La línea azul representa la calibración del período respecto del voltaje. Ésta se traduce en un polinomio de orden 4.

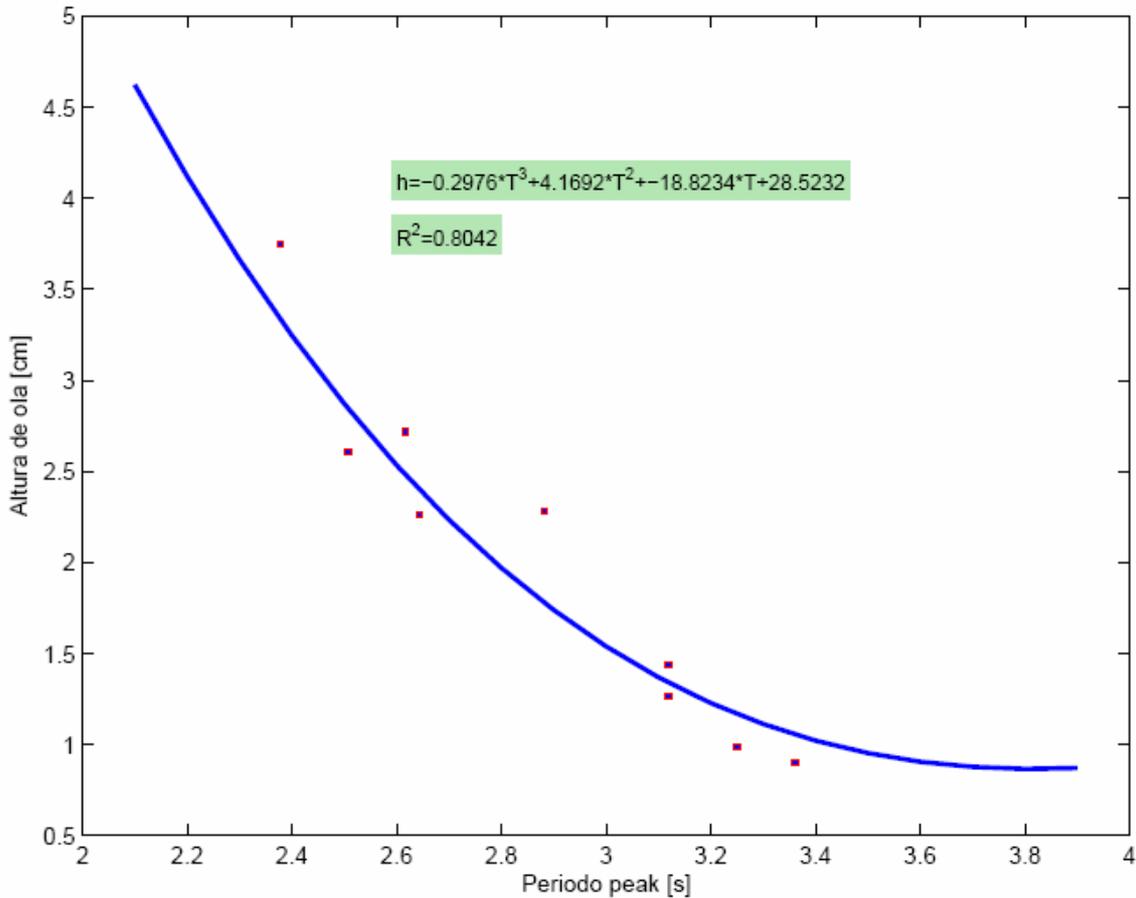


**Figura 4.8:** Calibración final del generador de olas.

El parámetro de control del oleaje en el sistema es el período peak (el cual se controla con el voltaje). La altura de ola se relaciona inversamente con el período como lo muestra la Figura 4.9, donde se aprecia la distribución de la altura en función del período peak. Esta relación es de gran utilidad ya que permite saber la altura de ola esperada en el canal para un período peak dado.

Como una herramienta para futuros estudios, la Figura 4.10 presenta el límite operacional del dispositivo de generación de oleaje considerando todas las experiencias

individuales de calibración en el canal. Esta sencilla figura permite conocer la posibilidad de generar o no cierta condición de oleaje.

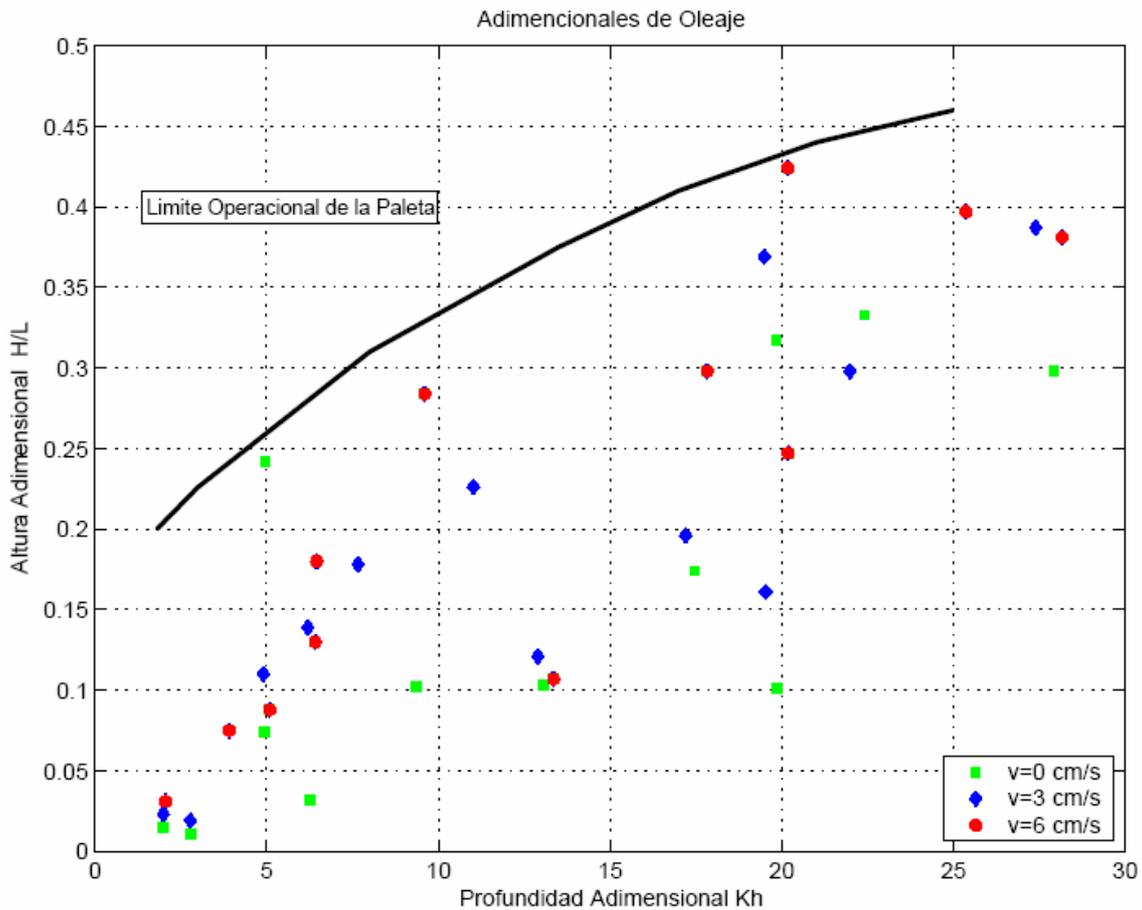


**Figura 4.9:** Altura de ola como función del período peak .

Nuevamente se observa que no existe ningún patrón de comportamiento que permita distinguir entre los adimensionales generados para las distintas velocidades de corrientes.

Debido a que el dispositivo generador de oleaje está constituido por un motor eléctrico que tiene un rango de generación de oleaje óptimo entre 5 y 1 [s] de período, no es recomendable exigir al generador de oleaje sobre o bajo el límite mencionado anteriormente. En el Anexo I, se explican en detalle las características y rangos de operación apropiados para el motor.

No se desarrolló en el canal un flujo generalizado de sólidos, sólo algunos movimientos del lecho particularmente en la fase valle (donde la velocidad es mayor). Para efectos de lograr la velocidad de corriente deseada se utilizó la bomba de recirculación de sedimentos, ya que permite una operación más rápida y precisa.



**Figura 4.10:** Adimensionales del Oleaje, Límite Operacional de la Paleta.

### 4.3 Caracterización hidrodinámica

El análisis de los datos fue llevado a cabo durante las mediciones mismas y además como post-proceso a través de una rutina en ambiente MatLab. Esta rutina fue construida y diseñada para sistematizar el trabajo con los registros debido a la gran cantidad de información que es necesario manejar para obtener los resultados.

Dentro de los alcances de la rutina se pueden contar: Análisis de la calidad de los datos muestreados; Análisis de estacionalidad del fenómeno registrado; Análisis del contenido espectral de las series de tiempo; Análisis de auto-correlaciones y correlaciones cruzadas; Construcción de perfiles de velocidad y comparación con perfiles teóricos lineales y no lineales por fase del oleaje; y Construcción de perfiles de energía cinética turbulenta por fase del oleaje, entre otros análisis.

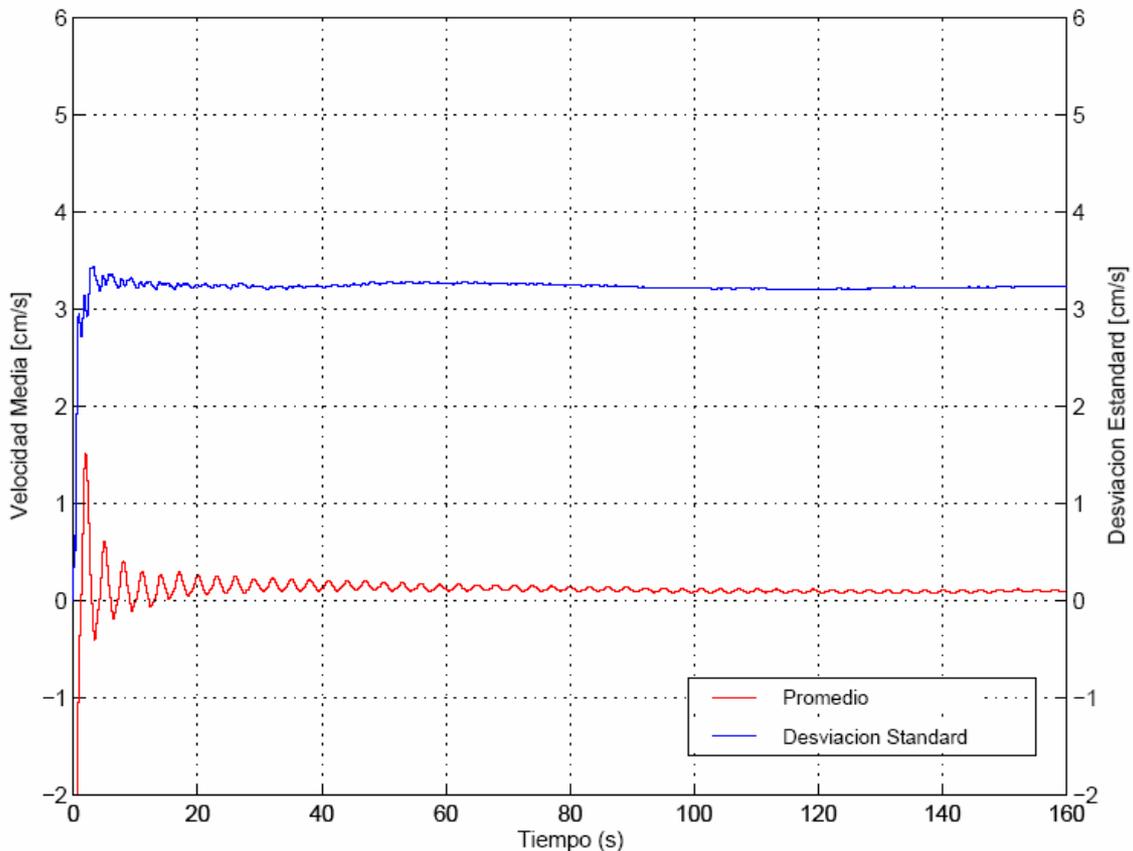
Todos estos análisis están apoyados tanto por salidas gráficas como archivos de texto resúmenes que permiten una rápida y completa síntesis de la información registrada en el laboratorio.

Las mediciones realizadas en el canal se detallan en la matriz de experiencias, Tabla 3.1.

#### 4.3.1 Estacionalidad.

Es importante mencionar que el tiempo de medición se rebajó de 180 segundos a 160, debido a que este cambió facilita medir con el ADV y es igualmente válido el registro en cuanto a estacionalidad del sistema, como lo muestra la Figura 4.11, donde se observa que inclusive para tiempos menores se tienen registros que se pueden catalogar como estado permanente, tanto para la serie de velocidades como para la de alturas de olas. La serie de velocidades presenta el mismo comportamiento.

En la Figura 4.11 no se presentaron las tres componentes de la velocidad de manera de no saturar el grafico de información innecesaria, debido a que las velocidades en los ejes z, x e y presentan el mismo comportamiento.



**Figura 4.11:** Análisis de estacionalidad de la serie de velocidades para  $T_p=3.15$  [s]

Se observa que la velocidad (en la dirección de la corriente) alcanza un valor fijo de desviación estándar aproximadamente a los 100 s. El momento de segundo orden de la serie (o desviación estándar) es más exigente que el promedio para definir estacionalidades de un sistema, sin embargo para esta serie, no se observan mayores tiempos de convergencias en la serie del promedio que en la serie de la desviación estándar.

Se escogió un lapso de 160 segundos para permitir que los registros que se estabilizaran en mayor tiempo pudieran ser validamente registrados y analizados.

Cada perfil consiste en 13 series medidas a distintas profundidades de la columna de agua. Las profundidades que se consideraron permiten obtener una caracterización detallada de la hidrodinámica del sistema, ya que se escogieron de manera de representar de la mejor manera posible los fenómenos hidrodinámicos presentes en el sistema.

Se consideró para esta decisión un perfil logarítmico de velocidades, el cual presenta una marcada variación desde el fondo hasta tope de la capa límite (zona del flujo donde los esfuerzos de corte dominan sobre las fuerzas másicas), y que varía luego de manera más gradual en la zona media del flujo y permanece casi constante en la sección superior de la columna de agua.

Las primeras cuatro mediciones se realizaron con un espaciamiento de dos mm y corresponden a mediciones cercanas al fondo del canal. Las siguientes 7 mediciones se realizaron con un espaciamiento vertical de 0.5 mm. Debido a que en el perfil de velocidades, tanto el asociado al oleaje como el vinculado a la corriente, no varía en la vertical de manera tan drástica como en los primeros 8 milímetros, luego para completar el perfil se añadieron dos puntos más, espaciados en 1 cm.

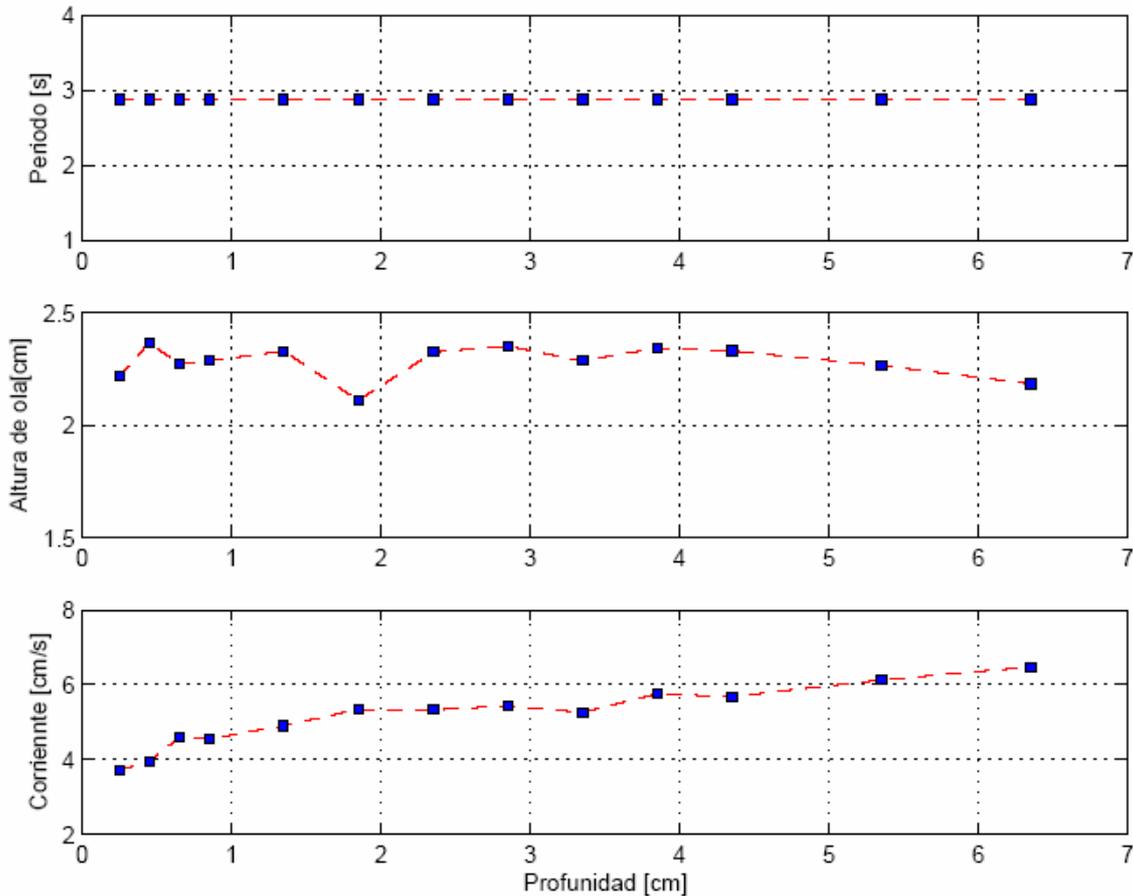
Es importante mencionar que con el objetivo de sistematizar los registros no se realizaron mediciones verticales en puntos superiores a los mencionados, ya que para ciertos períodos (los más pequeños, que producen variaciones del nivel medio de aguas mayores) el transductor emisor del ADV quedaría sobre el nivel medio de agua, el que para todas las mediciones alcanzó de 17 cm.

Antes de cada medición se esperaron 5 minutos de estabilización del sistema, y entre mediciones no se consideró ninguna pausa, más que la que toma cambiar el ADV de posición.

Cada medición fue revisada a medida que fue registrada, ya que la interfaz visual (Data Studio) del sensor de voltaje (que mide indirectamente altura), permite visualizar todos los registros de voltajes de todas las serie simultáneamente. Con este filtro visual se eliminaron mediciones que presentaron variaciones importantes dentro de sí mismas o con el resto de los registros de una misma experiencia

Una vez terminadas cada medición se evaluaron los datos de voltaje (vinculados a la altura) medidos con la rutina en ambiente MatLab, de manera que los registros de experiencias que presentaron anomalías fueron eliminados y repetidos al final de cada experiencia. Para este proceso no se detuvo el generador de oleaje de manera de que el registro tuviera la misma naturaleza que los últimos. En la Figura 4.12 a), b) y c) se

presentan, para todos los puntos del perfil, los registros de período peak, altura promedio, y velocidad de corriente promedio de la serie de mediciones asociada a un período peak de 2.7 s y una corriente con dirección contraria a la de propagación del oleaje de 5.4 cm/s. Cada punto representa el promedio de la variable medida durante 160 s.

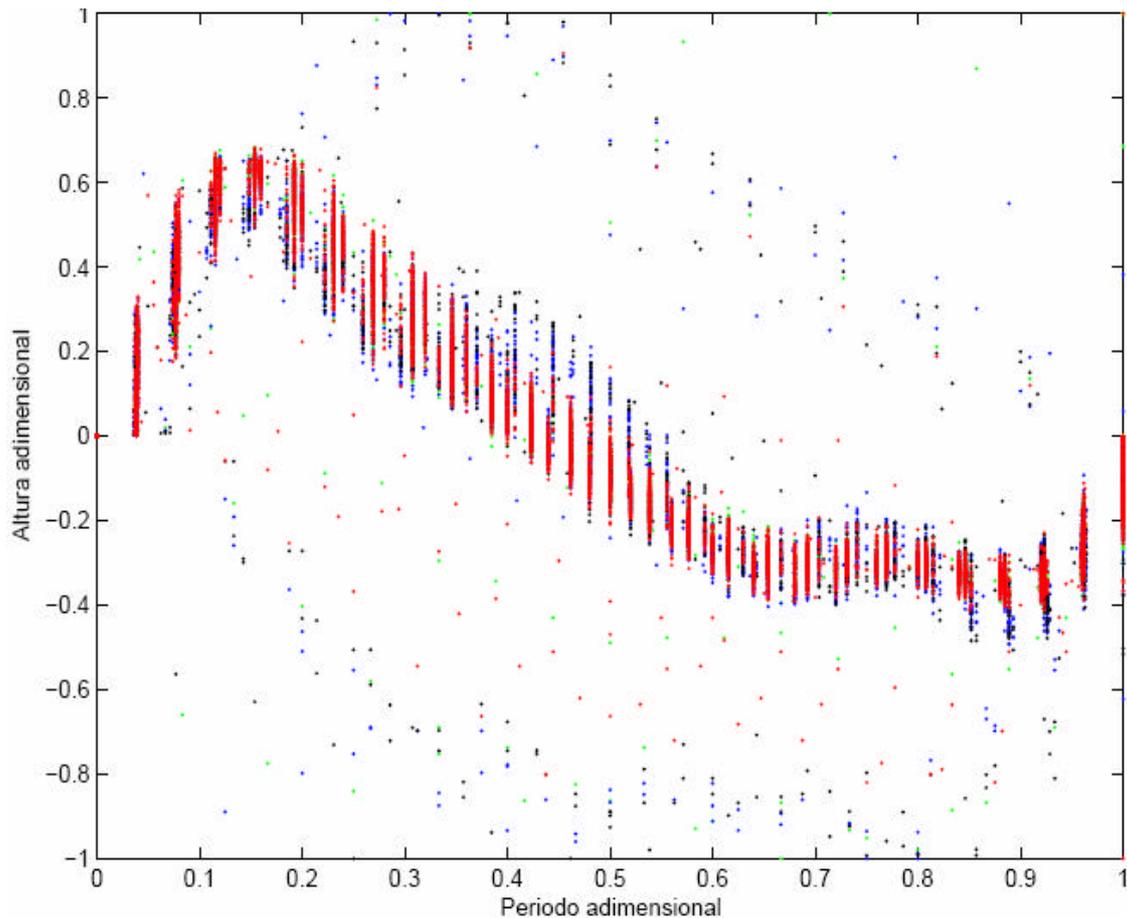


**Figura 4.12:** Análisis cualitativo de los datos registrados.

La variable corriente es la velocidad promedio, que se calculó como el promedio de velocidades de toda la serie. Se puede observar en la Figura 4.12 c) que la velocidad promedio aumenta a medida que los registros disminuyen su profundidad de muestreo, esto se debe al ya mencionado perfil logarítmico de velocidades.

En la Figura 4.13, se presenta una adimensionalización de cada ola por su período y su altura. Esta gráfica representa los resultados de la medición de de alturas y velocidades para un periodo peak de 2.43 s y una corriente de 2.4 [m/s].

Cada punto representa una medición. El resultado final es la superposición de todas las olas del registro, cada una de ellas adimensionalizada en la abscisa por su período particular y en las ordenadas por su altura de ola particular, obteniéndose el perfil de la ola. Las demás series presentaron un comportamiento similar.



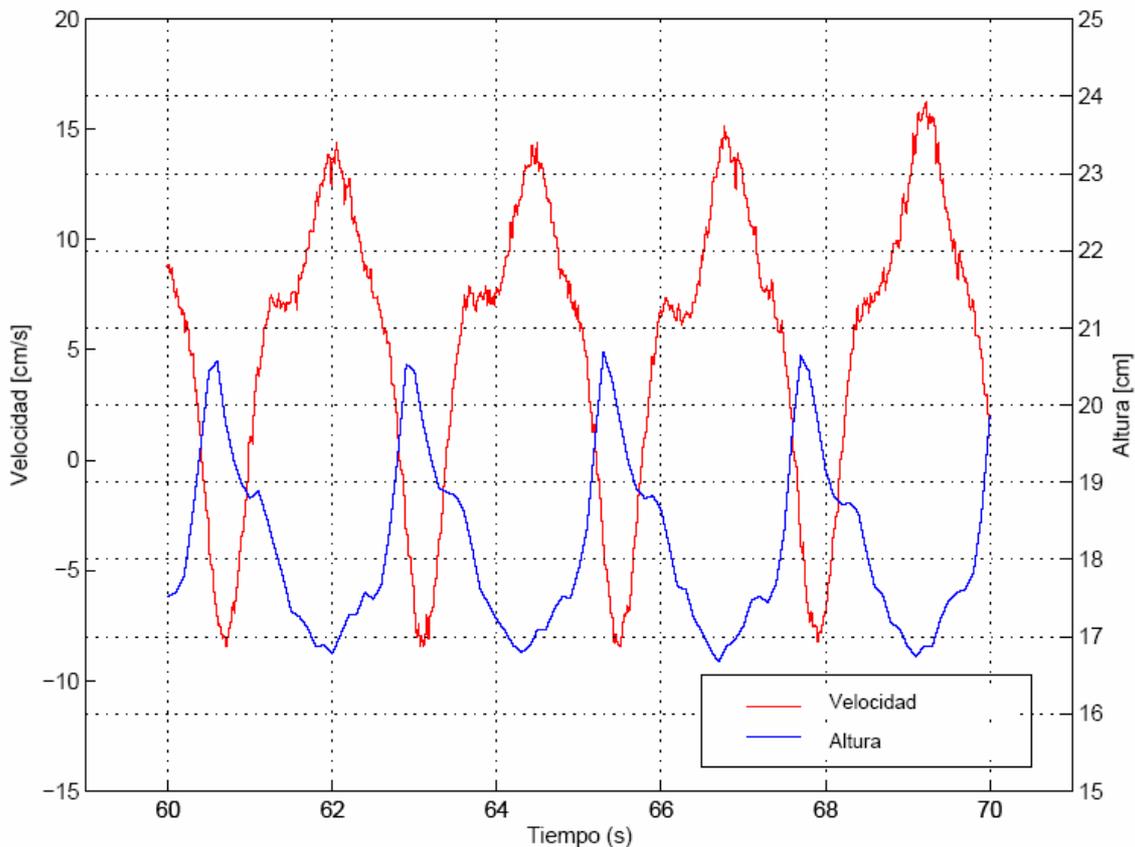
**Figura 4.13:** Perfil adimensional de ola registrada

Para un análisis estadístico de la serie, se puede recurrir al Anexo IV, Registros estadísticos de las mediciones, el cual contiene estadísticos y parámetros resúmenes de la series de velocidades y alturas. Esta síntesis del análisis también es producto de la rutina programada en MatLab antes mencionada.

Es importante mencionar que la velocidad de la ola está relacionada con su altura, por lo que la validez de los primeros garantizan la calidad de los segundos. La Figura 4.14 muestra una medición de altura de ola y de las velocidades asociadas para un período peak de 2.43 s y una corriente de 4.9 cm/s.

Cada punto de cada curva representa una medición instantánea de velocidad o altura para un tiempo dado.

Se puede observar que los mínimos están asociados a los máximos de altura, esto debe a que el ADV está orientado de manera que los valores positivos obtenidos corresponden a las velocidades en la dirección de escurrimiento del flujo, es decir, en la dirección contraria de la propagación del oleaje.



**Figura 4.14:** Correlación entre velocidad registrada y la altura de la columna de agua

### 4.3.2 Análisis Espectral

El análisis espectral de velocidades que se discutirá a continuación está compuesto por 3 combinaciones de oleaje (de período) y corriente, a saber: i) Sin corriente y período peak 3.15 s, experiencia 1; ii) Sin corriente y período peak 2.43 s, experiencia 3; y; iii) Corriente 6.3 cm/s y período peak 3.15 s, experiencia 7. Todos los espectros de velocidad que se presentan corresponden a series registradas a la misma profundidad, 1.85 cm.

Para efectos del análisis espectral, el eje X tiene la dirección del flujo, el eje Z es la vertical y el eje Y corresponde a la ortogonal a ambos.

La línea negra que se observa en cada uno de los tres gráficos corresponde a la ley de kolmogorov, esta ley asegura que la pendiente de con la que decae el contenido espectral en las gráficas log-log es de  $-8/3$ . El cumplimiento o no de la ley de kolmogorov no valida o invalida los datos registrados, debido a que fuera del rango inercial esta ley no se cumple.

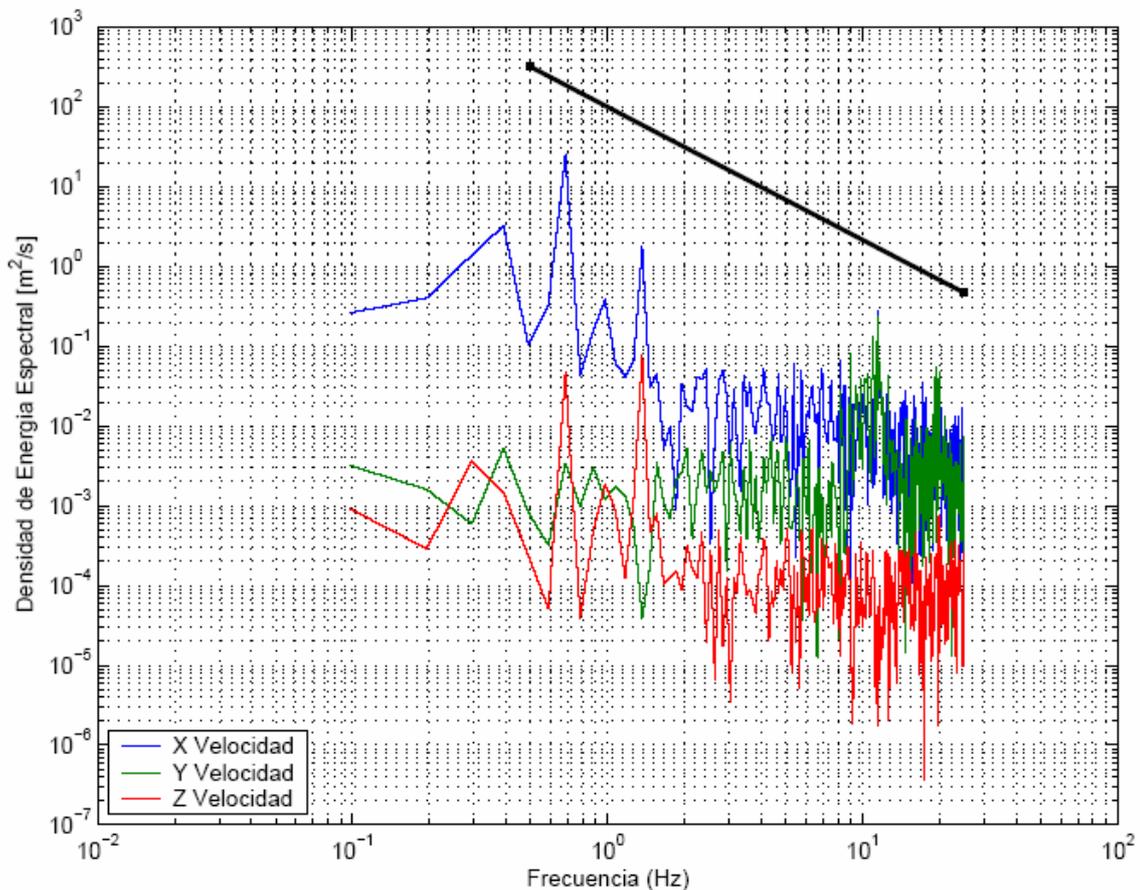
Con respecto a las unidades de los espectros, se puede mencionar que los espectros de altura tienen en la ordenada la unidad  $[m^2s]$ , mientras que los espectros de velocidades

tienen en su eje y la unidad [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], lo que determina una densidad de energía. No obstante se referirá a ambos como espectros de densidad de energía.

i) Este espectro representa una situación relativa de período largo. Se observa en la Figura 4.15 que el peak se encuentra a un frecuencia de aproximadamente 4 segundos, este peak de contenido espectral está asociado al oleaje.

La diferencia existente entre el peak de oleaje y la energía asociada a frecuencias mayores que 1 Hz es de aproximadamente 3 ordenes de magnitud, es decir, gran parte de la energía del sistema está contenida en el oleaje, y pequeñas cantidades están asociadas a turbulencia de frecuencias altas, mayores a 5 Hz, lo que está asociado a la turbulencia.

Se observa que para frecuencias mayores a aproximadamente 7 Hz la energía vinculada a la dirección X e Y comparten el mismo contenido de energía espectral, manteniéndose siempre por debajo la energía en la componente. Es decir, no hay isotropía en la distribución del contenido espectral en las distintas componentes. Tampoco se observa el cumplimiento de la ley de Kolmogorov, lo cual indica que no parece haber rango inercial en este caso.

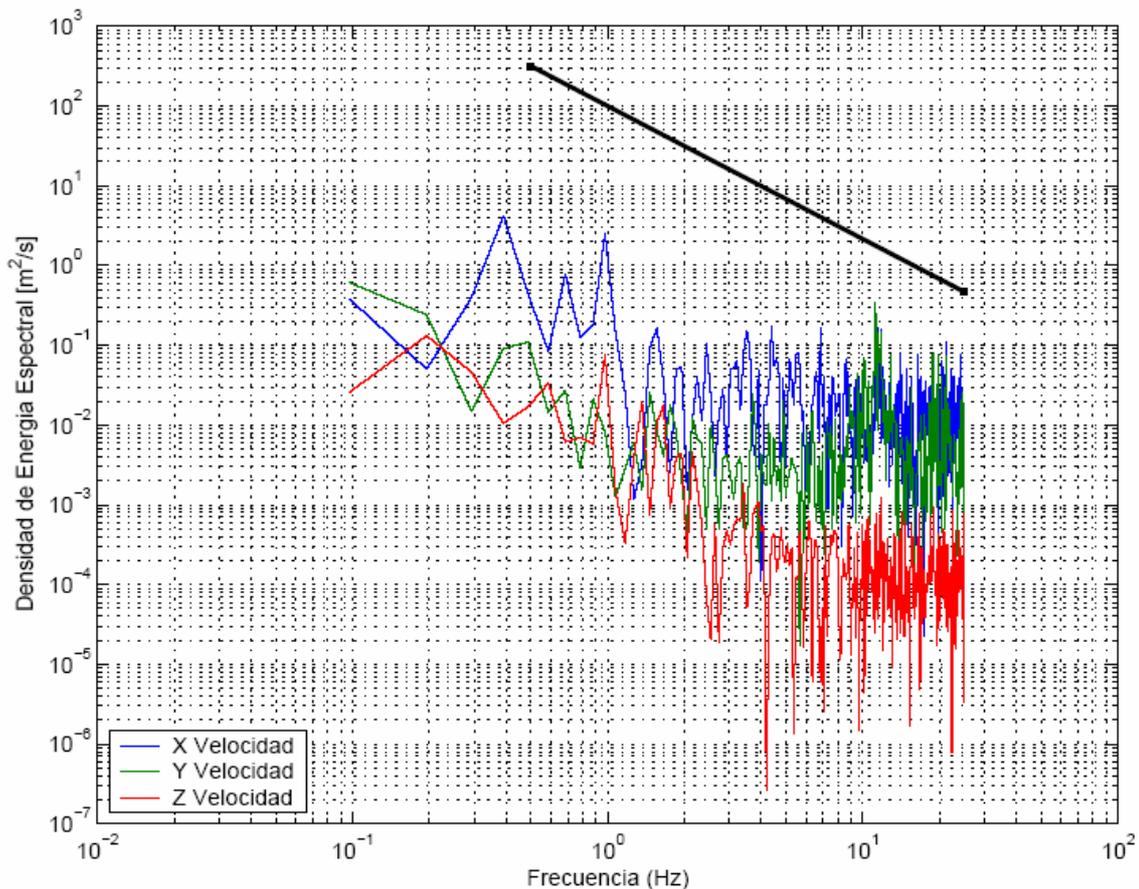


**Figura 4.15:** Espectro de velocidades,  $T=3.15$  s,  $v=0$  m/s,  $z=1.85$  cm.

ii) La Figura 4.16 presenta el espectro de velocidades para una situación relativa de período corto. Se observa que la diferencia de contenido espectral de energía existente entre el peak asociado a la frecuencia del oleaje y la energía que presentan frecuencias del orden de 1 Hz se redujo sólo a un orden de magnitud.

Esta disminución de la brecha energética que separa ambas frecuencias se debe a que parte de la energía del peak se distribuyó en las frecuencias mayores. Debido a que la mayor agitación generada por el oleaje (recordar que en esta situación el período es 2.43 s, mientras que en el caso anterior era de 3.15 s) contribuyó a entregar más energía a fluctuaciones de velocidad de frecuencia más alta.

Nuevamente la densidad de energía espectral, para las direcciones X e Y es del mismo orden para frecuencias superiores a 5 Hz. Se observa ahora una mayor isotropía en la distribución del contenido espectral entre 1 y 5 Hz. Además de que el decaimiento de la energía espectral se asemeja a la ley de Kolmogorov en ese rango, lo que se traduce en la presencia de un rango inercial en esa banda de frecuencia.

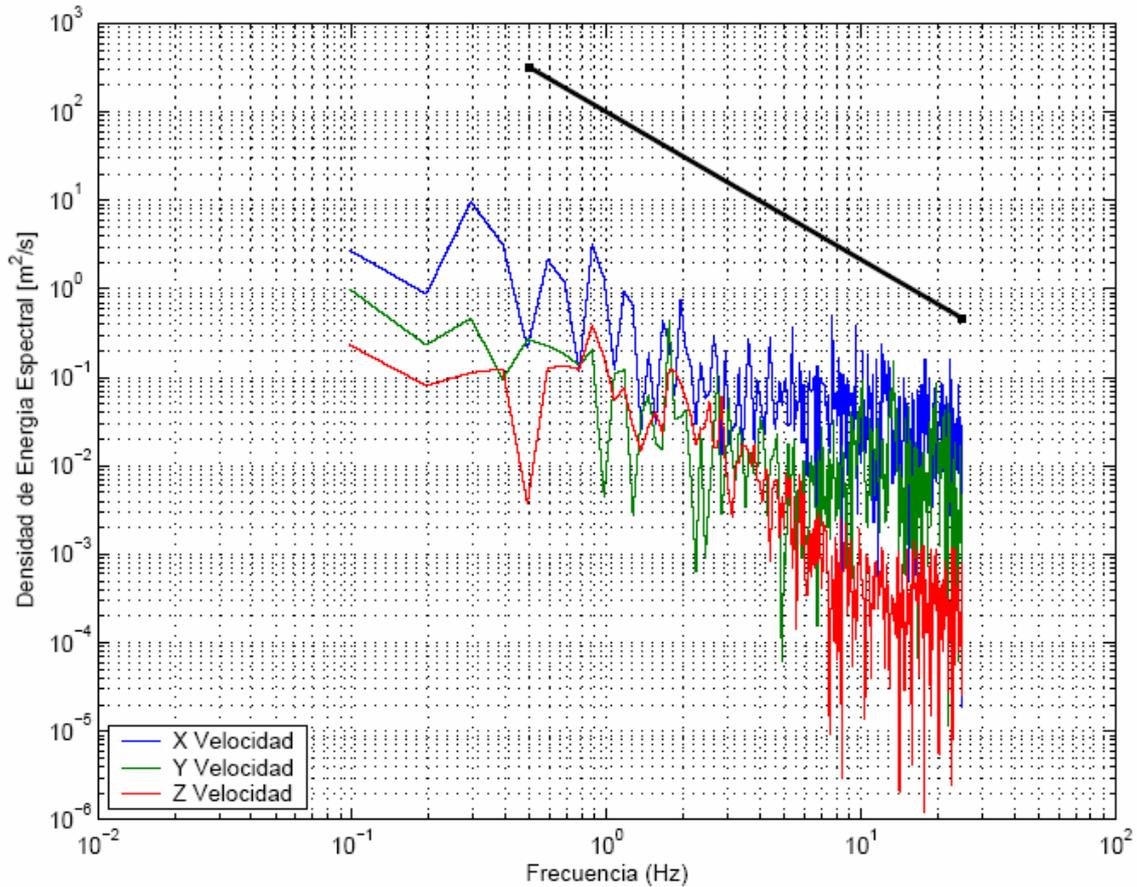


**Figura 4.16:** Espectro de velocidades,  $T=2.43$  s,  $v=0$  cm/s,  $z=1.85$  cm.

iii) Este caso representa la medición con mayor velocidad de corriente y el período más largo. Durante las mediciones se pudo constatar que el oleaje no se manifestó de forma definida ya que la poca energía por unidad de tiempo que el entregaba la paleta no fue suficiente para desarrollar un oleaje claro. No obstante se observa un peak menor en

una frecuencia cercana a los 0.3 Hz, que corresponde a un período cercano a 3 segundos.

En la Figura 4.17 se observa que disminuye aún más la diferencia energética entre el peak asociado al oleaje y el contenido espectral de las frecuencias mayores.



**Figura 4.17:** Espectro de velocidades,  $T=3.15$  s,  $\nu=6.3$ ,  $z=1.85$  cm.

Se observa en la Figura 4.17, más que en las figuras anteriores, una mayor isotropía en la distribución de la energía espectral y una mayor semejanza con la ley de Kolmogorov, en la banda de frecuencia comprendida entre los 1 y los 5 Hz, lo que se traduce en que en esa banda de frecuencia se cumple un régimen inercial.

En los tres espectros de velocidades anteriores se observa como para los tres ejes, las tres direcciones presentan peaks en las mismas frecuencias, a pesar de su diferencia de magnitud, se puede observar como bajo un peak en la dirección X, hay uno en la dirección Y. Esto está de acuerdo con los planteamientos teóricos, a pesar de no estar en fase las velocidades en X y en Y, ambas tienen la misma frecuencia, y el espectro no puede hacer esa distinción.

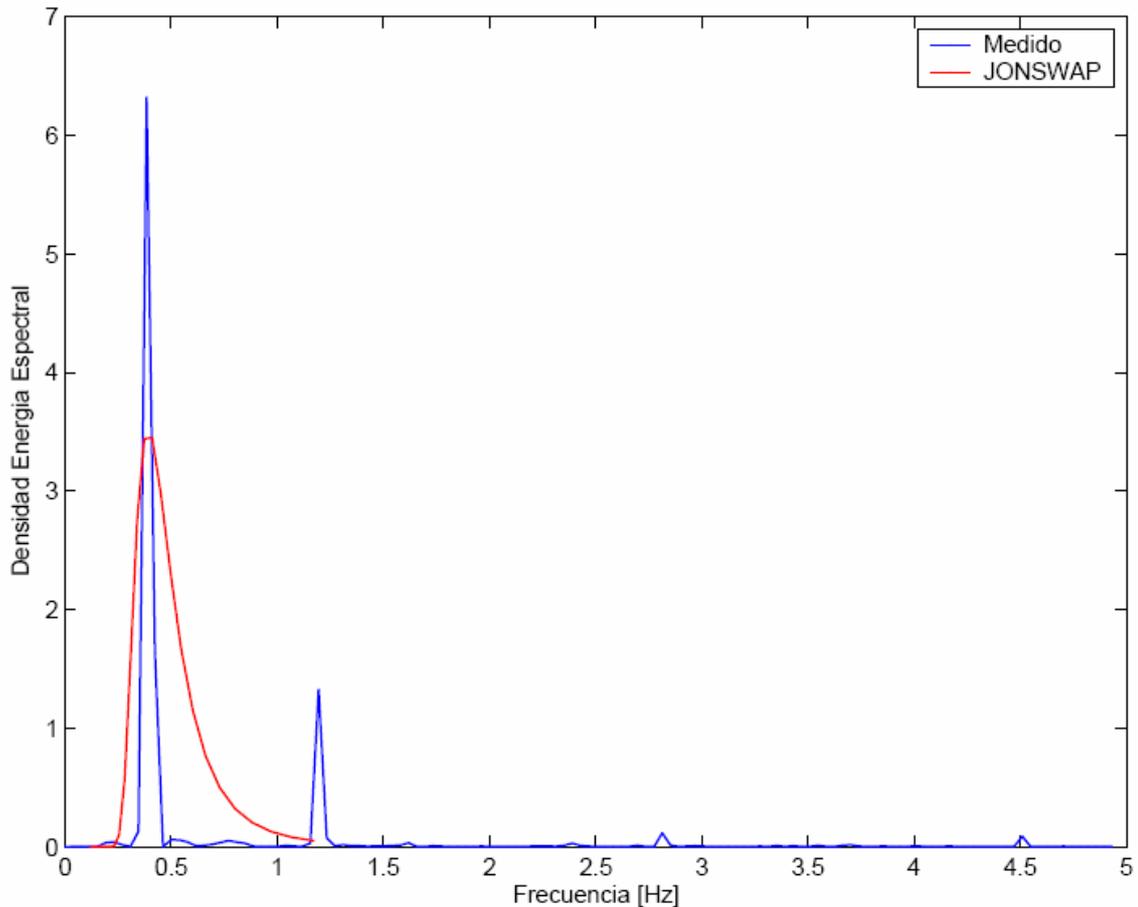
Para frecuencias altas, cercanas a 10 Hz, la señal que se captura tiene un alto contenido de ruido electrónico, el cual tiene la singularidad de ser menor en el eje Z que en los ejes X e Y, debido a un defecto instrumental del ADV. Este fenómeno se puede observar en los tres espectros anteriormente presentados.

Es importante mencionar la diferencia que existe entre un espectro unidireccional de oleaje regular, como el que se desarrolló en el laboratorio, y un espectro de oleaje unidireccional irregular como el que se generara en el mar. El primero tiene toda, o casi toda, su energía concentrada en una banda de frecuencia muy pequeña, mientras que el segundo distribuye parte de su energía en frecuencias que son cercanas (y no tan cercanas en algunos casos) a la frecuencia peak.

El ancho de banda que abarca el espectro es conocido como *spreading* (en rigor el término *spreading* está asociado a la dispersión direccional del espectro, sin embargo en adelante se utilizará indistintamente). El *spreading* de frecuencias de un oleaje regular es muy menor al de un oleaje irregular, ya que éste último presenta, por ejemplo en Chile, componentes de generación local (oleaje *Sea*) y componentes de generación lejana (oleaje *Swell*) que conviven en el espectro de oleaje que llega a la costa y que provocan que el espectro presente una distribución energía en el dominio de las frecuencias.

Esto sucede también en el dominio de las direcciones, los espectros reales concentran parte importante de su energía en la (o las) dirección(es) peak, sin embargo la dirección peak no es la (o las) única(s) dirección(es) en la cual llega el oleaje a la costa, el espectro tiene un *Spreading* direccional

La Figura 4.18 muestra una comparación entre un espectro *JONSWAP* de altura de ola (en el océano) y un espectro de altura de ola medido en el laboratorio uno con el peak en la frecuencia 0.41 Hz (período 2.43 s y profundidad 0.25 cm). El peak de frecuencia del espectro del oleaje medido es casi el doble del peak del espectro *JONSWAP*.



**Figura 4.18:** Comparación de espectro de altura de ola medido y JONSWAP.

Es muy importante tomar en cuenta las consecuencias de que el *Spreading* sea pequeño al llevar los resultados del modelo al prototipo, ya que es necesario considerar los efectos de concentración de energía. Los efectos de una experiencia realizada en el modelo, son en el prototipo mucho menos acentuados, ya que la energía se distribuye en más frecuencias aparte de la asociada al período peak. No hacer consideraciones de este tipo significaría asumir que al prototipo llega una sola ola muchas veces, lo cual dista mucho de lo que sucede en la naturaleza.

Durante el desarrollo del capítulo se reevaluará este aspecto al momento de llevar los resultados obtenidos del modelo al prototipo.

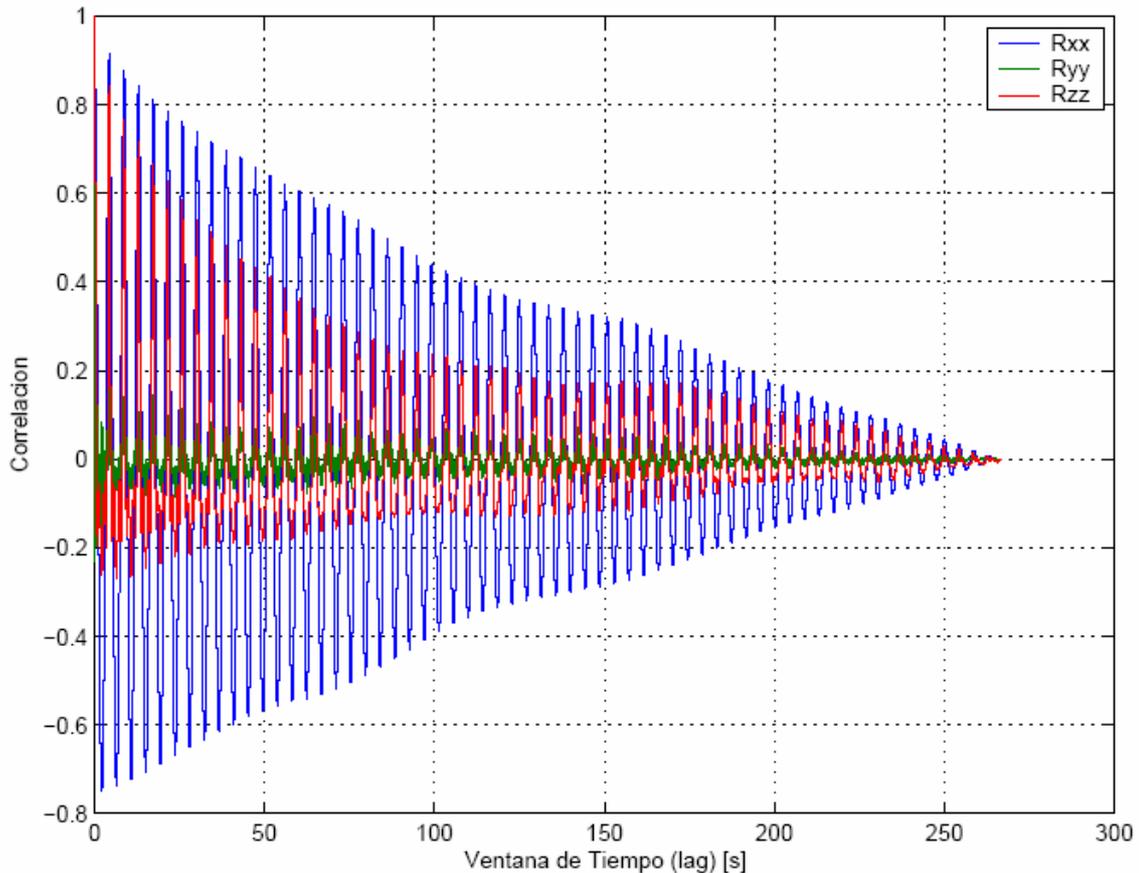
### 4.3.3 Auto correlaciones y Correlaciones cruzadas de las velocidades

Siguiendo con el análisis, la Figura 4.19 presenta la función de auto correlación de las velocidades para un período de 2.7 s y una condición sin corriente.

Para una variable  $a(t)$ , de promedio  $\langle A \rangle$  y de fluctuación  $a'(t)$ , la función de autocorrelación tiene la siguiente forma:

$$R(\tau) = \frac{\langle a'(t) \rangle \langle a'(t + \tau) \rangle}{\langle a'^2 \rangle} \quad 4.1$$

Esta función de  $\tau$  cumple que  $R(\tau) = 1$  si  $\tau = 0$ . Si la señal es estadísticamente estacionaria, la función de autocorrelación es simétrica respecto de  $\tau = 0$ .



**Figura 4.19:** Función de Auto-Correlación de velocidad,  $T=2.7$  s,  $v=0$  m/s,  $z=2.85$  cm.

La función de auto correlación indica cuanto tiempo toma a una variable del sistema independizarse de sí misma, de sus condiciones de borde originales. Es decir, durante cuanto tiempo un estado del sistema influencia los estados futuros en un instante dado de tiempo.

El análisis arrojó que el tiempo que toma a la velocidad independizarse de sí misma es del orden de lo 4 min. Esto significa que el sistema pierde la información inicial progresivamente hasta los aproximadamente cuatro minutos, donde el estado del sistema es independiente del inicial. Esto de debe a que las olas no son totalmente regulares.

El tiempo de medición de cada serie se estimó en 160 segundos, lo que implica que las primeras olas medidas de cada serie guardan relación con las últimas, validando el lapso de tiempo escogido.

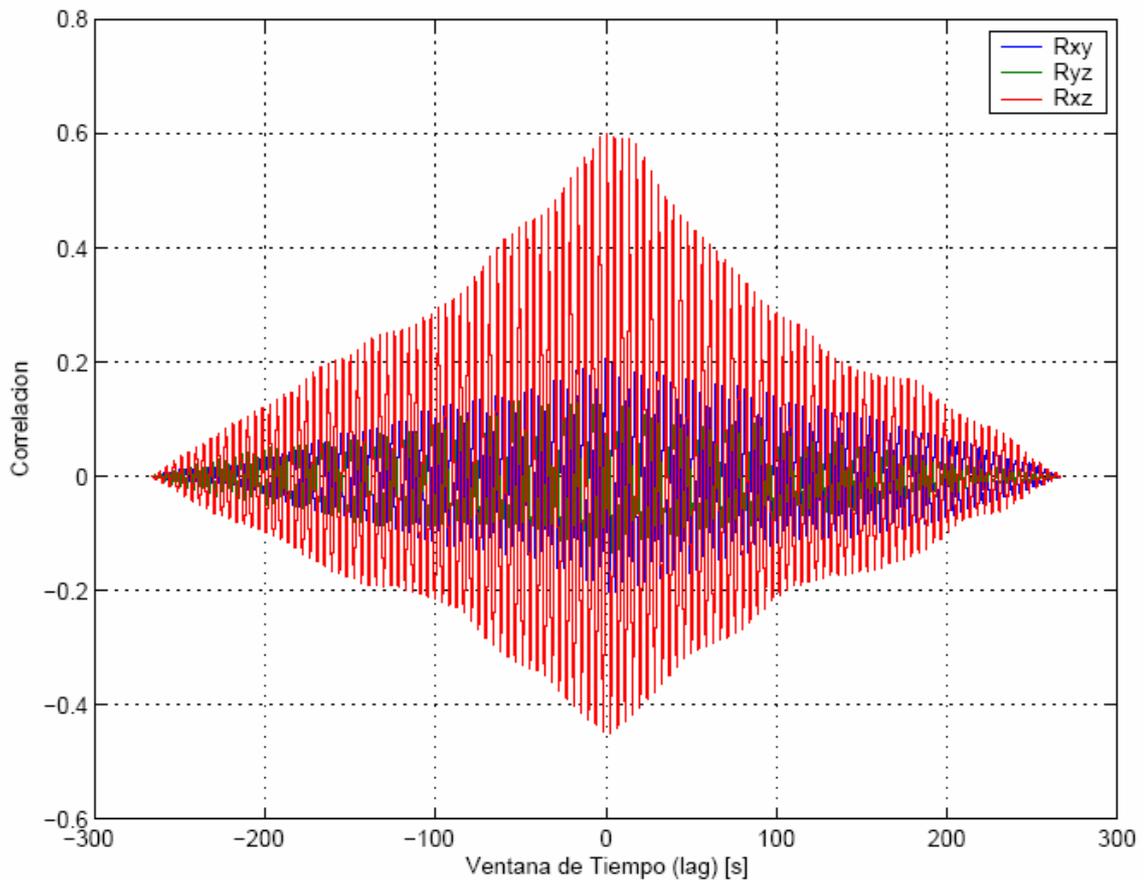
A su vez, la correlación cruzada realiza el mismo análisis, con la diferencia que ahora la variable que se independiza no lo hace de sí misma, sino de otra variable, en este caso otra velocidad. Es por esta razón que la correlación cruzada tiene dos variables asociadas.

Sean  $f$  y  $g$  funciones discretas. Para una variable  $a(t)$ , de promedio  $\langle A \rangle$  y de fluctuación  $a'(t)$ , la función de autocorrelación tiene la siguiente forma:

$$R(\tau) = \frac{\langle a'(t) \rangle \langle a'(t + \tau) \rangle}{\langle a'^2 \rangle} \quad 4.2$$

Esta función de  $\tau$  cumple que  $R(\tau) = 1$  si  $\tau = 0$ . Si la señal es estadísticamente estacionaria, la función de autocorrelación es simétrica respecto de  $\tau = 0$ .

En la Figura 4.20 se puede ver la función de correlación cruzada para un período de 2.7 s.



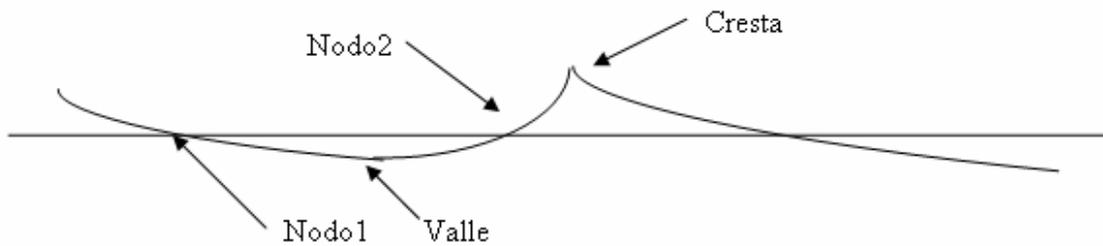
**Figura 4.20:** Función de Correlación Cruzada de velocidad,  $T=2.7$  s,  $v=0$  m/s,  $z=2.85$  cm.

Nuevamente el tiempo en que los pares de velocidades se hacen independientes uno de otro es aproximadamente 4 minutos, el análisis es similar al de la auto correlación.

#### 4.3.4 Distribución vertical de velocidad horizontal

Se construyeron los perfiles de velocidad para cada una de las nueve experiencias. A continuación sólo se muestran dos de ellos, de manera comparativa tomando un caso con corriente y otro caso sin corriente. En ambos casos se compara gráficamente el perfil registrado con dos teorías, la T.L.O. y la teoría de Dean.

La Figura 2.41 presenta la disposición de la ola que se consideró en el análisis.



**Figura 4.21:** Esquema de la ola analizada.

Es importante mencionar que la T.L.O. presenta una ola simétrica, vista desde el nivel medio de aguas, lo cual implica una distribución simétrica de velocidades respecto del eje vertical.

A diferencia de la T.L.O. la teoría de Dean propone un perfil de ola que no es simétrico, sino que tiene una cresta más pronunciada, corta y alejada del nivel medio de aguas, a la vez que un valle más largo y cercano al nivel medio de aguas. No obstante ambas promedian cero al considerar todas las fases de la ola a una misma profundidad. Esta diferencia provoca que el perfil de velocidades correspondiente a la teoría de Dean, presente su perfil de velocidad de fase positiva (que tiene velocidades mayores que cero) mayor que el de la T.L.O. y por lo general mayor que el experimental. Sin embargo el perfil experimental de velocidad de fase negativa (que tiene velocidades menores que cero) es similar a los perfiles teóricos de ambas teorías.

En uno de los casos sin corriente, correspondiente a la Figura 4.22, se puede notar que las dos teorías presentan el mismo comportamiento que el perfil de velocidades registrado.

En esta figura que representa al caso período peak 2.7 s y velocidad de corriente 0 cm/s, los rótulos de las variables significan (en orden descendente): Experimental máxima, Experimental mínima, teorica de Dean máxima, teórica de dean mínima, Teórica T.L.O máxima y por último, Teórica T.L.O. mínima. La misma nomenclatura fue utilizada en la Figura 4.23

Se observa también, en la Figura 4.22, que la fase de velocidad positiva (el valle de la ola, recordar que el ADV está orientado con su dirección positiva contraria a la dirección de propagación de oleaje) se asemeja mucho a la distribución de velocidades teórica de Dean. La fase de velocidad negativa (cresta) queda mejor representada, en este caso, por el perfil construido a través de la T.L.O.

El promedio de velocidad, considerando todos los datos de cada serie, es de 0 cm/s.

La Figura 4.23 presenta el perfil asociado a la experiencia 9, período peak 2.43 s y corriente de velocidad 4.9 cm/s.

La velocidad promedio alcanzó los 5.63 cm/s, lo que provoca que los perfiles de velocidades sean desplazados hacia la dirección positiva.

Se observa que el perfil de velocidades calculado a través de la T.L.O, no representa bien los datos registrados en el laboratorio, mientras que el perfil deducido con la teoría de Dean presenta una menor diferencia, sobre todo en la fase asociada a la cresta de la ola (fase negativa)

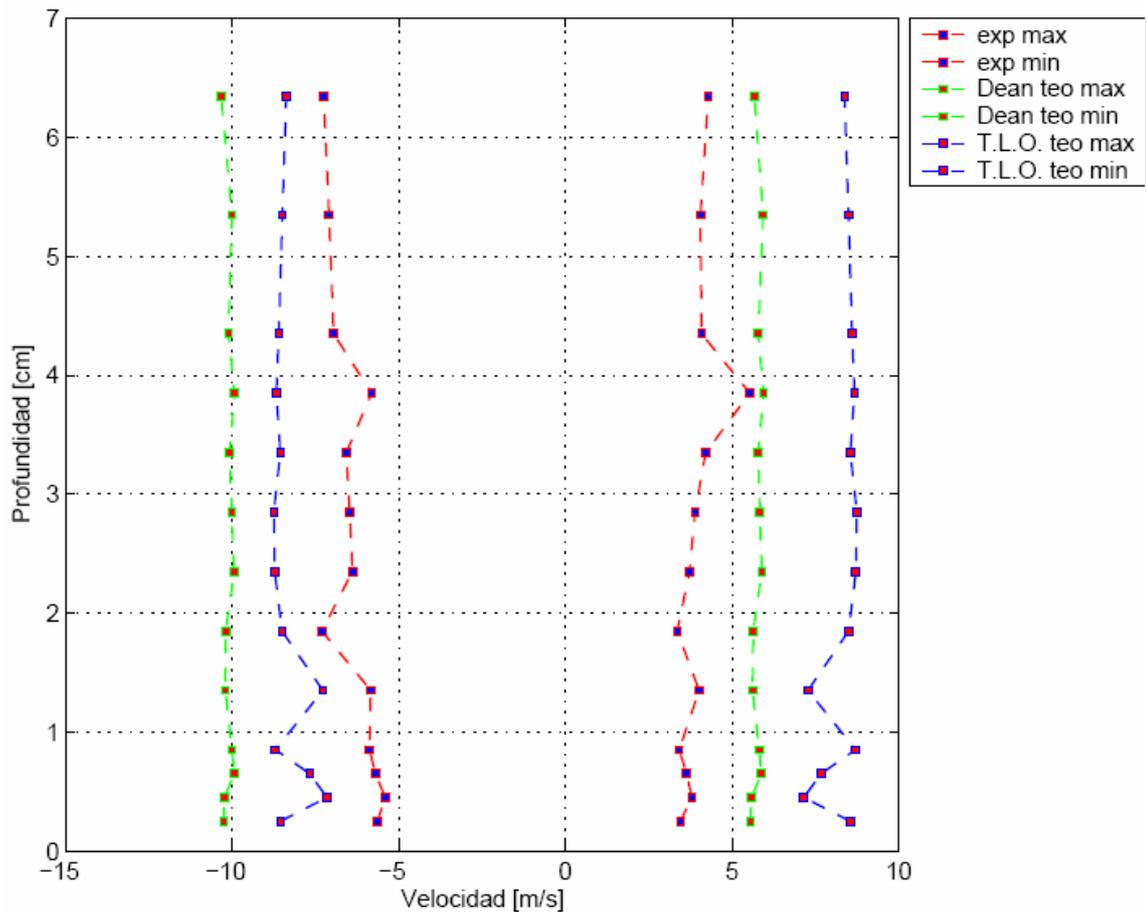
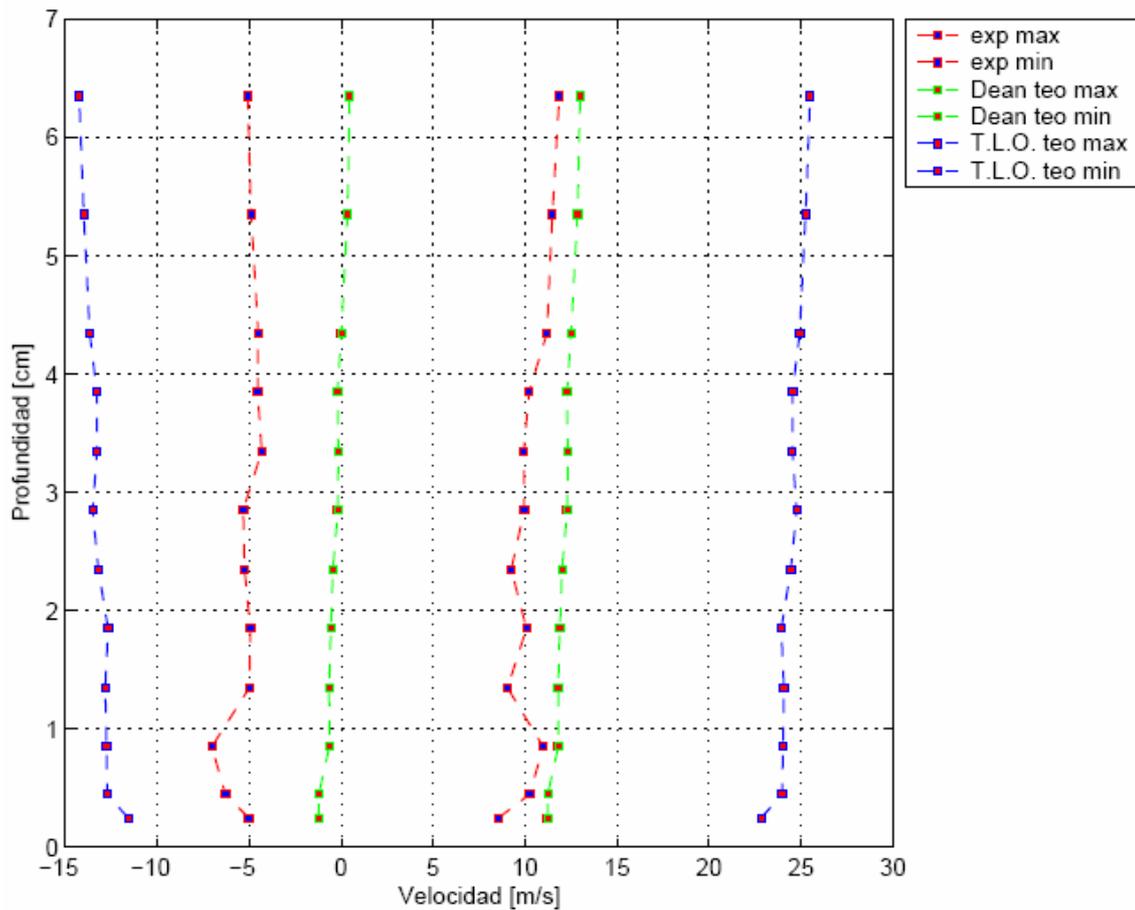


Figura 4.22: Comparación Perfil de velocidades,  $T= 2.7$  s,  $v= 0$  cm/s.

En los dos casos analizados los perfiles registrados de la fase asociada a la cresta quedaron acotados superiormente por el perfil teórico de la teoría de Dean e inferiormente por la T.L.O. Este comportamiento se presentó en 5 de los 9 perfiles medidos, manifestándose siempre una similitud mayor entre el perfil registrado y el perfil obtenido a través de la teoría de Dean. En los otros casos los perfiles de velocidades calculados con la teoría de Dean acotan a ambos lados el perfil de velocidades y el perfil de velocidades asociados a la T.L.O. se encuentra más alejado tanto en la fase cresta como en el valle.



**Figura 4.23:** Comparación Perfil de velocidades, período 2.43 s, velocidad 4.9 cm/s

La Tabla 4.2, presenta las diferencias promedio por experiencia existentes entre los valores de velocidad horizontal registrados y los propuestos por ambas teorías. La diferencia se estimó a través del método de las diferencias cuadráticas entre los perfiles teóricos y medidos.

**Tabla 4.2:** Comparación teorías de a través de perfiles de velocidad horizontal.

Experiencia	Diferencia Cuadrada [cm/s]	
	Lineal	No Lineal
1	3.06	6.42
2	8.38	7.72
3	9.46	10.99
4	12.63	4.53
5	14.42	7.06
6	18.23	14.34
7	19.36	12.06
8	26.16	11.11
9	30.02	12.28
<b>Promedio</b>	<b>15.75</b>	<b>9.61</b>

Se observa que en casi todos los casos la teoría que mejor representa (la que tiene menos diferencia) los datos registrados corresponde a la teoría de oleaje no lineal o de *Dean*. Sin ir más lejos el promedio de diferencias es en el enfoque de Dean casi un 40 % menor que el enfoque de la T.L.O.

De esta manera se concluye que la Teoría de Dean es la que representa mejor el perfil de ola generado en el laboratorio. La Figura 4.13 (perfil de olas adimensionalizado) apoya esta hipótesis, ya que se puede observar en ella que la desnivelación vinculada a la cresta de la ola es mayor que el valor absoluto de la desnivelación asociada al valle de la ola. Este comportamiento se repitió en todas las experiencias.

Debido a que las experiencias se pensaron para satisfacer la T.L.O. se redujeron los rangos de oleaje posible a los que se mencionan en el Capítulo 3, en la sección de Análisis de escalas. Sin embargo ahora que se tiene certeza acerca de la naturaleza del oleaje reproducido en el laboratorio y es posible ampliar las experiencias en futuros estudios que así lo requieran.

Cabe mencionar que durante las mediciones no se observó un flujo generalizado de sedimentos, sólo algunos movimientos aislados asociados a la fase valle; y el desarrollo de algunas formas de fondo en la zonas cercanas a la paleta y a la playa de absorción. El estudio de estas formas de fondo no forma parte de los alcances de este estudio.

#### **4.3.5 Energía Cinética Turbulenta**

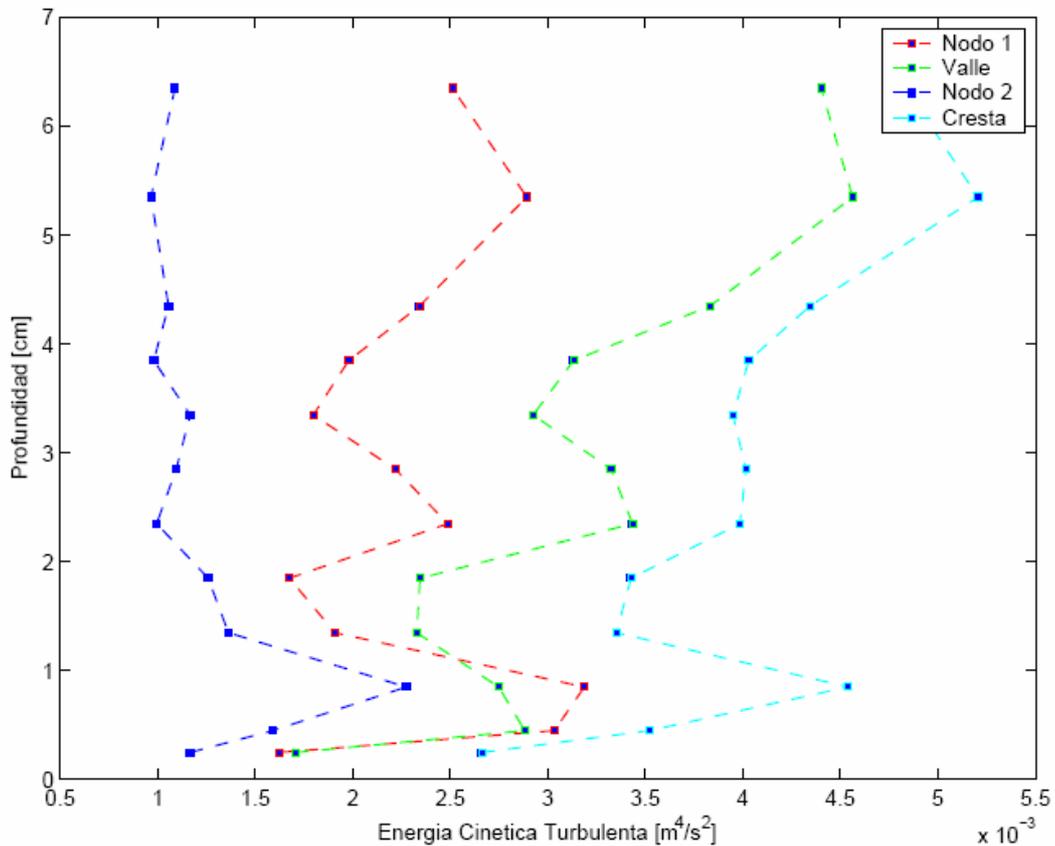
Junto con los perfiles de velocidades se construyeron perfiles de energía cinética turbulenta, para cada uno de los casos. A continuación se presentan dos casos, de manera de hacer un análisis comparativo entre una experiencia con corriente y otra sin corriente.

La Figura 4.24 muestra el perfil de energía cinética turbulenta para el caso período peak 2.43 y velocidad de corriente 4.9 cm/s.

Se observa que hay un peak de energía cercano al fondo, el cual se debe a que el gradiente de velocidades es mayor en esa zona, ya que ahí se desarrolla la subcapa viscosa. También se destaca que la energía asociada a la fase cresta es mayor que la energía correspondiente a la fase valle a lo largo de todo el perfil.

Las cuatro fases tienen energías similares en la parte baja del perfil mientras que en la sección superior de éste las energías se diferencian en mayor cantidad, manteniéndose las energías asociadas a la cresta y al valle con un valor más alto. Se observa un generación de energía cinética turbulenta cerca de la superficie en las fases cresta y valle.

Esto se debe a que en las fases de cresta y valle las velocidades son de la misma magnitud, a aunque de signo contrario, sin embargo la naturaleza cuadrática de la energía cinética turbulenta hace que sus valores sean de la misma magnitud y signo.

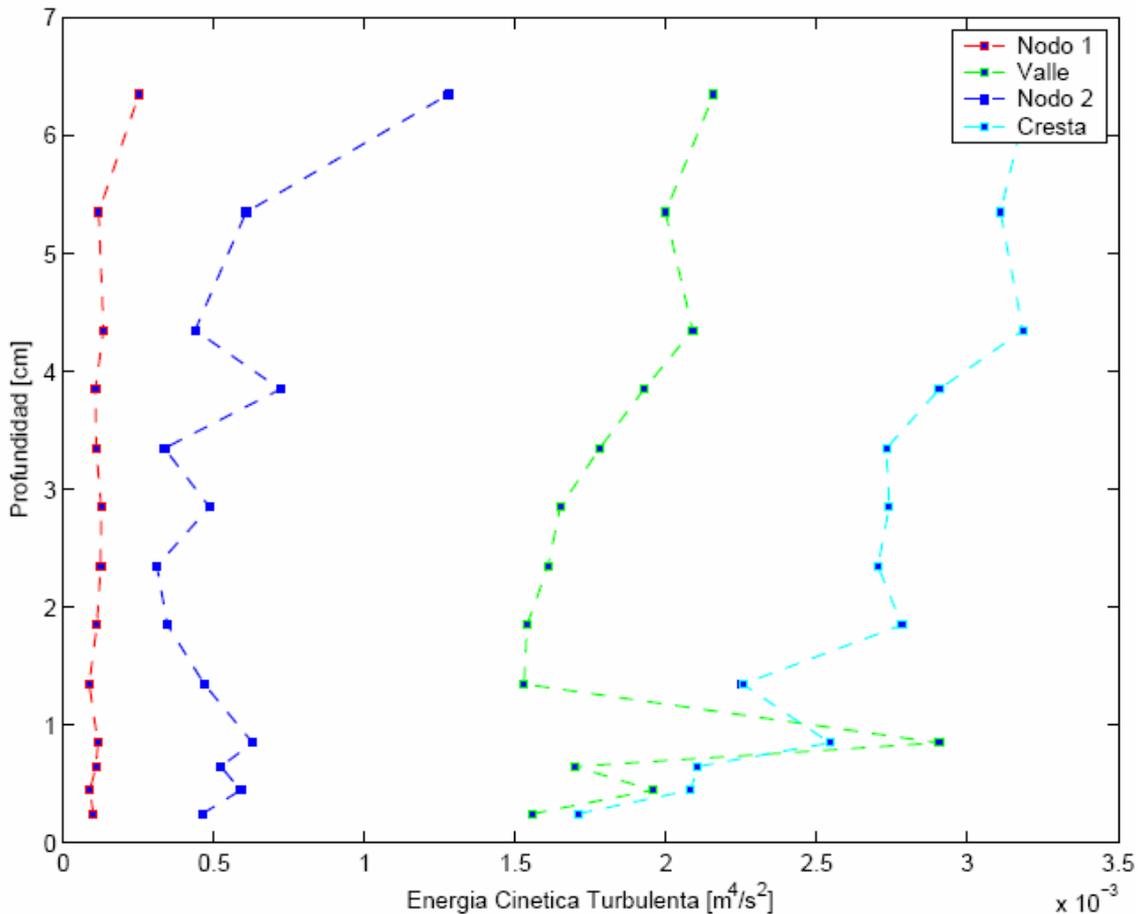


**Figura 4.24:** Perfil de energía cinética turbulenta, período 2.43 s, velocidad 4.9 cm/s

La Figura 4.25 corresponde al caso de período peak 3.15 s y con velocidad 6.3 cm/s. Se destaca el efecto de la velocidad que diferencia las energías por fase.

La presencia del flujo provoca que las fases de cresta y valle presenten valores de energía cinética turbulenta comparables entre sí y notablemente mayores a los que registran los dos nodos, presentando la energía asociada a la cresta mayor energía.

Los resultados obtenidos tienen un comportamiento consistente con los que propone referencia además presentan un orden de magnitud coherente con lo que expresa la referencia [Fredsoe y Deigaard, 92].



**Figura 4.25:** Perfil de energía cinética turbulenta, período 3.15 s, velocidad 6.3 cm/s

#### 4.3.6 Número de Reynolds

La rutina permite determinar también el número de Reynolds  $Re = \frac{h \rho U}{\mu}$ , el cual permite conocer la relación existente entre las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales. Se determinó la velocidad promedio de cada fase para cada uno de los 13 puntos del perfil, y luego se promedió en la vertical. La altura de escurrimiento de cada fase se determinó de la misma manera. El Reynolds fue calculado para cada punto del perfil y luego promediado en la columna por fases. La Tabla 4.3 muestra los números de Reynolds, separados por fases de la ola, para las nueve experiencias.

Se observa que en promedio las fases de nodo 1 y valle son las que poseen un número de Reynolds más alto, siendo ésta última la que presenta el mayor valor. Esto se debe a que en la fase valle (ver Figura 4.21), las velocidades del oleaje y de la corriente se suman, aumentando la rapidez del escurrimiento, y consecuentemente el número de Reynolds.

El nodo 1 tiene el siguiente valor más alto, debido a que la diferencia de altura de escurrimiento es poca entre ésta fase y el valle, lo que se traduce en que el efecto que tiene la corriente sobre el Reynolds no marca una diferencia relevante.

**Tabla 4.3:** Resumen de número de número Reynolds por fases

Experiencia	Reynolds x 10 <sup>-4</sup>			
	Nodo 1	Valle	Nodo 2	Cresta
1	1.47	4.27	1.61	4.37
2	4.1	6.37	0.79	6.67
3	1.76	5.71	2.3	8.94
4	6.55	6.89	1.28	0.78
5	5.3	6.09	0.45	1.78
6	5.86	8.85	0.41	6.41
7	13.69	11.21	9.48	0.28
8	11.83	12.8	1.24	1.78
9	17.39	15.59	3.1	4.86
<b>Promedio</b>	<b>7.55</b>	<b>8.64</b>	<b>2.29</b>	<b>3.98</b>

Les sigue en el orden del adimensional de Reynolds la fase cresta, la cual tiene la mayor desnivelación, y por lo tanto, la mayor velocidad inducida por el oleaje. Sin embargo el hecho de tener mayor la altura hace que el escurrimiento tenga la menor velocidad asociada a la corriente. Como se mencionó anteriormente, en esta fase las velocidades asociadas al flujo y al oleaje tienen dirección contraria, lo que disminuye la velocidad total en la fase y por lo tanto el Reynolds. Esto se debe a que tienen un número de Reynolds notablemente menor que los números de Reynolds de las fases valle y cresta, que son comparables y presentan un comportamiento similar.

Para las tres primeras experiencias, en las cuales no hay corriente, la fase con mayor valor de Reynolds es la cresta. Debido a la naturaleza no lineal del oleaje reproducido en el canal, la fase cresta tiene mayor velocidad que el valle, manifestándose esta diferencia en el número de Reynolds.

Al revisar los resultados de las experiencias 4, 5 y 6, se aprecia que la fase que tiene mayor número de Reynolds es la fase valle, mientras que la fase cresta a pesar de aumentar el número del adimensional, lo hace en menor cantidad que la fase valle.

En estas experiencias el nodo 1 aumenta ostensiblemente su valor de Reynolds comparativamente con el nodo 2.

Este cambio de orden se debe a la presencia de la corriente la cual introduce mayores velocidades en los nodos; disminuye la velocidad en la fase de cresta, ya que en esa fase de la ola las velocidades de la corriente y del oleaje son contrarias; y aumenta la velocidad en la fase del valle, donde la corriente y el oleaje tienen velocidades en la misma dirección.

Las últimas tres experiencias, las que tienen mayor velocidad, presentan un comportamiento anómalo, ya que en ellas el nodo 1 tiene mayor valor de Reynolds que la fase valle. Si bien es cierto, éstas experiencias son las que tienen mayor corriente, y por lo tanto mayor Reynolds, eso no explica el mayor valor del adimensional en el nodo 1.

La experiencia 7, es la que tiene mayor corriente, 6.3 m/s, y mayor período, 3.15, comparativamente. Se observó durante el transcurso de las mediciones que la acción de la paleta no fue suficiente para desarrollar un oleaje marcado. Esto puede explicar el comportamiento del número de Reynolds en las experiencias 7 y 9, las que presentan un mayor valor de corriente, lo que provocó que el oleaje y sus fases no se definieran de buena manera.

En el Capítulo de 3, en la sección de análisis de escalas, se planteo como hipótesis del análisis que el número de Reynolds debería alcanzar valores mayores a  $3 \times 10^3$  en el modelo de manera de asegurar flujo turbulento, esta condición se cumple a cabalidad.

#### 4.3.7 Análisis en prototipo

Con el análisis previo sólo resta analizar los resultados obtenidos en el modelo en el prototipo. Para esto se debe recordar que la escala geométrica escogida es 50, la profundidad en todos las experiencias fue de 17 cm, las escalas de sedimentos escogidas fueron 0.5, 0.75 y 1; y que las velocidades de corriente en el prototipo fueron de 0, 4 y 8 cm/s. La Tablas 4.4. y 4.5 presentan los registros medidos en el modelo y sus correspondientes valores escalados al prototipo, mientras que la Tabla 4.6 contiene los valores de las variables escaladas considerando el enfoque de Froude.

En las tablas que a continuación se presentan la columna escalas, contiene los valores de las escalas de cada experiencia. Escala de sólidos es la escala de tamaño de sólidos y escala temporal es la escala que se deduce con el enfoque de Kamphuis para oleaje corto.

**Tabla 4.4:** *Experiencias registradas en el modelo*

Experiencia	Escalas			Modelo				
	Long	Solidos	Temporal	Profundidad [cm]	Altura [cm]	Periodo [s]	Velocidad [cm/s]	Longitud [m]
1	50	0.5	1.27	16.99	1.26	2.98	0.05	3.0
2	50	0.75	1.48	17	2.26	2.55	0	3.3
3	50	1	1.65	16.89	2.61	2.32	-0.29	3.0
4	50	0.5	1.27	17.24	0.99	3.25	3.22	6.1
5	50	0.75	1.48	16.91	1.44	3.12	2.79	4.6
6	50	1	1.65	16.82	2.72	2.62	1.63	3.4
7	50	0.5	1.27	17.19	0.9	3.36	7.06	4.2
8	50	0.75	1.48	17.08	2.28	2.88	5.17	3.6
9	50	1	1.65	18.3	3.8	2.36	5.63	3.1

**Tabla 4.5:** *Experiencias escaladas en el prototipo*

Experiencia	Escalas			Prototipo				
	Long	Solidos	Temporal	Profundidad [m]	Altura [m]	Periodo [s]	Velocidad [cm/s]	Longitud [m]
1	50	0.5	1.27	8.5	0.63	3.79	0.07	22.2
2	50	0.75	1.48	8.5	1.13	3.77	0	22.4
3	50	1	1.65	8.44	1.3	3.82	-0.49	23.1
4	50	0.5	1.27	8.62	0.5	4.13	4.1	25.6
5	50	0.75	1.48	8.46	0.72	4.62	4.13	31.0
6	50	1	1.65	8.41	1.36	4.32	2.69	28.3
7	50	0.5	1.27	8.59	0.45	4.27	8.96	26.8
8	50	0.75	1.48	8.54	1.14	4.27	7.65	27.2
9	50	1	1.65	9.15	1.9	3.89	9.29	24.0

**Tabla 4.6:** *Experiencias escaladas en el prototipo según Froude y distorsiones.*

Se observa que la distorsión de la longitud de la ola (recordar que se definió la distorsión como la razón entre la longitud de ola en prototipo escalada según el enfoque de Fraude y la longitud de ola en prototipo escalada según el enfoque de olas cortas) mínima es aproximadamente 6, lo cual es altísimo, distorsiones aceptables en este tipo de modelos son del orden de 3 (Consideraciones prácticas del INH). Esta diferencia existente entre el modelo y el prototipo provoca que los fenómenos que están asociados a las escala de la longitud de la ola queden contenidos en una ventana espacial más pequeña de lo que corresponde, concentrando el fenómeno en una longitud menor. Entre los fenómenos afectados se puede mencionar el transporte de masa y la refracción.

Es importante recordar que el régimen del prototipo es de aguas intermedias, mientras que el del modelo es de aguas someras. Esta condición induce velocidades en las cercanías del fondo en el modelo mayores, que las que corresponden en el prototipo.

Otro efecto relevante que se observa al pasar del modelo al prototipo es el escalamiento de la altura de ola. En la Tabla 4.5 la experiencia 1 y 2 tienen prácticamente igual período y velocidad de corriente, difieren sólo en la escala del sedimento, sin embargo existe una diferencia de 0.5 m. en la altura de ola. Este efecto es muy importante para futuros estudios de transporte de masa.

El mismo fenómeno se puede observar entre la experiencia 7 y 8, donde la diferencia de altura de ola alcanza los 0.7 m.

Considerando lo anteriormente expuesto es posible aseverar que el modelo de escalas considerado sobreestima el efecto de la rugosidad de fondo, lo que afecta la escala temporal (y de velocidades también) induciendo alturas de ola en el prototipo mayores que las reales. Esto se podría haber solucionado ocupando sólidos de tamaño menor, lo que habría mejorado el escalamiento, sin embargo produciría transporte y formas de fondo, que son características que no se desea tener en los futuros estudios proyectados en el canal.

### 4.3.8 Análisis adimensional e integración de resultados

El objetivo de realizar un análisis dimensional es el de integrar las 9 mediciones realizadas y obtener resultados generales acerca del comportamiento del sistema. Estos resultados quedan expresados como funciones de números adimensionales que son los que se obtienen del análisis dimensional.

También se busca con este análisis encontrar una escala para las velocidades, es decir, un valor que de cuenta de la dimensión de las velocidades medias por fases. La variable que se busca como escala debe tener la singularidad de que al dividir los valores de las velocidades por esta cantidad, se obtenga la unidad (o un valor cercano a 1).

Es necesario saber cuáles son las variables relevantes para este análisis. Se tomaron en cuenta las siguientes variables en el análisis dimensional, con el objeto de explicar el comportamiento de la velocidad promedio de cada fase,  $u$ .

$$u = f(T, h, \rho, k_s, g) \quad 4.3$$

Donde  $u$  es la velocidad promedio de la corriente.

El problema que se está resolviendo es totalmente cinemático, de esta manera la base fue tomada con las variables  $\{L, T\}$ . Las variables adimensionales necesarias para describir el fenómeno en estudio son 3. Se eligieron los siguientes adimensionales.

$$\frac{u}{\sqrt{gh}} = f\left(\frac{T^2 g}{h}, \frac{\rho}{\sqrt{gh^{3/2}}}, \frac{k_s}{h}\right) \quad 4.4$$

El valor de  $\frac{k_s}{h}$  se puede considerar constante ya que la altura de escurrimiento fue siempre muy cercana a 17 cm y el fondo móvil siempre estuvo constituido por el misma arena. De esta manera las variables adimensionales relevantes son 2.

$$\frac{u}{\sqrt{gh}} = f\left(\frac{T^2 g}{h}, \frac{\rho}{\sqrt{gh^{3/2}}}\right) \quad 4.5$$

El segundo término puede ser reemplazado por el número de Reynolds. Finalmente las variables relevantes para explicar la velocidad son:

$$\frac{u}{\sqrt{gh}} = f\left(\frac{T^2 g}{h}, Re\right) \quad 4.6$$

De la misma manera, para la energía cinética turbulenta media por fase,  $K$ , se puede realizar el mismo análisis, encontrándose que las variables relevantes son las mismas, es decir:

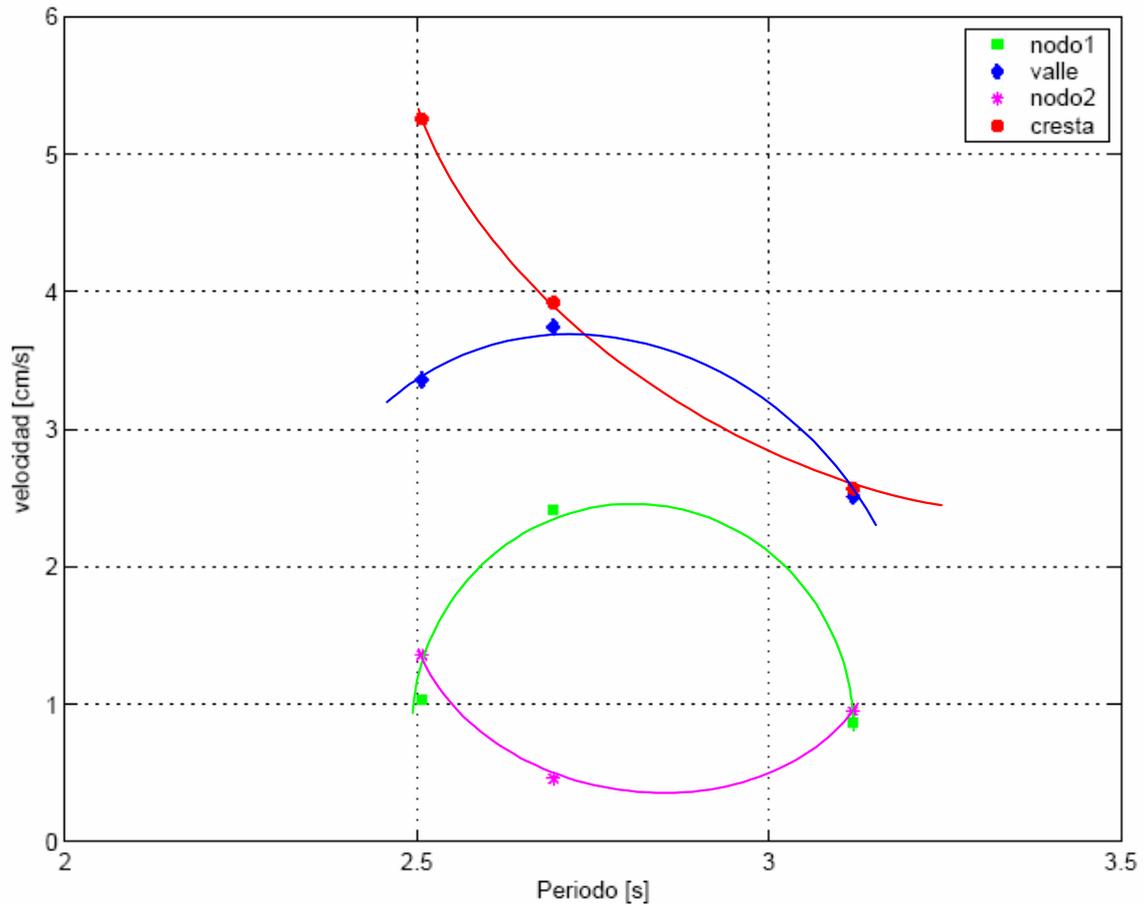
$$\frac{K}{u^2} \sim f \left( \frac{T^2 g}{h}, Re \right) \quad 4.7$$

En las experiencias analizadas se descartó la experiencia 6 en las figuras que se presentan a continuación, por presentar un comportamiento distinto a todas las series, en cuanto a su energía cinética turbulenta, la cual es para la fase cresta y valle del orden de 8 veces mayor que la energía cinética turbulenta del resto de las mediciones.

La Figura 4.26 presenta la distribución de las velocidades por fases en función del período para las primeras tres experiencias (sin corriente).

Se aprecia claramente que las velocidades asociadas a la fase valle y cresta, sobre todo esta última, presentan un comportamiento inverso con el período. Este comportamiento se debe a que la misma cantidad de agua es desplazada por la paleta en menor tiempo, introduciendo más energía al sistema, lo cual se ve reflejado en el aumento de las velocidades.

Las fases nodo 1 y valle presentan un comportamiento similar, al igual que las fases nodo 2 y cresta.

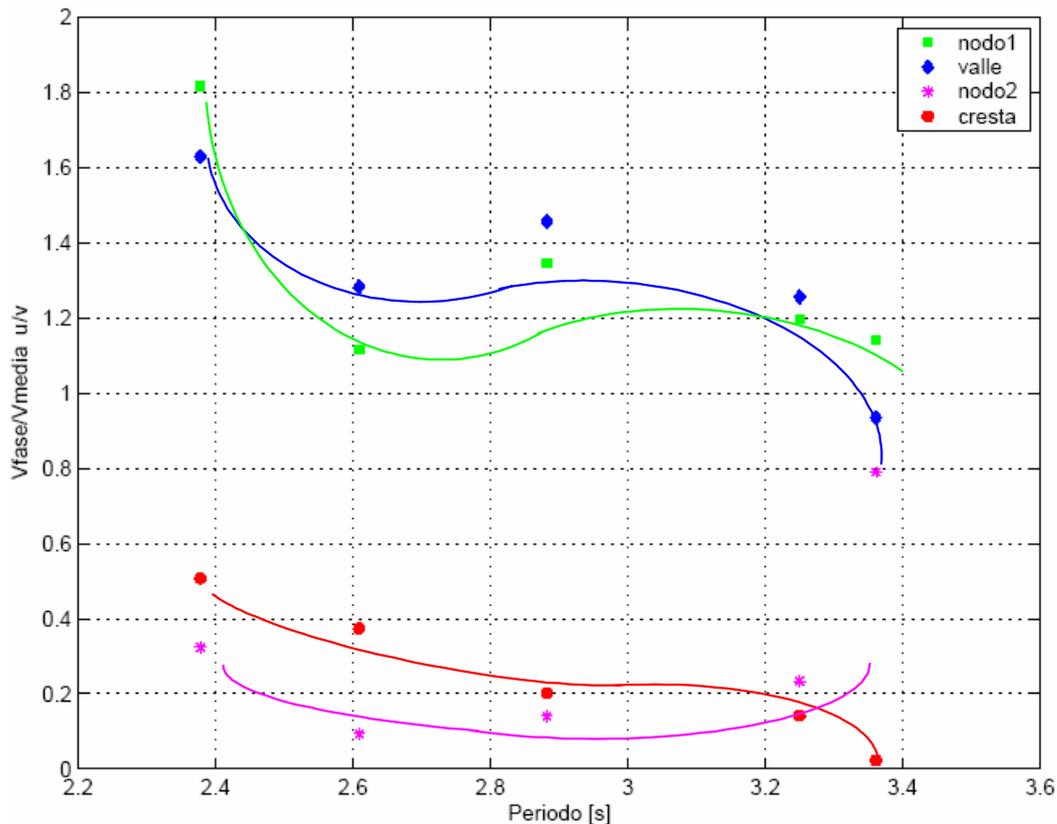


**Figura 4.26:** *Velocidades media por fase. Experiencias 1,2 y 3*

Este aumento no se ve reflejado en los dos nodos, de hecho las velocidades de estos puntos son notablemente menores (exceptuando la velocidad del nodo 1 para el período 2.7 s). Estos bajos valores son consistentes con la teoría de Dean (y la T.L.O.) la cual predice que las velocidades en los nodos deben ser nulas.

A continuación, en la Figura 4.27, se puede apreciar la distribución de las velocidades de las fases adimensionalizadas por la velocidad media de toda la serie (velocidad de la corriente) para las experiencias 4 a la 9. Se distinguen dos comportamientos claros, uno para el nodo 1 y para el valle; y otro para el nodo dos y la cresta.

Nuevamente las fases nodo 1 y valle presentan un comportamiento similar, al igual que las fases nodo 2 y cresta.



**Figura 4.27:** Velocidades por fase adimensionales. Experiencias 4 a 9.

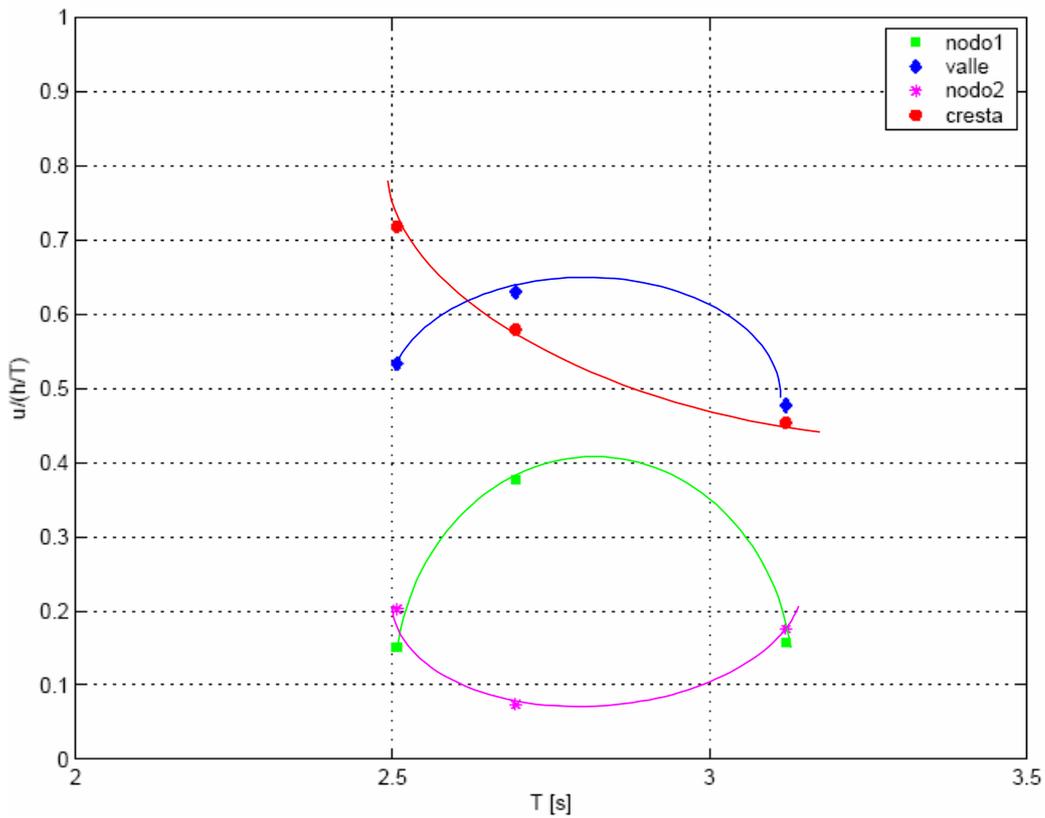
Este análisis permite determinar que la escala de velocidades de la fase cresta y el nodo 1 es la velocidad media. Las velocidades del nodo 2 y de la cresta no quedan bien escaladas por este valor, ya que el valor del adimensional de velocidades se aleja de la unidad.

Los dos comportamientos tienen la misma tendencia, una disminución de la velocidad adimensional en función del período, exceptuando la velocidad en el nodo 2 para el período 3.36 s, la cual tiene una velocidad cercana a la velocidad de la fase valle. Sin embargo, ambos comportamientos presentan magnitudes distintas, la magnitud de la velocidad adimensionalizada para el nodo 1 y el valle es mayor que el mismo parámetro para las fases nodo 2 y cresta.

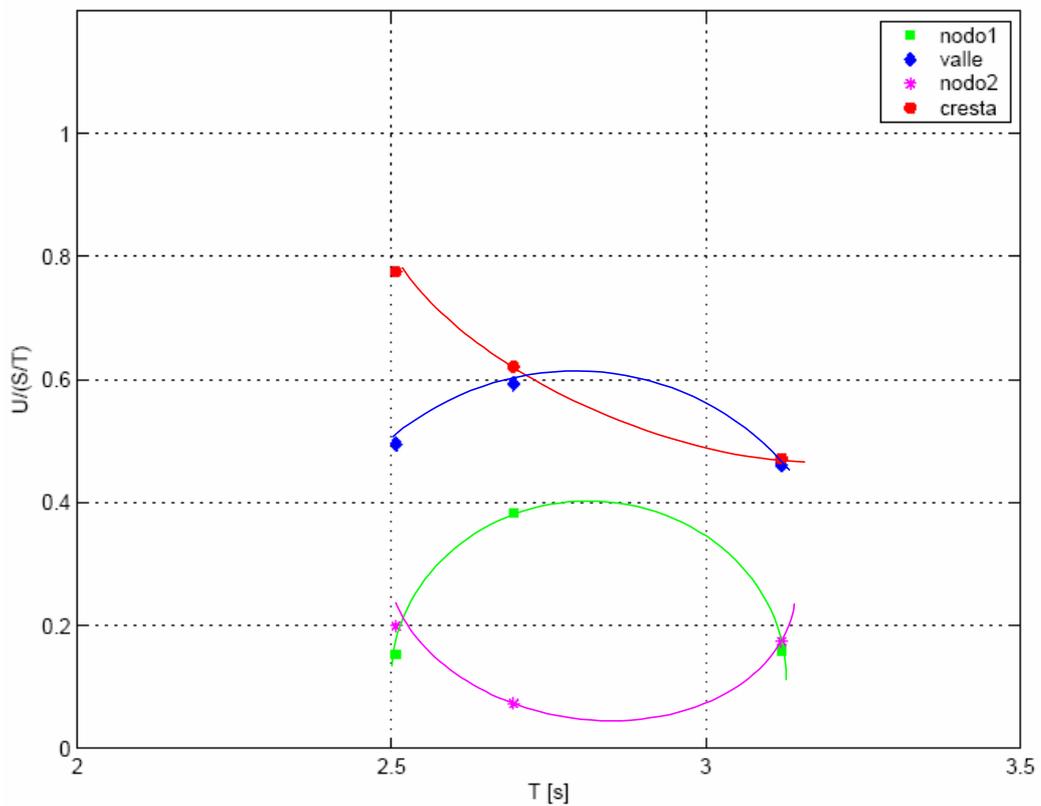
Se determinó una escala de velocidades del fenómeno para las experiencias 1 a 3. Para las demás experiencias la escala de velocidades es la velocidad media como se observa en la Figura 4.28. En un primer intento se consideró la profundidad media dividida por el período, lo cual parece ser una buena escala de velocidades para las fases cresta y valle.

Se consideró otra escala de velocidades en la cual la altura es reemplazada por el *Stroke* de la paleta. Este análisis de escala se presenta en la Figura 4.29.

Existen dos comportamientos de las velocidades, una para el nodo 1 y el valle y otro para el nodo 2 y la cresta.



**Figura 4.28:** Velocidad adimensional en función del período. Experiencias 1 a 3.



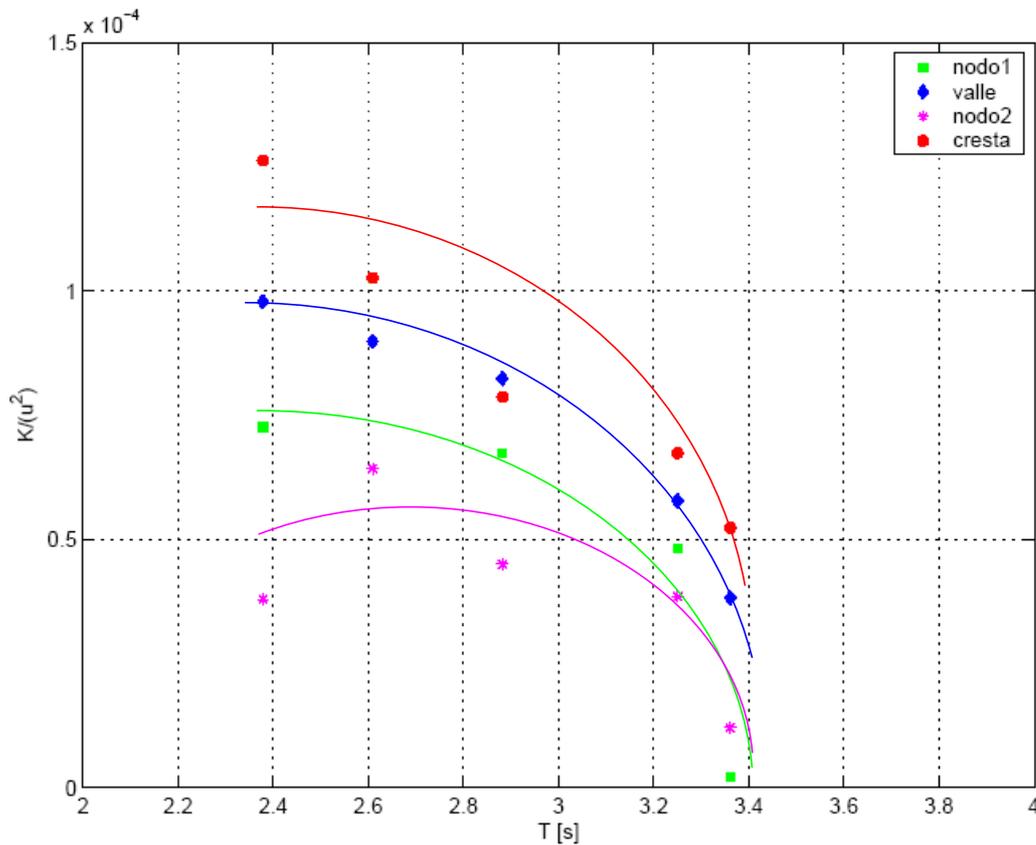
**Figura 4.29 :** Velocidad adimensional en función del período. Experiencias 1 a 3.

Debido a que es *Stroke* es del orden de los 11 cm (comparada con el valor de la profundidad media que es 17 cm), el valor de la velocidad adimensional de las fases de cresta y valle se acerca más a la unidad.

De las dos escalas propuestas, la escala de velocidades que mejor representa las experiencias sin corriente es  $\frac{S}{T}$ , donde S es el *Stroke* y T el período.

Los nodos no quedan bien escalados con ninguna de las escalas de velocidades propuestas.

La Figura 4.30 presenta la energía cinética turbulenta adimensionalizada por las velocidades de las fases, como función del período. En ella se puede observar que para las 4 fases la energía cinética turbulenta adimensionalizada presenta un comportamiento decreciente conforme aumenta el período.



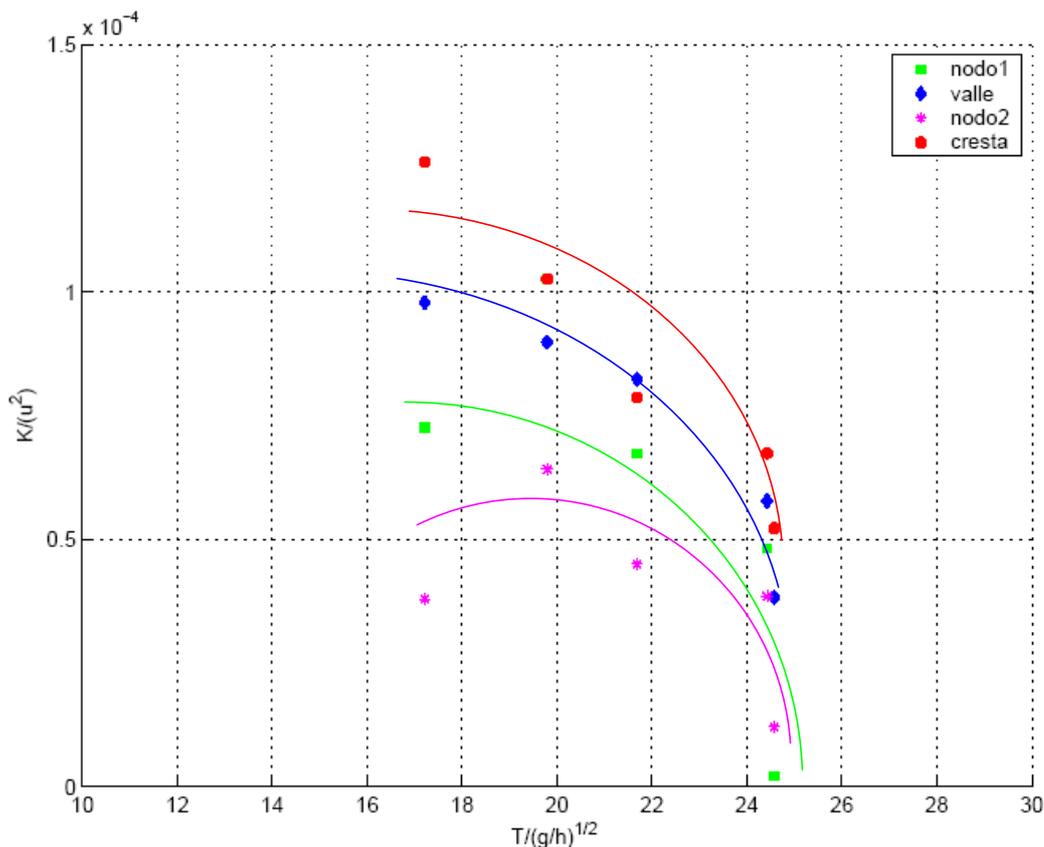
**Figura 4.30:** Energía cinética turbulenta adimensional en función del período. Experiencias 4 a 9.

Esta tendencia tiene su explicación en el hecho de que para períodos mayores la agitación en el canal es baja, mientras que al disminuir el período el flujo es más turbulento, aumentando la energía cinética turbulenta. Los resultados presentan un orden de magnitud coherente con lo que expresa la referencia [Fredsoe y Deigaard, 92].

Se puede observar que las tendencias de cada fase se concentran en torno a los períodos mayores y tienen una mayor dispersión en los períodos menores. También se observa que las fases valle y cresta presentan un mayor valor de energía cinética turbulenta, siendo ésta última la que presenta el comportamiento con valores más elevados.

Por otra parte se puede apreciar un comportamiento descendente, en períodos menores que 2.61 s, en ambos nodos (el valor de energía cinética adimensional alcanzado por el nodo 1 para el período 2.61s es igual al valor alcanzado por la fase cresta). No es posible determinar si este es un comportamiento generalizado a todas las fases ya que no se realizaron experiencias con períodos menores. Para las fases cresta y valle este comportamiento descendente debiera producirse para períodos menores que 2.4 s.

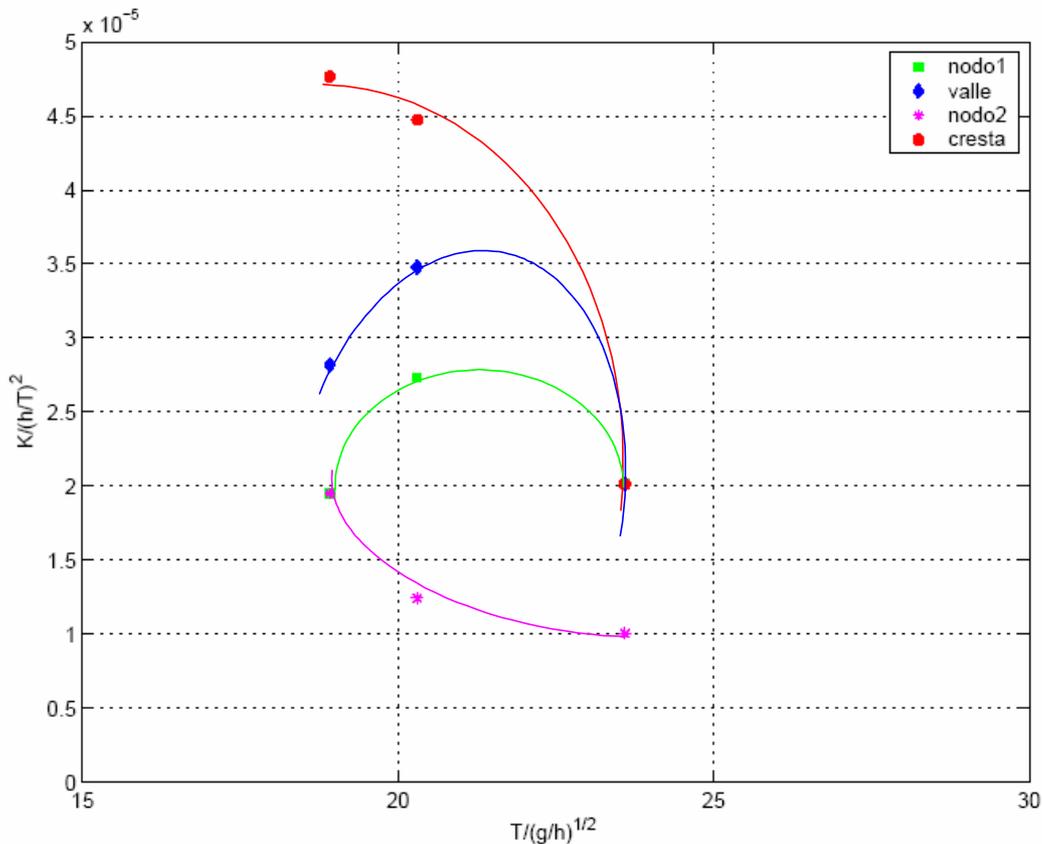
Un comportamiento similar al discutido para la gráfica anterior presenta la Figura 4.31, la cual en el eje de las abscisas tiene el período adimensionalizado,  $\frac{T}{\sqrt{g/h}}$ .



**Figura 4.31:** Energía cinética turbulenta adimensional en función del período adimensional. Experiencias 4 a 9.

Nuevamente se observa una concentración de las tendencias de las distintas fases para los períodos adimensionales mayores. Es importante mencionar que el valor de la altura que compone el período adimensional corresponde a la altura de agua por fase.

Por último, la Figura 4.32, presenta para las tres primeras experiencias (sin corriente) la distribución de la energía cinética turbulenta adimensionalizada por la altura y el período,  $\frac{K}{\eta h / T^2}$ , en función del período adimensional.



**Figura 4.32:** Energía cinética turbulenta adimensional en función del período adimensional. Experiencias 1 a 3.

Es importante mencionar que la altura que compone los adimensionales corresponde al nivel medio de aguas en este caso. A diferencia de los análisis de los casos anteriores se utilizó esta altura (y no la altura media) para diferenciar los comportamientos ya que en estos tres casos no hay corriente, sólo la excitación producida por el oleaje.

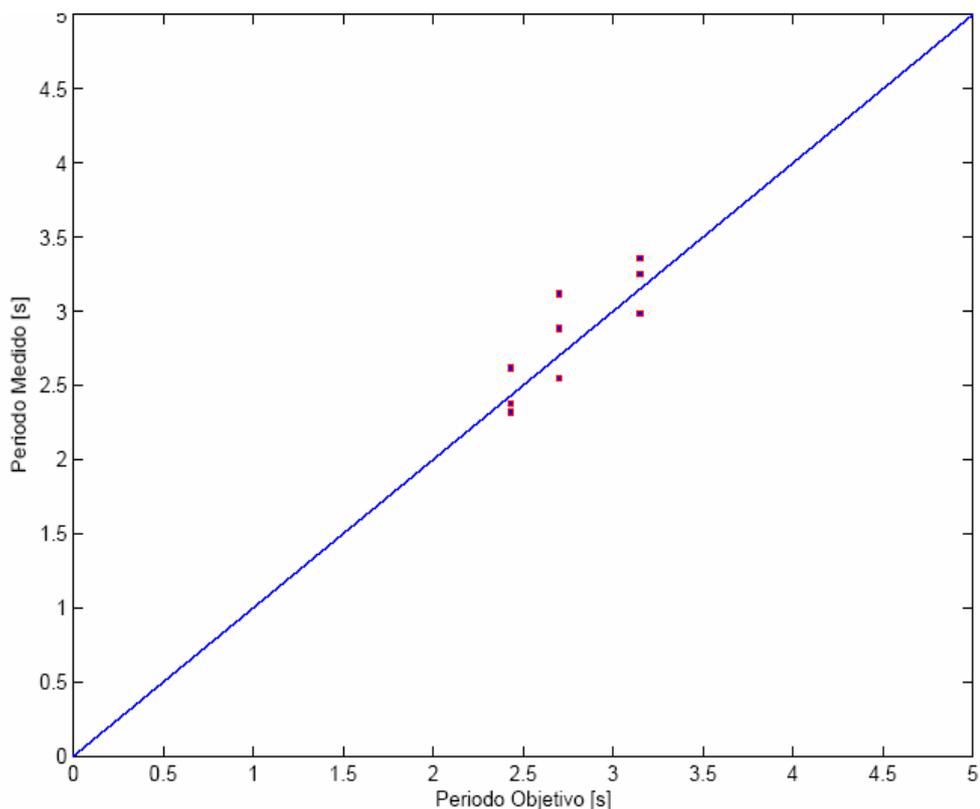
Se puede notar que existe una tendencia de las fases cresta y valle a presentar valores más altos de energía cinética adimensional. Nuevamente se aprecia el comportamiento decreciente de la energía cinética adimensional con el período (notar que los valores de la energía cinética adimensional para la fase cresta y valle alcanzan el mismo valor).

En la Figura 4.23, la serie nodo 2 no tiene el comportamiento que tienen el resto de las fases, sin embargo en todas las otras gráficas la fase nodo 2 tiene un comportamiento similar a la fase cresta.

### 4.3.9 Comparación entre parámetros objetivos y registrados

Las experiencias programadas cambiaron los valores de sus parámetros de control debido a que, tanto el período peak como la velocidad de la corriente, están sujetas a error por la calibración del sistema de control de cada una de ellas.

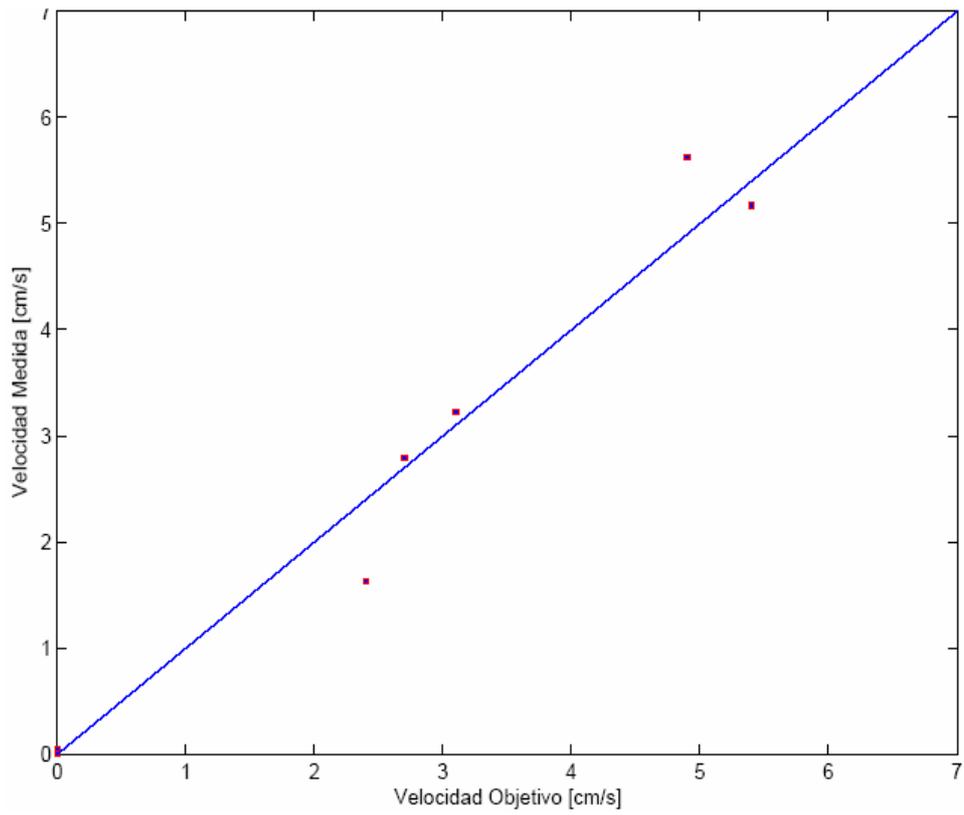
A continuación se discute en forma gráfica la calidad de la calibración para representar los valores objetivos de los parámetros de control de la instalación. La Figura 4.33 muestra la relación existente entre el período peak objetivo y el generado por la paleta.



*Figura 4.33: Comparación períodos peak objetivo y medido.*

Se observa que los datos registrados se ajustan muy bien a los objetivos, lo que asegura la buena calibración del generador de oleaje. La Figura 4.34 muestra la relación existente entre la velocidad corriente objetivo y el la reproducida en el canal.

Nuevamente se observa el buen ajuste entre los valores objetivos y los medidos en el canal. Lamentablemente la escasa cantidad de experiencias no permite establecer un comportamiento de la calibración del período peak en función del mismo, es decir, no es posible saber como varía la calidad de la calibración a medida que se requieren períodos más largos o más cortos. Sin embargo se puede garantizar la calidad de calibración en el rango de 2.43 s a 3.15 s.



**Figura 4.34:** Comparación velocidades de corriente objetivo y medido.

## 5 Conclusiones y recomendaciones:

Durante el desarrollo de este estudio se han realizado múltiples experiencias, observaciones y análisis, dentro de los cuales una parte no fue presentada en esta memoria. Esto se debe a que el criterio utilizado fue el de incluir sólo lo estrictamente relevante y no duplicar análisis o información ya presentada.

A continuación se exponen las conclusiones de este trabajo de título. Es importante mencionar que el canal se calibró y operó en un rango particular de períodos y corrientes, por lo tanto las conclusiones derivadas pertenecen a ese rango y no pueden ser extrapoladas a todos los rangos de período y oleaje posibles de generar en el canal. Las mismas consideraciones hay que tener al respecto del *Stroke* de la paleta, el cual permaneció constante durante todas las experiencias.

### 5.1 Conclusiones

#### 5.1.1 Calibración del generador de oleaje

- ? El generador de oleaje implementado y su interfaz computacional permiten trabajar en el sistema con total seguridad y comodidad, ya que esta última se maneja desde el computador cercano al canal. Además permite realizar mediciones extensas (del orden de dos horas de operación continua) ya que el sistema eléctrico que compone el controlador del generador fue diseñado especialmente para tales efectos.
  
- ? Se calibró el generador de oleaje considerando nueve experiencias que corresponden a distintos escenarios de corriente, alturas de nivel medio de aguas y períodos de oleaje.

Uno de los parámetros de control del sistema, y, en particular, el parámetro de control del oleaje, es el período peak. La curva, que relaciona el período peak con el voltaje, construida tiene una correlación de 97% en el rango 1.5 a 5 s.

Sin embargo, el contraste entre los valores objetivos y medidos arrojan un 80% de correlación entre ellas, lo que induce un error entre el oleaje objetivo y generado. No obstante la calibración realizada permite trabajar con completa seguridad en el rango 2.4 a 3.15 s. Es importante mencionar que la implementación digital que se realizó, no induce errores en la etapa de control del generador.

- ? Un parámetro de respuesta del período peak es la altura de ola generada. La curva de calibración realizada entre el período peak y la altura tiene una correlación de 80%.
- ? El otro parámetro de control del sistema es la velocidad de la corriente que se opone al oleaje. La curva de calibración construida realizada tiene una correlación de 99%.

Es importante mencionar que, si bien es cierto la curva de calibración tiene una altísima correlación, en la práctica debido al control manual que tiene este parámetro (recordar que se controla a través de una placa orificio y un manómetro) las velocidades medias medidas en las experiencias no se corresponden con sus pares objetivos con la precisión antes mencionada sino con aproximadamente una correlación de 95%, lo cual permite trabajar con toda seguridad en el rango 0 a 6.3 cm/s.

La velocidad de la corriente no resultó ser un parámetro relevante de la calibración de los parámetros del oleaje, esto se debió a que las velocidades de la corriente seleccionadas oleaje son del orden de un 5 % de la celeridad de la ola, lo cual no es suficiente para modificar perceptiblemente la altura o el período peak del oleaje.

- ? Respecto de los límites de operación del generador de oleaje, se puede mencionar que se construyó una gráfica que de manera fácil permite conocer la posibilidad de generar un cierto tipo de oleaje en el canal.
- ? Se construyó una rutina en ambiente MatLab que permite la fácil calibración de experiencias medidas en el canal. Esta rutina está a disposición de futuros estudios que consideren experiencias o calibraciones en rangos distintos de velocidades de corriente.

### **5.1.2 Caracterización hidrodinámica**

- ? Se realizaron nueve experiencias de medición en el canal. Los perfiles de ola medidos presentaron un valle de menor magnitud (desnivelación de altura de agua respecto del nivel medio de aguas) que la cresta, lo cual es un indicio de la naturaleza no lineal del oleaje generado en el canal.
- ? Los espectros de velocidad presentaron una distribución de energía que sistemáticamente marcó un peak en la frecuencia asociada al peak del oleaje.

Este peak varió su energía dependiendo de las características de la experiencia a la cual pertenece.

Las experiencias sin oleaje marcaron un peak de magnitud mayor en las frecuencias del oleaje que sus pares con corriente, los cuales mostraron mayor contenido de energía espectral en frecuencias más altas.

- ? Los análisis de las auto-correlaciones y correlaciones cruzadas arrojaron como resultado que el tiempo que toma al sistema perder coherencia es orden de 4 minutos, después de los cuales el oleaje pierde correlación consigo mismo, esta pérdida de información se debe a la reflexión del oleaje, la cual se estima es del orden del 10%.
- ? Con respecto a los perfiles de velocidades medidos se puede mencionar que estos presentan mayor afinidad con los perfiles construidos a partir de la teoría de oleaje de Dean que con sus pares de la T.L.O.

De esta manera, se concluye que el oleaje generado en el laboratorio es de naturaleza no lineal y que queda bien caracterizado por la teoría de función de corriente.

- ? El número de Reynolds presentó para las experiencias sin corriente valores de mayor magnitud, y comparables entre sí, en las cresta y el valle.

Este comportamiento cambia en las experiencias con corriente en las que la fase valle tiene el número de Reynolds más alto, seguido de los nodos y la fase cresta. Este comportamiento se debe a que las velocidades en la fase valle son significativamente mayores que en las otras fases, ya que en ella la superposición de las velocidades asociadas al oleaje y a la corriente es aditiva, a diferencia de la fase cresta, donde las velocidades se oponen y se restan

- ? Con respecto a la energía cinética turbulenta, los perfiles presentaron el comportamiento apropiado según las referencias bibliográficas estudiadas. Se destaca un peak en la cercanía del fondo, este peak se debe al gradiente de velocidades presentes en la cercanías del fondo.

Los perfiles de energía cinética turbulenta media por fases, adimensionalizada por la velocidad media de cada fase, presentaron un comportamiento decreciente con el período y con el período adimensionalizado por  $(g/h)^{1/2}$ . Este comportamiento se debe a que los períodos mayores entregan menos energía por unidad de tiempo al cuerpo de agua, de hecho tienen un Reynolds menor que los períodos menores, y por lo tanto menor turbulencia.

- ? Las escalas de velocidades del sistema se determinaron para dos escenarios, para los casos sin corriente y con corriente.

Para los casos con corriente una buena escala de velocidades, para la fase valle y nodo 1, es la velocidad media del flujo. Estas dos fases presentan un buen colapso. Las fases cresta y nodo 2 no quedan bien escaladas por este valor, sin embargo presentan un buen colapso.

Para los casos sin corriente una buena escala de velocidades para las fases cresta y valle es la profundidad dividida por el período peak del oleaje,  $h/T$ . Sin embargo la escala  $S/T$ , donde S es el *Stroke*, es parámetro que escala mejor la velocidad. Los nodos 1 y 2 no quedan bien escalados por ninguno de los valores propuestos.

- ? Se construyó una rutina que permite rápidamente analizar las series de datos registrados en el canal, tanto para las velocidades como para las alturas. Esta rutina permite realizar todo el análisis presentado en el capítulo anterior y está a disposición de futuros estudios que consideren experiencias o calibraciones en rangos distintos de velocidades de corriente.
- ? Por ultimo cabe mencionar que todos los objetivos propuestos se cumplieron a cabalidad y satisfactoriamente. Queda entonces a disposición del Departamento de Ingeniería Civil, particularmente a la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente una instalación en óptimas condiciones, calibrada y lista para su utilización.

## 5.2 Recomendaciones a cerca de los futuros estudios en el canal

Como se mencionó en el Capítulo 4, las distorsiones longitudinales producidas por el modelo son de orden 6 a 8, por lo que se debe tener especial cuidado al analizar y escalar al prototipo resultados medidos en el modelo. Se recomienda utilizar resultados de futuros estudios en el modelo de manera cualitativa.

En los futuros estudios que se lleven a cabo en el canal se puede ampliar el rango de experiencias ya que se conoce la naturaleza del oleaje, las calibraciones y las capacidades de la paleta.

Respecto de las distorsiones, se aconseja considerarlas al momento de establecer un programa de experiencias en el laboratorio, particularmente en estudios que consideren fenómenos que sean afectados por la longitud de la ola, como por ejemplo estudios relacionados con transporte de masa.

Otro efecto relevante son las distorsiones en la transición de régimen de aguas someras, en el laboratorio, a aguas intermedias o profundas en el prototipo. Esta transición induce más agitación en las zonas cercanas al fondo en el modelo y es necesario considerarlas al realizar estudios que consideren transporte de masa.

Para futuros estudios relacionados con transporte de masa se recomienda utilizar la escala de esfuerzo de corte debido a olas cortas, ya que considera información tanto del sólido que compone el fondo, de la escala longitudinal (o geométrica si no hay distorsión) y de la densidad. Sin embargo, se recomienda estudiar la referencia [S. Hughes, 1993] ya que ese texto incluye información acerca de modelos físicos y escalas apropiadas para distintos escenarios.

Así mismo, se recomienda estudiar el Anexo I, Funcionamiento del generador de oleaje, que contiene información relevante asociada al funcionamiento y operación del generador de oleaje, de manera de optimizar su utilización de manera segura.

## 6 Bibliografía y Referencias:

1. Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple, 1998, "Water Wave Mechanics For Engineers And Scientists", Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, Vol 2.
2. Carlos García, Mariano Cantero, Yarko Niño, Marcelo García, 2005, "Turbulence Measurements with Acoustic Doppler Velocimeter", Journal of Hydraulic Engineering©ASCE.
3. Yarko Niño, 2004, Proyecto FONDECYT "Turbulencia y transporte en la capa límite béntica de lagos y estuarios, estudio de terreno y modelación", concurso regular a fondos FONDECYT.
4. Apuntes curso "Hidrodinámica Ambiental" dictado por los profesores Yarko Niño y Aldo Tamburrino, División de Recursos Hídricos y Medioambiente, Universidad de Chile.
5. Apuntes curso "Hidráulica Marítima" dictado por el profesor Javier Vásquez, División de Recursos Hídricos y Medioambiente, Universidad de Chile.
6. Miguel A. Vergara S, 1993, "Técnicas de Modelación en Hidráulica", Ediciones alfa Omega, pags. 37-106.
7. Irving H. Shames 1992, "Mecánica de Fluidos", McGrawHill, pág..571-572
8. Carlos Briso Medina, 2003, "Calibración y Ensayos de Defensa Costera en Canal de Olas Bidimensional", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
9. Francisco Nicolau del Roure Olivares, 2004, "Evaluación de Metodologías de Transferencia de Oleaje Desde Aguas Profundas a Aguas Someras, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil", Universidad de Chile.
10. D.C. Ipsen, 1960, "Unitis, Dimensions and Dimensionless Numbers", McGrawHill, pags. 132-133.
11. Fredsøe y Deigaard, 1992, "Mechanics of Coastal Sediment Transport", Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, Vol 3.
12. Steven A. Hughes, 1991, "Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering", Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific Vol 6.
13. José Espinoza E, 2006, "Caracterización Hidrodinámica de la Desembocadura del Rio Maipo", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile

14. Esteban Ballester V, 2004, “Estudio del Comportamiento de la Barra de Sedimentos en la Desembocadura del Rio Maipo, Chile”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
15. Manuel Barahona L, 1997, “Estudio experimental de la Interacción entre un flujo Turbulento y un Lecho granular Móvil”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
16. David Aracena F, 1999, “Estudio Experimental de Ondas Sedimentarias en Condiciones de Sedimento No Uniforme.”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
17. National Instruments, 2003-2004, SCB-68 68-pin Shielded Connector User Manual
18. National Instruments, 2003-2004, NI- DAQ7 Quick Start Guide.
19. Churchill Conrols, Wave monitor Manual.