



SIMULACIÓN DE UN SISTEMA OWC PARA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

Autor: David López González Tutor: Dr. Bruno Pereiras García

E-mail: UO204118@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Los sistemas OWC (Oscillating Water Column) son unas de las variantes de la energía undimotriz. Se basa en obtener energía eléctrica a partir del giro de una turbina movida por el aire que entra y sale de una cámara semisumergida de hormigón debido al ascenso y descenso de la columna de agua en el interior de la cámara.

La finalidad principal del presente artículo es desarrollar un modelo que represente fielmente la interacción de las olas del mar con la cámara del sistema OWC así como el comportamiento de la columna en el interior. Una vez generado el modelo el segundo objetivo era analizar la influencia del amortiguamiento creado por la turbina en la captura de energía del OWC. Para realizar las simulaciones se escogió seguir las dimensiones dadas por Morris de un modelo a escala del OWC, en el que la turbina está representada por un orificio.

El diseño fue realizado en Autocad y mallado mediante Gambit, para las simulaciones se utilizó Fluent. La simulación se realizó con modelo multifase agua-aire, y generando la ola mediante una UDF que produce un movimiento de la pared tipo pistón.

Los resultados obtenidos indican que la anchura de orificio ideal es de entorno a 1 cm, ya que anchuras mayores conllevan a una disminución excesiva del diferencial de presiones, mientras que más pequeñas llevan a caudales demasiado bajas que el aumento en el diferencial de presiones no es capaz de compensar. Las presiones no tienen una evolución sinusoidal debido a la variación del coeficiente de amortiguamiento con el tiempo.

En lo que se refiere a la interacción entre la cámara y las olas, la influencia de la cámara es considerable en el agua próxima. Además los movimientos del agua dentro y fuera de la cámara son notablemente diferentes, de hecho la columna interior no tiene un movimiento sinusoidal y las alturas de las entrefases agua-aire son distintas dentro y fuera de la cámara.

ABSTRACT

Oscillating water column (OWC) device is a structure which generates energy from waves. Air movement is produced by the oscillation of the water column inside the chamber caused by the waves. This device takes advantage of using the air which leave or enter in a semi-sumerged chamber for moving the blades of a turbine.



Building a model which reproduces the interaction between the waves and the chamber and how this interaction influence in the water column is the main aim of this work. Once the model was built, the work was focused on calculating the most adequate damping to obtain the biggest power. The model simulated has the same dimension as the Morris' ones [1]. Its scale is 1:12.5 of OWC device.

The model was designed with Autocad and meshed with Gambit, for the simulations Fluent has been used. This model has two phases, air and water, so it was utilized the volume of fluids (VOF) model, and the waved was generated by an UDF which produced a piston type movement.

The results indicate that the ideal width is above 1 cm because bigger damping produced lower pressure in the chamber and in the smaller ones the air flow is too small. The pressure have not a sinusoidal evolution caused by the influent of the damping ratio varies along the time.

Relating to the interaction between the chamber and the waves, the influence is quite big in the water near the chamber. In addition, the movements of the water inside and outside the chamber is very different, in fact the water column does not have a sinusoidal movement and the high of the interfase inside and outside the chamber is quite different.

INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables es ya una realidad en el mix energético en países desarrollados, teniendo un papel muy importante en la Unión Europea en general y en España en particular.

Sin embargo, aunque energías como la eólica, solar o geotérmica están muy desarrolladas y producen grandes cantidades de energía, otras como la energía undimotriz están poco implantadas y algunas de sus variantes aún en fase de desarrollo.

El agua es en la actualidad una fuente importante de electricidad en centrales hidráulicas, cubriendo en España más del 10% de la demanda. Otra energía que tiene como vector el agua es la mareomotriz, siendo de este tipo la planta de Rance que abastece a toda la ciudad de Rennes siendo su potencia total de 240 MW. En ambos casos se hace pasar el agua a través de turbinas pudiendo así mediante un alternador generar energía eléctrica aprovechándose la energía cinética y potencial del agua.

En este artículo se tratará otra variante de obtención de energía eléctrica a partir de la energía de las olas. Este sistema, menos desarrollado a día de hoy que los descritos anteriormente, se denomina Oscilating Water Column (OWC) mostrado en la figura 1. El OWC permite obtener energía eléctrica a partir del aire en movimiento, situado en la parte superior de las olas, en lugar de utilizar el movimiento del agua. Es decir, que no son las olas las que mueven las turbinas directamente, sino una masa de aire comprimido que éstas empujan.

Las primeras pruebas experimentales del sistema OWC empiezan en 1910 en Burdeos (Francia). Hoy día existen distintos prototipos como los de cámara única en Azores (Potugal), Galway (Escocia) o Kaimei (Japón), y de cámara múltiple en Mutriku (España).

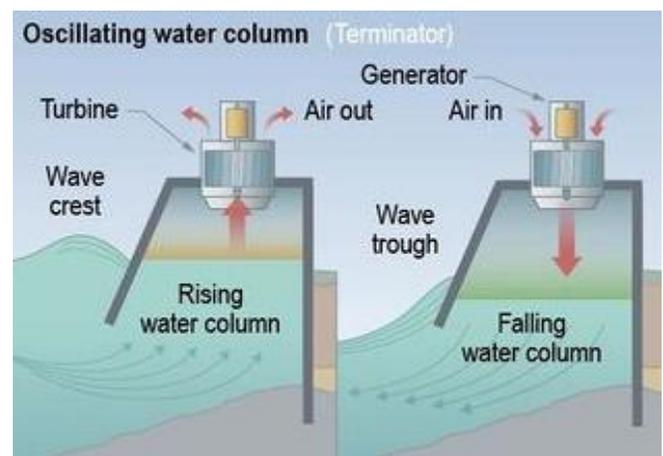


Figura 1. Funcionamiento sistema OWC.



Los principales componentes de un OWC son:

- La estructura física, la cual se divide en:
 - La columna de agua.
 - Cámara de aire.
- La turbina de aire.
- Las válvulas de aire, las cuales tienen propósitos de control y protección [2].
- El generador eléctrico, el cual puede ser de velocidad variable o fija [3].
- Equipo eléctrico y de control de la turbina y válvulas de aire.

La cámara es habitualmente de hormigón, aunque se pueden utilizar otros materiales constructivos. En cuanto a su forma su parte frontal la zona inferior está abierta para permitir el paso de la ola. La parte superior está conectada a la atmósfera desde donde el aire entra y sale a través de una turbina.

Los distintos volúmenes de agua que entran en la cámara hacen que la columna de líquido suba y baje de forma cíclica en el interior de dicha estructura, de ahí el nombre del sistema.

La turbina utilizada es especial, siendo autorrectificante y bidireccional [4]. Cuando el aire sale al exterior, es decir, cuando el nivel de la columna de agua asciende hay sobrepresión en la cámara girando los álabes en una dirección. Cuando el aire entra al interior debido a que el nivel de la columna desciende se tiene depresión en el interior respecto a la presión atmosférica girando de nuevo en el mismo sentido al ser turbinas autorrectificantes. Se aprovecha así la energía debida al movimiento de las olas tanto con la entrada como con la salida de estas en la cámara.

El sistema OWC tiene tres ventajas principales con respecto a la energía hidráulica y mareomotriz:

- La primera es la simplicidad constructiva, constando solamente de la cámara de hormigón y la turbina.
- En el caso concreto de los sistemas onshore se tiene una mayor facilidad de conexión a red.
- Los gastos en mantenimiento son menores que las tradicionales. Esto se debe a que las palas de la turbina son movidas por aire en lugar de agua pudiendo por tanto durar mucho más tiempo.

Los OWC pueden situarse en la zona donde la ola rompe, es decir, en la costa, recibiendo el nombre de on-shore y siendo de este tipo la estudiada en el artículo. También se pueden situar no justamente en la costa pero sí en las proximidades de ésta, pudiendo tener influencias del litoral, denominándose near-shore.



Figura 2. Sistema OWC en Australia.

Otra variante son las off-shore que se sitúan alejadas de la costa, en que las únicas influencias sobre la energía transmitida por las olas son las de la propia cámara.

En la mayoría de artículos se estudia de forma aislada la cámara y la turbina. En cambio, en el presente artículo, se estudiara la interacción entre cámara y turbina.

Teniendo claro que el objetivo principal del presente estudio es la obtención de un modelo



que represente fielmente a los sistemas OWC reales, sustituyendo la turbina por un orificio, validado en los trabajos de Sarmiento [5] y Morris-Thomas [1].

Una vez alcanzada dicha meta se pasó al estudio de la influencia del amortiguamiento realizado por la turbina sobre la captura de energía. La búsqueda de la anchura óptima de la turbina es novedoso, pues la mayoría de los estudios realizados se centran solamente en la interacción del agua con la pared frontal de la cámara o en el movimiento del agua en el interior de la estructura (Luo et al. [6]).

Un caso de estudio habitual es buscar la forma (Morris-Thomas et al. [1]) y la inclinación (Bouali et al. [7]) más adecuadas de la pared frontal o la anchura y profundidad idóneas (Zhang et al [8].).

Otra vía de estudio ha sido la comparación de resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación numérica (López et al. [9]; Iturrioz et al. [10]). Aunque ha habido intentos del uso de otros programas como Fluinco (Teixeira et al. [11]) para sistemas OWC estos dan distintos resultados a los obtenidos mediante el programa Fluent.

Para la realización del entorno a simular se ha tomado como modelo la estructura usada por Morris-Thomas (figura 3) para estudios experimentales sobre OWC. Este diseño tiene una longitud de 37,8 metros desde la zona donde se producen las olas hasta la parte final de la cámara, mientras que la longitud de la cámara es de 0,64 metros.

La altura del agua que se ha tomado como base es de 0,9 metros, aunque se han realizado variaciones en las distintas simulaciones persiguiendo la búsqueda de la interfase inicial más óptima para el trabajo.

Se ha optado por realizar un estudio 2D en lugar de 3D por diversas razones:

- La principal es que, debido a la simetría de la cámara y al ser el frente de ola paralelo a la cámara, el error asumiendo 2D es pequeño.
- La simulación 2D es mucho más rápida y con menores necesidades computacionales que la 3D, pudiéndose multiplicar el número de éstas para un mismo tiempo.

MÉTODODO TRABAJO

Una vez estudiados diversos artículos y trabajos sobre la simulación numérica y ensayos experimentales sobre los sistemas OWC, se decidió realizar la simulación mediante el programa Fluent siendo éste el más utilizado para la simulación del OWC, además de tener contrastados sus resultados con modelos a escala.

El trabajo se dividió en las siguientes etapas:

- a) Realización del modelo seleccionado en Autocad 2007.

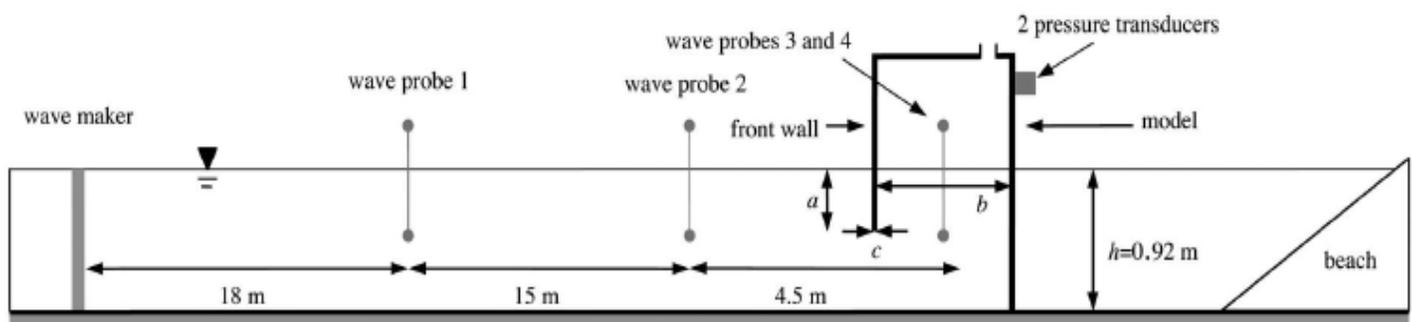


Figura 3. Modelo de Morris-Thomas [1].



- b) Mallado del modelo mediante Gambit 2.4.
- c) Definición de las condiciones de contorno
- d) Simulación del modelo para diversas configuraciones mediante Fluent 13.
- e) Tratamiento de los datos obtenidos mediante Matlab 12.
- f) Cálculo de potencias a partir de las presiones y caudales.

A) Modelo en Autocad

Se escogió diseñar el modelo mediante Autocad por la facilidad y dinamismo de éste frente al Gambit.

Se realizaron tres variantes del modelo cambiando la anchura de la turbina, representada por un orificio, incrementando y reduciendo el tamaño de la turbina en un 50 % respecto del modelo tomado como base. Se hicieron por tanto anchuras de 2,5 cm, 5 cm(anchura base) y 7,5 cm. Posteriormente se realizaron otros dos modelos de anchuras 1cm y 0,5cm con el fin de buscar la anchura optima como se comentará en el apartado de resultados.

B) Mallado mediante Gambit

Se escogió un mallado rectangular y de mayor refinamiento en la parte de la interfase ya que esta es una zona clave en el estudio (figura 5). Por la misma razón se realizó un mallado más fino en la zona de la cámara que en el resto del modelo. El número total de celdas es de 76833.

Para la realización del mallado se dividió la figura en cinco caras mar, atm, cámara mar, cámara aire y turbina, las cuales se pueden observar en la figura 4.

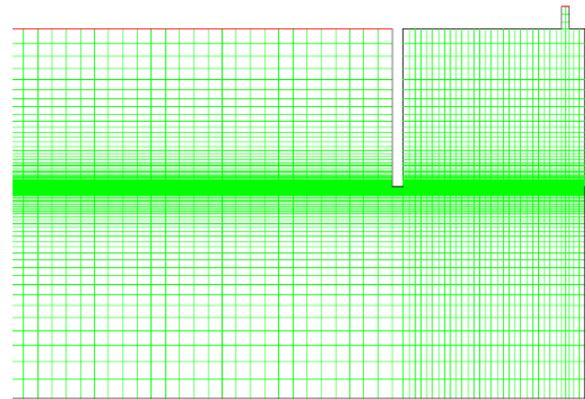


Figura 5. Mallado de la zona de la cámara.

c) Condiciones de contorno

Una vez realizado el mallado se fijaron las condiciones de contorno de los distintos ejes. Se diferenciaron cinco partes en función de la zona ocupada por estos, su función y sus condiciones:

- Wall inferior: correspondiente al eje inferior del modelo que representaría al fondo del mar en una situación real. Se define esta zona como Wall en la cual el entorno de dicha Wall inferior tendrá velocidad cero.
- Cámara: correspondiente a los ejes que conforman la cámara incluyendo los de la pared frontal, la parte superior, los laterales de la turbina y la pared trasera. Se define también como Wall siendo la velocidad del fluido cero.

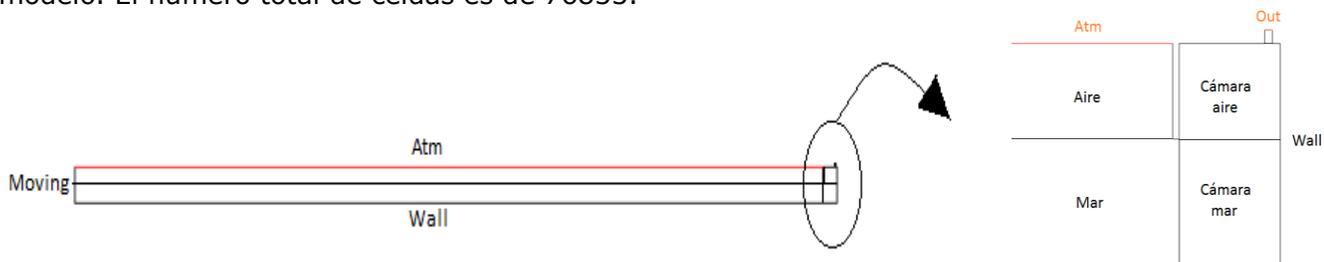


Figura 4. Zonas y ejes del modelo.



- **Moving:** correspondiente al eje de la izquierda del modelo, si lo asimilamos a un ensayo experimental sería el elemento que se utiliza para generar las olas. En este caso el movimiento que se imprimirá será tipo pistón mediante UDF en Fluent como posteriormente se describirá. Se define también como Wall para poder definir la velocidad posteriormente mediante la UDF.
- **Atm:** correspondiente al eje superior del modelo fuera de la zona de la cámara. Será por tanto la superficie libre, escogiendo por ende Pressure-outlet.
- **Out:** correspondiente a la zona de salida del aire a través de la turbina. Como la salida de la turbina está abierta a la atmósfera siendo de nuevo Pressure-outlet.

D) Simulación en Fluent:

Tras cargar la malla realizada en Gambit se comprueba la calidad de ésta, siendo realmente buena debido a que todas sus celdas son rectangulares. Esta simulación es en 2D en régimen transitorio ya que varía en función del tiempo.

Al ser dos fluidos distintos, aire y agua líquida, es un modelo de multifase. En este caso se definió el agua como fase principal y el aire como fase secundaria.

Otro dato a tener en cuenta es seleccionar en condiciones de operación la gravedad, siendo la aceleración de la gravedad de $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$ en el eje de las Y.

Una vez definidas las fases y condiciones de operación se compiló la UDF programada con la finalidad de crear las olas. Ésta se puede consultar en el anexo.

Las olas se pueden generar de modos diversos. En el caso particular de generarla a partir de una UDF esta puede definir un movimiento tipo bisagra, fijando el punto inferior del eje moving, o tipo pistón en el que el eje moving haga un movimiento de vaivén.

En este caso se escogió el tipo pistón, pudiendo ajustar la amplitud y la velocidad de las mismas cambiando el valor de la amplitud o la frecuencia.

Otra condición a definir en el programa Fluent es la altura a la que llegará el agua en este modelo. En este caso la interfase inicial aire-agua, como simulación base, se situó a 0,9 metros aunque se probaron a otras alturas como 0.8 o 0.7 para observar qué sucedía cuando el agua pasaba por debajo de la cámara.

Por la gran longitud del modelo el agua no llegaba a la cámara hasta unos 20 segundos para la mayoría de las simulaciones. Las simulaciones se realizaron a 10000 time step y, en principio, se fijó un tamaño de time step de 0.01 segundos fijo, ya que para simulación con tamaño de time step variable la simulación daba problemas debido al número de Courant. Aún así entorno a los 5000 time step el número de Courant se hacía demasiado grande por lo que entre 5000 y 10000 time step la simulación se realizó con un tamaño de time step de 0.005 segundos.

En las simulaciones se tomaron datos de presión estática y caudal a distintas alturas en el interior de la cámara y el orificio. La presión utilizada en los cálculos se tomó a una altura de 1.25 metros, altura a la que nunca llega la columna de agua del interior de la cámara.

Estos datos fueron tomados en la zona izquierda de la cámara para que la presión no se viese influenciada por el orificio. También se tomó el data a 1.3 metros para comprobar que la presión en la zona de aire del interior de la cámara es constante.



En lo referente a los caudales se tomaron justo a la salida del orificio que son los datos utilizados en los cálculos analizados posteriormente. También se realizó la medida de caudal en la zona interna del orificio a modo de asegurar que el caudal es constante en todo el orificio.

Los monitores de las presiones y caudales se guardaron a cada paso temporal haciendo, en el caso de las presiones, la media de los valores a las distintas alturas evaluadas.

También se guardaron los case & data a cada 50 pasos temporales para poder ver de forma visual la evolución de presiones, altura de la columna de agua, velocidades, etc.

E) Postproceso

Una vez terminadas las simulaciones se disponía de miles de datos a doble columna, bien paso temporal-presión estática o bien paso temporal caudal.

Una vez exportados a Matlab estos datos se disponían en forma de matriz con cuidado de delimitar las columnas para no mezclar el número de pasos temporales con la otra variable de estudio.

Con estas matrices es sencillo representar la presiones y caudales, graficas que se discutirán en el apartado de resultados.

F) Cálculo de potencias.

La potencia de la turbina se puede calcular fácilmente como el producto del caudal y la presión:

$$W = P * Q \quad [1]$$

Calculándose y representándose nuevamente mediante Matlab.

Posteriormente se calculó la potencia producida para un ciclo de ola en cada uno de los casos mediante la fórmula:

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \dot{W} dt \quad [2]$$

Valor que se representó en función del tiempo para saber que anchura es mejor.

Tanto la evolución de potencias como las potencias puntuales son analizadas en el siguiente apartado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se indicó anteriormente el objetivo principal era la realización del modelo adecuado para el sistema OWC y una vez conseguido esto buscar la mejor tendencia en cuanto a anchuras de turbinas. Este apartado se divide por tanto en:

1) Análisis del comportamiento de las olas en su creación, en el choque contra la cámara y comportamiento de la columna de agua.

2) Análisis de la evolución de presiones, caudales y potencias a lo largo del tiempo, así como diferencias entre estas magnitudes según el tamaño del orificio.

1) Análisis del comportamiento de las olas

Las imágenes que se analizan a continuación son las correspondientes al orificio base de 5 cm de ancho, siendo la frecuencia de 0,47 s⁻¹ y una amplitud de 4,195m.

Como se puede apreciar en la sucesión de imágenes (figura 6), la primera ola generada tarda algo menos de seis segundos en estabilizarse. Aunque a partir de este instante de tiempo la primera ola es estable, no es hasta la tercera o la cuarta cuando se uniformizan, siendo posteriormente todas las olas iguales.

Esto se traduce en que hasta pasados unos 15 segundos no se producen las primeras olas estables.

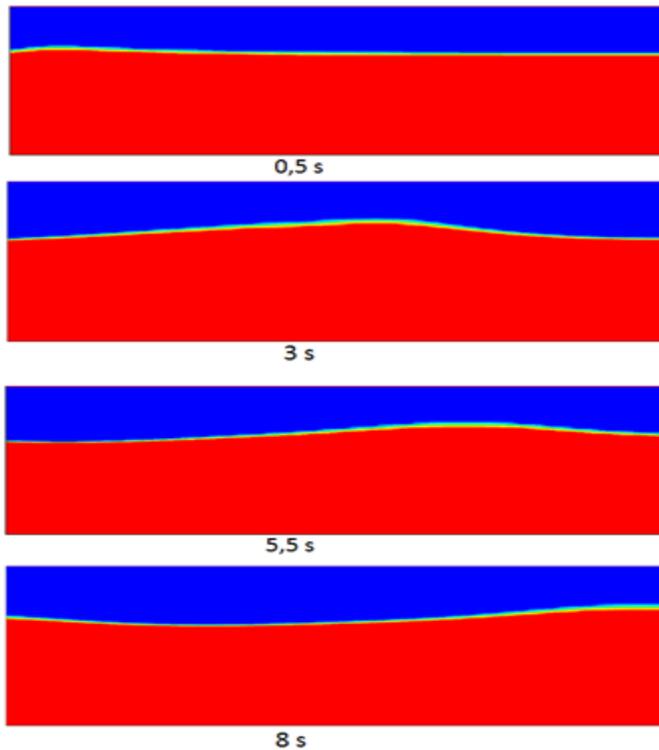


Figura 6. Creación de las olas.

En los primeros instantes de simulación la ola se genera a partir de una especie de lengua, cosa que no sucede con las posteriores, seguramente por estar el agua totalmente parada en los momentos iniciales.

En lo referente a la llegada de las olas a la cámara aunque aún no han llegado ya se empiezan a notar sus influencias entorno a los 15 segundos, como se ratifica en el análisis de caudales posteriormente.

La primera de ellas no llega hasta los 18 segundos. Esta primera ola no es representativa pues es de una altura mucho menor que las posteriores y prácticamente no altera la columna de agua del interior de la cámara.

El tiempo que tarda la ola desde su creación hasta el golpeo con la cámara es considerable debido a la distancia a recorrer. Sin embargo esta gran separación es necesaria para minimizar la influencia de las olas reflejadas en la zona de creación.

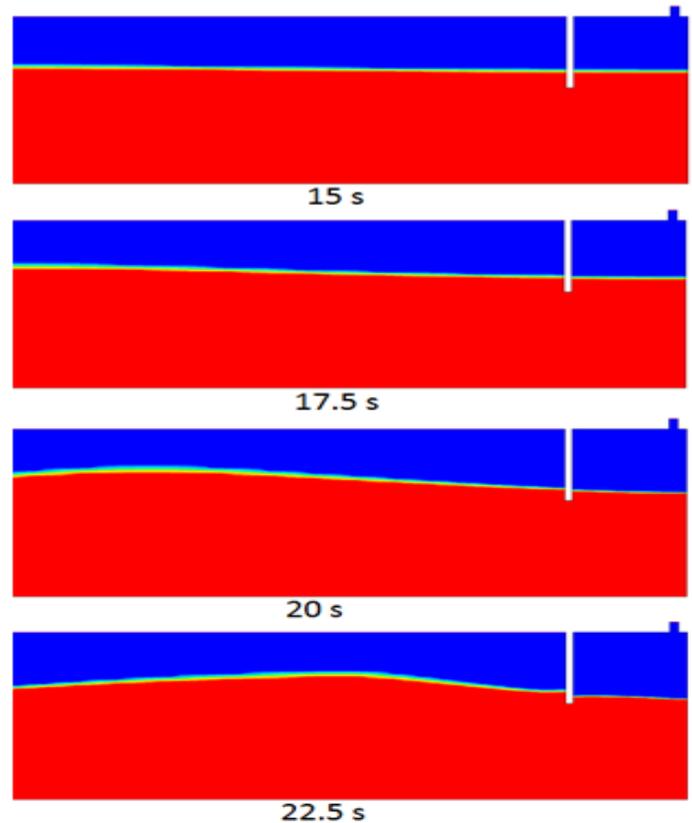


Figura 7. Llegada de las olas a la cámara.

Hasta pasados más de 23 no llega la segunda ola que ya muestra el comportamiento que tendrá el agua en el interior de la cámara durante el resto de la simulación.

Se puede observar una diferencia de alturas importante entre el nivel del agua en el interior y en el de las proximidades exteriores de la cámara. El nivel interior se ve influenciado unas décimas de segundo más tarde que la llegada de la ola a la zona externa. Esto es debido a las inercias y la influencia del orificio. El desfase entre las olas exteriores y la columna es por tanto distinto según la anchura de los orificios estudiados.

La fuerza hacia abajo producida en la entrefase debido a la presión del aire es directamente proporcional a la diferencia de presiones (ΔP) e inversamente proporcional al cuadrado de los caudales (Q):

$$k = \frac{\Delta P}{Q^2} \quad [3]$$



Observando la fórmula anterior se puede concluir que el amortiguamiento y por tanto el desfase es mayor en orificios pequeños por dos motivos, la diferencia de presiones es mayor y los caudales son menores.

La amplitud de movimiento de la columna interior de agua no alcanza sus valores habituales en el resto de la simulación hasta los 25-30 segundos. La amplitud de la columna no es estable ni siquiera a partir de los 30 segundos.

Estos dos hechos se deben seguramente a la influencia de la cámara, ya que en las proximidades exteriores se pueden observar distintas alturas de olas de las que se aprecian en la zona inicial del modelo debido al rebote de éstas con la cámara. Al chocar la ola con la cámara se aprecia la creación de una nueva ola en sentido contrario a la corriente.

2) Análisis de presiones caudales y potencias.

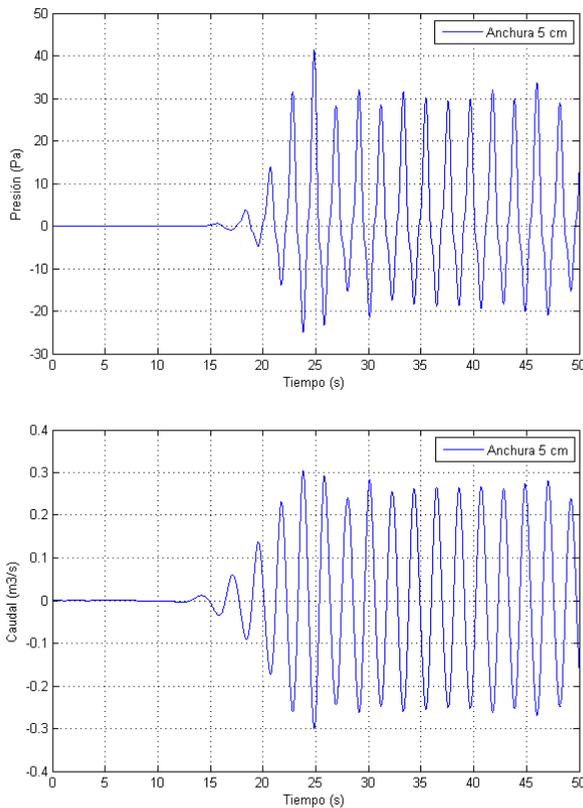


Figura 8. Evolución de presiones y caudales.

La gráfica de presiones respecto al tiempo ratifica lo visto en las secuencias de imágenes analizadas anteriormente. La presión no varía en la cámara hasta que llega a ésta la influencia de la primera de las olas, es decir, entorno los 15 segundos. No es hasta los 23 segundos cuando se dan presiones similares a los valores obtenidos cuando se alcanza el régimen permanente.

Una vez alcanzados los valores normales se observa que las sobrepresiones en la cámara son considerablemente mayores que las depresiones. Las sobrepresiones tienen un valor medio en el entorno de los 30 Pa frente a los 20 Pa de la depresión, es decir, diferencias de entorno al 50 %. Esto indica que la influencia de la llegada de la ola es mucho mayor que la de su retirada en lo referente a las diferencias de presión en la cámara.

También se observa que las presiones no tienen una forma exactamente sinusoidal, ni las amplitudes son totalmente idénticas con la evolución del tiempo.

La variación en la forma es debida a que el coeficiente de amortiguamiento no es constante sino que varía a lo largo del ciclo. Esta variación del coeficiente de amortiguamiento se debe a la variación del número de Reynolds.

En cuanto a la variación de diferenciales de presión se debe a la influencia de la cámara sobre las olas que chocan contra ella y que producen la oscilación de la columna de agua en el interior de la cámara.

En lo referente a caudales se comienza a notar variaciones entorno a los 13 segundos cuando aún no ha llegado la primera ola, y tan sólo se pueden notar influencias de ésta. En realidad también se notan variaciones de la presión entorno a los 15 segundos, pero estas no son apreciables debido a los valores del eje de ordenadas. Al igual que lo ocurrido en las presiones los valores habituales de caudal no se alcanzan hasta unos 23 segundos.

Al contrario que en las presiones, los caudales de entrada y de salida de aire son



prácticamente iguales, además la forma es perfectamente sinusoidal. Sin embargo también se nota una pequeña variación en los valores de los caudales, causada probablemente también por la influencia de la cámara en las olas que chocan contra ésta y por tanto sobre la columna de agua.

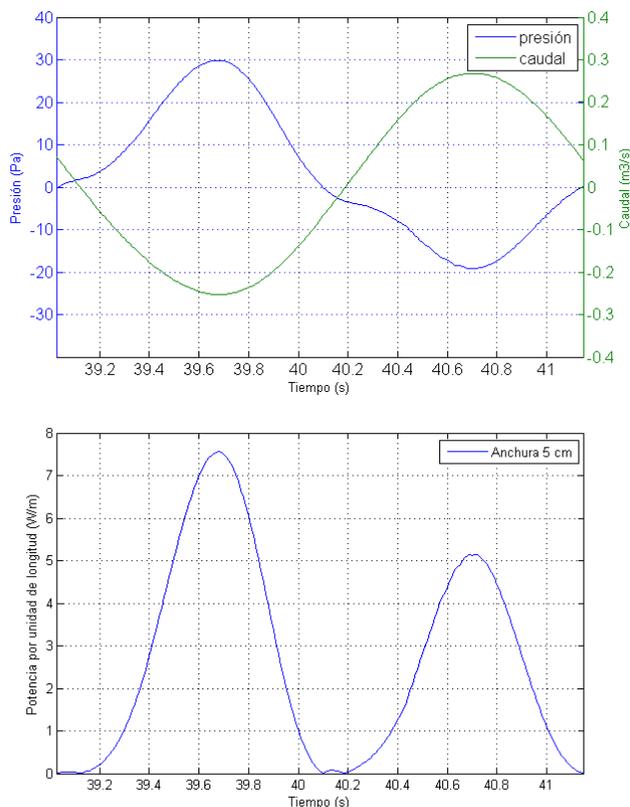


Figura 9. Ciclo de presión-caudal y de potencia

Fijándose en la comparativa de presiones y caudales se da un desfase de 0,1 segundos. Esto se debe a que se mantienen las sobrepresiones en la cámara incluso durante un breve instante cuando la entrefase comienza a bajar.

La potencia alcanza un pico a los 25 segundos, poco antes de que se establezca presiones y caudales. Al observar un ciclo de potencia se percibe que los valores varían notablemente de las exhalaciones a las inhalaciones, esto se debe a las variaciones de presión analizadas anteriormente ya que los caudales son casi idénticos para la exhalación y para la inhalación.

Además debido al desfase entre caudal y presión hay 0,1 segundos por ciclo en el que la potencia es prácticamente nula.

Aunque se han estudiado cinco anchuras de orificio, en la gráfica de potencia respecto al tiempo sólo se representan solo las siguientes tres anchuras para mayor claridad:

- 2,5 cm.
- 5 cm.
- 7,5 cm.

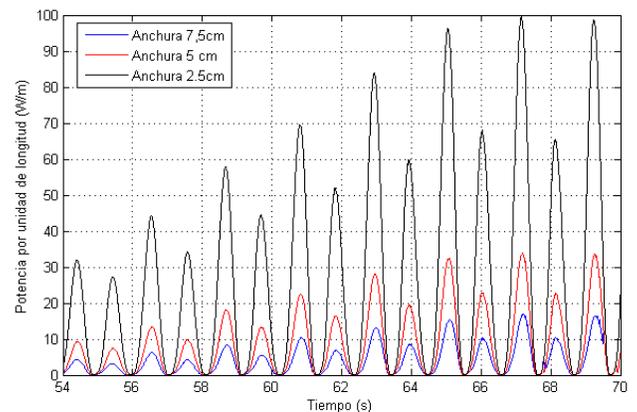


Figura 10. Comparativa de potencias para distintas anchuras de orificio

Se ve que las potencias van exactamente en fase a pesar de tener distintos orificios. El coeficiente de amortiguamiento no tiene por tanto influencia en los tiempos en los que se alcanzan los valores mínimos y máximos de presión, caudal y potencia.

En los tres orificios representados se observa una mayor potencia con la disminución de la anchura. Esto se debe a que los datos referentes al caudal son muy similares en los tres tamaños mientras que por el contrario las presiones son mucho mayores en los orificios menores. El máximo de presión para el de 7,5 cm de 30 Pa, para el de 5 cm de 60 Pa y de más de 250 Pa para el de una anchura de 2,5 cm.

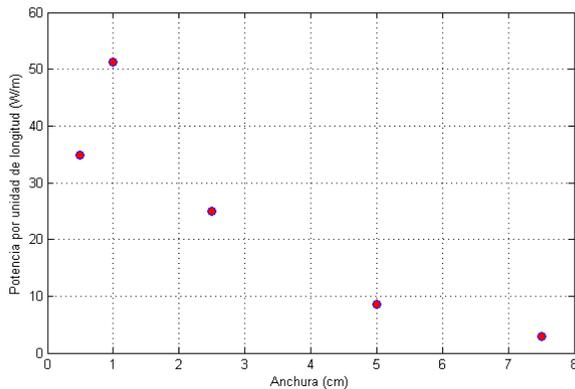


Figura 11. Potencias medias para distintas anchuras de orificio

En el gráfico se muestra la potencia en función de la anchura de orificio observándose un mejor comportamiento para las anchuras más pequeñas. Sin embargo, llega un punto en el cual una disminución de anchuras perjudica la potencia. Esto es debido a que en anchuras muy pequeñas ya se puede observar una caída importante del caudal, mientras que el aumento del diferencial de presión es cada vez menor.

Con este análisis se puede decir que existirá una anchura ideal entorno a 1 cm y, por tanto, no necesariamente habrá más potencia a menor anchura, como se observa en la comparativa entre las menores turbinas.

CONCLUSIONES

A continuación se van a exponer las conclusiones respecto a la propia simulación como a la tendencia en la búsqueda de un amortiguamiento ideal obtenido mediante la variación del tamaño del orificio.

En lo referente a la simulación:

- La primera ola creada tiene una altura muy pequeña, no alcanzándose valores normales hasta la tercera ola.
- Al impactar las olas con la cámara se produce nuevas olas en sentido contrario a la corriente que tendrán una gran

influencia, sobre todo en las proximidades exteriores de la cámara.

- Por ello es importante realizar un modelo con gran distancia entre la creación de las olas y la cámara, consiguiendo una influencia prácticamente nula entre ambas zonas.

En cuanto al tamaño del orificio:

- Las presiones en el interior de la cámara varían ligeramente con el tiempo además de no describir una forma exactamente sinusoidal debido a la influencia del amortiguamiento.
- Los caudales son prácticamente iguales, no variando una vez alcanzada la estabilidad, y obteniéndose en su representación una forma perfectamente sinusoidal.
- Haciendo una comparación de potencias en función del ancho de turbina se concluye que el ancho óptimo es entorno a 1 cm. Esto se debe a que para anchuras mayores se da una disminución importante del diferencial de presión, y para anchos menores el caudal es excesivamente bajo.

Para futuros trabajos sería interesante buscar recrear el efecto de la costa sobre las olas. Otra vía de estudio podría ser buscar el orificio ideal en función de las velocidades y amplitudes de ola.

ANEXOS

```
#include"udf.h"
real pi, freq, phase, Ampdeg, Amprad, w,
AVel;
DEFINE_CG_MOTION(moving, dt, vel,
omega, time, dtime)
{
NV_S(vel, =, 0.0);
```



```

/* Definir constantes*/
pi = 3.141592654;
f = .47;
Ampdeg = 4.195;
phase = 0;
/*Convertir amplitud a radianes */
Amprad = Ampdeg*pi/180;
/*Definir velocidad angular */
w=2.0*pi*f;
/*Definir movimiento de la pared */
AVel = Amprad*w*cos(w*time + phase);
vel[0] = AVel;
}

```

column". Journal of offshore mechanics and arctic engineering 2007: 273-278.

- [2] Falcao, O., Justino, A.P.A. "OWC wave energy devices with air flow control". Ocean engineering 1999: 1275-1297.
- [3] O'Sullivan, D.L., Lewis, A.W. "Generator selection and comparative performance in offshore oscillating water column ocean wave energy converters". IEEE transactions on energy conversion 2011: 603-614.
- [4] Setoguchi, T., Takao, M. "Current status of self rectifying air turbines for wave energy conversion". Energy conversion and management 2006: 2382-2396.
- [5] Sarmiento, A.J.N.A. "Wave flume experiments on two-dimensional oscillating water column wave energy devices". Experiments in fluids 1992: 286-292.
- [6] Luo, Y, Nader, J.R., Cooper, P., Zhu, S.P. "Nonlinear 2D analysis of the efficiency of fixed oscillating water column wave energy converters". Renewable energy 2014: 255-265.
- [7] Bouali, B., Larbi, S. "Contribution to the geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter". Energy procedia: 565-573.
- [8] Zhang, Y., Zou, Q.P., Greaves, D. "Air-water two-phase modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device". Renewable energy 2012: 159-170.
- [9] López, I., Iglesias, G., López, M., Castro, M., Rodríguez, M.A. "Turbine-chamber coupling in an OWC wave energy converter". Coastal engineering 2012: 1-7.
- [10] Iturrioz, A., Guanache, R., Armesto, J.A., Alves, M.A., Vidal, C., Losada, I.J. "Time-domain modeling of a fixed detached oscillating water column towards a flating multi-chamber device". Ocean engineering 2014: 65-74.
- [11] Teixeira, P.R.F., Davyt, D.P., Didier, E., Ramalhais, R. "Numerical simulation of an

NOMENCLATURA

W: potencia
P: presión
Q: caudal
T: periodo
t: tiempo inicial
f: frecuencia
k: coeficiente de amortiguamiento
 ΔP : diferencial de presiones

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar dar las gracias a mi tutor Bruno Pereiras García por su ayuda en todas las dudas surgidas a lo largo del proyecto, así como por poner a mi disposición todos los medios necesarios para la realización del trabajo.

Mi agradecimiento también para los profesores que nos han alentado a leer artículos científicos, pues ha sido de gran ayuda para saber enfocar este trabajo de forma correcta.

Por último a mis compañeros de máster por hacer éste mucho más ameno y entretenido.

REFERENCIAS

- [1] Morris-Thomas, M.J., Ivin, R.J., Thiagarajen, K.P. "An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water



oscillating water column device using a code based Navier-Stokes equations". Energy 2013: 513-530.

- [12] Marjani, A.E., Castro, F, Bahaji, M., Filali, B. "3D unsteady flow simulation in an owc wave converter plant".
- [13] Du. Q., Dennis, Y.C. "2D numerical simulation of ocean waves. Marine and ocean technology 2011: 2183-2189.
- [14] Liu, Z., Hyun, B.S., Hong, K.Y. "Application of numerical wave tank to OWC air chamber for wave energy conversion". International offshore and polar engineering conference 2008: 350-356.
- [15] Sentürk, U., Özdamar, A. "Modelling the interaction between water waves and the oscillating water column wave energy device". Mathematical and computational applications 2011: 630-640.
- [16] Manual de Gambit.
- [17] Manual de Fluent.