



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Innovaciones al SIBEO (Sistema
de Bombeo por Energía de
Oleaje)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
FÍSICO

PRESENTA:

HIRAM HERNÁNDEZ FLORES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. STEVEN PETER REED CZITROM BAUS



Ciudad Universitaria, CD. MX., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

1. Datos del alumno
Apellido paterno
Apellido materno
Nombre(s)
Teléfono
Universidad Nacional Autónoma
de México
Facultad de Ciencias
Carrera
Número de cuenta

Datos del alumno
Hernández
Flores
Hiram
56 76 65 44
Universidad Nacional Autónoma de
México
Facultad de Ciencias
Física
402112198

2. Datos del tutor
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Datos del asesor
Dr.
Steven Peter Reed
Czitrom
Baus

3. Datos del sinodal 1
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Datos del sinodal 1
Dra.
Catalina Elizabeth
Stern
Forgach

4. Datos del sinodal 2
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Datos del sinodal 2
Dr.
Arturo
Olvera
Chávez

5. Datos del sinodal 3
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Datos del sinodal 3
Dr.
Carlos
Málaga
Iguiñiz

6. Datos del sinodal 4
Grado
Nombre(s)
Apellido paterno
Apellido materno

Datos del sinodal 4
Dr.
Lorenzo Alberto
Martínez
Suástegui

7. Datos del trabajo escrito.
Título
Número de páginas
Año

Datos del trabajo escrito
Innovaciones al SIBEO (Sistema de Bombeo
por Energía de Oleaje)
50 pp
2017

Innovaciones al SIBEO (Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje)

Hiram Hernández Flores.

Agradecimientos

A mis padres.

A la UNAM, que a través del sínodo y los profesores me han ayudado y dado la oportunidad de concluir esta etapa académica.

A el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT)-DGAPA, que a través del financiamiento del proyecto IN118608, fue posible contar con medios para realizar el experimento.

Índice general

Índice general	2
Resumen	3
1. Introducción.	5
1.1. El SIBEO.	6
1.2. Motivación	8
2. Marco teórico	10
2.1. Sistemas de ecuaciones (flujo).	10
2.1.1. Ecuaciones sin bombeo.	10
2.1.2. Ecuaciones en fase de bombeo.	13
2.2. Perfil de la trompeta	18
3. Construcción del modelo a escala.	20
3.1. Intersección de los tubos.	21
3.1.1. Variaciones del dispositivo e instrumentación.	25
3.2. Fabricación de las trompetas	26
4. Desarrollo experimental.	29
4.1. Dispositivo experimental.	31
4.2. Experimentos con SIBEO de 2 tubos.	34
4.2.1. Marea -2 cm.	35
4.2.2. Marea +2 cm.	40
4.2.3. SIBEO sesgado	41
4.3. Experimentos con SIBEO de 3 tubos.	41
5. Discusión	43
5.1. Eventos desfavorables dentro del experimento	43
5.2. Análisis y elementos para perfeccionar el modelo	45
6. Conclusiones.	48
Bibliografía	50

Resumen

Como antecedentes contamos que en los últimos veinticinco años se han desarrollado una gran cantidad de instrumentos que utilizan la energía de oleaje. En particular existen dispositivos como el SIBEO que se encargan de aprovechar la energía mecánica del oleaje para emplearla en el manejo y disposición del agua del océano. Este es un dispositivo que ha sido resultado de una serie de mejoras durante el proceso de implementación en cuerpos de agua costeros, donde existe la necesidad de rehabilitar partes contaminadas, a través de suministrar agua limpia y oxigenada en áreas donde el agua permanece estancada.

El Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje (SIBEO) es un dispositivo que tiene como función transportar el agua que proviene del oleaje del mar a una laguna receptora. La resonancia es el principio físico en el que se basa el SIBEO, donde las dos columnas de agua que conforman al sistema son representadas en un sistema mecánico idealizado, por medio de dos masas que se encuentran unidas entre sí por un resorte y el cual en este modelo es descrito mediante el volumen de aire que se encuentra dentro de la pieza que une a las dos columnas de agua en el sistema. Esta parte del dispositivo toma el nombre cámara de compresión, así como los dos ductos que contienen a las columnas de agua son llamados: resonante y desagüe, según su posición en el sistema.

Estos dispositivos se han puesto a prueba en una serie de experimentos. Comenzando en el canal de olas del Centro para la Investigación Aplicada de Costas de la Universidad de Delaware, seguidos por los estudios realizados en la costa de Oaxaca cerca a la Laguna de Lagartero y el Puerto de Ensenada (Baja California), el SIBEO ha proporcionado información importante de su funcionamiento que ha servido para tener un prototipo más eficiente. Ya que solamente el desempeño del sistema es óptimo cuando entra en resonancia, como cuando coinciden el periodo de oleaje con la frecuencia natural de oscilación del SIBEO, se desarrolló un sistema de sintonización que permite mantener esta condición ante las variaciones del oleaje. Este sistema está patentado por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

En esta tesis se tiene como principal objetivo, el mostrar que es posible contar con un dispositivo de bombeo con una mayor eficiencia en su desempeño. Materializar un modelo con el cual se demuestre que el sistema ha contado con suficientes mejoras durante su desarrollo en estos últimos años, las cuales permitan una mayor capacidad de saneamiento en los cuerpos de agua, para los cuales fue elaborado. Así también este trabajo forma parte de una labor

continua, que busca el contar con un sistema óptimo, el cual ayude para una paulatina implementación en el futuro.

Debido a esto, se concluyó que a partir de los experimentos anteriores, es posible contar con un instrumento con más eficiencia en su tarea de dotar con agua limpia a las lagunas receptoras. Uno de los resultados más importantes obtenidos del experimento realizado en Delaware, fue que conforme el tubo resonante disminuye su longitud, el gasto que proporciona el bombeo del dispositivo aumenta de manera considerable. Así es como el nuevo diseño se basa en acortar la distancia del tubo resonante, por lo que en el experimento está encauzado en mostrar que la magnitud del gasto proporcionado por el bombeo del prototipo, es mayor respecto a los datos obtenidos con el experimento que se llevo a cabo en Delaware.

Sin duda estos resultados contribuyen con información apreciable para que en el futuro se pueda contar con un SIBEO más eficiente.

Capítulo 1

Introducción.

México posee una extensa franja litoral y un gran número de cuerpos de agua costeros, en los cuales, se desarrolla una intensa actividad económica. Tales como: el turismo, la movilidad de productos destinados al comercio interior y exterior, así como la cada vez mayor producción de proteína marina, ocasionada por la acuicultura.

En nuestro país, existen más de 130 cuerpos de agua costeros, cuya área total corresponde a una franja de 1.25 km de ancho a lo largo de toda la costa del país (11,000 km). Una parte significativa de este ecosistema se encuentra amenazada por la intensa actividad económica que en ella se despliega y que, a su vez, genera importantes recursos económicos para el país. Paradójicamente, la capacidad amortiguadora y baja dinámica de este ecosistema, características que favorecen muchas de las actividades biológicas y portuarias lo hacen vulnerable a la acumulación de sedimentos y sustancias exógenas. Asimismo, las descargas de agua y sedimentos, tanto sistemáticas como accidentales, constituyen los factores principales que afectan los cuerpos de agua costeros (Xueet al. 2004; Guerra-García and García-Gómez 2005; Borja & Elliott 2007; Cornelissenet al. 2008).

A causa de esta situación, se ha trabajado en la rehabilitación de estas áreas costeras, las que usualmente han incluido el tratamiento de efluentes y el dragado periódico de sedimentos. Estos procedimientos, sin embargo, son costosos y muchas veces resultan en una rehabilitación lenta, o pierden efectividad en el largo plazo (Dauvin 2008; Shin et al. 2008). Por tanto, una rehabilitación ambiental adecuada debe incluir la disminución de la descarga de contaminantes, el incremento en la biodiversidad y el aumento en la dinámica hidrológica.

En la Universidad Nacional Autónoma de México, se desarrolló un Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje (SIBEO). Este Sistema puede ser utilizado para rehabilitar cuerpos de agua costeros contaminados; al inyectar agua limpia y oxigenada de la zona de rompientes de ola hacia las áreas estancadas de estos cuerpos. Dado que no tiene partes móviles, permite el paso de organismos marinos, por lo que también puede usarse para el manejo biológico y de las pesquerías en lagunas costeras. Otra ventaja de tal sistema, es que usa la

energía renovable y libremente disponible del oleaje, lo cual, genera bajos costos operacionales. La instalación del SIBEO para la rehabilitación de ecosistemas, será la primera aplicación permanente a escala real de esta tecnología inventada y desarrollada en la UNAM. De igual forma, la experiencia adquirida con la instalación de estos SIBEOs, servirá como base para su uso en otras áreas del extenso ecosistema costero nacional e internacional.

1.1. EL SIBEO.

El dispositivo se desarrolló y patentó en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el objetivo de disminuir el tiempo de residencia en ecosistemas costeros (Czitrom 2002; Czitrom et al. 2003)¹. El SIBEO actúa transportando agua limpia y oxigenada del océano adyacente al cuerpo de agua afectado para promover su ventilación y limpieza. Dado que no tiene partes móviles y usa la energía de las olas, el SIBEO es una herramienta sustentable de manejo costero con bajos costos operacionales y de mantenimiento.

El sistema se compone por un ducto de entrada que está expuesto a la acción de las olas, un ducto de desagüe dirigido al cuerpo de agua receptor y un elemento de bombeo entre ambos ductos. Para iniciar su funcionamiento, un vacío parcial eleva agua del mar y del cuerpo de agua receptor hasta un nivel de operación en la cámara de compresión. La señal de presión inducida por el oleaje en la boca del ducto de entrada, impulsa un movimiento oscilatorio que derrama agua en la cámara de compresión con el paso de cada ola. El agua vertida no puede regresar al ducto de entrada, ya que éste prevalece sobre el nivel del agua en la cámara de compresión; ahí se acumula, forzando por gravedad un flujo a través del tubo de desagüe hacia el cuerpo de agua receptor.

Básicamente, el SIBEO está compuesto por dos masas de agua (en los ductos de entrada y de desagüe), acoplados por un resorte de aire (el gas en la cámara de compresión). Cualquier sistema con resortes y masas tiene una frecuencia natural de oscilación intrínseca que depende del tamaño de las masas (en este caso la cantidad de agua en los ductos) y de la dureza del resorte (para el SIBEO, depende del volumen de aire en la cámara de compresión). Cuando la frecuencia natural de oscilación del SIBEO coincide con la frecuencia del oleaje, el sistema entra en resonancia, las oscilaciones del agua aumentan su tamaño y el bombeo de agua marina es maximizado. Esto es similar a un columpio infantil en el que las oscilaciones se hacen cada vez mayores si se le empuja en los momentos apropiados.

La sintonización se controla con un circuito electrónico programado que analiza la señal del oleaje para localizar la frecuencia con la mayor energía. Este mismo circuito controla una compresora de aire y una bomba de agua para

¹Czitrom, S.P.R., R. Godoy, E. Prado, P. Pérez, R. & Peralta-Fabi, 2000. Hydrodynamics of an Oscillating Water Column Seawater Pump, Part I: Theoretical Aspects. *Ocean Engineering*, Vol. 27, No. 11, pp. 1181-1198. Factor de impacto: 0.857.

regular el volumen de aire en la cámara de compresión y así mantener un estado de resonancia con el oleaje más energético.

La sintonización hace posible mover el desempeño del SIBEO a lo largo de las curvas que se muestran en la figura 1.2, esto para maximizar el flujo bombeado. Lo cual se logra ingresando a la cámara de compresión el volumen de aire apropiado, para que coincida con la frecuencia y la cantidad de agua que contiene el tubo resonante. Cuando el sistema opera en esta condición, se maximiza la magnitud de las oscilaciones en los ductos y por tanto es posible captar un mayor volumen de agua sobre la laguna receptora. Para los casos en que el rango de frecuencias es grande, se inventó y patentó un sistema para sintonizar la frecuencia natural del SIBEO, de tal forma que coincida con la del oleaje más energético en todo momento (Czitrom 2002). La sintonización se logra cambiando la dureza del resorte de aire en la cámara de compresión, al modificar el volumen de gas, intercambiando aire y agua con un contenedor adyacente.

En el presente trabajo se hace la comparación de los datos obtenidos en un experimento publicado (Czitrom et al. 2002) con los recopilados en esta ocasión; que fueron realizados con un diseño mejorado, el cual, se pretende tenga un desempeño más eficiente.

Ya con el antecedente de pruebas en las que el dispositivo mostró su funcionalidad, tanto en experimentos como en lagunas costeras, se expone la importancia que actualmente tiene la conservación del ambiente, no sólo por el hecho de la importancia que tienen los cuerpos de agua como un elemento fundamental para las condiciones de vida de nuestro planeta, sino también, por la importancia económica que reportan para las comunidades locales.

El desarrollo del SIBEO ha transitado por varias etapas, desde el diseño conceptual, hasta la deducción de las ecuaciones diferenciales que lo describen y las pruebas con un modelo a escala en un canal de olas (Czitrom et al. 2000a). Un prototipo del SIBEO a escala 1:4 fue instalado en la costa de Oaxaca, cerca de Laguna de Lagartero (LL) para probarlo en condiciones marinas, señalar la factibilidad de instalarlo en un área con alta energía de oleaje, así como para mostrar que los organismos marinos como las larvas de camarón pueden ser bombeados sin deterioro para acuicultura extensiva. El prototipo fue instalado exitosamente con la ayuda de los pescadores de una cooperativa (Czitrom et al. 2000b) y probó su potencial como una herramienta de manejo costero. El prototipo fue desmantelado después de las pruebas.

Destaca del trabajo anterior el desempeño de un modelo numérico que integra las ecuaciones diferenciales del SIBEO. La figura 2 muestra el flujo medido con un modelo a escala 1:25 (Q_{Exp}) en experimentos en canal de olas y el flujo predicho por el modelo numérico (Q_{mod}) para diversos colectores (la altura que destaca el ducto de entrada sobre el agua en la cámara de compresión) y volúmenes de aire en la cámara de compresión. Es claro que el modelo numérico reproduce satisfactoriamente los datos experimentales, mostrando que es una buena herramienta de diseño y predicción para casos de aplicación real. En el océano, la frecuencia del oleaje normalmente varía en el tiempo, de tal forma que el SIBEO no necesariamente se encontrará en el modo preciso de resonancia.

Si el rango de frecuencias del oleaje es pequeño, el SIBEO puede diseñarse para resonar a una frecuencia intermedia y el desempeño disminuirá sólo ligeramente cuando varíe.

1.2. Motivación

Con el antecedente de pruebas en las que el dispositivo mostró su funcionalidad, tanto en experimentos como en lagunas de la costa, se conformó un proyecto en el que se consideraba la eficiencia del SIBEO.

Si comparamos la eficiencia entre el sistema de sintonización con un SIBEO donde el tubo resonante sea más corto, de inmediato podemos darnos cuenta que es más conveniente un dispositivo que tenga un tubo resonante con menor longitud. Ya que, mientras el gasto de agua que bombea el SIBEO puede llegar a ser el doble con un sistema de sintonización, el gasto máximo que alcanzaría con un tubo resonante corto puede llegar a ser quince veces mayor.

Es por esto que, en la búsqueda de un modelo de bombeo más eficiente, es preferible contar con un sistema que proporcione un mayor volumen de bombeo, a pesar de que eso implique que el SIBEO se encuentre, por debajo de la superficie del mar. Una de las consecuencias de tener un SIBEO sumergido, es que sería demasiado costoso contar con un sistema de sintonización que se adapte a las condiciones que demanda una cámara de compresión que se encuentre por debajo del nivel del agua. Por esta razón, nos fue más necesario prescindir de un sistema que cambiara la presión en el interior de la cámara de compresión y optamos por la construcción de un SIBEO con el tubo resonante más corto. Así es que preferimos contar con un dispositivo que bombea de 100 a 150 %, comparándolo con otro que en su máximo desempeño sólo alcanzaría un 50 %.

Todas estas modificaciones fueron realizadas para incrementar la eficiencia del SIBEO bajando los costos de fabricación y operación, para que en un futuro sea viable su utilización a escala real en nuestro país. Como se muestra en el siguiente capítulo a partir de experimentos realizados previamente, se sabe que si extrapolamos la tendencia de los datos obtenidos, es posible que alcancemos un incremento importante en el flujo que aporta agua a la laguna receptora (gráfica 2.4). Ya que la energía que transporta el oleaje se transmite directamente en el volumen de agua que oscila dentro del tubo resonante, resultaría más eficiente mover una masa de agua pequeña, lo que implicaría la reducción del tubo. Producir una oscilación de una cantidad pequeña de volumen dentro del tubo resonante, requiere de una cantidad menor de energía, lo que se podría traducir en que este volumen de agua que ingresa a la cámara de compresión aumentaría. Si la cantidad de agua que admite la cámara de compresión aumenta, es inmediato pensar que el gasto que bombea aumente, lo que haría más eficiente el SIBEO. Asimismo, al acortar el tubo resonante se tomó en cuenta que debía construirse con parámetros similares que permitieran la comparación con los datos que se obtuvieron con el primer modelo del SIBEO. Por esta razón fue que el tubo resonante del modelo con el que se llevaron a cabo los experimentos de Delaware, debería ser seccionado en dos o en tres partes y así mantener

constante el volumen del tubo resonante en los dos casos. Con la misma masa en el tubo resonante, se esperaba que la frecuencia de resonancia del nuevo modelo estuviera alrededor de las que se encontraron en el experimento hecho en Delaware. Esto sucedería con la condición de que se conservara el mismo volumen de aire de la cámara de compresión.

Con este análisis se emprendió la construcción del modelo a escala de 1:25. A través de la construcción de este dispositivo se buscó corroborar las suposiciones descritas anteriormente.

Para que el SIBEO llegara a su constitución actual, se tomaron en cuenta los elementos que en el experimento anterior fueron considerados como causantes de pérdidas de energía. Dentro de este análisis se propuso proporcionar al sistema de bombeo de un difusor que nos ayudara a controlar la formación de vórtices que se producen en la salida del tubo resonante. Una vez que el modelo estuvo terminado, le fueron añadidos sensores de altura de agua. Con estos sensores se buscaba registrar la altura del agua, tanto en la cámara de compresión como dentro del tubo resonante.

Capítulo 2

Marco teórico

El interés de este experimento, como la mayoría de los casos en el laboratorio, es el de medir algunas variables dentro del comportamiento del dispositivo. En esta ocasión, nuestro principal interés radica en controlar las variables, para que sea posible cuantificar el flujo proporcionado por el bombeo que produce el SIBEO en contacto con el oleaje oceánico.

La manera mas simple para hacer una descripción del sistema, es aproximar el comportamiento del dispositivo a un sistema de dos masas unidas entre si por un resorte y estas a su vez, unidas cada una a un resorte amortiguad. Con esto buscamos encontrar una representación mecánica para encontrar las condiciones en las que se pueda encontrar una dimensionalización del flujo que proporciona el SIBEO.

2.1. Sistemas de ecuaciones (flujo).

En trabajos anteriores del SIBEO se encontró una forma de modelar a este sistema. Partiendo de las ecuaciones de Navier-Stockes [6] y resolviendo el sistema es posible encontrar con las ecuaciones que rigen a este sistema, aunque en esta ocasión por la dificultad de encontrar una solución a este problema, optaremos por un planteamiento distinto.

2.1.1. Ecuaciones sin bombeo.

Para resolver esta dificultad, se convino el el sistema que relaciona las variables, como un modelo matemático que exponía la forma mas simple para la descripción de interacción de variables medibles. Como se mencionaba anteriormente, tenemos presente que muchos casos donde el problema planteado son fenómenos relacionados a mecánica de fluidos y específicamente a medios donde la viscosidad contribuye de forma importante, son comúnmente relacionados con las ecuaciones de Navier-Stockes. En cualquier otra ecuación en física, esta relación muestra un balance entre las energías y las

variables que son propiedades de la materia, las cuales pueden ser función directa de la de la presión. Así es como de la integración de la ecuación de Euler, se puede utilizar la ejecución de Bernoulli para establecer mediante una línea de corriente, el comportamiento del fluido dentro el sistema de bombeo y el cual se constituye de dos partes, antes de bombear el agua y posteriormente cuando el sistema bombea.

Una vez que se cuenta con las variables que están presente en el modelo que se propone, se procede a establecer de la forma que mas apegada este al fenómeno que se busca medir y eventualmente describir. En esta parte es como se debe considerar que la masa de aire varia su volumen de forma adiabática dentro de la cámara de compresión, podremos considerar que las ecuaciones que corresponden a cada una de las líneas de corriente son parte del mismo proceso. Y es precisamente esta consideración la que nos permite acoplar las dos ecuaciones que corresponden a cada una de las etapas del flujo, hasta que se produzca el bombeo.

$$\int_C \frac{\partial u}{\partial t} \cdot d\vec{s} + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} + \Omega = cte \quad (2.1)$$

Partiendo de condiciones, como que:

$$PV^{-\gamma} = cte \quad (2.2)$$

Precisamente debido a que hay un volumen de agua, que es el que se derrama sobre la cámara de compresión, es importante considerar el volumen delimitado geoméricamente por la superficie que se produce sobre la parte superior del tubo resonante. La parte que complementa a este flujo de agua, es comprendido por medio de la línea de corriente que va del nivel del agua que esta dentro de la cámara de compresión, a la altura delimitada por el nivel de la laguna receptora. El estudio detallado de esta proposición se encuentra en las tesis anteriores que tratan al SIBEO.

Para este trabajo nos restringiremos solamente en el funcionamiento del modelo mecánico y como mencionábamos anteriormente tendremos que asociar cada una de las variable del sistema mediante cada una de las secciones que componen a cada una de las líneas de corriente. Además de tomar en cuenta que todas esta variables definen al sistema, hacemos unas consideraciones que involucran a las dos partes en el de nuestro sistema de bombeo.

Si consideramos que la masa de aire varia su volumen de forma adiabática dentro de la cámara de compresión, podremos considerar que las ecuaciones que corresponden a cada una de las líneas de corriente son parte del mismo proceso. Y es precisamente esta consideración la que nos permite acoplar las dos ecuaciones que corresponden a cada una de las etapas del flujo, hasta que se produzca el bombeo.

$$\left(X_1 + L_1(1 + \varepsilon_1) + \frac{T_d}{\cos \theta} \right) \ddot{X}_1 + \frac{\dot{X}_1^2}{2} + \left(\frac{K_1}{2} + \frac{(L_1 + T_d/\cos \theta)}{D_1} f_1 + C_{r_1} \right) \dot{X}_1 + \ddot{X}_1 \mid \ddot{X}_1 \mid$$

$$+\frac{(P_A - \rho g H)}{\rho} \left[\left(1 - \frac{A_1 X_1}{V_0} - \frac{A_c X_2}{V_0} \right)^{-\gamma} - 1 \right] + X_1 g \cos \theta = \frac{W}{\rho} \quad (2.3)$$

$$\left(X_2 + \frac{A_c}{A_2} L_2 (1 + \varepsilon_2) + L_c \right) \ddot{X}_2 + \frac{\dot{X}_2^2}{2} + \left(\frac{K_2}{2} + \frac{L_2}{D_2} f_1 + C_{r_2} \right) \left(\frac{A_c}{A_2} \right)^2 \ddot{X}_1 \mid \ddot{X}_1 \mid + \frac{(P_A - \rho g H)}{\rho} \left[\left(1 - \frac{A_1 X_1}{V_0} - \frac{A_c X_2}{V_0} \right)^{-\gamma} - 1 \right] + X_2 g = 0 \quad (2.4)$$

Todas y cada una de las variables que son parte de la línea de corriente, están expuestas en la figura 2.1 y así quedan definidas cada una de las magnitudes que intervienen durante un periodo propio del oleaje:

- X = Desplazamiento dentro del tubo
- L = Longitud del tubo
- P_A = Presión atmosférica
- ρ = Densidad del agua
- γ = Compresibilidad del aire
- W = Señal de presión
- V = Volumen (cámara de compresión)
- T_d = Nivel de marea
- H = Nivel de agua dentro de la cámara de compresión en la posición de equilibrio
- θ = Angulo del tubo resonante Longitud añadida por efectos de la geometría de la boca del tubo
- $g \cos \theta$ = Gravedad reducida por la inclinación del tubo resonante
- f = Coeficiente de perdida por fricción
- K = Perdidas de energía por vorticidad
- C_r = Atenuación por radiación

mientras que los subíndices 1 y 2 de cada una de las variables se refieren al lugar que toman dentro de las líneas de corriente, las cuales toman su posición respecto a la cámara de compresión. Esto quiere decir que son, de la parte del tubo resonante de la parte del tubo de desagüe. Así como los términos que se

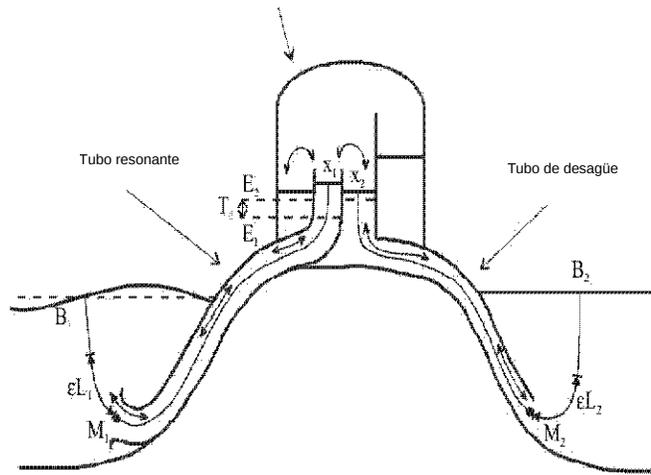


Figura 2.1: SIBEO y líneas de corriente que lo describen

refieren a diámetro y área transversal (D y A respectivamente) del tubo son constantes que van a estar determinadas por las condiciones del material.

Es por esto que la oscilación del agua dentro del SIBEO va a estar dada por el cambio de volumen respecto al tiempo. Ante esta situación conviene solo tomar encuesta el termino de velocidad. Ya que esta ocasión estamos interesados en ver lo que pasa con un volumen de agua determinado, podemos asumir que en general, el comportamiento de la posición del nivel del agua en cada momento, va a estar determinado por la función que se muestra en la figura 2.2, lo cual puede reducirse a una principal dependencia de la velocidad.

Y esto nos obliga a que gracias a una diversidad de variables que no dependen únicamente de la velocidad, optimamos por tomar el modelo linealizado y tratar de encontrar la solución de la ecuación mediante un método numerico. Ante estas condiciones se puede concebir que la ecuación resultante es una del tipo Bernoulli, a la que se le agregan los términos que producen las pérdidas de energía.

2.1.2. Ecuaciones en fase de bombeo.

Ahora podemos relacionarla directamente con la derivada respecto al tiempo, lo que nos deja saber como se comporta la altura de la columna en cada oscilación.

Estos cambios en la velocidad de la caída de la columna de agua intervienen directamente en el comportamiento de la oscilación y cambia la frecuencia a la que la masa en el modelo mecánico entra en resonancia. Es por esto por lo que se agrega un término en las ecuaciones que procede de esta magnitud, la cual se le asigna el nombre de masa añadida.[7]

Los términos de perdidas se estudiaron en artículos anteriores, por eso en

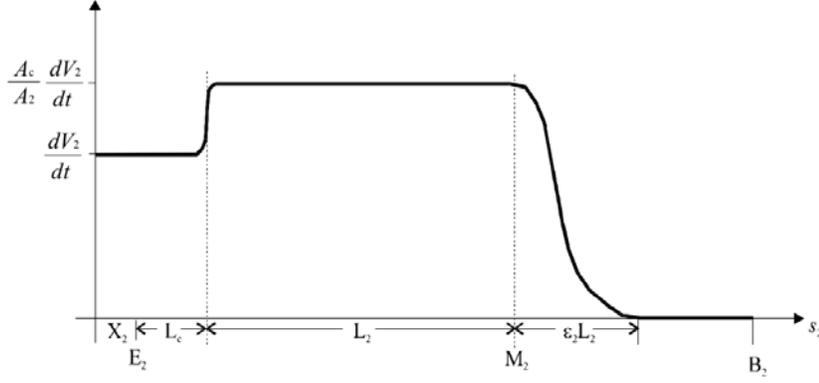


Figura 2.2: Flujo respecto al tiempo en el tubo de desagüe

esta ocasión solo haremos mención de que la forma de considerarlos dentro del modelo como fricción, radiación y vorticidad, se fija al considerar el modelo en su parte lineal. Como se puede ver con el modelo mecánico de masas que se abstrae del sistema, la ecuación diferencial que contempla estas es evidentemente no lineal, por lo que se hace una aproximación que involucra explícitamente a la velocidad. Para finalizar este análisis, se le suman a esta expresión los términos de disipación, que se comportan como los amortiguadores en el símil mecánico.

Posteriormente se mostrara como intervienen estas condiciones en el sistema, lo que nos lleva a encontrar la frecuencia de resonancia. Claramente este principio tiene el objetivo de encontrar las magnitudes donde el sistema entre en resonancia en base las oscilaciones de la columna de agua, lo que explica con la sintonización.

Esta resonancia se producen en dos valores, los cuales son solución de la ecuación 2.4 para cada uno del volumen interno de aire que se presenta dentro la cámara de compresión. Esta relación esta presente en el espectro de frecuencias, donde el máximo de los modos normales coincide con la solución con signo positivo.[3]

Es importante hacer una aclaración en el uso de la notación, porque cambian las literales, donde:

$$A = \frac{g + \alpha A_1}{\Omega^2(L_1 + L_d)} + \frac{\alpha A_{cam}}{\Omega^2 L_2}$$

$$B = \frac{g \alpha A_{cam}}{(L_1 + L_d)L_2 \Omega^4}$$

$$\alpha = \frac{(P_A - \rho g H)\gamma}{\rho V_0}$$

Finalmente ahora que contamos con el volumen que une al sistema porque y apoyándonos en el símil mecánico, utilizaremos a los coeficientes que parten de la ecuación diferencial. Al igual que anteriormente y como lo habíamos previsto, en esta ocasión solo nos referiremos a las ecuaciones linealizadas (dos) ya que no modifica importantemente el comportamiento de la curva de la función. De esta manera podemos contar con las soluciones que tratan la frecuencia del sistema

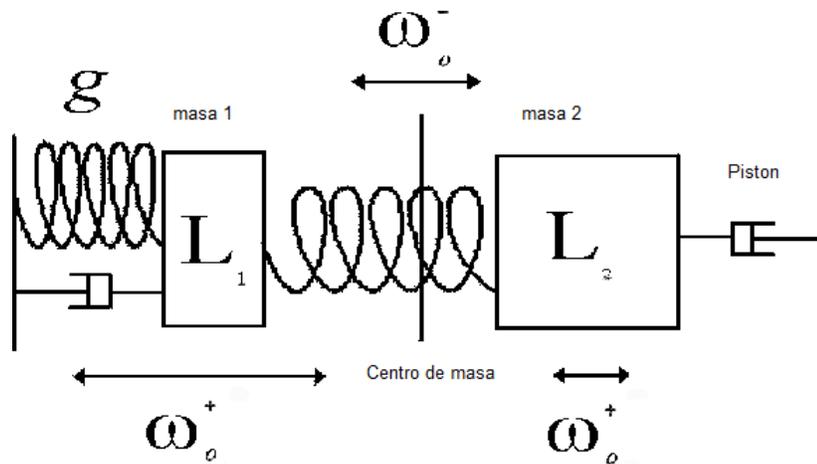


Figura 2.3: Representación mecánica del SIBEO, compuesta de dos masas, resortes y amortiguadores.

como:

$$\omega^{\pm} = \sqrt{\frac{A \pm \sqrt{A^2 - 4B}}{2}} \quad (2.5)$$

En el estudio de los fluidos y en general en toda la física, resulta de gran importancia la utilización de parámetros adimensionales. De hecho en ocasiones, las posibilidades de obtener resultados fundamentales para la comprensión de fenómenos están completamente condicionadas al empleo de cantidades adimensionales para el análisis. Además de proveernos de la capacidad para enunciar problemas y resultados de manera universal. Por esto debe entenderse que no es necesario definir una escala física para plantear un problema, la utilización de cantidades adimensionales permite diseñar experimentos que se pueden realizar, por ejemplo, en un laboratorio y luego aplicar los resultados obtenidos en situaciones reales que difícilmente serían reproducibles experimentalmente tal como son.

Para asegurarnos que el modelo es válido, se decidió dividir la oscilación en dos partes. una en donde cada uno de los desplazamientos dentro de los tubos es constante, lo que corresponde a la fase de no bombeo y la otra donde la cantidad de agua que se intercambia en los tubos no corresponde directamente a la variación de la altura dentro del resonante. Esta es la fase que corresponde al bombeo.

Para esta parte es importante señalar que es posible calcular el volumen que se forma sobre el final del perfil del tubo resonante. Podemos apoyarnos del análisis dimensional de las variables, procedimiento que se encuentra descrito en los trabajos anteriores del SIBEO (artículos y tesis) [1, 6, 5] y al mismo tiempo se puede comprender básicamente desde la velocidad del agua.

$$\phi(u) = \sqrt[3]{\frac{Du^4}{g^2}} \quad (2.6)$$

Se había expuesto anteriormente que esta aproximación corresponde solo a la fase de no bombeo; pero como lo que queremos es encontrar involucrar a las dos ecuaciones, tenemos que encantar el volumen que de agua que se derrama sobre el colector del SIBEO. Para este momento es pertinente mencionar que una parte importante del procedimiento, paso por un análisis dimensional del sistema. Ahora contamos con la explicación que proviene de un modelo empírico.

Debido a que ya contábamos con la modelación donde se contemplaba primordialmente de la velocidad del agua en el tubo.

$$X = \frac{A_1}{A_c} \int u dt \quad (2.7)$$

Donde el cociente de A 's muestra la relación entre las dos áreas transversales de los tubos resonante y de desagüe. Sin dejar de tomar en cuenta que anteriormente se había mostrado que X corresponde al desplazamiento de la columna dentro del tubo.

Aquí se muestra que es la altura del carquete que se forma es función directa de la velocidad, en relación de diámetro del tubo y la constante del cambian en la posición en el planeta.

De los experimentos realizados en Delaware, resultó que alrededor del 10% de las pérdidas de energía eran producidas por la formación de vórtices dentro y fuera del tubo resonante. Dado que ya lo explicamos anteriormente, los resultados del experimento del SIBEO en Delaware, el cual estudia extrapolando el modelo matemático numéricamente, muestran conforme la distancia del tubo resonante se reduce, parece que el gasto se incrementa casi de forma asintótica. Esta variación en los parámetros nos permite validar los cambios en el diseño del modelo y aunque no sabemos los valores precisos donde es correcto usar este modelo. nos es suficiente para saber que podemos contar con un SIBEO mas eficiente. Así solo nos queda explorar los puntos donde es valido este modelo para las nuevas condiciones.

Con la construcción del primer SIBEO se buscaba comprobar la propuesta de bombear agua a un cuerpo de agua aislado. Ya que se pudo demostrar que el sistema funcionaba, se esperaba que en una etapa posterior el SIBEO llegara a ser más eficiente.

Es importante señalar que antes de que se construyera el primer modelo se contaba ya con un modelo numérico que mostraba dos resultados importantes. El primero era que conforme el periodo del oleaje aumentaba, el gasto que proporcionaba el sistema de bombeo también incrementaba. El segundo resultado que aportaba el modelo, era que si la longitud del tubo resonante disminuía, el gasto de agua que bombeaba el SIBEO también aumentaba. Esto nos sirvió para la construcción de un sistema más eficiente.

Al mismo tiempo que se consideró reducir la longitud del tubo resonante, se decidió que era conveniente construir el dispositivo con el volumen del tubo

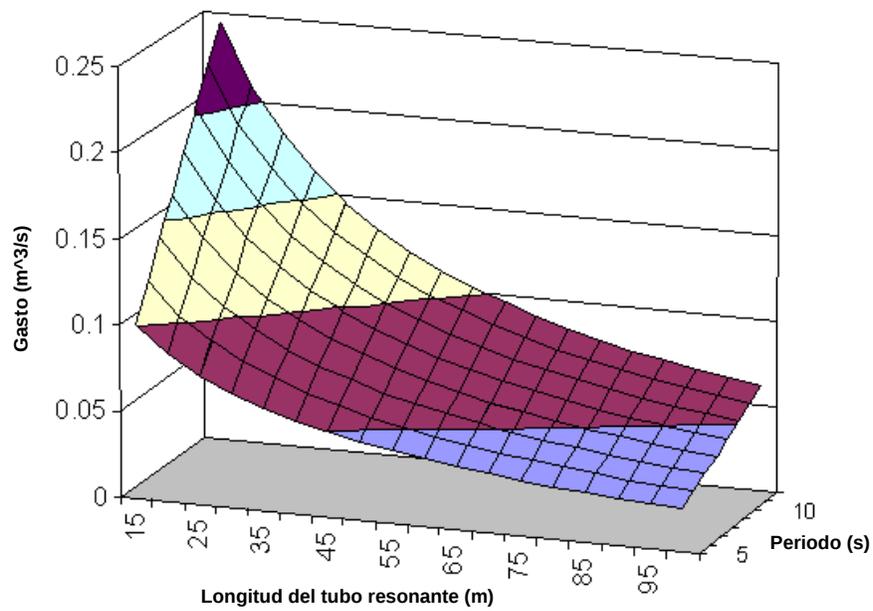


Figura 2.4: A partir de la gráfica podemos inferir que al utilizar un tubo resonante más corto, el gasto que produce el bombeo del SIBEO aumenta considerablemente (Czitrom 2000).



Figura 2.5: Montaje final del SIBEO sumergido

resonante del dispositivo de Delaware.

Es importante decir que la entrada del tubo resonante debe estar alejada del rompiente de las olas, pues si buscamos resolver los problemas de azolvamiento, es necesario que la boca de entrada del SIBEO se ubique alejada del rompiente de las olas, zona con la mayor concentración de sedimento suspendido. La razón principal es porque la turbulencia que se produce en la superficie del mar cuando se acerca a la costa, puede mezclarse con la arena que se encuentra en el fondo de la playa. Esta arena puede depositarse en el interior del tubo resonante, lo que afectaría el funcionamiento del dispositivo. Al reducir el tubo resonante y mantenerlo fuera de la zona de rompiente de las olas, el SIBEO debería posicionarse alejado de la playa. Este es el motivo por el cual el sistema de bombeo estaría sumergido.

Con el volumen del tubo resonante original dividido, el sistema se constituyó en un arreglo compacto, con la cámara de compresión por encima de los tubos resonantes.

Ya que esta vez la cámara de resonancia se encontraría por debajo del nivel del mar, sería muy difícil y costoso contar con el sistema de sintonización sumergible en condiciones reales. Por eso se determinó un volumen constante de aire dentro de la cámara de compresión. Este volumen de aire sería calculado a partir del modo de resonancia promedio.

2.2. Perfil de la trompeta

Se mencionó en la introducción la importancia que tenían las pérdidas de energía que intervienen para la eficiencia del modelo del SIBEO. ya que se estimaba que las pérdidas asociadas a la geometría de la boca del tubo resonante eran del 10 %, se determinó aumentarle una superficie que disminuyera los efectos del borde del tubo en la caída de la columna de agua.

La geometría que construye el perfil de la trompeta en la boca de entrada del tubo resonante esta determinada en base de un trabajo anterior en la historia de implementación del SIBEO. Este perfil se creó únicamente para la caída de la

columna de agua. Para la oscilación completa y la inclusión por completo de las consecuencias en el cambio de la velocidad y como interfiere en las diferencias de presión en el fluido, es parte de un problema más complejo. Así es que en este trabajo nos restringiremos a describir como reducir la vorticidad de esta columna, dependiendo principalmente de la velocidad.

Como se detalla en la construcción del modelo, a partir que se cuenta con el perfil, se puede asumir que el efecto de la caída de la columna de agua, es igual en cualquier parte donde termina el tubo, por lo que podemos decir que cuenta con simetría cilíndrica. Fue por eso que se determinó revolucionar el perfil que se obtiene basándose en el trabajo de maestría de Elia Echeverría[7], quien formó parte del grupo del SIBEO.

Capítulo 3

Construcción del modelo a escala.

En la introducción se dio una breve explicación del porqué se determinó acortar el tubo resonante. Esta modificación halló fundamento a partir del análisis que se realizó de los datos obtenidos en el experimento de Delaware; ya que el sistema debería tener un mayor gasto en el momento de estar efectuando el bombeo, invariante a la frecuencia en que se esté trabajando.

Tomando en cuenta estas condiciones, se decidió acortar la longitud del tubo resonante con la finalidad de aumentar el gasto que proporciona el sistema de bombeo. Una vez efectuado el experimento, sería posible comparar los datos proporcionados, tanto del experimento realizado en Delaware, como del que se efectuó en el canal de olas del Instituto de Ingeniería. Así es como, teniendo presente que la frecuencia natural de oscilación del sistema aumenta al reducirse la longitud del tubo resonante, se determinó seccionar la longitud del tubo resonante del SIBEO utilizado en Delaware en dos partes y tres partes, con la finalidad de que el volumen de agua de este tubo se conservara. Una vez seccionado el tubo resonante, se dispusieron de forma paralela las partes de este; uno de los extremos de los segmentos coincidiría al final de los tubos con una unión que formaría el único tubo resonante que ingresaría a la cámara de compresión.

Para la fabricación de la cámara de compresión se dispuso que el volumen de aire fuera el que coincidiera con el volumen de agua del tubo resonante y del tubo de desagüe. Ya que esta vez no sería posible contar con el sistema de sintonización, el parámetro final para determinar el volumen de la cámara de compresión, fue el periodo de oleaje con el que se cuenta en condiciones reales. Asimismo, se consideró el periodo en el que está la moda de las frecuencias que se presentan en el océano.

Todos estos datos fueron determinados a partir de una hoja de cálculo, la cual se nutrió con datos de parámetros establecidos. La ventaja de este programa radicó en que fue posible alimentarlo con parámetros de diferentes materiales,

$A1= 0.0031142 \text{ m}^2$	Teta= 1.0471976 rad (60 grados)
Omega= 3.14519	Dcamara=12.708861
$A_c = 0.1 \text{ m}^2$	$A2=0.0003747761 \text{ m}^2$
$A_c/A2= 32.111292$	$D2= 2.6875 \text{ m}$

Cuadro 3.1: Tabla con las dimensiones del diseño del SIBEO

con lo cual, podríamos llegar a determinar las condiciones para la construcción de un SIBEO a escala real.

3.1. Intersección de los tubos.

En la construcción del modelo a escala se tomaron en cuenta diferentes aspectos para la factibilidad del diseño. Uno de los puntos más importantes a considerar, fue que el modelo del SIBEO debía de fabricarse de una manera similar a la que se podría construir en escala real. Por esta razón, se decidió que los tubos que conformarían el sistema se obtendrían a partir de medidas y materiales de productores comerciales. Tomando en cuenta las dimensiones del material que se comercializa, se buscó que el modelo pudiera construirse con los tubos que ya cuentan con dimensiones estandarizadas. La hoja de cálculo que nos sirvió como herramienta para realizar los cálculos, se sustentó con los datos de las dimensiones de los tubos que se adquirieron. Estos parámetros se ajustaron a las dimensiones del tubo de desagüe, los tubos que integrarían la cámara de compresión y el tubo resonante. El tubo resonante conservó el volumen que se había calculado previamente, de dos y de tres tubos según el caso que se estudió.

Al determinar las dimensiones con las que se debía construir el modelo se tomó como herramienta una hoja de cálculo, donde se fijaban los valores del material disponible, con las magnitudes del sistema que fueron calculados previamente. Esta estimación serviría para que el SIBEO funcionara en los valores que más se acercaran a los del mar.

Para la elaboración del sistema de bombeo de dos tubos se dividió el tubo resonante en dos partes, los cuales, se establecieron en forma paralela. Este arreglo dio como resultado que la cámara de compresión se encontrara paralela como el resto de los tubos que conformaban el tubo resonante. Esta estructura convergió en una sola unidad que no superaría la escala de la cámara de compresión. Como consecuencia de todas estas modificaciones que se llevaron a cabo en la construcción del modelo, el SIBEO habría de ubicarse por debajo del nivel de altura del agua por donde pasaran las olas.

Para encontrar la medida precisa del nuevo tubo resonante, se buscó que el volumen de aire de la cámara de compresión coincidiera con el modelo manufacturado para el laboratorio en Delaware. Posteriormente, se alimentó la hoja de cálculo que anteriormente se había programado a través del macros del mismo software, con las dimensiones de la cámara de compresión del primer SIBEO. Para el uso de este software fue necesario utilizar funciones que se



Figura 3.1: Ensamblaje del diseño completo

basaban en las ecuaciones con las que se describe el funcionamiento del SIBEO. (Czitrom et al. 2000)

Como se mencionó en la introducción, contar con un sistema de sintonización para un sistema de bombeo en condiciones del mar, requeriría de la instalación compleja del equipo electrónico y, además, resultaría costoso. Por tanto, en este experimento se buscaba prescindir del sistema de sintonización a causa de las dificultades que pudieran presentarse en el mar. Esto implicaría que ya no se contara con sistema de sintonización que calculara y determinara el volumen que necesita el sistema para entrar en resonancia; por lo complicado que sería contar con este sistema sumergible. Por eso se determinó que la frecuencia natural de oscilación debería estar fija y coincidir con las condiciones que se presentan en el océano.

Una vez que se determinó acortar la longitud del tubo resonante y conservar la masa de agua que oscila dentro de éste, llegó el momento de construir el SIBEO a escala. El tubo resonante debería contar en uno de sus extremos con una unión en la que deberían juntarse los dos flujos de cada sección del tubo. Esta unión era necesaria porque sólo podría ingresar un tubo a la cámara de compresión. La longitud del tubo resonante que se calculó fue de 1.80 cm; así se cumplía el objetivo de que este volumen se conservara invariante de la geometría que llegue a presentar.

Fue así como de una sección de 20 cm del tubo de acrílico se cortó, con una sierra de disco, una parte del tubo. Aquí la sierra tomaría la función de un plano que atravesaría al cilindro (sección de tubo de acrílico) por el diámetro de círculo que forma la base, hasta alcanzar en un solo punto la otra base del cilindro. Esta pieza se fabricó dos veces y, una vez que estuvieron listas, se pegaron haciendo coincidir los planos que cortaron a la pieza de acrílico. Con esta nueva pieza, se buscaba que el flujo de agua de cada uno de las secciones de tubo se uniera en uno solo y que el flujo del tubo resonante ingresara a la cámara de compresión.

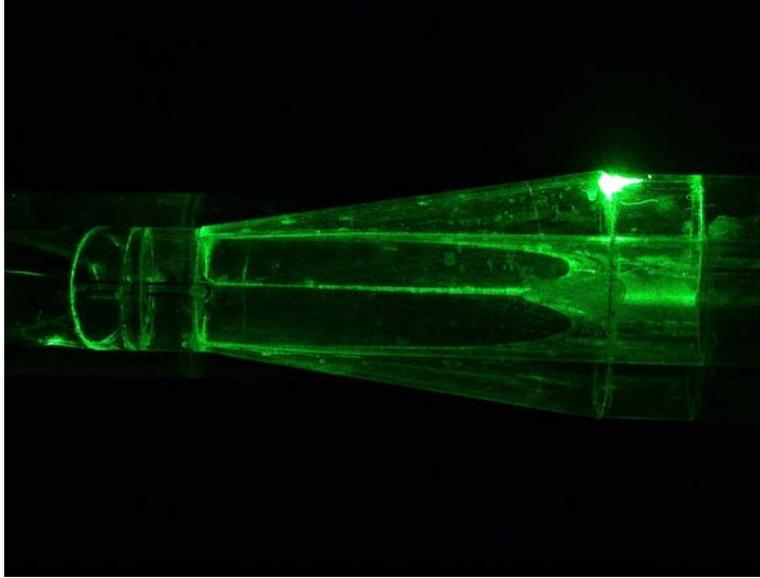


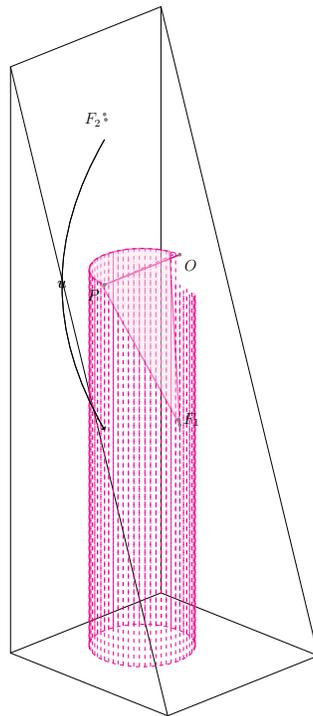
Figura 3.2: Intersección de los tres tubos al tubo resonante.

Para esta ocasión, se diseñó el nuevo modelo con un tubo resonante en el cual el volumen de agua era muy parecido al del tubo resonante del SIBEO utilizado en Delaware. Esto resultó como consecuencia de fijar un volumen de aire en la cámara de compresión y, por tanto, una frecuencia en la cual se esperaba que resonara el sistema. Asimismo, con estos parámetros se pensaba que la comparación podría hacerse inmediatamente en el gasto que proporcionaría cada uno de los sistemas. En la elaboración del tubo resonante seccionado en tres partes, se resolvió unirlos de la siguiente manera: si determinamos una recta dispuesta longitudinalmente sobre la superficie del tubo resonante, como eje axial de nuestro arreglo, nos será más sencillo determinar cuáles son los planos que deberán seccionar el difusor.

Se efectuaron dos cortes con un ángulo entre los planos tangentes al tubo de $\frac{2}{3}\pi$. Así garantizamos que al momento de unir las tres partes, obtendríamos una sola pieza donde, la suma de los ángulos de cada parte de trompeta sumarían 2π . Esto conformaba una trompeta para un tubo resonante conformado de tres secciones juntas, donde se contaba con una simetría axial al vértice que resultaba al hacer los cortes.

En la elaboración del tubo resonante, seccionado en tres partes, se determinó unirlos de la siguiente manera: si determinamos una recta dispuesta longitudinalmente sobre la superficie del tubo resonante, como eje axial de nuestro arreglo, nos será más sencillo determinar cuáles son los planos que deberán seccionar la trompeta.

Al hacer la manufactura de estos SIBEO's se contemplo que las dimensiones que se emplearon, fueron las mismas en el sistema de dos tubos, como en el



1

Figura 3.3: Sección de uno de los tubos que conforma la unión que se convierte en el tubo resonantes

sistema de tres tubos. La cámara de compresión de las dos versiones que se fabricaron fueron las mismas. Aunque en el sistema de bombeo de tres tubos el lugar donde se insertaba el tubo resonante se encontraba mas cercano a una de las tapas transversales que servían como limites en la cámara de compresión. Por esta misma razón no es difícil notar que fue consecuencia de reducir el tubo resonante en tres partes, lo que hace que se reduzca la distancia del SIBEO de manera que la longitud del tubo resonante en esta ocasión es $\frac{3}{4}$ del tubo resonante compuesto por dos partes.

En todo momento de la fabricación del modelo se tuvo que considerar, tanto las dimensiones del canal, como la instrumentación con la que se iba a trabajar, todo esto ya contando con la experiencia que se obtuvo del experimento en Delaware.

3.1.1. Variaciones del dispositivo e instrumentación.

Como se explicó anteriormente, al acortar el tubo se esperaba que, además de presentar un sistema más compacto, aumentará la señal de presión, ya que el dispositivo contaba con dos entradas en el mismo tubo resonante.

En una segunda parte del experimento se determinó comparar, ahora, con los datos obtenidos del modelo mejorado, la innovación en este nuevo SIBEO. Se dispuso que el tubo resonante se cortara aún más, por lo que un arreglo de tres tubos, se unió al tubo resonante.

Es importante mencionar que en proceso de construcción del modelo, al mismo tiempo se desarrolló parte de la instrumentación utilizada en el modelo.

Los dispositivos con los que se detectaba la altura de la ola, el nivel de agua dentro de la cámara de compresión así como el del tubo resonante, fueron fabricados con alambres que funcionaban como un transductor que transmitía la altitud que presentaba el agua en ese instante, como un cambio en la capacitancia que presentaba el arreglo de alambres. Para poder registrar esta señal como datos en un archivo de texto, fue necesario cambiar este tipo de señal por un potencial eléctrico. Este resultado fue gracias a que se contaba con un circuito electrónico que registraba el cambio de capacitancia como una diferencia en el voltaje.

La razón por la cual fue empleado este circuito, es porque se componía básicamente de dos circuitos del tipo RLC; que de acuerdo a la ecuación que resuelve el sistema es posible cambiar la frecuencia si se varía el valor de cada uno de estos elementos. Si nuestro sensor percibía el cambio de capacitancia, dejaba la resistencia y la inductancia fija, aunque esta función fue realizada por un circuito integrado.

Después de que cada oscilador tenía una frecuencia de resonancia, se sumaban las dos señales donde sólo faltaba la operación de convertir el cambio de frecuencia por un cambio de potencial. Esta señal era recibida por una tarjeta de adquisición de datos que hacia posible guardarlos en un archivo digital.

Al igual que nuestro dispositivo de bombeo, es posible hacer una analogía mecánica fundamentada en la descripción matemática de las oscilaciones, la cual también explica el funcionamiento de este tipo de circuitos.

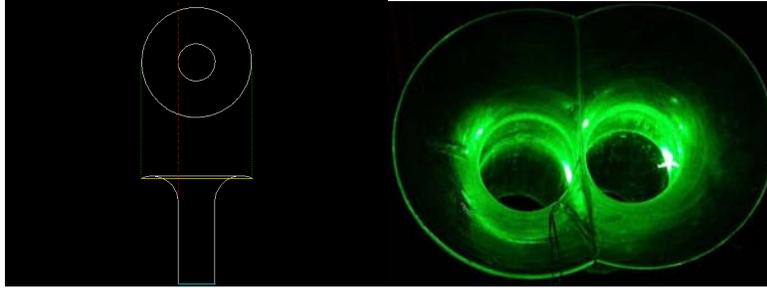


Figura 3.4: Diagrama de la fabricación de la trompeta de dos tubos

3.2. Fabricación de las trompetas

Para controlar la formación de los vórtices que se forman a la salida del volumen de agua que oscila por la acción del oleaje, en la introducción se mostró a detalle cómo fue calculado el perfil que deberían llevar los difusores que se encontrarían en la entrada del tubo resonante.

En esta parte se muestra como fue manufacturada la trompeta, además de que se hace una descripción de cómo fue que se le dotó al tubo resonante de estas trompetas.

Para explicar la manera en la que fueron fabricadas las trompetas, será necesario, ayudarnos de una convención de sistema de coordenadas cilíndricas.

Tanto para el modelo de tres, como para el modelo de dos tubos resonantes, se dotó de una trompeta a cada una de las secciones del tubo resonante. Ya que el arreglo de las secciones del tubo resonante requería que estuvieran pegados en forma paralela, se determinó seccionar la parte de la trompeta que no permitiría efectuar esta exigencia. Así fue que como posteriormente de efectuar el corte, resultaron dos tubos que se unieron paralelamente, constituyendo al tubo resonante en una sola unidad.

Para el proceso de manufacturaron de las trompetas, se requirió el apoyo del Taller de Diseño Industrial de la Facultad de Arquitectura. En este laboratorio se usó como herramienta un torno con el que se iba devastando un bloque de madera, el cual quedaría por dar la superficie final sobre la cual se depositaría la placa de PET. Para la geometría que se requería se necesitó de un perfil que se utilizó como escantillón. Este perfil fue calculado a partir de las condiciones que presentaban los tubos de medida estándar. Lo que se realizó fue, que se produjo una gráfica en base a la propuesta geométrica que se obtuvo en base al trabajo que realizó Elia Echeverría en su tesis de maestría. La grafica que produjo fue ajustada a los parámetros que permitían las dimensiones de los tubos que se comercializan. En este trabajo tiene como parte central un análisis entre las fuerzas que se producen cuando la columna de agua oscilante baja.

Esta geometría también esta determinada por el número de Reynolds que se tiene cuando se presentan las condiciones de frecuencia y amplitud determinados. En esta ocasión además de pretender reproducir las condiciones

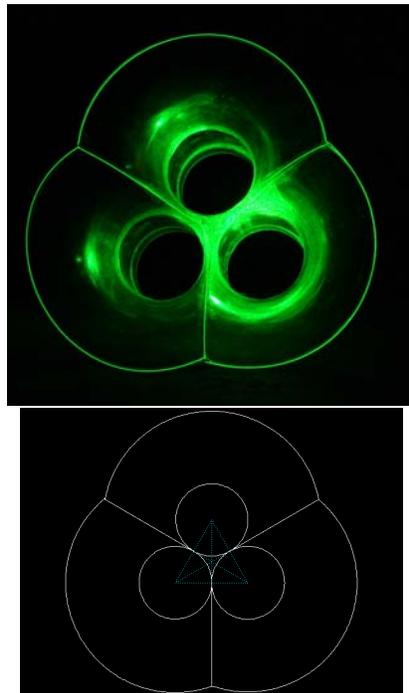


Figura 3.5: Fotografía y diagrama de la trompeta de tres tubos

que se presentan en el océano, se buscó que también contaran con condiciones equivalentes a los experimentos efectuados en Delaware.

Una vez que se contaba con el perfil que fue resultado de equilibrar estas dos fuerzas, se continuó por revolucionar esta gráfica alrededor de un eje para obtener una superficie.

Cuando se tenía cada una de las trompetas ya elaboradas con el *PET*, se continuó por pegar las secciones. La parte de la trompeta que evitaba que las superficies coincidieran en un mismo plano fue apartada como se mencionó anteriormente, para que coincidieran paralelamente los tubos que tenían su propia trompeta.

Primero se comenzó con la fabricación de la trompeta del SIBEO de dos tubos. Se fabricó por separado cada una de las trompetas que formarían entre las dos una sola pieza.

Después de que se terminó por conformar la boca de entrada del dispositivo de bombeo compuesto del tubo resonante de dos secciones juntas, se continuó con la misma forma de fabricación para la boca de entrada del SIBEO de tres tubos. En esta ocasión las secciones que se apartaban de la superficie de la trompeta original constaban de un corte extra. Como se ve en la figura 3.4 los planos que seccionarían a las trompetas habrían sido rotados 120 grados respecto al eje del cilindro. Esto es resultado de ensamblar tres tubos paralelamente, por que se forma un triángulo equilátero a partir de los centros que forman las secciones transversales de cada uno de los tubos.

Capítulo 4

Desarrollo experimental.

El experimento se realizó en el laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería. El laboratorio cuenta con un canal de olas de 37 m de longitud, 0.8 m de separación entre las paredes que contienen el volumen total de agua y 1.2 m de altura. De la base del canal el dispositivo que produce el oleaje cuenta con una pala que es controlada por un motor eléctrico. Al desplazar el volumen que contiene a la pala, se produce la ola que recorre el canal.

El canal de olas cuenta con un sistema de absorción dinámica, el cual, busca reducir los efectos que se producen por la reflexión al final del canal. Por esta razón el canal está constantemente acondicionado con una playa de arena al final del recorrido de la ola.

Este canal cuenta con una amplia gama de sensores que son parte de la instrumentación del laboratorio. Todos estos tipos de transductores pueden estar conectados a las computadoras que se encuentran en la cabina de control del laboratorio. Para esta ocasión, fueron empleados los sensores de altura que fueron dispuestos a lo largo del canal. A esta instrumentación se le sumaron los sensores de presión con los que contaba el SIBEO, así como los sensores de altura que se le habían dotado en el momento de su fabricación. La información de las medidas de los sensores eran registrados por medio de una Laptop.

Una vez que se armó el dispositivo y con el canal vacío, se montó de tal forma que el vector de onda incidiera directamente sobre el plano que genera con los difusores elaborados para reducir la vorticidad. Antes de colocar al SIBEO sobre el fondo del canal se consideró que, debido a la instrumentación con la que contaba, debíamos estar seguros de que no contara con ninguna fuga que cediera a las presiones negativas y positivas. En este caso solo estamos hablando de los sensores de altura que se instalaron sobre el SIBEO. Asimismo, se hizo la revisión para evitar las fugas que se pudieran presentar a causa de la instalación de los sensores de presión.

Una vez que se colocó el dispositivo de bombeo sobre la superficie del canal, se fijó al fondo presionándolo con bastones. Con esto se buscaba que al incidir los cambios de presión no perturbaran tanto que cambiaran la forma de cómo estaba colocado el SIBEO. Posteriormente, se colocó el tubo de desagüe que

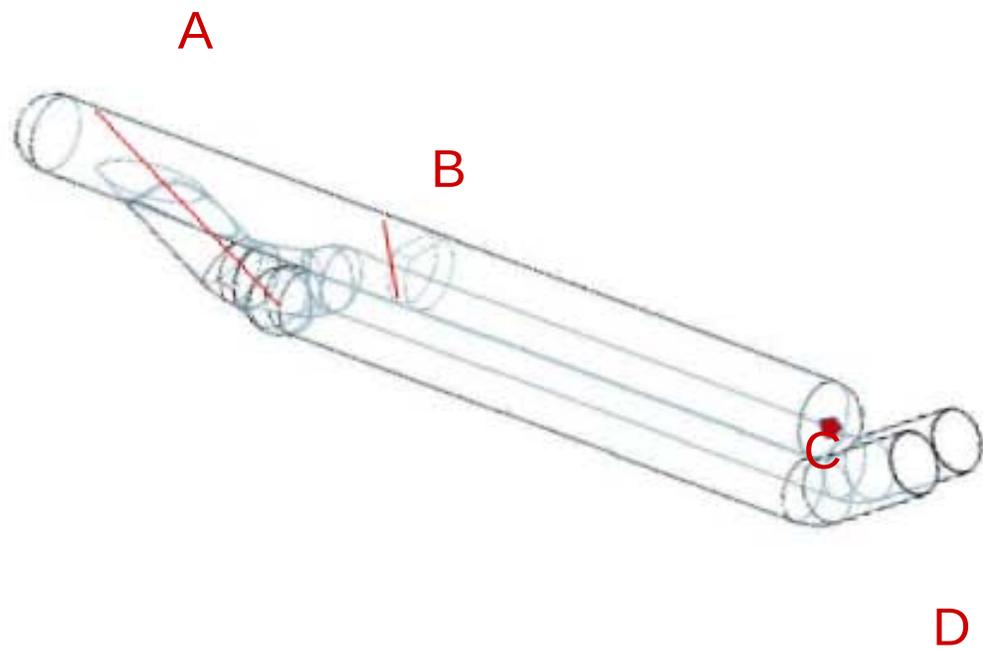


Figura 4.1: Distribución de la instrumentación; A y B son los sensores de altura, mientras que C y D son los de presión.

tenía la longitud de 20 m sobre la parte superior de las paredes del canal, para que al final descargara el agua en la cubeta y se pudiera registrar el gasto proporcionado. La longitud del tubo de desagüe fue el adecuado para reproducir como contexto del océano.

Mientras que una parte del tubo de desagüe está conectada a la cámara de compresión, el otro extremo se introduce en la cubeta de agua que funciona como laguna receptora y nos sirve para controlar la medición del flujo.

4.1. Dispositivo experimental.

Como se mencionó anteriormente el canal del laboratorio, cuenta la mayor parte del tiempo con una playa al final del canal que absorbe el reflejo de las olas que produce la pala. Por esta razón, se determinó que el SIBEO se encontrara en medio de la playa y la pala. Como lo muestra el esquema, el arreglo del experimento contaba con los sensores de altura que registraban en la computadora del laboratorio los datos que se producían en el experimento. Estos sensores de altura son los que funcionan mediante un transductor a base de resistencia eléctrica. A estos sensores se sumarían los que ya se habían integrado durante el ensamblaje del SIBEO.

Para el experimento se elaboraron por separado dos sistemas de bombeo. El primero serviría para dividir el volumen de agua que contenía el SIBEO que se utilizó en Delaware. Posteriormente se fabricó otro sistema de bombeo en el cual el tubo resonante estuviera seccionado en tres partes. Con la división del tubo resonante además de aumentar el gasto de agua que bombeaba, se buscaba que aumentara la señal de presión, que como en todos los fluidos es la que sirve como una de las variables principales para describir el movimiento, en este caso el flujo de agua que entra al sistema.

Una vez que se superaron todas las fugas y quedó fijo el sistema, comenzamos por llenar el canal de olas hasta una altura de 1.07 m. posteriormente el sistema permaneció a esta presión por un día, lo que nos aseguró que no ingresaría agua a la cámara de compresión. Para el día siguiente se iniciaron las pruebas tanto de la instrumentación como del funcionamiento del sistema. Durante esta etapa pudimos ver que existía una frecuencia en el oleaje en la que el sistema resonaba y bombeaba agua sobre la cubeta, aunque no coincidía con la frecuencia que se había calculado. Dentro de las dificultades que no fueron posibles de superar, se encontró que el registro de la altura en el interior de la cámara de compresión así como la del tubo resonante no se llevó a cabo, debido a que la interfase electrónica no funcionó bien. Ante esta eventualidad decidimos seguir con el experimentos con los sensores de altura de resistencia, que son con los que cuenta el canal de olas. Así quedaban siete sensores de altura a lo largo del canal, uno en el tubo resonante y otro más en la cámara de compresión

La forma de medir el gasto de agua que proporciona el sistema fue el mismo que se empleó en el experimento de Delaware. En el momento que comenzaba a derramar agua sobre la cubeta, esperamos a que el sistema se estabilizara y proporcionara un flujo constante. El volumen que se derramaba sobre la cubeta

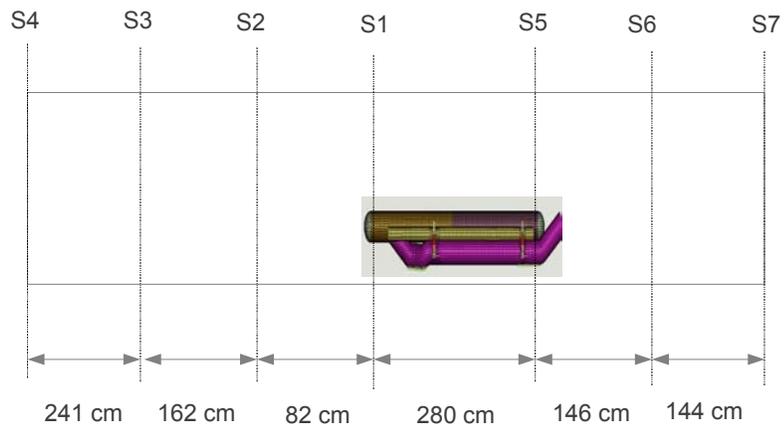


Figura 4.2: Distribución de las instrumentación (sensores) a lo largo del canal

se media por medio de una probeta. Con este procedimiento aseguramos que las incertidumbres estuvieran dentro del orden que permite hacer una medición confiable

Como anteriormente se detalla, se construyeron dos sistemas de bombeo. El primero serviría para dividir el volumen de agua que contenía el SIBEO que se utilizó en Delaware. Posteriormente se fabricó otro sistema de bombeo en el cual el tubo resonante estuviera seccionado en tres partes. Con la división del tubo resonante además de aumentar el gasto de agua que bombeaba, se buscaba que aumentara la señal de presión que se consideraba que, podría incrementar el volumen que ingresaba a la cámara de compresión.

Se evitó que los cambios de presión producidos por la diferencia de altura de las olas interfirieran en la posición del SIBEO, dotándolo de unas superficies de rotación en forma de bala con un diámetro que coincidiera con el del tubo de conformaba la cámara de compresión. Con esta superficie, se tenía la finalidad de reducir el movimiento que podría ser efecto del cambio de presión ocasionado por el oleaje, ya que si el SIBEO podría permanecer más estable, los datos recopilados estarían libres de una variable más que no se controla. Esta pieza fue fabricada al mismo tiempo que se termoformaban los difusores que fueron elaborados para reducir la formación de vórtices.

Para posicionar al sistema en el fondo del canal, se fabricaron dos tubos que tenían la finalidad de disminuir la fuerza de empuje de la cámara de compresión. Se determinó que la geometría de los lastres fuera un tubo por que le proporcionaría estabilidad a la cámara de compresión, ya que como se puede ver el sistema cuenta con una cámara de compresión de forma cilíndrica. Por eso el peso del lastre sería constante a través de la longitud de la cámara. Así la fuerza de empuje que ejercía la cámara de compresión ocupada por aire, mas el empuje de los tubos de arena, producía una fuerza hacia arriba que equivaldrá al peso tanto de SIBEO más los tubos rellenos de arena. Con esto, en conjunto de los lastres contaría con una densidad muy similar a la del agua. Se buscaba esta característica para que el montaje del experimento fuera más sencillo. Con eso solo tendríamos que preocuparnos de fijar el sistema para que no se moviera por el oleaje.

La cantidad de volumen de aire de la cámara de compresión es la misma en los dos modelos, tanto en el de tres como el de dos secciones de tubo resonante, estos dos lastres servirían como la base en la que se apoyaría el sistema de bombeo para darle estabilidad al modelo.

Como lo muestra el esquema 4.1, el arreglo del experimento contaba con los sensores de altura de agua en el tubo resonante, el de la cámara de compresión y uno más que medía la amplitud de la ola.

El sensor de presión que se encontraba colocado en la trompeta registraba el cambio de presión que se producía por la diferencia de altura de la ola que se producía en el inicio del canal. Uno de los sensores de altura se colocó a la misma distancia del sensor de presión, por lo que coincidía con la misma altura en que se encontraba este.

También se mencionó anteriormente, que la manera de integrar el flujo que se producía por el oleaje, fue medir la frecuencia del oleaje y después hacer

el producto con volumen del tubo resonante. Así, por medio de esta forma encontramos que esa frecuencia coincidía con el gasto que se producía al entraba al tubo. Con esto, llegamos a comparar el volumen que entra contra al colector, contra el que produce con el sistema en resonancia. La finalidad de encontrar este cociente radicaba en que el gasto proporcionado en función con el que entra al sistema estaba registrado anteriormente en el experimento que variaba el volumen de aire para encontrar la resonancia, por que en esta ocasión solo era posible comparar los dos sistemas de esta forma.

$$Q_{wave} = \frac{A_1 a}{T} \quad (4.1)$$

Aquí Q_{wave} es el gasto que le proporciona la ola al sistema, A_1 la amplitud de la ola, mientras que a es área transversal del tubo resonante y T el periodo de oleaje.

De acuerdo a la figura 1.2 es posible notar que la variable que se controlaba en el canal de Delaware era el volumen de aire de la cámara de compresión. En esa ocasión el sistema de bombeo contaba con un dispositivo que permitía cambiar el volumen dentro de la cámara de compresión, lo que le permitía funcionar como sistema de sintonización. Así es como fue posible que el SIBEO entrara en resonancia con el oleaje, que en este caso se trataba de un periodo constante. Ya que se tenía esta forma de comparar los datos de los dos experimentos, se pudo evaluar el funcionamiento de este nuevo diseño sumergido.

4.2. Experimentos con SIBEO de 2 tubos.

El procedimiento estuvo dividido de la siguiente manera: el primer dispositivo con el que se trabajó en el canal fue el SIBEO dos tubos; con este SIBEO se hicieron tres corridas, en las que la marea se controlaría, en comparación del nivel de oleaje con la laguna receptora (cubeta) y que van de: -1 cm, 0 cm y 1 cm. Cada una de estas series de mediciones independientes se hicieron con el colector nivel de 2 cm y 1 cm, que eran las medidas para el caso de marea -1 cm. En el caso de las corridas restantes se determinó que el colector estaría con el nivel de agua de 0.5 cm y 1 cm.

Se comenzó por comparar diferentes alturas de mareas, para que pudiéramos controlar las variables por medio de variar la altura del depósito que hacía la función de las lagunas. Con esta diferencia de altura entre al depósito y el nivel del mar, que en este caso se hacía por medio de la altura del depósito en lugar del canal.

También a partir de la gráfica 4.3 se puede ver que conforme se va acercando a la frecuencia máxima de resonancia se va reduciendo el gasto que bombea. Al graficar los diferentes gastos con diferentes amplitudes se busca ver cómo se comporta en función de la amplitud, así se ve que en cuanto llegamos al modo normal de resonancia del sistema, nos podemos dar cuenta que el gasto aumenta. A pesar que el sistema coincide con la frecuencia de resonancia independientemente de la amplitud, para la máxima amplitud encontramos que

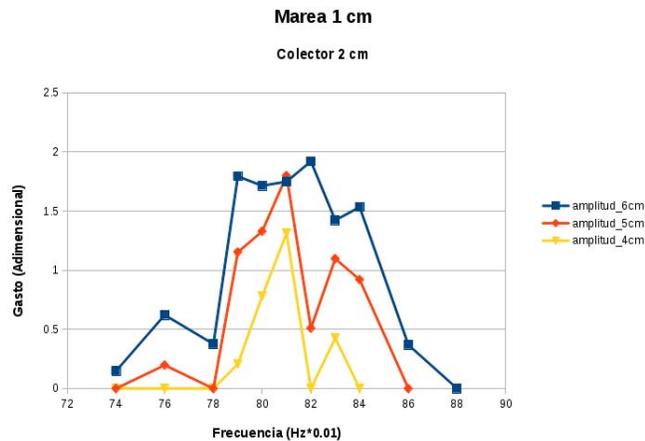


Figura 4.3: La proporción entre volumen de agua que entra al sistema y el que bombea decrece conforme nos aproximamos a el máximo en la amplitud más alta.

el máximo de la frecuencia de resonancia que es en el valor de 0.8 Hz, entonces con esto simplemente no es posible encontrar o mostrar que el nuevo sistema es mucho más eficiente que el de Delaware.

Mediante la comparación de las dos gráficas (4.3 y 4.7) se nota que el valor de la proporción de lo que entra, contra lo que bombea el sistema es ligeramente mayor en el nuevo dispositivo que con el que realizaron las pruebas en Delaware. Con el nuevo dispositivo se hicieron los cálculos para que bombeara 2.5 veces mas que el primer modelo.

Para modificar el nivel del colector se utilizó un ducto conectado a la cámara de compresión, por medio del cual era posible aumentar o disminuir la presión interna de ésta.

En todas las gráficas (4.3, 4.4, 4.5) se observan máximos locales, los cuales coinciden precisamente con el valor de los múltiplos de la frecuencia de todos los experimentos del colector.

4.2.1. Marea -2 cm.

Para las primeras pruebas se consideró que, lo más conveniente era comenzar con la medición del gasto que producía el SIBEO cuando el nivel del depósito se encontraba a la misma altura que la línea de nivel del agua del canal cuando este se encontraba sin actividad. Para el resto de las mediciones se le proporcionó a la computadora que controlaba la pala, así como la que registraba las alturas de las olas, los sensores de altura de resistencia y los datos se registraron durante un minuto. Al mismo tiempo que se registraban los datos con los programas de la instrumentación con la que contaba el canal, se registraron los datos de cambio de presión que proporcionaban los sensores que estaban conectados a la laptop.

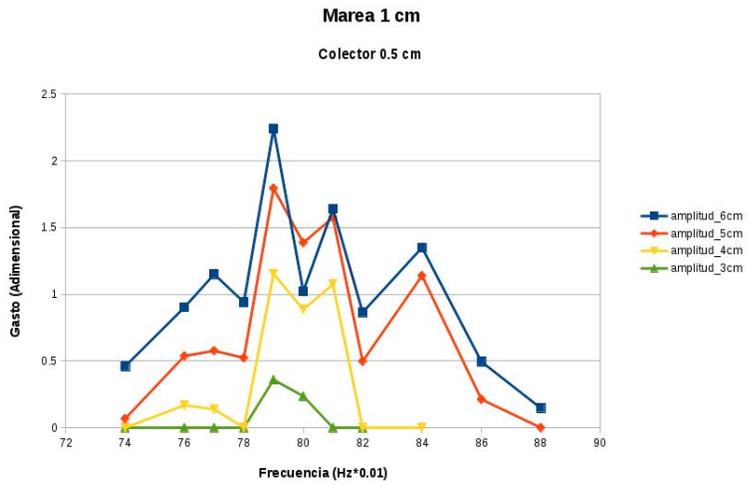


Figura 4.4: El gasto máximo que bombea el SIBEO está en 0.79 Hz

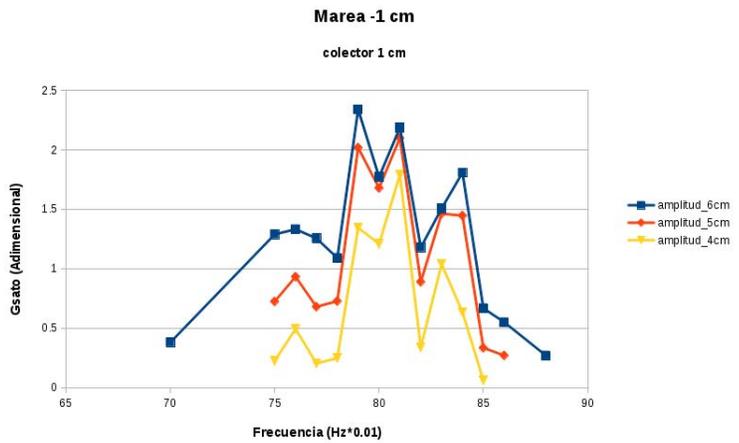


Figura 4.5: El máximo coincide con las frecuencias anteriores

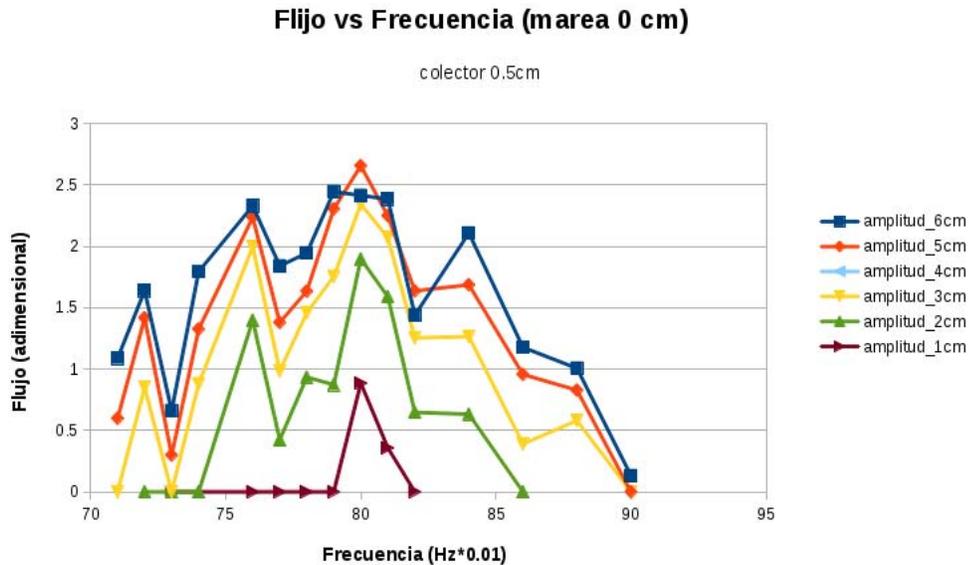


Figura 4.6: Gráfica de gasto contra frecuencia, con diferentes amplitudes.

En esta ocasión es oportuno recordar que los programas de adquisición de datos son una adaptación de los programas con los que se registraban los datos del dispositivo de bombeo automatizado que se llevó a cabo en el laboratorio de acústica del departamento de física de la Facultad de Ciencias.

Ya se había comentado anteriormente cómo se procedió en las mediciones del sistema de dos tubos. Con el colector a dos niveles diferentes se pudo notar una diferencia en el gasto que proporcionaba. Con esta marea y con este dispositivo el modo normal de vibración en el que encontraba el máximo gasto fue en 0.8 Hz. En las gráficas (4.3, 4.4, 4.5) se puede notar una tendencia general en la que la cantidad de agua que proporciona el flujo tiende a subir mientras se acerca a este valor en la frecuencia del oleaje. A pesar de que existen caídas importantes en el gasto que proporciona el sistema, existe una tendencia general en la que se incrementa su valor al aproximarse a dicha frecuencia.

Es posible ver en la gráfica que existe una tendencia global a incrementar el gasto que proporciona el sistema a medida que se acerca a la frecuencia de resonancia, aunque existen algunas caídas en el flujo, que coinciden en una frecuencia que es constante independientemente del colector que se esté utilizando. Por eso podemos suponer que estas caídas están relacionadas con un múltiplo de las frecuencias en la que estas caídas de flujo se están presentando.

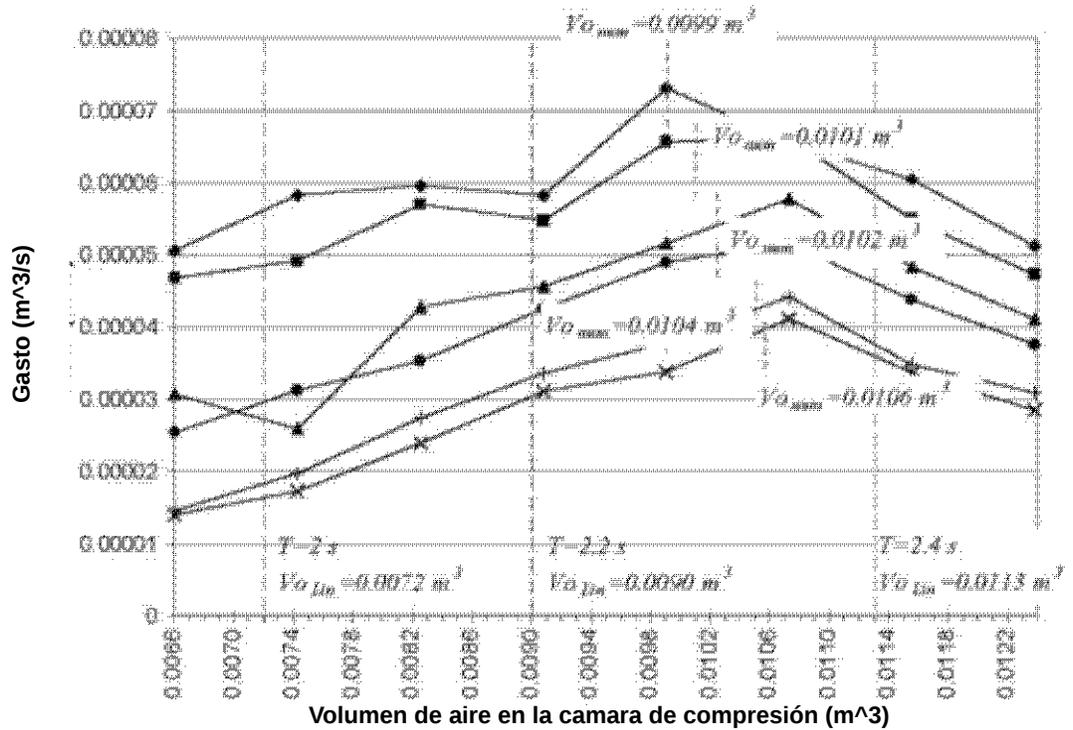


Figura 4.7: A partir de la gráfica podemos inferir que al utilizar un tubo resonante más corto, el gasto que produce el bombeo del SIBEO aumenta considerablemente (Czitrom 2000).

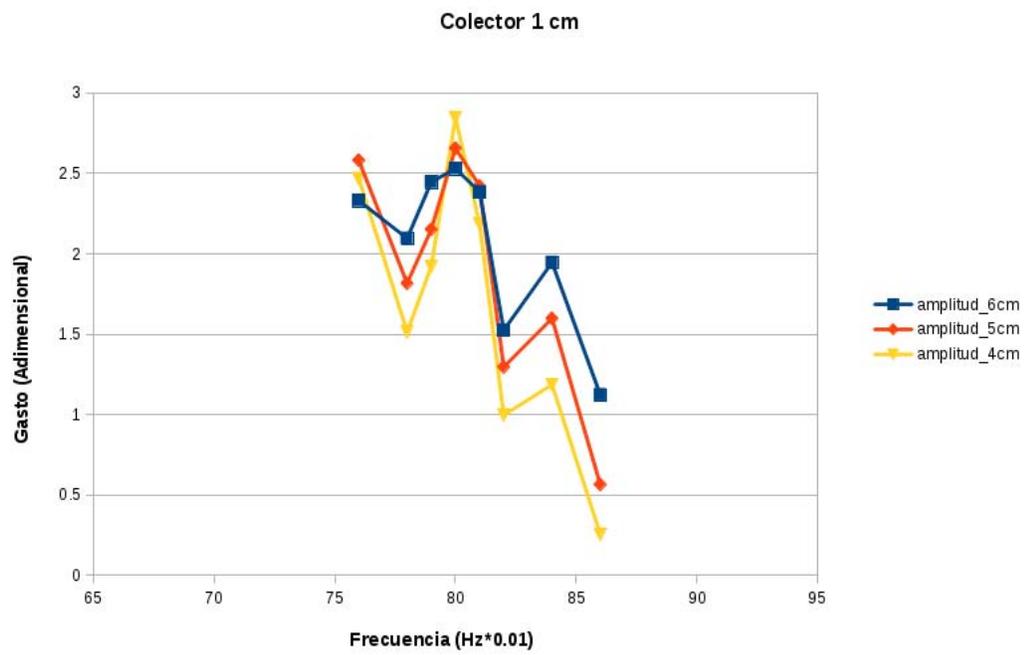


Figura 4.8: Gasto en función de la frecuencia para marea de 0 cm.

4.2.2. Marea +2 cm.

Al finalizar los experimentos donde la “laguna”¹ receptora se encontraba al mismo nivel de la superficie en que se transportaban las olas, se planteó que una parte importante del desempeño del dispositivo debería tomar en cuenta los cambios de marea que se producen en las condiciones reales del océano. Fue así que para reproducir una marea en el mar, se determinó que el contenedor receptor que se encontraba afuera del canal se posicionara a 2 cm por debajo del nivel del agua del canal cuando éste se encontraba con el dispositivo que produce con oleaje apagado.

Se hicieron experimentos con marea de 2 cm y varios colectores. Se comenzó sin oleaje y, más abajo, con oleaje. Una vez que se terminó de hacer el registro de los datos con las frecuencias, amplitudes y niveles de colector con los que se venía trabajando, se consideró apropiado ver que sucedía con el dispositivo cuando se encontraba al nivel del colector saturado. Se tuvo en cuenta que cuando se tenía la marea más alta, valía la pena saber el comportamiento del SIBEO en estas condiciones. Por esta razón se disminuyó la presión de la cámara de compresión mediante una válvula que permitió la salida de aire. Así se buscaba que la presión de la columna de agua que estaba sobre la boca de entrada se transfiriera hasta llegar al nivel máximo del colector. Este nivel estaría acotado por la altura del tubo resonante dentro de la cámara de compresión.

En estas condiciones se observó el comportamiento y se hizo el respectivo registro de datos. Con ello se buscaba conocer los efectos del oleaje con el colector a su máxima capacidad.

La etapa de este experimento comenzó por establecer el nivel de la marea en 1.1 cm, al mismo tiempo que el colector se encontraba en el nivel más alto establecido por la altura del tubo resonante, que era de 0.8 cm. Como se explicó anteriormente, se medía el tiempo en el que alcanzaba cierta capacidad en el vaso de precipitado, obteniendo así 1 litro en 24 segundos, lo que es lo mismo a un gasto de $41.76 \frac{cm^3}{s}$.

Ya con esta información y tomando en cuenta que la resonancia en el bombeo se encontraba en una frecuencia de 0.8 Hz, se estableció que el oleaje utilizado estaría dado por esta frecuencia como base para hacer un registro dentro de todas las amplitudes, desde 2 hasta 6 cm.

Los datos obtenidos mostraron que tomando en cuenta que el nivel del colector se encontraba a su altura máxima, el gasto de agua que bombea el dispositivo es invariante a esta condición. Esto implica que el SIBEO no aprovecha más allá de la energía potencial que le proporciona la diferencia de altura dada por una marea positiva. Es decir, tanto el oleaje como la frecuencia de resonancia no le proporciona ninguna ventaja al gasto que proporciona el dispositivo mientras este se encuentre por debajo de la marea respecto a la laguna receptora, o sea que se convierte en un sistema de bombeo por marea (SIBEM).

¹Se menciona que el nivel del receptáculo sobre el que ingresa el gasto de bombeo, es similar a la laguna que existe en la costa, por lo que es considerada de esa forma para términos explicativos.

A través de las gráficas podemos apreciar que el periodo de las oscilaciones es invariablemente la amplitud de la ola. Es posible que la amplitud esta relacionada con el gasto y con la onda estacionaria del colector del SIBEO.

4.2.3. SIBEO sesgado

Considerando que las condiciones reales que se producen en el océano pueden discrepar de las condiciones controladas que se preparan en el laboratorio, consideramos que hacer una variante en el experimento daría elementos para darnos cuenta de que pasaría con el funcionamiento del dispositivo si alteramos algunas condiciones.

A partir de los parámetros que se nos permitían modificaren el laboratorio, llegamos a cambiar la dirección del vector de frente de onda que producía el canal. Esto se logró cambiando de posición el SIBEO. Debido a las dimensiones del sistema y del canal, el ángulo máximo que se alcanzó fue pequeño.

Con esta información se pretendía hacer una comparación entre las mediciones, donde se le proporcionaba a las dos corridas que se registraban de la misma frecuencia. Así sería válido comparar los datos en posición original con los de posición sesgada.

El ángulo que se determinó a partir de la máxima longitud con la que cuenta el SIBEO. También se consideró importante que la trompeta que alimenta al sistema no permaneciera cerca de las paredes laterales del canal de olas, porque esto podría modificar el comportamiento del sistema

Los datos que se obtuvieron en esta etapa del experimento coincidían exactamente con los que se habían capturado antes de cambiar la posición del SIBEO.

Al final nos fue posible notar que el cambio de ángulo no influyó de manera notable. El ángulo fue de 30 grados y el flujo de agua que pasaba por el sistema era casi de la misma magnitud.

Esta información es importante porque hay intervalos de tiempo en los océanos donde la marea es positiva. Todos estos resultados son importantes para considerar la construcción del SIBEO en condiciones dentro del océano, por lo que en base a estos datos, podemos prescindir de configuraciones que elevarían el costo en escala real.

4.3. Experimentos con SIBEO de 3 tubos.

Se montó el SIBEO de tres tubos, para observar el comportamiento que tendría bajo las condiciones que se establecieron en el experimento anterior. En esta ocasión registramos los datos para dar cuenta de la eficiencia en el bombeo que podría proporcionar esta variante del sistema.

Después que se realizaron todas las mediciones con el dispositivo de dos tubos, se esperaba que los datos de gasto que se registraron con el SIBEO de tres tubos, fuera mucho más que en el de dos.

Al igual que el dispositivo que dividía el tubo resonante en dos partes, en este se buscaba que aumentara la señal de presión, debido a que cada tubo

contribuía a este fin, además de que la cámara de compresión fue calculada para el volumen en que alcanzara la frecuencia de resonancia. Con esto se esperaba que el flujo de bombeo aumentara por la contribución de la señal de presión de cada uno de los tubos resonantes, como lo indica la gráfica 2.4.

En el momento en que comenzamos a recopilar los datos, sabíamos que teníamos que buscar la frecuencia de resonancia en un valor más alto del que habíamos encontrado con el dispositivo de dos tubos. Lo que habíamos notado a partir del experimento anterior fue que, a pesar de que la masa de agua del tubo resonante era constante en los tres casos (SIBEO en Delaware, SIBEO de dos tubos y SIBEO de tres tubos), la frecuencia de resonancia aumentaba conforme la boca de entrada se acercaba a la cámara de compresión. El comportamiento de cada uno de los sistemas relacionaba directamente la frecuencia de resonancia con la longitud del tubo resonante, lo que no implicaba que se conservara el volumen. El hecho de que la frecuencia de resonancia esté relacionada directamente con la longitud de tubo de resonancia y no con la masa, quiere decir que el sistema funciona como una columna de agua oscilante, lo que significa que la columna de agua se comporta como un solo tubo; o sea que no importa que el arreglo de tubos cuente con un tubo resonante paralelo, ya que éste se comportara como un solo tubo y la frecuencia en la que se encuentre la máxima resonancia coincidirá solo con la longitud de la columna de agua oscilante de un solo tubo.

Se comenzó con la marea de 0 cm y el colector de 1 cm (2 cm sobre el resonante), teniendo en cuenta que la frecuencia de resonancia debería tener un valor más alto en este dispositivo, se comenzó por hacer el registro de todas las frecuencias desde la más baja hasta la máxima que podría proporcionar el motor con el cual se producen las olas en el canal.

Se construyó el dispositivo con condiciones similares al anterior y como debería aumentar la magnitud de la frecuencia, comenzamos estableciendo una frecuencia de 4 Hz. Con estas condiciones específicas el sistema no produjo ningún gasto en el bombeo. La columna de agua dentro del tubo resonante no es oscilante, además de que no se producía flujo por parte del SIBEO, tampoco coincidía la frecuencia en la que debería de resonar, por tanto, se decidió buscar el modo normal de resonancia. Así, llegamos a pasar por un valor de 5 Hz y terminamos de medir hasta la frecuencia de 6 Hz. En ninguno de estos eventos se produjo bombeo de agua. Como esperábamos que la frecuencia de resonancia estuviera por encima de 0.95 Hz comenzamos por la de 0.94 Hz que es una frecuencia más alta, y así garantizamos de no dejamos de considerar una variación notable por el cambio de condiciones. Con esto pasamos directamente a establecer la de 0.94 Hz.

El gasto sólo era perceptible con gotas, por lo que este resultado nos llevó a considerar que la frecuencia de resonancia se había recorrido a un valor más alto. Así fue como pudimos darnos cuenta que este nuevo diseño, que seccionaba el tubo resonante en tres partes, se comportaba como un sistema que cuenta con un tercio de la longitud del tubo resonante.

Capítulo 5

Discusión

En este capítulo se hará un análisis sobre el comportamiento que tiene, tanto el sistema que se utilizó en Delaware como el que se trabajó en el canal de olas del Instituto de Ingeniería. Se pretende mostrar cómo el comportamiento del sistema de bombeo con el que se experimentó para este trabajo tiene una mayor eficiencia en el escalar de flujo (gasto hidráulico). Asimismo, en esta sección se expondrá de manera detallada como es el funcionamiento del sistema. A través de las gráficas y datos se realizará una comparación de la eficiencia de ambos sistemas. Primero se exponen los datos del gasto que produjo el SIBEO de Delaware, que se publicaron en artículos (Czitrom, 2000), y con la información de este experimento se comparó con los datos que arrojó el experimento en esta ocasión. Así la gráfica reúne las mediciones que se controlan, y las que se miden, como son la proporción del gasto que se obtuvo de el cociente entre el gasto de entrada y el de salida.

A continuación se exponen ciertas condiciones que estuvieron presentes durante el desarrollo del experimento. Algunas de las cuales, de haber prescindido de ellas, es posible que se hubieran mostrado mejor los resultados que produciría este nuevo modelo. Con esto se tiene como trabajo a futuro resolver estas eventualidades para poder demostrar de una manera más contundente la eficiencia de la nueva propuesta.

Por eso es que en esta etapa solo se tiene el objetivo de comparar con los datos experimentales que se recopilaron del sistema diseñado para Delaware y no contra un modelo numérico como se tenía la intención en aquella ocasión.

5.1. Eventos desfavorables dentro del experimento

En esta parte del trabajo se exponen resultados a considerar en la planeación de un SIBEO en el futuro. El aprendizaje que se obtuvo fue valido en el sentido de que ahora se cuenta con información que nos ayudará a entender mejor cada uno de los procesos que intervienen en el sistema de bombeo. Como se ha hecho

a lo largo de la historia del SIBEO, estos nuevos hallazgos nos proporcionan una oportunidad para mejorar el propio sistema de bombeo como ejemplos a analizar por separado en el laboratorio relacionados con la mecánica de fluidos.

En el momento que se diseñó el sistema sumergible se tomaron en cuenta diferentes aspectos con los cuales se buscaba el mejoramiento del desempeño. Muchas de las variables fueron posibles de controlar, aunque, se presentaron circunstancias que no estaban relacionadas directamente con aspectos considerados importantes en el diseño y que, al final resultaron fundamentales en el comportamiento y eficiencia del sistema.

En las dos partes del experimento se contemplaba que al reducir la longitud del tubo aumentaría el gasto en el bombeo del sistema. Y ya que se trata de un modelo que está basado en un sistema mecánico de dos masas; se tenía presente que la masa de agua del tubo resonante debía permanecer constante, respecto al SIBEO de Delaware. El flujo de la bomba alcanza un máximo cuando el sistema está en resonancia. Lo que fue posible notar a través de los resultados, es que existe una tendencia general de aumentar la proporción de agua en la que alcanza un máximo general y a partir del cual comienza a disminuir la proporción del gasto.

Tampoco coincidía con la frecuencia esperada, ya que el volumen, tanto de agua como de aire de la cámara de compresión, estuvieron calculados para un periodo de oleaje de 2s. Se puede ver que aunque hay un comportamiento general en el que el gasto aumenta, al mismo tiempo hay una oscilación en la que la resonancia interfiere negativamente, lo cual produce estas bajas en el agua que se bombea. En la gráfica 5.1 se puede ver que este tipo de comportamiento se presenta en el SIBEO de Delaware, aunque con cambios menos drásticos. Empero, hay que hacer notar que la manera en que está conformada geoméricamente la cámara de compresión es significativamente diferente en los dos sistemas a evaluar. Mientras que la disposición de la cámara de compresión en el caso de SIBEO sumergido es longitudinalmente al tubo que la conforma, en el de Delaware se dispone de forma transversal. Esta manera de conformar la cámara incidió directamente en los resultados obtenidos.

En esta parte del experimento es posible ver que el modo natural de oscilación en el que se produce el máximo gasto en el bombeo, no coincide con el que era el mismo con el que formaba la onda estacionaria que no permitía registrar un aumento en el gasto del sistema de bombeo de dos tubos. Conforme la longitud del tubo resonante va reduciéndose, la frecuencia de resonancia del sistema se va recorriendo a un valor más alto.

Para el análisis de esta parte es necesario considerar que la medida de la reducción de la distancia del tubo resonante está directamente relacionada con el aumento en el gasto de bombeo. Ahora, si al seccionar el tubo resonante en tres partes, se disminuye la distancia de este y podríamos esperar que el gasto aumentara independiente que el valor de la frecuencia. Podemos pensar que si el sistema no proporcionó en este experimento un gasto mayor en comparación al sistema de dos tubos debido a que, como aumenta la frecuencia en la que entra en resonancia, interviene en el proceso del bombeo un aspecto que aún no hemos tomando en cuenta pero que depende de cuantificar que tanta energía se pierde

en el proceso de bombeo. Así, como en algún momento al experimentar con este sistema se encontró que una parte de las pérdidas de energía correspondía a la formación de vórtices; podríamos esperar que en esta ocasión las pérdidas pudieran ser ocasionadas por la turbulencia que se crea en el interior del tubo resonante. Lo que debería ser evidente es que el sistema se comporta como si fuera un solo tubo resonante de esa longitud porque es la cantidad que esta oscilando en una columna de agua, es decir que se comporta con una sola columna de agua oscilante. Esto también se puede explicar de la siguiente forma: si existe una señal de presión que aumenta pero que energéticamente se conserva por la longitud del tubo.

Por eso hay que tener presente que un tubo resonante demasiado corto debe de coincidir con una frecuencia que exista en las condiciones oceánicas, porque puede llegar a que aumente tanto que la frecuencia no llegue a alcanzar la resonancia el sistema. Pueden tomarse los datos que no muestran un aumento de gasto que bombea en su valor de resonancia y que, siguiendo la tendencia de la curva, podríamos esperar que aumentara.

Sin embargo, esta información es valiosa porque sirve para que en la construcción futura de un nuevo modelo o en el mejor de los casos, un dispositivo a escala real, se tengan en cuenta estos aspectos para emplear las dimensiones precisas con el fin de contar con el dispositivo más eficiente.

Los SIBEOs de dos y de tres tubos, se comportan como si fueran un sistema con esa longitud de tubo resonante. El SIBEO de dos tubos se comporta como si la frecuencia en la que entra en resonancia fuera un tubo de longitud de la mitad que presenta actualmente el tubo resonante. Los datos muestran que entra en resonancia con una frecuencia que oscila alrededor de 1 Hz cuando por las consideraciones de diseño esperabamos 0.5 Hz.

En el de tres tubos la frecuencia aumenta como se esperaba que aumentara, con una longitud menor en el tubo resonante y con los mismos valores en el resto de las dimensiones del sistema. Lo que permite que se comporte como si fuera una longitud de 1m por parte del tubo resonante.

5.2. Análisis y elementos para perfeccionar el modelo

Durante el experimento se registraron simultáneamente: la amplitud, frecuencia, nivel del colector y nivel de la marea. Estos datos se vinculaban con un archivo que registraba los datos de nivel de agua (sensores de resistencia eléctrica del canal) y los que se registraban de los sensores de presión; tanto de la cámara de compresión, como el que se encontraba en la boca de entrada del dispositivo.

En el momento que se estaban calculando las dimensiones con las que contaría el nuevo dispositivo, se tomó en cuenta que debían coincidir con las medidas de las tuberías que se encuentran en el mercado. Estos requerimientos deberían considerar dos objetivos: el primero, que debía ser transparente para

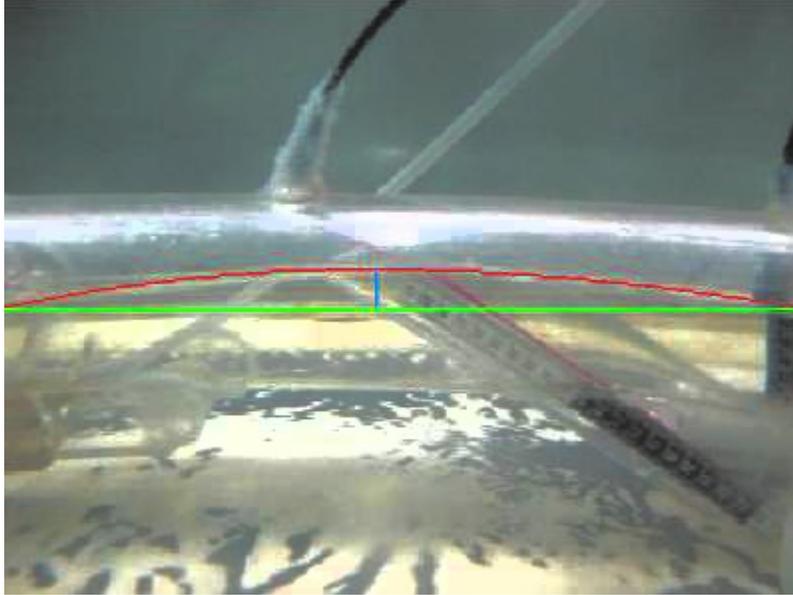


Figura 5.1: La línea verde marca el nivel de la onda estacionaria que rebasa al tubo resonante (Czitrom 2007)

que fuera posible determinar las condiciones de la cámara de compresión, tanto para la lectura de los datos como para fijar las variables necesarias para controlar la medición de los datos que proporcionaría el experimento. También era importante considerar las dimensiones que proporcionaba el fabricante al requerir estos materiales. Estas medidas están expuestas en la tabla 1.1. Con estas medidas y con los parámetros de equivalencia obtenidos del dispositivo anterior fueron con las que se alimentó la hoja de cálculo.

Las caídas del flujo están relacionadas a un comportamiento interno del sistema pero se pueden explicar los cambios más drásticos debido a que en el momento que se formaba la onda estacionaria era notable darse cuenta que esta interfería en el gasto que bombeaba el SIBEO. La cresta de la mitad de la longitud de la onda que se formaba coincidía con los múltiplos de las frecuencias en la que entraba en resonancia. Para calcular la frecuencia en la cámara de compresión se tomó en cuenta que son ondas en agua somera, porque la profundidad de la ola es mucho menor que la longitud de onda de la ola $\omega = \sqrt{d}gk$, donde d es la profundidad, g la constante de la gravedad en la tierra y k el vector de onda.

La longitud del depósito de agua en la cámara de compresión fue de 43 cm por lo que si es media longitud de onda, se sabe que se tiene una frecuencia de resonancia de 0.86 Hz lo cual coincide con las frecuencias medidas.

Una de las adaptaciones que se contemplaron para este dispositivo fue instalar una barrera que se ubicara por debajo del nivel de agua, en la que

se encontraba el colector, lo que se buscaba es que esta barrera impidiera la oscilación. De forma que la longitud se redujera buscando que las condiciones que determinan el periodo de oscilación en el que se encuentre la onda estacionaria. Por lo tanto, se busca que la altura cambie y así se podría controlar que regresara el volumen de agua otra vez al tubo resonante.

A partir de la representación de la bomba por el sistema mecánico de dos masas y dos resortes, es posible encontrar las ecuaciones que rigen al SIBEO como se muestra en el primer capítulo referido a los aspectos teóricos. Como ya ha sido anteriormente explicado, con base al funcionamiento de un símil mecánico y de las ecuaciones que resultan de este modelo, nos es posible saber la frecuencia natural de oscilación.

Así alcanzamos a determinar cuál es la frecuencia en que el gasto que proporciona el SIBEO de tres tubos es el máximo. Esta frecuencia coincide con el gasto máximo que puede tener el sistema de bombeo.

Es por eso que como se ve en las gráficas, no se alcanzó el primer modo de vibración.

Aquí los parámetros están especificados en la tabla 3.1.

Estos datos se acercan mucho a los valores que se presentan en el modelo numérico a través de la hoja de cálculos.

Capítulo 6

Conclusiones.

El SIBEO ha sido fruto del trabajo de un equipo grande de colaboradores que han intervenido en su desarrollo y mejoramiento a lo largo del tiempo. Gracias a la integración de varios proyectos se han obtenido más elementos para poder concretar un modelo a escala real. De igual forma, en este trabajo, a pesar de que no se alcanzó el objetivo que se había planteado al iniciar el proyecto, se obtuvieron resultados importantes que seguramente serán fundamentales para el proceso de mejoramiento del sistema.

Una vez más, se muestra la importancia y pertinencia de la física experimental como parte fundamental del proceso de retroalimentación en el que se ha basado la ciencia. Sin duda, el resultado nos lleva a considerar que el diseño que debe emplearse en el mar, tiene que ser construido basado en los principios físicos que sustenten que el sistema sea más eficiente.

Fue así como se contó con todos los datos y se procedió a hacer el análisis de estos. A través de comparar los datos que se obtuvieron en este experimento y los datos que se tenían del experimento de Delaware, nos fue posible demostrar el objetivo que se buscaba. El cual, era mostrar que con un tubo resonante más corto, el sistema de bombeo contaría con un funcionamiento más eficiente. Los datos que podrían haber ratificado esta idea, se vieron alterados por las condiciones que se expusieron en el capítulo anterior. No obstante, de lo que si estamos seguros es que el conocimiento que arrojó este experimento servirá para el perfeccionamiento del modelo en el futuro en el que se cuente con las condiciones para la construcción a escala real. No es posible mostrarlo inmediatamente porque los datos a comparar son muy parecidos. Pero al momento de hacer el análisis de los datos y tomando en cuenta que se presentaron algunas dificultades con la instrumentación en la etapa de adquisición de datos, definitivamente podemos considerar que este modelo es más adecuado para implementarlo en condiciones reales.

Después de haber obtenido todos los datos del modelo del canal de olas, el siguiente paso que se realizó fue analizar el funcionamiento del modelo. En esta ocasión, ya que no se obtuvieron los resultados que se esperaban, porque no contábamos con que el periodo donde se encontró la resonancia del sistema no

coincidiera con el que se había calculado. Por otro lado, tampoco preveíamos que el modo natural de oscilación en el que encontramos la resonancia máxima- y por lo tanto el gasto máximo que podría proporcionar el sistema coincidiera con que se formara una onda estacionaria que superara la altura del tubo resonante.

En cuanto los cambios al modelo, se encuentran: proporcionar de una barrera la cámara donde se encuentra el colector. Si tomamos en cuenta que si cambia la longitud del depósito donde se forma la onda estacionaria, la frecuencia en la que se formaría una nueva onda tendría que ser de un valor más alto y por lo tanto, garantizaríamos que ya no se formara más la onda estacionaria. Esto sería muy útil, ya que era la frecuencia que esperamos en que se realizara el mayor gasto de bombeo por parte del dispositivo. Con este cambio en las condiciones de variación del dispositivo, se podría hacer una nueva medición con las mismas condiciones, esta sería la manera en la que se podría tener certeza, ya que garantizamos que no ingrese agua al tubo resonante y, por lo tanto que cambie la lectura del gasto proporcionado por la cámara de compresión.

Ahora, como trabajo a futuro y después de haber obtenido todos los datos, queda como siguiente paso analizar el funcionamiento del modelo. Una vez que logremos esto estaremos en condiciones de afirmar que se cuenta con un modelo mas eficiente. Confiamos en que la experiencia en desarrollo del SIBEO será muy útil para la construcción del sistema una vez que sea posible contar con él en el mar.

Bibliografía

- [1] S. P. R. Czitrom, R. Godoy, E. Prado, P. Perez, R. Peralta-Fabi, 2000. Hydrodynamics of an oscillating water column seawater pump. Part I: Theoretical aspects. *Ocean Engineering*.
- [2] S. P. R. Czitrom, R. Godoy, E. Prado, A. Olvera, C. Stern, 2000. Hydrodynamics of and oscillating water column seawater pump. Part II: Tuning to monochromatic waves. *Ocean Engineering*.
- [3] R. Godoy, S. P. R. Czitrom, 2007. On the tuning of a wave-energy driven oscillating-water-column seawater pump to polychromatic waves. *Ocean Engineering*
- [4] A. Olvera, E. Prado, S. P. R. Czitrom, 2007. Parametric resonance in a oscillating water column. *The journal of engineering mathematics*.
- [5] F. González M., 2007. Estudio de una columna de agua oscilante. Tesis de licenciatura en física. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias.
- [6] R. Godoy D., 1999 Sintonización de un sistema de bombeo por energía de oleaje. Tesis de maestría en ciencias físicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias.
- [7] E. Echeverria A, 2012. Estudio de los efectos de borde de un flujo oscilante a la salida de un tubo a través del análisis de la masa añadida. Tesis de maestría en ciencias físicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias.