



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

PRESENTA:

JOSÉ GUADALUPE SEGUNDO CORONA GÓMEZ



DIRECTOR DE TESIS:

DRA. CATALINA ELIZABETH STERN FORGACH

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Hoja de Datos del Jurado

1. Datos del alumno

Corona

Gómez

José Guadalupe Segundo

58472974

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

094201343

2. Datos del tutor

Dra.

Catalina Elizabeth

Stern

Forgach

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Steven Peter Reed

Czitrom

Baus

4. Datos del sinodal 2

Dr.

Arturo

Olvera

Chávez

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Carlos

Málaga

Iguñiz

6. Datos del sinodal 4

Dr.

Francisco Javier

Mandujano

Sánchez

7. Datos del trabajo escrito

Vorticidad y pérdidas de energía en flujos oscilantes

46 p

2011

Resumen

Vórticidad y Pérdidas de Energía en Flujos Oscilantes

Se construyó un dispositivo experimental con el objetivo de encontrar las pérdidas de energía debidas a la formación de vórtices a la salida de un tubo en el que una columna de agua oscila libremente.

Se hicieron dos tipos de experimentos; en el primero se trabajaron cuatro casos distintos donde se midieron las amplitudes de oscilación de la columna de agua. Se encontró que la frecuencia de oscilación de la columna de agua no varía con la altura inicial. A partir de los datos medidos se calculó el valor de la energía potencial y posteriormente se calcularon las pérdidas en las primeras oscilaciones donde se observó que no son determinantes en la disipación de energía. Además se obtuvo en el primer caso un sólo régimen de decaimiento y dos regímenes para los siguientes tres casos. Se encontró que el decaimiento de la columna de agua no es similar al de un oscilador amortiguado.

En el segundo experimento se midió la altura de la columna de agua y sincronizadamente se filmó el flujo a la salida del tubo. Se utilizó un algoritmo de *velocimetría por imágenes de partículas* (**PIV**, por sus siglas en inglés) para obtener los campos de velocidades a partir de analizar las imágenes que componen la filmación. Con los valores obtenidos del **PIV** se encontró el comportamiento de la energía cinética asociada a la columna de agua. Después se hizo una comparación gráfica entre la energía potencial y de energía cinética de la columna de agua.

En todos los casos se dan resultados y se analizan, se presentan conclusiones y finalmente se hacen propuestas para trabajo a futuro.

Agradecimientos

Le agradezco profundamente a la Doctora Catalina Elizabeth Stern Forgach por haberme permitido relizar este trabajo bajo su tutoría, por la infinita paciencia que me tuvo, por el placer de haber aprendido a su lado y por permitirme formar parte de su equipo.

Al Doctor Steven Peter Reed Czitrom Baus, por aceptar ser mi sinodal, por sus valiosos comentarios para el mejoramiento de este trabajo y por haberme otorgado la generosa beca del Proyecto SEMARNAT-2002-01-C01-00016, la cual me fue de enorme ayuda.

A los Doctores: Arturo Olvera Chávez, Carlos Málaga Iguíñiz y Francisco Javier Mandujano Sánchez por aceptar formar parte del jurado calificador de esta tesis y que gracias a sus muy valiosos comentarios ayudaron a mejorar y enriquecer este trabajo.

A Francisco Martínez Farias y también a Jorge Hernández Tahuilán (donde quiera que estés) por su valiosa ayuda que me brindaron en el Laboratorio de Acústica.

A la UNAM por que es uno de los más grandes privilegios estar en sus aulas.

A mi madre Josefina Gómez por enseñarme a luchar, por tu cariño, por tu enorme apoyo moral y económico que sin ellos me habría sido muy difícil sobrevivir en este mundo.

A mi padre Auffroi Corona, por enseñarme a trabajar y a ser honesto.

A mi compañera Karina por que siempre estuviste a mi lado y por compartir la vida conmigo.

A mi pequeño Huitzi, desde que llegaste eres la fuente de todas mis energías.

A mis hermanos Laura y Auffroi por que siempre estuvieron conmigo.

A la bandera: Moi, Héctor, Mailo, Paco y Georgi (siempre estarás con nosotros) por compartir su amistad y por lo mucho que he aprendido de ustedes.

A tod@s, muchas gracias.

Contents

Resumen	iv
Agradecimientos	v
1 Introducción	1
1.1 SIBEO	2
1.2 Pérdidas de energía	4
1.3 Vórtices y vorticidad	5
1.4 Objetivo	5
2 Dispositivo experimental	7
2.1 Dispositivo	7
2.2 Medición de la altura de la columna de agua	9
2.2.1 Calibración del sensor	10
2.3 Medición del campo de velocidades	12
3 Procedimiento Experimental	13
3.1 Experimento General	13
3.2 Oscilación libre.	14
3.2.1 Resultados	14
3.2.2 Análisis	20
4 Experimento con PIV	28

4.1	Experimento	28
4.1.1	Resultados	29
4.1.2	Análisis	31
5	Conclusiones	35
5.1	Conclusiones Generales	35
5.2	Trabajo a futuro	37

Capítulo 1

Introducción

Este trabajo está motivado por el proyecto **SIBEO** (*Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje*), el cual aprovecha la energía del oleaje para bombear agua de mar a cuerpos de agua costeros estancados.

Hoy en día el consumo de hidrocarburos como principal fuente de energía -necesaria para el desarrollo cotidiano de las actividades humanas- ha provocado su acelerado agotamiento además de daños al medio ambiente, que en ocasiones han sido irreversibles. Por tales motivos, se vuelve necesario buscar otras fuentes de energía que sean de bajo costo y no contaminantes. Una de las varias alternativas que se tienen es aprovechar la energía que contienen las olas del mar.

En el siglo pasado se desarrollaron varias técnicas para utilizar éste tipo de energía, teniendo como objetivo la producción de electricidad. Sin embargo, hay otras formas de usarla. En México, el Doctor Steven Czitrom del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (ICMyL-UNAM) y un equipo de investigadores teniendo el interés de bombear agua de mar limpia a cuerpos de agua costeros -como lagunas y bahías- que se encuentran estancados por diversos factores, desarrollaron el *Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje* (**SIBEO**).

1.1. SIBEO

El **SIBEO** es un sistema mecánico sin partes móviles que sirve para bombear agua desde el mar hasta cuerpos de agua costeros. Consta de dos tubos y una cámara de compresión (ver figura 1.1). El primer tubo se denomina resonante por razones que se harán claras más adelante; por él entra el agua y se deposita en la cámara de compresión. El segundo tubo es de desagüe.

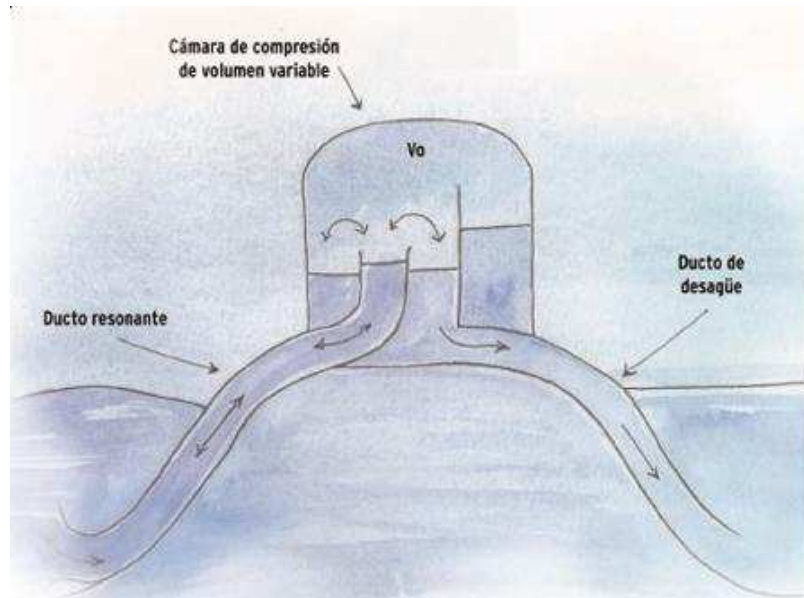


Figura 1.1: Esquema general del *SIBEO*

El sistema se puede describir mecánicamente como dos masas que están conectadas por un resorte (ver figura 1.2), donde la primera masa representa al tubo de admisión (resonante) y la masa conectada a éste (L1) representa el agua contenida dentro del tubo expuesto a la acción de las olas del mar. La cámara de compresión representa el resorte y la segunda masa (L2) representa al tubo de desagüe, que descarga por gravedad el agua a la laguna.

El diseño del método de bombeo ya existía desde los años setenta, pero con el tiempo se le han hecho modificaciones para hacerlo más eficiente. Por ejemplo se le

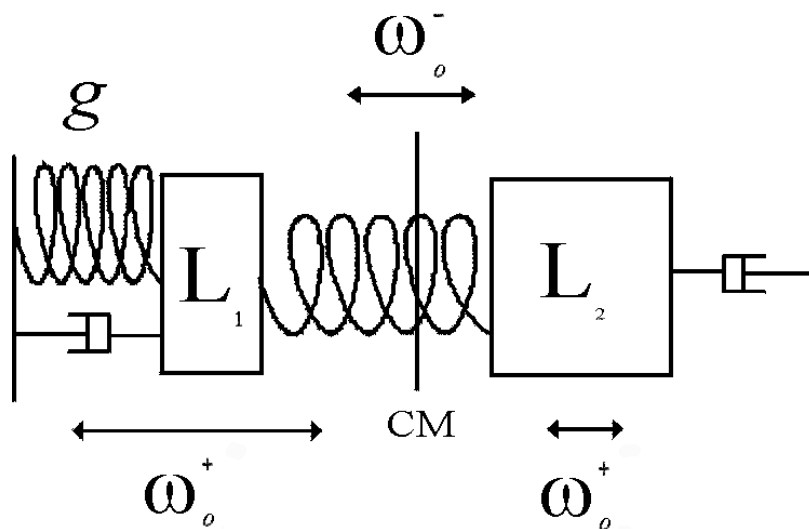


Figura 1.2: Modelo mecánico del *SIBEO*

añadió un sistema de sintonización. Como en el mar existe oleaje con un amplio rango de frecuencias con mayor o menor grado de energía, en la cámara de compresión se encuentra un sintonizador que pone al **SIBEO** en resonancia con el oleaje de mayor energía. La frecuencia de resonancia del sistema depende de la masa y de la fuerza del resorte (cámara de compresión). Entonces, al cambiar el volumen de aire de la cámara se modifica la frecuencia de resonancia del sistema y se puede sintonizar con la frecuencia más energética del oleaje. Cuando el sistema entra en resonancia, la amplitud de oscilación en el tubo resonante se incrementa y el agua se derrama dentro de la cámara de compresión. Posteriormente, a través del tubo de desagüe, el agua descende por gravedad al cuerpo de agua estancado.

El **SIBEO** se utiliza para el manejo de zonas costeras. Puesto que no tiene partes móviles, los organismos acarreados por el agua pasan sin dañarse. Así, en 1995 el **SIBEO** se utilizó para introducir larva de camarón a la laguna *El Lagartero* de Oaxaca.

También se puede utilizar para ventilar aguas contaminadas al introducir agua con oxígeno. Tiene entonces un enorme potencial para solucionar diversos problemas

asociados con la restauración del entorno ecológico.

1.2. Pérdidas de energía

En esta sección se describen los distintos tipos de pérdidas de energía que existen en un flujo oscilante dentro de un tubo. Estas se deben a la fricción del flujo con las paredes del tubo, a la radiación y a la formación de vórtices [12].

Las pérdidas por fricción se deben a los esfuerzos cortantes entre las partículas del fluido que se mueven en trayectorias paralelas con velocidades distintas. El desplazamiento entre las capas de fluido se debe a la viscosidad, en particular a la condición de adherencia en la pared del tubo, de ahí que la pérdida de presión se atribuya a la fricción en las paredes. Cuando el flujo es turbulento, la presencia de vórtices en todo el flujo incrementa los esfuerzos entre las distintas capas y, por lo tanto, las pérdidas de presión por fricción son mayores que en el caso laminar.

En las pérdidas por radiación de energía se considera que las oscilaciones en los tubos generan una onda superficial en el cuerpo de agua al que están conectados.

La siguiente pérdida que es el interés de este trabajo, se debe a la formación de vórtices en boca de los tubos. Estos vórtices son inducidos por el flujo oscilante que en los tubos se forman periódicamente. La geometría de la boca de los tubos juega un papel muy importante en la magnitud de la pérdidas por formación de vórtices.

Una causa de disipación para un líquido de viscosidad muy pequeña es la pérdida de la presión en la entrada del tubo [6] debido a la diferencia de radios del tanque (de tamaño grande) y el tubo (de un radio mucho más pequeño): debido a la contracción precipitada entre los dos, algunos remolinos aparecen en la entrada del tubo, disipando cierta cantidad de energía.

En experimentos realizados con un modelo del **SIBEO** en un tanque de olas, se puso un difusor en forma de trompeta en la entrada del tubo resonante, lo que

incrementó el flujo volumétrico en un 15% . Además, puesto que en el borde del difusor se forma un vórtice cuando el agua sale y otro cuando el agua entra, se buscaron las condiciones adecuadas para que no se generen vórtices.

1.3. Vórtices y vorticidad

En esta sección se da una definición breve de vórtice y de su interpretación matemática que es la vorticidad.

Donde hay un flujo viscoso en movimiento siempre hay gradientes de velocidad y vórtices. Un vórtice tiene que ver con el giro de partículas en torno a un punto y esta rotación debe estar referida al movimiento colectivo. Entonces al vórtice se puede proponer como el patrón que se genera por el movimiento de rotación de muchas partículas alrededor de un punto en común.

La vorticidad es un campo vectorial; es decir, su magnitud y dirección están definidas en cada punto del espacio ocupado por el fluido. Es una medida de rotación de cada partícula de fluido y se define como:

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v}, \quad (1.1)$$

donde \vec{v} es la velocidad del flujo.

1.4. Objetivo

El objetivo de éste trabajo es investigar experimentalmente el comportamiento de una columna de agua que oscila libremente, para determinar los factores que inciden en la disipación de energía por formación de vórtices. Para esto, en el laboratorio de acústica de la Facultad de Ciencias de la UNAM, se construyó un dispositivo que consiste en un tubo de forma cilíndrica sumergido vertical y parcialmente en un

tanque con agua. Para producir el flujo oscilante, se sube la columna de agua dentro del tubo y se deja oscilar libremente hasta que decae totalmente.

La variación en la altura de la columna de agua se registra por medio de un sensor de capacitancia. Para visualizar el flujo se introduce pintura metálica al agua. La pintura está compuesta de pequeñas partículas. Para iluminar el área de interés se forma una hoja de luz haciendo pasar un haz de luz láser perpendicularmente por una lente cilíndrica. El flujo a la salida del tubo se graba con una cámara de video. Un algoritmo de **PIV** (*Velocimetría por Imágenes de Partículas*, por sus siglas en inglés) desarrollado en el laboratorio de Acústica [10], permite medir el campo de velocidades en función del tiempo.

Dado que las mediciones del sensor y la toma de la cámara de video están sincronizados, es posible relacionar el campo de velocidades con la oscilación de la columna de agua. Se espera entonces poder encontrar una relación entre el campo de velocidades y las pérdidas.

La tesis está dividida en cinco capítulos:

En el capítulo 2 se describe el dispositivo experimental que se usó para realizar este trabajo así como las técnicas y el equipo utilizado para hacer las mediciones y registrar los datos tomados de éstas.

En el capítulo 3 se habla del procedimiento experimental. Se describe el experimento en general y en particular cuatro casos que se diferencian por una altura inicial Z_0 , se dan los resultados obtenidos, se analizan estos resultados y por último se hacen conclusiones para cada caso.

En el capítulo 4 se describe un experimento similar a los del capítulo cuatro con la diferencia de que también se trabajó con el campo de velocidades que se forma en la boca del tubo, se dan resultados y se analizan llegando a conclusiones finales.

En el capítulo 5 se dan las conclusiones generales y se propone el trabajo a futuro.

Capítulo 2

Dispositivo experimental

En este capítulo se presenta el dispositivo experimental que se construyó para la generación de una columna de agua oscilante, así como las técnicas y equipos utilizados para la medición y toma de datos.

Para llevar a cabo el objetivo trazado en este trabajo, se diseñó un nuevo sistema totalmente controlado por computadora en el que es posible medir de manera simultánea la altura de la columna de agua y el campo de velocidades en la boca del tubo. Esto permitirá cuantificar resultados que hasta ahora sólo se habían estudiado de manera cualitativa por visualización.

2.1. Dispositivo

El dispositivo experimental esta compuesto de las siguientes partes:

Un tanque o depósito de forma cúbica con un volumen de $70^3 cm^3$. Tres de las paredes y la base son de acrílico, la otra pared es de vidrio. El tanque se llena de agua.

Un tubo de acrílico de forma cilíndrica donde oscila una columna de agua. El tubo tiene una longitud de 50 cm y un radio interno de 2.5 cm. El tubo se encuentra sumergido parcialmente en el centro del tanque.

Un sensor de capacitancia dentro del tubo. Con este dispositivo se mide el cambio de altura que tiene la columna de agua.

Un par de electroválvulas de 120/60 Volts/Hz colocadas en la parte superior del tubo, las cuales tienen la función de abrirse para soltar la columna de agua.

Un láser de estado sólido de 150 mW de potencia.

Una lente cilíndrica que se utiliza para abrir una hoja con la luz emitida por el laser.

Una videocámara para filmar el flujo en la boca del tubo.

Un programa con el que se controla el encendido de los sistemas de medición y también con el que se hace la captura de datos.

Un programa de **PIV** (*Velocimetría por Imágenes de Partículas*, por sus siglas en inglés).

En la figura 2.1 se muestra el dispositivo experimental donde estan señalados los componentes que lo conforman.

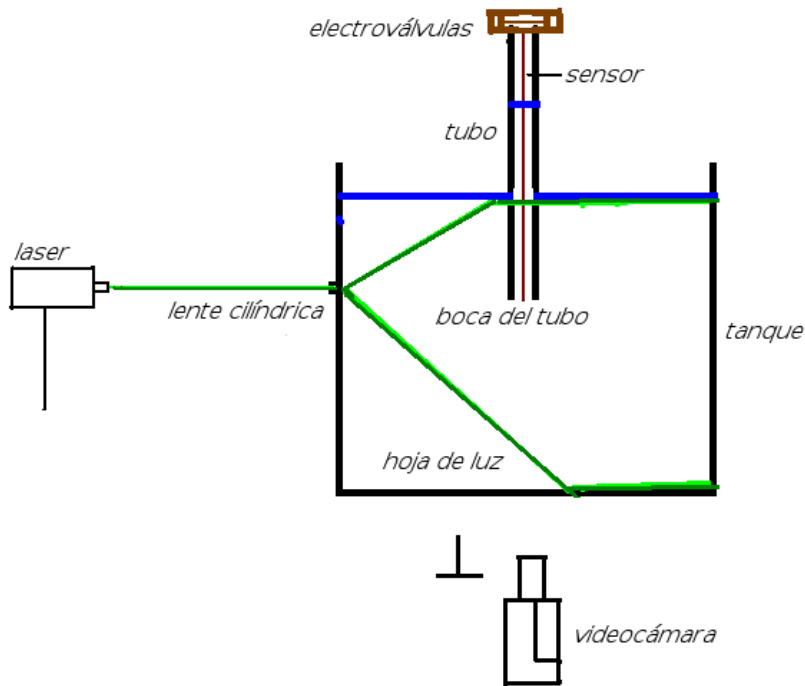


Figura 2.1 Perfil esquemático del dispositivo experimental.

En la figura 2.2 se muestra una fotografía tomada cuando el dispositivo experimental está trabajando.

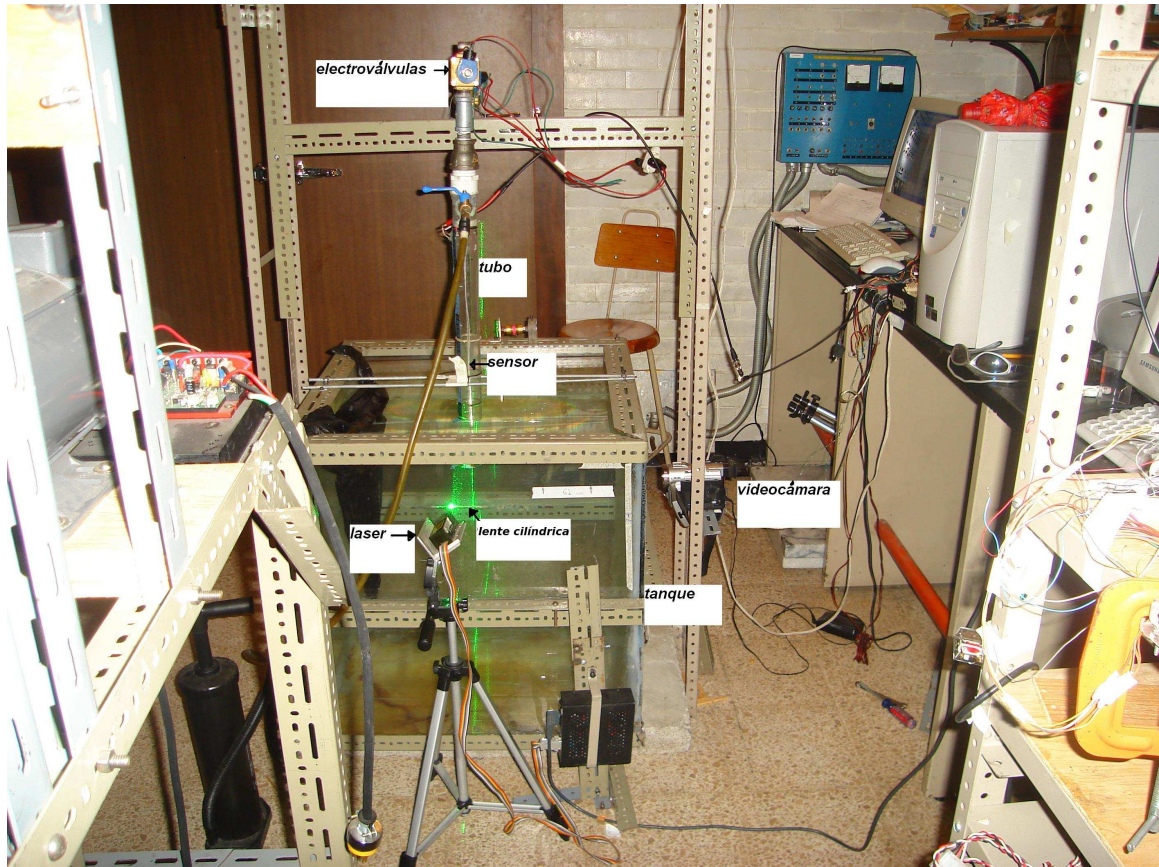


Figura 2.2 Dispositivo experimental en el Laboratorio de Acústica.

2.2. Medición de la altura de la columna de agua

La altura de la columna de agua se midió con un sensor de capacitancia. El sensor está formado por dos cables tensos paralelos dentro y a lo largo del tubo. Uno de ellos se encuentra aislado con un recubrimiento de plástico; el otro no. Los cables constituyen los polos de un capacitor y el agua es el medio dieléctrico. Los cables están conectados a un circuito doble resonante. Al moverse la columna de agua entre los cables, cambia el medio dieléctrico entre ellos provocando una variación en la capacitancia.

El circuito registra las variaciones que hay en la capacitancia como variaciones de voltaje. El voltaje cambia con la altura del agua. Las variaciones en el voltaje son enviadas a la PC mediante una tarjeta de captura de datos NI USB 6009.

La figura 2.3 muestra el esquema con los elementos involucrados en el funcionamiento del sensor de capacitancia.

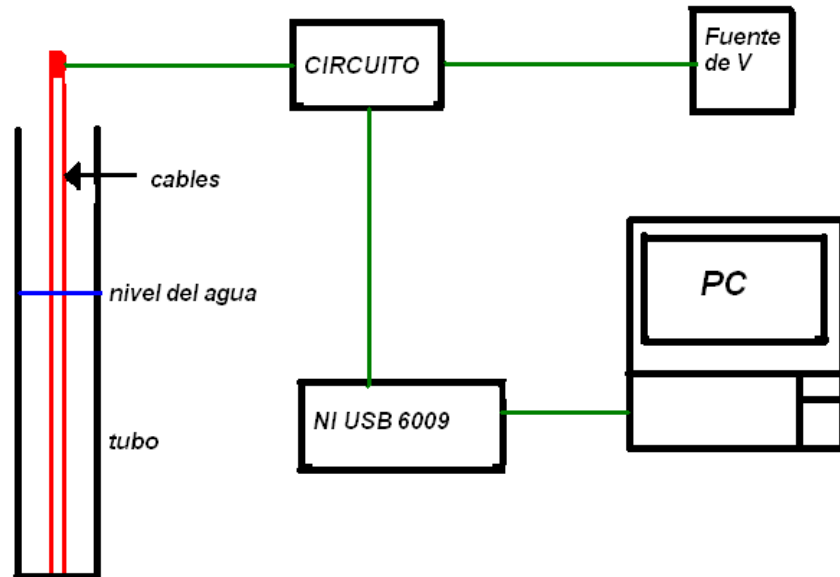


Figura 2.3 Esquema del sensor de capacitancia.

2.2.1. Calibración del sensor

La calibración se realizó por comparación entre la longitud del sensor al sumergirlo en agua y la diferencia de potencial que presentaba.

El sensor se fue sumergiendo dentro del tanque cada dos centímetros de profundidad, en donde, para cada punto se midió el valor de la diferencia de potencial. Tomando en consideración la longitud del sensor los puntos de calibración se seleccionaron en un intervalo de 2cm a 44cm.

La relación entre la profundidad y la diferencia de potencial es lineal a trozos. La calibración a lo largo del sensor obedece a dos rectas, una para los primeros 16 puntos y otra para los últimos 6 como se observa en la figura 2.4. En los primeros 16 puntos la diferencia de potencial cambió una décima de su valor conforme cambiaba la profundidad del sensor cada dos centímetros, después en los siguientes seis puntos la variación fue de centésimas en el valor medido de la diferencia de potencial, a esto se debe la existencia de las dos rectas en la calibración.

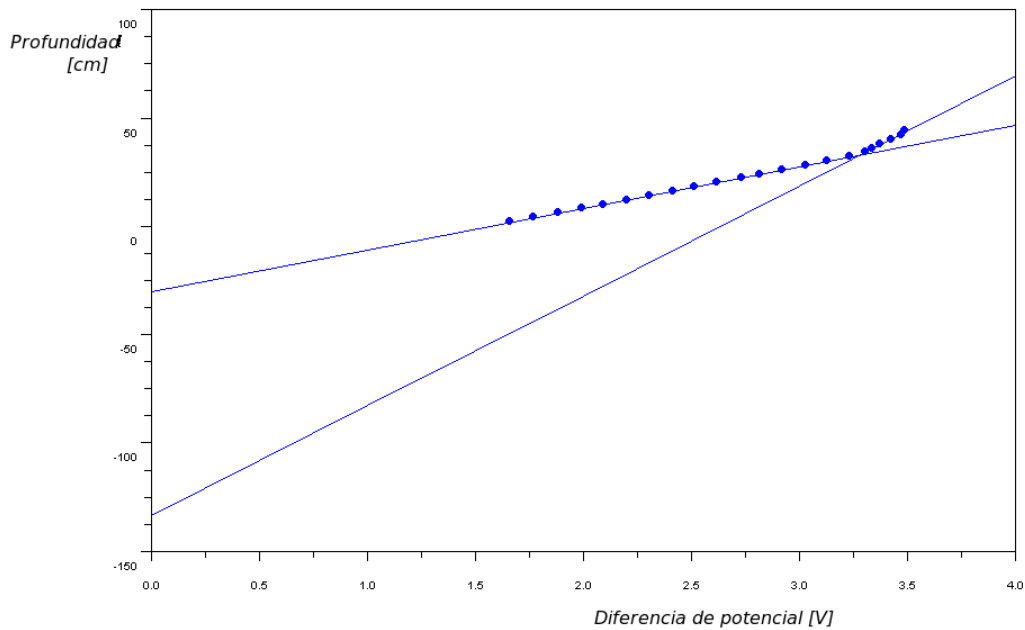


Figura 2.4 Relación lineal entre la profundidad del tubo y la diferencia de potencial.

Con los puntos de las dos rectas, se calculó el valor de la pendiente y de la ordenada al origen para cada una usando mínimos cuadrados. Los valores de la pendiente y la ordenada al origen obtenidos se sumaron y con esto se obtuvo el siguiente par de ecuaciones, donde la ecuación 2.1 corresponde a la primera recta y la ecuación 2.2 a la segunda:

$$Z = -10,8 \pm 0,3cm \quad (2.1)$$

$$Z = -82,9 \pm 0,2cm \quad (2.2)$$

El valor de este par de estas ecuaciones se introdujo en un algoritmo con el cual, mediante la tarjeta de captura de datos, registró en centímetros los valores de los máximos y los mínimos de la oscilación de la columna de agua mientras esta se amortigua..

2.3. Medición del campo de velocidades

El campo de velocidades se midió usando un sistema de **PIV**(*Velocimetría por Imágenes de Partículas*, por sus siglas en inglés). El **PIV** consta de dos partes. Primero se prepara el dispositivo para poder observar el fluido y obtener imágenes.

Con una hoja de luz se iluminó el área cercana a la boca del tubo. Con una videocámara, que se orientó a 90° con respecto al área iluminada, se tomaron imágenes de la luz dispersada por partículas de pintura metálica *Vinci*.

La videocámara que se utilizó es digital de marca *PANASONIC* DV401D en formato mini DV con una velocidad de captura de 30 cuadros por segundo y con una resolución de 720 por 480 pixeles.

La videograbación se dividió en intervalos de tiempo que es equivalente a descomponer el video en el número de cuadros que hay en un segundo. El total de los cuadros que lo componen es de 450. Esto se hizo con el programa *ADOBE PREMIERE*.

En la segunda parte se hace el procesamiento de las imágenes obtenidas para lo cual, se utilizó un algoritmo desarrollado en el Laboratorio de Acústica [10].

Capítulo 3

Procedimiento Experimental

En éste capítulo se muestra el procedimiento experimental que se llevó a cabo para encontrar las pérdidas de energía. Primero se describe el experimento en general y a partir de éste se describen cuatro casos distintos.

Los cuatro casos consistieron en escoger distintas alturas y a partir de estas se soltó la columna de agua. Posteriormente con los datos obtenidos de cada uno se calculó la frecuencia, la energía potencial y posteriormente las pérdidas.

Para los cuatro casos se muestran los resultados obtenidos, se hace un análisis sobre el decaimiento de la columna de agua y finalmente se sacan conclusiones.

3.1. Experimento General

Se sumerge parcialmente el tubo de acrílico una profundidad H en el centro del tanque (ver figura 3.1). Se cierran las electroválvulas, con una bomba de aire se sube la columna de agua hasta el tope dentro del tubo y se pone a correr un algoritmo, al cual se le ordena abrir las electroválvulas cuando el sensor registre una altura Z_0 escogida. Cuando esto sucede la columna de agua cae y comienza a oscilar hasta que se amortigua totalmente. El sensor hace un registro de toda la oscilación cuyos datos son almacenados en una computadora.

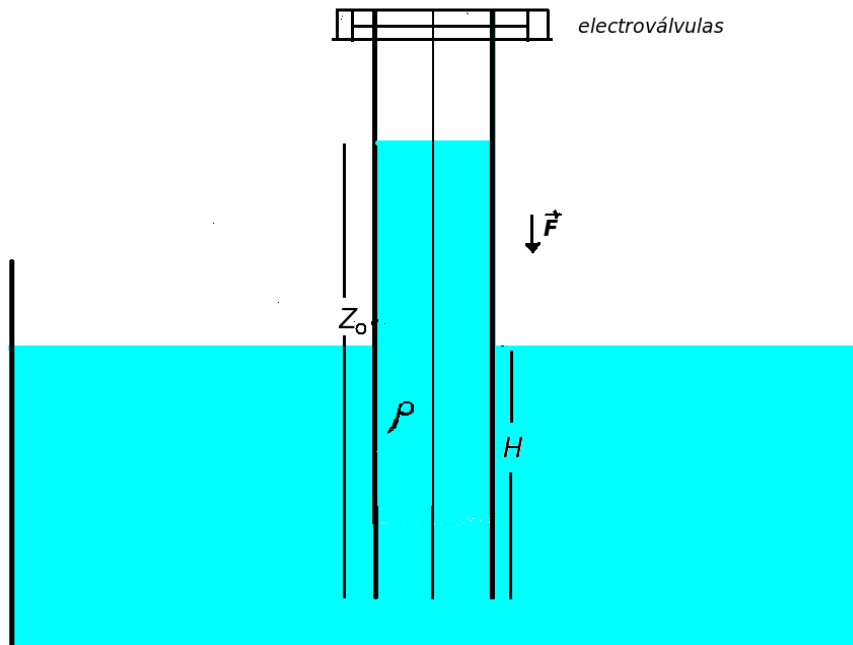


Figura 3.1 Perfil del dispositivo experimental.

3.2. Oscilación libre.

En estos experimentos sólo se dejó caer la columna de agua desde una altura inicial Z_0 . Se hicieron cuatro casos. El primero fue a partir de $Z_0 = 23\text{cm}$. Para los siguientes tres la altura Z_0 se fue aumentando en 5 cm.

3.2.1. Resultados

En cada experimento utilizando el programa *SCILAB* se obtuvo graficamente la altura de la columna de agua en función del tiempo. Las gráficas de los cuatro casos se muestran en la figura 3.2. Se esperaba encontrar un decaimiento exponencial similar al de un oscilador amortiguado.

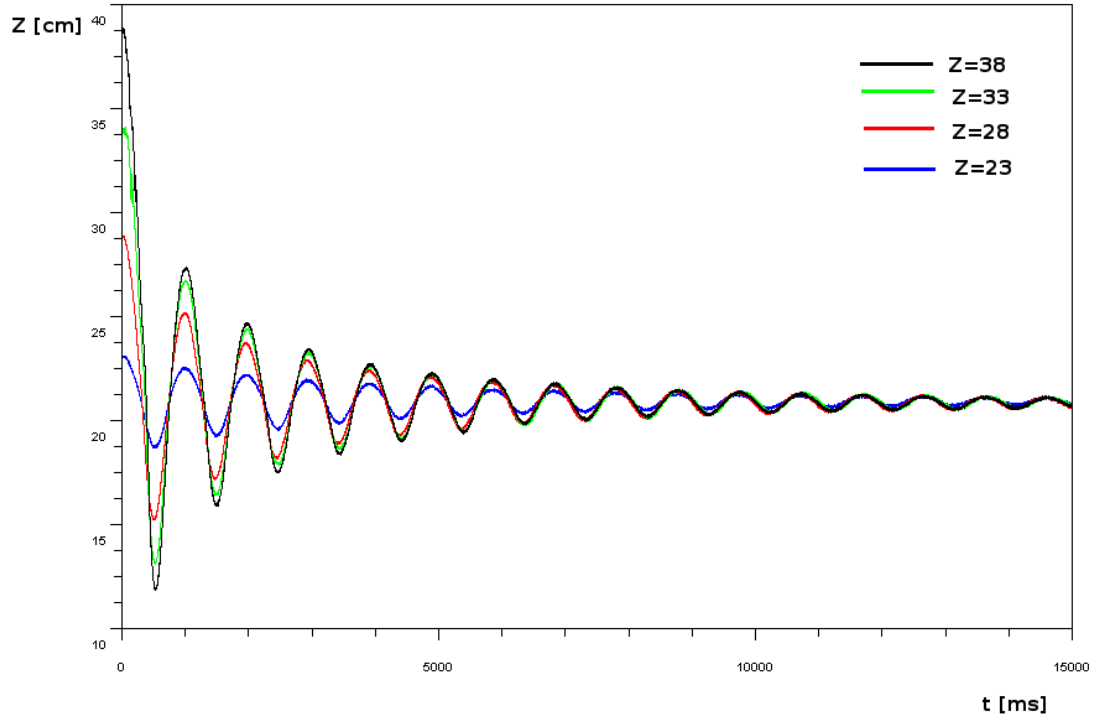


Figura 3.2 Variación de la amplitud de la columna de agua oscilante.

Además de obtener las gráficas de los experimentos también, se obtuvieron los archivos donde quedaron registrados los puntos máximos y los puntos mínimos en función del tiempo para cada uno de los cuatro casos.

En las siguientes dos tablas se muestran en dos columnas por experimento estos valores. La tabla 3.1 representa los valores para los casos de $Z_0 = 23\text{cm}$ y $Z_0 = 28\text{cm}$. En la tabla 3.2 se presentan los valores de $Z_0 = 33\text{cm}$ y $Z_0 = 38\text{cm}$ respectivamente. El primer valor en los máximos corresponde al la altura desde donde se soltó la columna de agua.

$Z_0 = 23 \pm 0,5cm$				$Z_0 = 28 \pm 0,5cm$			
Máximos		Mínimos		Máximos		Mínimos	
Amplitud	Tiempo	Amplitud	Tiempo	Amplitud	Tiempo	Amplitud	Tiempo
[cm]	[s]	[cm]	[s]	[cm]	[s]	[cm]	[s]
23.06	0	18.66	0.5	28.81	0	15.2	0.5
22.57	0.9	19.24	1.4	25.19	0.9	17.15	1.4
22.22	1.9	19.53	2.4	23.77	1.9	18.17	2.4
22.01	2.9	19.83	3.4	22.94	2.9	18.85	3.4
21.82	3.9	20.03	4.4	22.45	3.9	19.23	4.3
21.70	4.9	20.16	5.3	22.14	4.9	19.53	5.3
21.52	5.9	20.29	6.3	21.88	5.8	19.77	6.3
21.47	6.8	20.36	7.3	21.75	6.9	19.95	7.3
21.39	7.8	20.48	8.2	21.62	7.8	20.08	8.2
21.36	8.7	20.50	9.2	21.46	8.7	20.21	9.2
21.30	9.7	20.56	10.1	21.41	9.7	20.28	10.2
21.26	10.7	20.58	11.1	21.34	10.7	20.36	11.1
21.22	11.7	20.62	12.2	21.28	11.7	20.42	12.1
21.19	12.7	20.64	13.1	21.23	12.6	20.47	13.1
21.18	13.6	20.71	14	21.18	13.6	20.52	14
21.12	14.5			21.16	14.6		

Tabla 3.1

La incertidumbre de la altura Z_0 , es la suma de los valores de las incertidumbres calculadas en cada una de las rectas pertenecientes a la calibración del sensor.

$Z_0 = 33 \pm 0,5cm$				$Z_0 = 38 \pm 0,5cm$			
Máximos		Mínimos		Máximos		Mínimos	
Amplitud	Tiempo	Amplitud	Tiempo	Amplitud	Tiempo	Amplitud	Tiempo
[cm]	[s]	[cm]	[s]	[cm]	[s]	[cm]	[s]
33.11	0	13.45	0.5	38.79	0	11.95	0.5
26.45	1.0	16.45	1.4	27.56	1.0	16.04	1.4
24.33	1.9	17.82	2.4	24.87	1.9	17.62	2.4
23.24	2.9	18.61	3.4	23.66	2.9	18.49	3.4
22.67	3.9	19.11	4.4	22.90	3.9	19.14	4.3
22.24	4.9	19.43	5.3	22.44	4.8	19.58	5.4
21.96	5.8	19.75	6.3	22.16	5.8	19.93	6.3
21.81	6.9	19.94	7.3	21.98	6.8	20.11	7.3
21.64	7.8	20.04	8.3	21.80	7.8	20.27	8.2
21.49	8.7	20.24	9.2	21.60	8.8	20.39	9.2
21.40	9.8	20.28	10.2	21.55	9.7	20.47	10.2
21.34	10.7	20.38	11.2	21.48	10.7	20.52	11.1
21.28	11.7	20.45	12.2	21.42	11.7	20.57	12.1
21.23	12.7	20.49	13.2	21.37	12.7	20.61	13.1
21.19	13.7	20.52	14.2	21.32	13.6	20.66	14
21.13	14.5			21.29	14.6		

Tabla 3.2

Cálculo de las frecuencias

En la figura 3.2 se observa que los periodos en los cuatro casos coinciden. Para encontrar el valor de la frecuencia con la que oscila la columna de agua en cada caso, se tomaron los intervalos temporales de la oscilación y a partir de estos se calculó la frecuencia promedio. La incertidumbre de la frecuencia se calculó sacando

la desviación estándar. Estos resultados se presentan en la tabla 3.3.

$Z_0 \pm 0,5[cm]$	Frecuencia [Hz]
23	$1.03 \pm 0,02$
28	$1.02 \pm 0,02$
33	$1.04 \pm 0,03$
38	$1.04 \pm 0,03$

Tabla 3.3

Por los valores calculados, se puede observar que la frecuencia es independiente de la altura Z_0 donde comenzó a oscilar la columna de agua.

Se sabe que existen dos regímenes de decaimiento en donde, en el primero las pérdidas de energía se deben a la formación de vórtices. En el segundo dominan las pérdidas por fricción en las paredes del tubo.

Pérdidas de la energía potencial

Como la energía potencial U sólo depende de la altura Z_0 , se calculó su valor en el punto donde fue soltada la columna de agua y en los primeros tres máximos para los casos donde $Z_0 = 23cm$ y $Z_0 = 28cm$. Para los casos donde $Z_0 = 33cm$ y $Z_0 = 38cm$, además del punto donde fue soltada la columna de agua, la energía potencial se calculó en los primeros cuatro máximos. En estos puntos se supone que la energía es puramente potencial, es decir, la velocidad de la columna de agua es cero.

Las pérdidas de la energía potencial se calcularon mediante la diferencia de máximos. En cada caso para el primer valor de la pérdida se tomó el valor de la altura en $t=0$ y el primer máximo de la oscilación, para el segundo valor de la pérdida se tomó la diferencia entre el segundo y el tercer máximo y para el tercer valor de la pérdida se tomó el tercer y cuarto máximo, esto en los dos primeros casos.

Estos resultados se presentan en las siguientes tablas:

$Z_0 = 23$		
Z[cm]	U[ergs]	Pérdidas [%]
23.06	451	
22.6	441.5	2.1
22.2	434.6	1.5
22	430.5	0.9

Tabla 3.4

$Z_0 = 28$		
Z[cm]	U[ergs]	Pérdidas [%]
28.8	563.3	
25.2	492.7	12.5
23.8	464.9	5.6
22.9	448.7	3.5

Tabla 3.5

En los dos últimos casos, se tomó el valor del cuarto máximo para calcular el cuarto valor de la pérdida de energía potencial. Ver tablas 3.6 y 3.7.

$Z_0 = 33$		
Z[cm]	U[ergs]	Pérdidas [%]
33.1	647.6	
26.4	517.4	20
24.3	475.9	8
23.2	454.6	4.5
22.6	443.4	2.5

Tabla 3.6

$Z_0 = 38$		
Z[cm]	U[ergs]	Pérdidas [%]
38.8	758.7	
27.6	539.07	29
24.9	486.4	9.8
23.7	462.8	4.8
22.9	447.9	3.2

Tabla 3.7

3.2.2. Análisis

Los puntos máximos y los puntos mínimos de los cuatro casos del experimento (datos de las tablas 3.1 y 3.2) se graficaron por separado en un plano log-log donde para el primer caso, se obtuvo el mejor ajuste a una recta y en los tres casos las rectas se "doblan", en estos factores basaremos nuestro análisis.

En el primer caso la oscilación de la columna de agua comenzó con una altura inicial de $Z_0 = 23\text{cm}$. En la figura 3.3 se muestra la oscilación cubierta con una sola envolvente cuya ecuación para los puntos máximos es $Z(t) = (22,5 \pm 1,0)t^{-0,03 \pm 0,001}$ y para los puntos mínimos es $Z(t) = (18,6 \pm 0,001)t^{0,032 \pm 0,001}$.

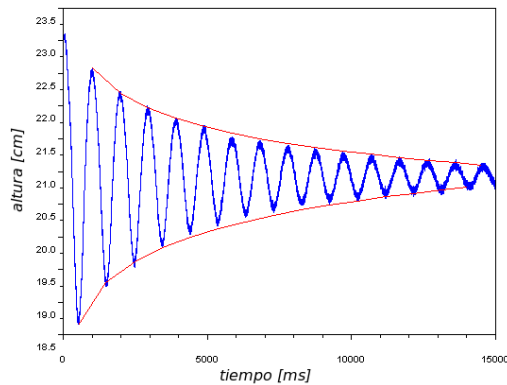


Figura 3.3 Una sola envolvente cubre todos los puntos del decaimiento.

Por los ajustes hechos se observa que tanto la bajada de la columna de agua (figura 3.4) como la subida de ésta (figura 3.5) son casi totalmente lineales, al final los últimos puntos para la bajada y los últimos puntos para la subida no se ajustan a la recta, esto pasa cuando la columna de agua ya casi se amortiguó.

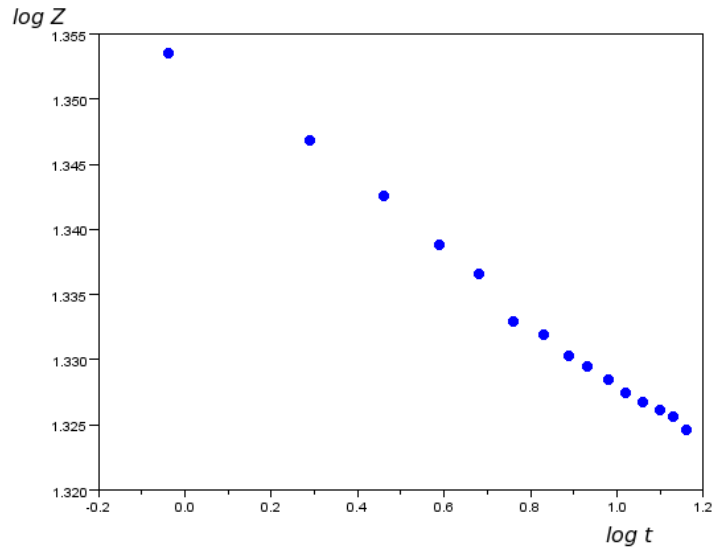


Figura 3.4 Ajuste de la curva $Z_0 = 23$. $\log Z = (-0,03 \pm 0,001)\log t + (22,5 \pm 1,0)$.

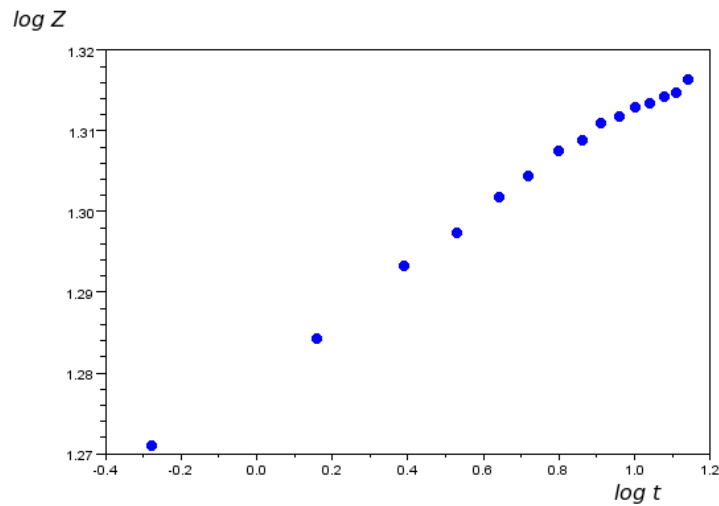


Figura 3.5 Ajuste de la curva $Z_0 = 23$. $\log Z = (0,032 \pm 0,001)\log t + (18,6 \pm 0,001)$.

En el segundo caso del experimento, la altura inicial desde donde fue de $Z_0 = 28\text{cm}$. Aquí el decaimiento fue cubierto con dos envolventes (figura 3.6). Una cubrió los

primeros cinco máximos y la segunda envolvente los puntos restantes. De igual forma se hizo en los puntos mínimos.

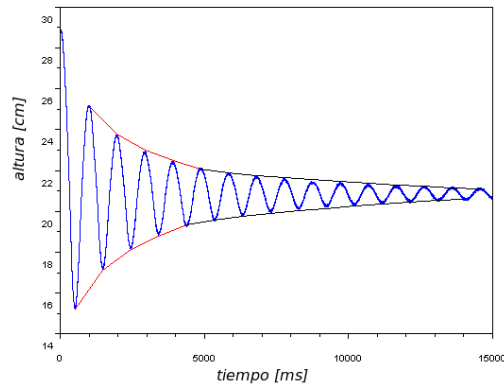


Figura 3.6 Decaimiento formada por dos envolventes.

La ecuación de la primer envolvente para los máximos es; $Z(t) = (24,5 \pm 1,0)t^{-0,06 \pm 0,001}$ y para la segunda envolvente $Z(t) = (23,3 \pm 1,0)t^{-0,04 \pm 0,002}$. Estas ecuaciones se obtuvieron con el programa *SCILAB*.

En el ajuste que se hizo para los máximos (figura 3.7) se observa que la caída de la columna de agua no es totalmente lineal, pues al final la recta se "dobla".

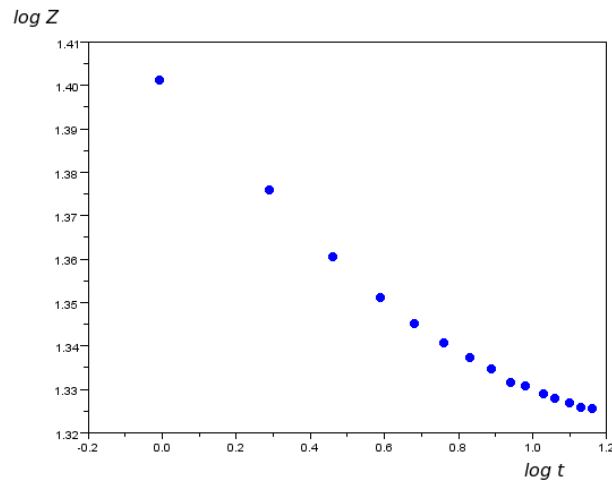


Figura 3.7 Ajuste de la curva $Z_0 = 28$. $\log Z = (-0,06 \pm 0,001)\log t + (24,5 \pm 1)$.

Cuando la columna sube (figura 3.8) se observa el mismo efecto, la recta al final se dobla.

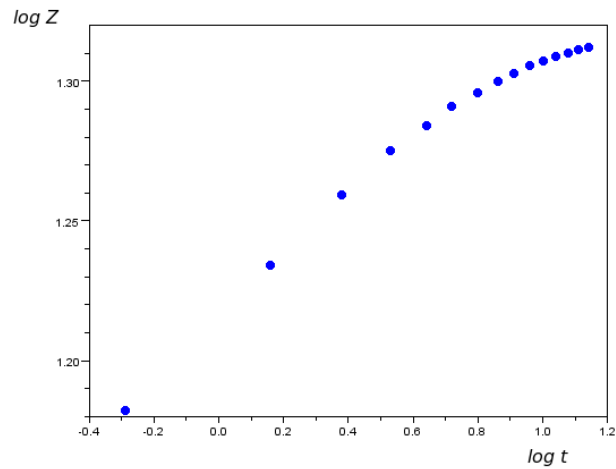


Figura 3.8 Ajuste de la curva para los puntos mínimos $Z_0 = 28$.

$$\log Z = (0,064 \pm 0,001)\log t + (15,1 \pm 0,001)$$

En el tercer caso, cuando la columna de agua se dejó caer desde $Z_0 = 33\text{cm}$, ahora la primer envolvente cubrió los primeros cuatro puntos en los máximos y también los primeros cuatro puntos para los mínimos (figura 3.9).

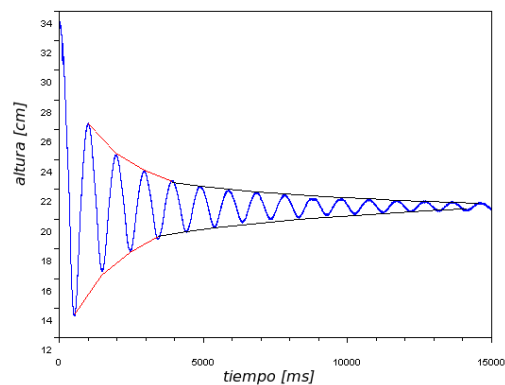


Figura 3.9 Se observa que la primer envolvente se ajusta en un punto menos que en el decaimiento anterior.

La ecuación de la primer envolvente es $Z(t) = (25,1 \pm 1,0)t^{-0,07 \pm 0,004}$ y de la segunda $Z(t) = (23,7 \pm 1,0)t^{-0,04 \pm 0,002}$.

En la figura 3.10 se observa un comportamiento lineal al principio de la bajada de la columna de agua y también el mismo comportamiento cuando sube (figura 3.11)

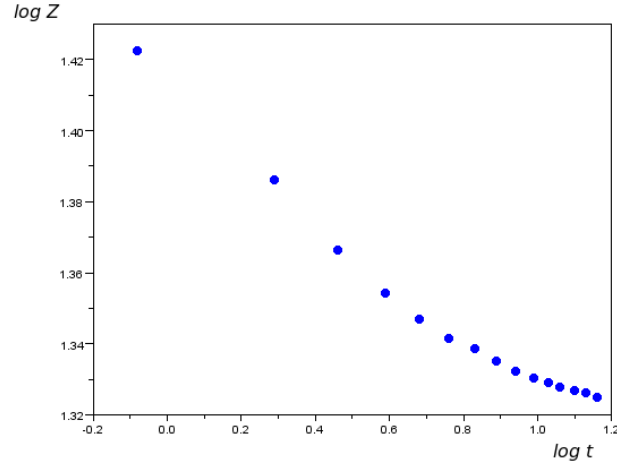


Figura 3.10 Ajuste de la curva para los máximos $Z_0 = 33$.

$$\log Z = (-0,07 \pm 0,001)\log t + (25,1 \pm 1).$$

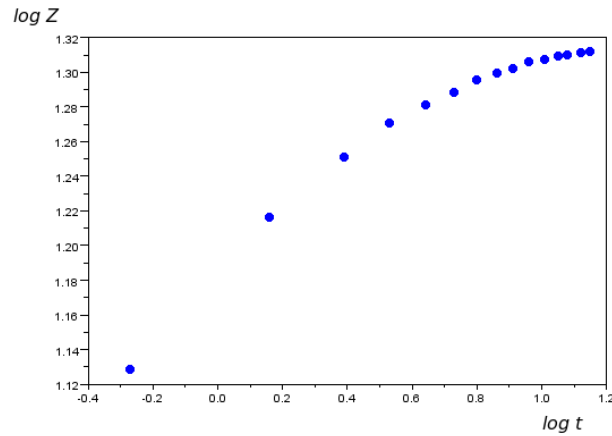


Figura 3.11 Ajuste de la curva para los mínimos $Z_0 = 33$.

$$\log Z = (0,12 \pm 0,009)\log t + (15,1 \pm 0,06).$$

Finalmente, en el último caso donde la columna de agua fue soltada en $Z_0 = 38\text{cm}$

la primer envolvente cubrió los primeros cuatro puntos como en el caso anterior ver figura 3.12.

La ecuación de los máximos para la primer envolvente es $Z(t) = (26,3 \pm 1,0)t^{-0,08 \pm 0,001}$ y para la segunda envolvente $Z(t) = (23,8 \pm 1,0)t^{-0,04 \pm 0,001}$.

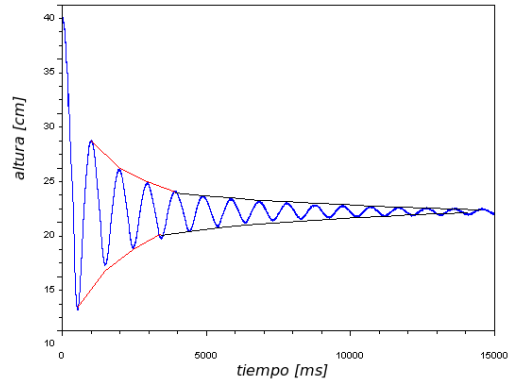


Figura 3.12 La primer envolvente cubre los mismos puntos del decaimiento que en el tercer caso.

En la figura 3.13 vemos el mismo comportamiento para la bajada de la columna de agua y también cuando la columna sube (figura 3.14): sólo al principio es lineal.

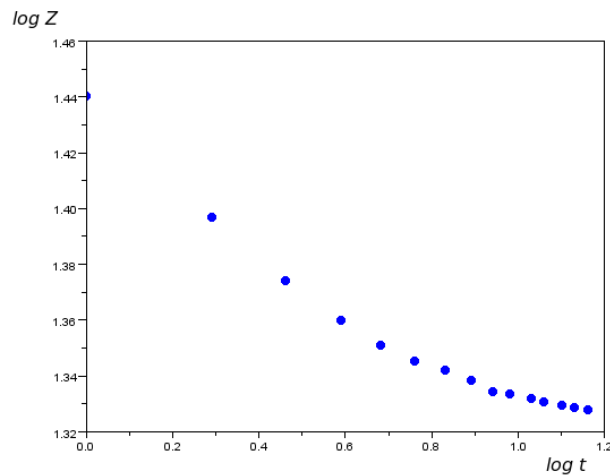


Figura 3.13 Ajuste de la curva para los máximos $Z_0 = 38$.

$$\log Z = (-0,08 \pm 0,001)\log t + (26,3 \pm 1).$$

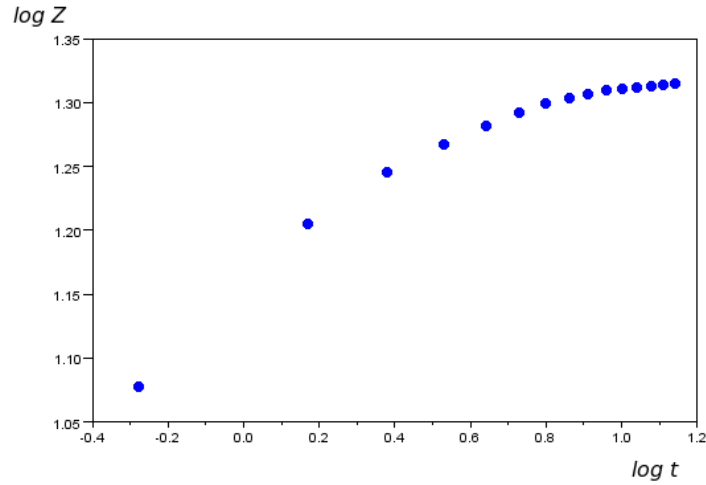


Figura 3.14 Ajuste de la curva para los mínimos $Z_0 = 38$.

$$\log Z = (0,15 \pm 0,01)\log t + (14,4 \pm 0,01)$$

En el primer caso $Z_0 = 23\text{cm}$, tomando en cuenta que que el decaimiento tiene una sola envolvente y que por lo tanto la bajada como la subida de la columna de agua es casi totalmente lineal, se puede decir que bajo esta configuración sólo existe un régimen de decaimiento.

Los valores calculados de las pérdidas de la energía potencial (tabla 3.4) donde éstas en conjunto son de 4.5% nos da información acerca de que la disipación de energía no está dominada por la formación de vórtices. Entonces se vuelve importante la pérdida de presión en la entrada del tubo [6].

En los siguientes tres casos conforme fue aumentando Z_0 los máximos y los mínimos fueron cubiertos con dos envolventes, entonces se podría suponer que existen dos regímenes de decaimiento.

Las pérdidas de energía potencial para el caso donde $Z_0 = 28\text{cm}$ suman 21.6%; para $Z_0 = 33\text{cm}$ son del 35% y para $Z_0 = 38\text{cm}$ son del 46.8%. Aunque en el último caso las pérdidas de energía potencial están muy cerca del 50%, los vórtices siguen sin ser dominantes como fuente disipativa dentro del primer régimen.

Tomando en cuenta que la segunda envolvente cubre más puntos y que en éste

régimen las pérdidas son debidas a la fricción de la columna de agua con las paredes del tubo, la viscosidad se vuelve importante en las pérdidas de energía cuando aumenta la altura inicial Z_0 .

Capítulo 4

Experimento con PIV

En este capítulo se muestra el experimento hecho con **PIV** el cual, es similar al presentado en el caso anterior con la diferencia que además de registrar la oscilación de la columna de agua también se filmó el flujo de ésta en la boca del tubo.

Se presentan los resultados que consisten en presentar la gráfica del comportamiento de la energía cinética asociada a la columna de agua y en un punto de ella la imagen del campo de velocidades.

Se analizan los resultados y se dan conclusiones.

4.1. Experimento

El experimento consistió en tomar una altura inicial con valor de $Z_0 = 27,5\text{cm}$ desde donde fue soltada la columna de agua, al mismo tiempo en forma sincronizada y controlado por computadora, se filmó el flujo en la boca del tubo y posteriormente se analizaron las imágenes con el algoritmo **PIV**.

En la figura 3.15 se muestra la gráfica del amortiguamiento de la columna de agua. La gráfica es importante para hacer una comparación entre la energía potencial y la energía cinética cuando se haga analice el experimento.

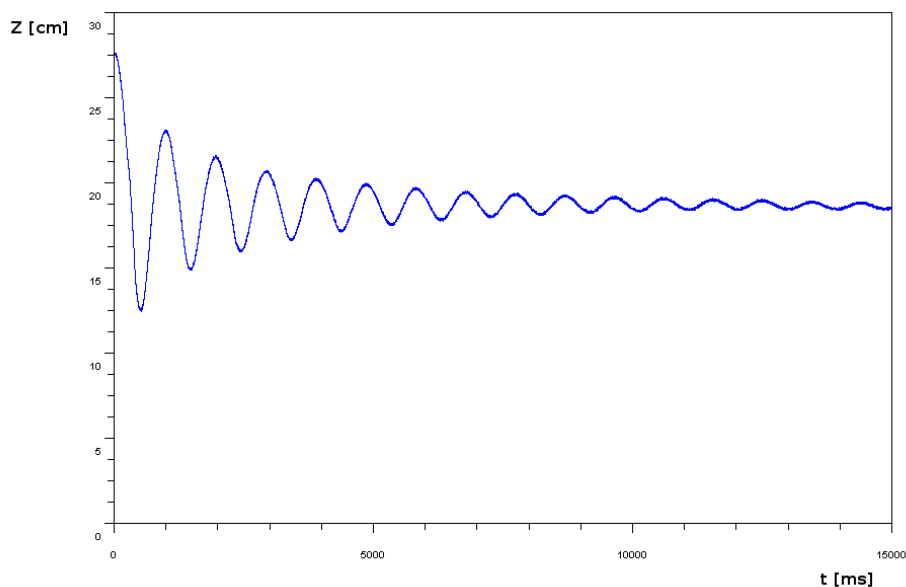


Figura 3.15 Amortiguamiento de la columna de agua. La frecuencia con la que osciló fue de $1,04 \pm 0,04\text{hz}$.

4.1.1. Resultados

Partiendo de la figura 3.15 y tomando la videograbación hecha durante la oscilación, se hizo un barrido a todas las imágenes que conforman el video, esto es, cada una de ellas fue sometida al algoritmo de **PIV**.

El algoritmo **PIV** proporciona las componentes horizontales (x) y verticales (y) de la velocidad en cada celda de interrogación [10]. De ahí se obtiene el vector de velocidad resultante, formando así el campo de velocidades.

Para estimar el valor de la energía cinética E_c sobre el campo de velocidades V , se determina el cuadrado de la velocidad para cada celda $v_{i,j}$, el cual es proporcional a la energía cinética local $E_{c_{i,j}}$, es decir, la energía cinética de cada celda, de tal manera, que la energía cinética total E_c se calcula como:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \sum_{i,j} v_{i,j}^2$$

Los subíndices i, j , corren sobre el número de celdas en la dirección horizontal y vertical, y ρ es una constante de proporcionalidad.

En la gráfica 3.16 se muestra el comportamiento de la energía cinética de la columna durante la oscilación.

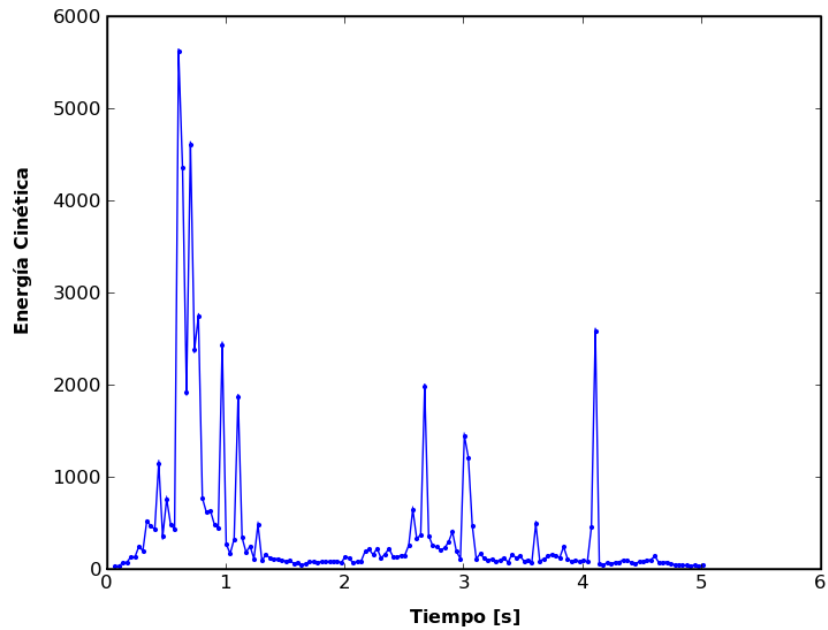


Figura 3.16 Energía cinética total en función del tiempo de la columna de agua.

El algoritmo **PIV** nos proporciona la visualización del campo de velocidades en cada imagen que compone el video filmado. Un ejemplo se muestra en la figura 3.17. Esta imagen corresponde al campo de velocidades cuando aparece el primer pico de la figura 3.16.

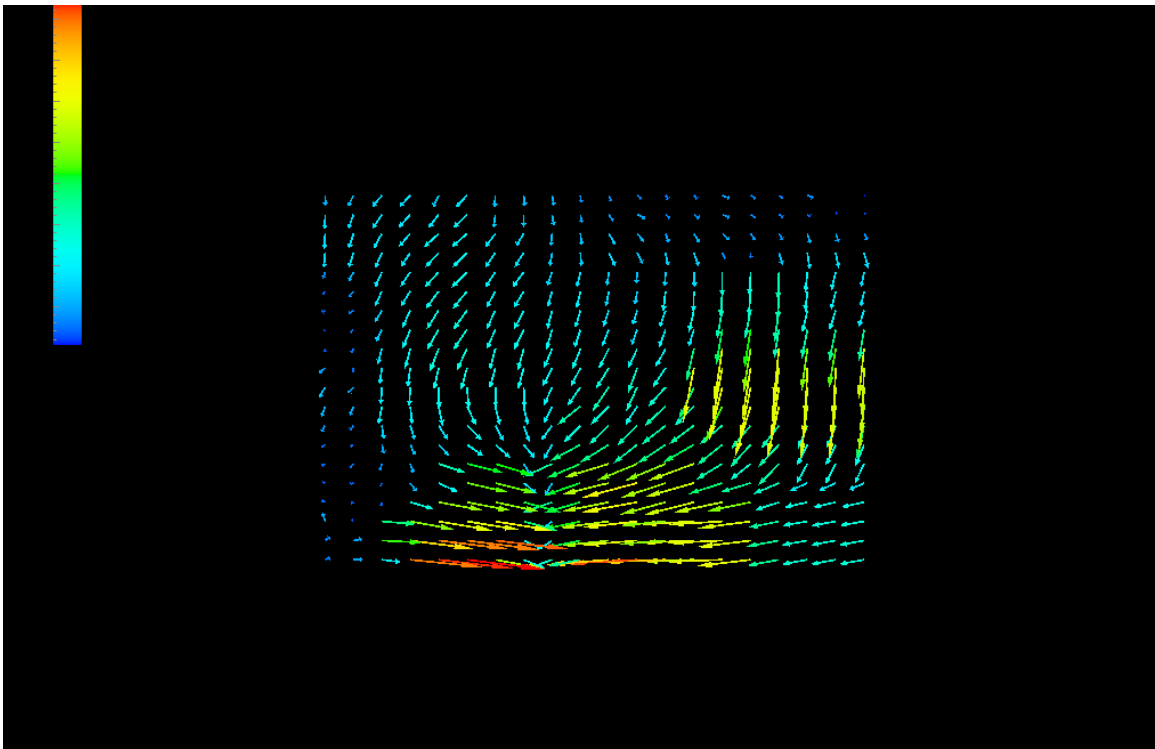


Figura 3.17 Campo de velocidades. La escala de colores indica en forma descendente la zona del plano en donde la velocidad del flujo fue mayor.

Por la dirección que tienen los vectores se observa como la masa de agua se concentra a través de los costados hacia el centro de la parte baja del plano, siendo esta zona donde hay un mayor movimiento de agua. La imagen sólo muestra la mitad del vórtice, la otra parte quedó fuera de la misma.

Por dificultad en el montaje el área sobre la cual se filmó el flujo no fue más amplia y sólo se alcanza a observar una parte del movimiento final del flujo, por lo que a futuro es necesario filmar sobre todo el plano del tanque.

4.1.2. Análisis

Tomando como referencia al máximo pico de la figura 3.16 se observa que a partir de él hay una sucesión de otros picos cuyas magnitudes están en forma descendente. Esto nos podría dar alguna información de las pérdidas de energía cinética, sin em-

bargo después de un intervalo de tiempo vuelven a surgir picos sin que estos tengan un comportamiento definido.

El intervalo de tiempo en donde es visible lo que se podría considerar como pérdidas de la energía cinética se da antes de los dos segundos de la oscilación como se muestra en la figura 3.18. En esta figura se presentan las gráficas superpuestas de la oscilación de la columna de agua y de la energía cinética.

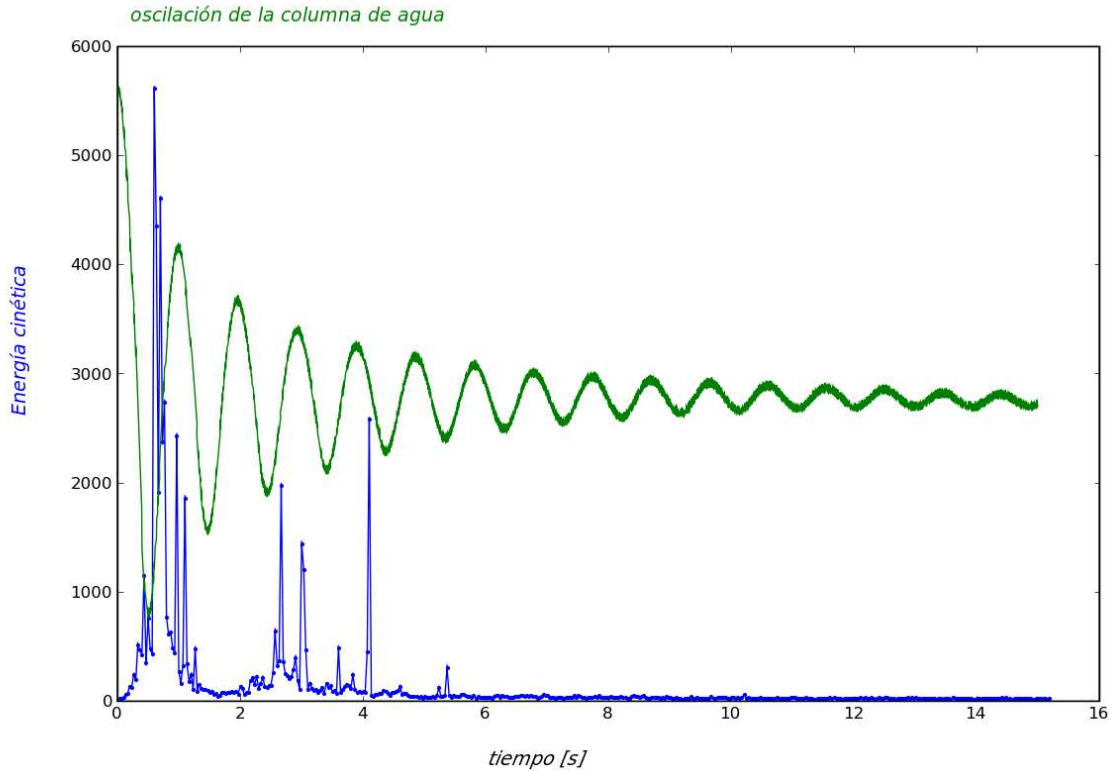


Figura 3.18 Comparación de la oscilación y la energía cinética de la columna de agua.

En la figura se observa que cuando la columna de agua todavía no es soltada, su energía potencial es máxima y la energía cinética es cero. Después de que es soltada va perdiendo energía potencial y la gráfica de la energía cinética comienza a subir.

Cuando la gráfica de la energía potencial se va acercando al primer mínimo de la oscilación aparece el primer pico de la energía cinética. Después aparece el máximo

pico de la energía cinética y es cuando la energía potencial de la columna de agua se hace cero, o sea, esta llega a su primer mínimo.

Inmediatamente después del máximo pico, se da una sucesión de éstos en forma descendente y simultáneamente la columna de agua se acerca a su primer máximo. Esto se puede interpretar como la columna de agua va perdiendo energía cinética y va ganando energía potencial.

Conforme la columna de agua sigue oscilando ahora llenando hacia el segundo mínimo se aprecian picos de energía cinética cuya magnitud -contrario a lo que se podrá suponer- va descendiendo hasta que al final se alcanza a observar un pico que coincide con el segundo mínimo de la oscilación.

Observando la gráfica de la energía cinética hay un intervalo de tiempo donde no se observa movimiento y luego hay un resurgimiento de picos. Por su magnitud y los intervalos temporales que hay entre estos picos podríamos suponer que no son consecuencia del movimiento de la columna de agua, su origen pudo ser provocado por algún rebote del flujo de la columna de agua con el fondo o las paredes del tanque.

Esta suposición se basa en la configuración que tuvo el experimento. Debido a la profundidad del tubo (17.5 cm) sumergido a partir del nivel de agua en el tanque (60 cm) la distancia que hay de la boca de éste al fondo es de 42.5 cm y la distancia de la boca del tubo a las paredes es de 32.5 cm. Por lo que pudo haber un reflujó hacía el área donde se hizo la videograbación lo que tuvo como consecuencia que al hacer el barrido de **PIV** se haya obtenido en la gráfica el resurgimiento de estos picos.

Debido a que no se tiene el valor de las energías cinéticas (magnitud de los picos) debido a la calibración del **PIV**, no se puede hacer un cálculo cuantitativo de las pérdidas sí es que al menos la primera sucesión de picos se pueden tomar como tales..

En experimentos que se hicieron anteriormente al presentado en este trabajo se registró el comportamiento anómalo de la oscilación cuyo origen fue el rebote del flujo hacía dentro del tubo, en la figura 3.19 se muestra un ejemplo.

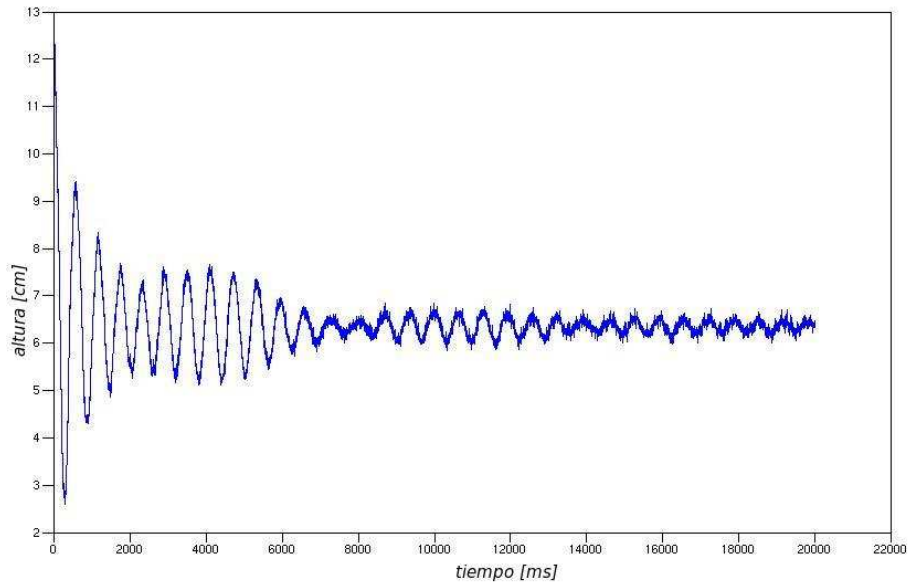


Figura 3.19 Rebotes registrados en el amortiguamiento de la columna de agua.

En la figura se observa primero un decaimiento y después un resurgimiento en la oscilación para volver a decaer y segundos después volver a resurgir hasta que empieza a decaer totalmente. Este comportamiento anormal es atribuido a rebotes del flujo de la columna de agua con el tanque,

La gráfica de la energía cinética no muestra un comportamiento como se podría esperar, esto es, lo ideal sería que el primer pico que aparece fuera el máximo y después de este siguieran los demás en forma descendente, Si así fuera podríamos hablar que se observaron pérdidas en la energía cinética.

La causa del comportamiento de la energía cinética pudo ser originada por el área limitada que se filmó, esto es, los cuadros analizados con el algoritmo **PIV** sólo registraron una parte no tan significativa y no toda la evolución que tuvo el flujo de la columna de agua. También deben considerarse los rebotes del flujo con las paredes y el fondo del tanque.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones generales derivadas de los resultados obtenidos y analizados en este trabajo. También se hacen propuestas para el trabajo a futuro en el estudio de las pérdidas de energía en flujos oscilantes.

5.1. Conclusiones Generales

Se construyó un dispositivo experimental totalmente controlado por computadora donde se pudo manipular y medir una variable (la altura de la columna de agua) y de forma sincronizada videogravar el flujo de la columna de agua en la boca del tubo.

Se estudiaron las oscilaciones libres de una columna de agua tomando como variable la altura inicial Z_0 desde donde fueron soltadas. Se encontró que la frecuencia de oscilación de la columna de agua es constante en función de distintas amplitudes iniciales. En el caso donde comenzó la oscilación con la altura inicial más pequeña, se encontró un sólo régimen de decaimiento, esto se interpretó en base a que todos los puntos de la oscilación fueron cubiertos con una sola envolvente y por consiguiente los puntos máximos y los puntos mínimos se ajustaron a una sola recta respectivamente. En los siguientes tres casos y conforme se fue aumentando la altura inicial del comienzo de la oscilación, los puntos de ésta fueron cubiertos con dos envolventes, donde se

observó que para un caso los primeros cinco puntos de la oscilación son lineales y para los dos últimos casos los primeros cuatro puntos son lineales. Esto nos hace suponer que existen dos regímenes de decaimiento. En los cuatro casos donde se calcularon las pérdidas de energía potencial en las primeras oscilaciones por el valor encontrado y como estas pérdidas están relacionadas con los vórtices se puede pensar que los vórtices no son dominantes en la disipación de energía dentro del primer régimen. La principal causa de disipación de energía dentro del primer régimen es la pérdida de presión debida a la diferencia entre el radio del tubo y el radio del tanque [6]. Es importante señalar que en los casos donde aparentemente aparecen los dos regímenes de decaimiento, el segundo ajuste cubre más puntos que el primero lo que nos hace suponer que los efectos viscosos son significativos. El decaimiento de la columna de agua no es como el de un oscilador amortiguado.

En otros experimentos donde se estudiaron las oscilaciones gravitacionales [6], se encontraron dos regímenes de decaimiento donde en el primero gobiernan las pérdidas debidas a la pérdida de presión en la entrada del tubo sumergido en un gran depósito -en nuestro caso el depósito es de dimensiones muy limitadas- y el segundo régimen es debido a efectos viscosos además de tener un decaimiento exponencial. En nuestro caso los regímenes de decaimiento encontrados no son exponenciales.

En el experimento donde se analizaron los campos de velocidades se obtuvo información donde la energía cinética de la columna de agua no se manifiesta en forma ordenada y decreciente como se podría esperar, por el comportamiento que muestra nos hace suponer que se registraron rebotes del flujo de la columna de agua con la geometría del tanque.

5.2. Trabajo a futuro

Para trabajos posteriores en el estudio de flujos oscilantes se propone mejorar el dispositivo experimental. Construir un tanque de mayores dimensiones para evitar en lo posible los rebotes del flujo que sale del a columna de agua con las paredes y el fondo del tanque. Es necesario ampliar el área de filmación hacia todo el plano del tanque perpendicular a la videocámara, con esto se podría filmar toda la evolución que tiene el flujo al salir del tubo. Filmar con una cámara de mejor resolución y mayor velocidad de captura para con esto obtener información más precisa del campo de velocidades.

Es necesario crear un modelo numérico de la oscilación de la columna de agua para hacer una comparación entre los resultados del experimento y las predicciones que pueda hacer el modelo.

Es importante darle continuidad a los experimentos de oscilaciones libres y hacer un análisis más amplio como, calcular la velocidad de la columna de agua para obtener la energía cinética y así poder encontrar el valor de la energía mecánica en cada oscilación, con esto, se obtendrán valores más precisos de la disipación de la energía total y así saber con más exactitud la influencia de los vórtices en la disipación de energía.

Bibliografía

Libros

- [1] Baird, D.C.1999, UNA INTRODUCCION A LA TEORIA DE MEDICIONES Y AL DISEÑO DE EXPERIMENTOS,PHH, 2 edición
- [2] Currie, I.G. FUNDAMENTAL MECHANICS OF FLUIDS, McGrauw-Hill, 2nd ed.
- [3] Fox, Robert W. McDonald Alan T., INTRODUCCION A LA MECANICA DE FLUIDOS, McGrauw-Hill, cuarta edición.
- [4] Landau y Lifshitz, MECANICA DE FLUIDOS, Reverté, segunda edición.
- [5] Tipler, Paul A., FISICA, Reverté, tercera edición.
- [6] White, Frank M., MECANICA DE FLUIDOS, McGrauw-Hill, primera edición

Artículos

- [7] Élice Lorenceau, David Quéré, Jean-Yves Ollitrut, Christophe Clanet, "Gravitational oscillations of a liquid column in a pipe"
- [8] S.P.R. Czitrom, R. Godoy, E. Prado, P. Pérez, R. Peralta-Fabi "Hydrodynamics of an oscillating water column seawater pump. Part I: theoretical aspects"

- [9] S.P.R. Czitrom, R. Godoy, E. Prado, A. Olvera, C. Stern "Hydrodynamics of an oscillating water column seawater pump. Part II: tuning to monochromatic waves"

Tesis

- [10] Francisco Javier Martínez Farías "Medición de Campos de Velocidades utilizando Algoritmos de Velocimetría por Imágenes de Partículas"
- [11] Paula Pérez Brunius "Pérdidas de presión debidas a fricción en ductos con flujos oscilantes"
- [12] Ramiro Godoy Diana "Sintonización de un sistema de bombeo por energía de oleaje"