

## ARTICULO ORIGINAL

### Interpretación del recurso undimotriz con simulaciones CFD

#### Study of wave resource with CFD simulations

**\*Valdez, P; Pereiras, B; Castro, F**

*Universidad de Valladolid, España – Escuela de ingenierías industriales.  
Departamento de ingeniería energética y fluido mecánica.  
Paseo del Cauce, 59, España*

#### RESUMEN

Este trabajo es una descripción de la secuencia metodológica de procesos que concluye en resultados obtenidos a través de simulación computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) para el aprovechamiento de energía oceánica. El campo de aplicación de las herramientas CFD posee innumerables opciones para su utilización en recursos renovables, aquí nos centraremos en el método denominado de columna de agua oscilante, OWC (Oscillating Water Column), el cual convierte la energía de las olas en energía neumática para ser convertida en mecánica a través de una turbina reversible. Para que los resultados obtenidos fuesen reconocidos por la comunidad científica internacional se optó por el análisis de un sistema en particular correspondiente al comportamiento del grupo turbinado para el ciclo sinusoidal que describen las olas, desarrollando el modelo físico y numérico de la turbina; el cual ha sido modelizado mediante condiciones de contorno estacionarias y posteriormente validado a través de resultados de publicaciones correspondientes a instalaciones experimentales.

**Palabras clave:** Mecánica de Fluidos, CFD, OWC, Turbinas, Energías Renovables.

#### ABSTRACT

This work is a methodological description of the processes and concludes with the results obtained from the Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations for harnessing ocean energy. There are countless applications for CFD in renewable resources and as complement of experimental case studies. We will focus on the simulations performed using the method known as oscillating water column (OWC), which converts the energy of waves into pneumatic power so that it can be then converted into mechanical energy through a reversible turbine. In addition, we will describe the operation of a particular system for the behavior of turbine group for describing the wave cycle so the results obtained were recognized by the international scientific community. This was accomplished by developing physical and numerical models, which has been modeled by stationary boundary conditions and subsequently validated by results of publications for experimental testing in order to better study them.

**Keywords:** Fluid Mechanics, CFD, OWC, Turbines, Renewable energy.

---

*\*Autor Correspondiente: **Pablo Valdez.** Universidad de Valladolid, España – Escuela de Ingenierías Industriales. Departamento de Ingeniería Energética y Fluido mecánica.  
Paseo del Cauce, 59, 47011 Valladolid, España  
Email: pablopatriovaldez@yahoo.com*

*Fecha de recepción: marzo 2015; Fecha de aceptación: mayo 2015*

## **INTRODUCCIÓN**

Los océanos son una fuente de energía renovable que se manifiesta a través de diferentes fenómenos: mareas (mareomotriz), corrientes marinas, gradiente térmico (mareotérmica), gradiente salino y olas (undimotriz).

Refiriéndonos a energía undimotriz las olas son oscilaciones periódicas en la superficie del mar. Se forman por la acción del viento y descargan la energía acumulada (combinación de energía cinética con energía potencial) en los obstáculos que encuentran por el camino. Como toda oscilación periódica, las olas se caracterizan por la amplitud, la longitud de onda y el periodo.

El potencial energético de las olas es muy grande, las zonas de mayor potencial son las áreas costeras de las costas atlánticas europeas, Australia, el sur de África, Japón, el sur de América del Sur y el oeste de América del Norte.

Todos los sistemas transformadores de energía undimotriz deben hacer frente a tres problemas fundamentales: maximizar el rendimiento para un oleaje irregular, aguantar las cargas estructurales en condiciones climáticas extremas y acoplar la lenta frecuencia de las olas con la de la red eléctrica.

El primer antecedente de esta tecnología es de 1976, cuando el profesor Alan Wells (Queen's University, Belfast) desarrolló la primera turbina autorrectificante: la turbina Wells.

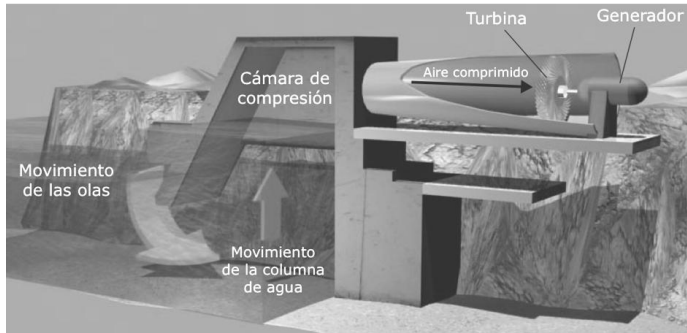
Una alternativa, la turbina de impulso axial fue propuesta en 1988 por Kim (Thakker et al., 2005) para resolver los inconvenientes de la turbina Wells; trabajos posteriores sobre este diseño han llegado a la conclusión de que es superior a la turbina Wells (Kaneko et al., 1992).

Posterior a la aparición de la turbina de impulso axial, McCormick presentó su turbina de impulso radial (McCormick et al., 1993). Estudios posteriores concluyen que la potencia máxima es mayor para la turbina axial (Setoguchi et al., 1996 y Takao et al., 2012) aunque indican que en la zona de operación donde las presiones son máximas, la turbina radial era la que más energía extraía pero la de menor rendimiento medio analizando un rango completo de operación.

El paso siguiente en el desarrollo de las turbinas de impulso axial fue implementar configuraciones que poseen dos turbinas de este tipo, a los que se llamara en el presente artículo "grupo turbinado" para diferenciarlas de la turbina individual. Estas configuraciones se crearon con el objetivo de aprovechar en mayor medida que los sistemas precedentes el trabajo generado por los dos semi ciclos que describen una ola. Se obtiene que estos grupos turbinados brindan en el rango completo de operación rendimientos mayores (Maeda et al., 2001), (Takao et al., 2011), (Jayashankar et al., 2009), (Mala et al., 2011) y (Takao et al., 2012).

Finalmente el trabajo realizado por Jayashankar (Jayashankar et al., 2010) fue la idea original que despertó el interés en desarrollar un estudio con mayor profundidad a través de simulaciones CFD.

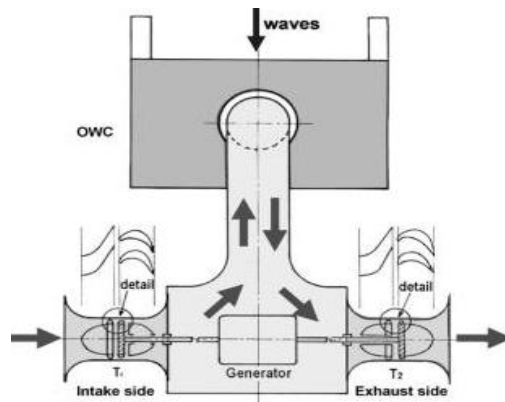
La justificación de los dispositivos basados en la tecnología OWC es que estos aprovechan la oscilación natural de la superficie libre del agua, causada por las olas, para generar una corriente de aire. Dicha corriente de aire se hace circular por una turbina conectada a un generador eléctrico, se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Instalaciones de columna oscilante de agua (OWC).

Los tres componentes principales que forman una planta OWC son: Cámara, Turbina y Generador.

La naturaleza de las olas divide el funcionamiento de los sistemas OWC en dos semi ciclos. El primero es cuando la ola avanza en dirección a la cámara e introduce agua, comprimiendo el aire disponible y elevando su presión; éste atraviesa la turbina y es expulsado a la atmósfera (se le denominara exhalación). Cuando la ola retrocede el agua abandona la cámara generando una depresión que aspira aire de la atmósfera y nuevamente éste circula a través de la turbina (se le denominara inhalación), puede verse en la Figura 2.



**Figura 2.** Sistema de turbinas gemelas axiales unidireccionales (Jayashankar et al., 2010).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las simulaciones CDF permiten realizar diseños para compararlos con las instalaciones reales y de esta forma evaluar proyectos sin erogaciones importantes de dinero previo a la construcción de prototipos.

La turbina es el elemento central de la central OWC y el más complejo de diseñar debido a que trabaja en condiciones muy desfavorables: flujo bidireccional, régimen no estacionario y un amplio rango de situaciones de funcionamiento ya que la naturaleza del oleaje es muy irregular.

Sistema de grupo turbinado con dos turbinas axiales unidireccionales, esta configuración dispone de dos turbinas unidireccionales idénticas (Jayashankar et al., 2010) y por su configuración se la identifica como un sistema de turbinas gemelas axiales unidireccionales, (Figura 2); el esquema permite describir las dos etapas de conversión de energía neumática que se desarrollan por ciclo completo de oleaje incidente.

Cada una de las dos turbinas unidireccionales idénticas que están dispuestas para funcionar alternativamente para el aprovechamiento de cada uno de los semi ciclos que describe las olas (Jayashankar et al., 2009 y 2010). Cada una de ellas extrae energía durante medio ciclo sinusoidal del oleaje cuando son sometidas al flujo bidireccional, (Takao et al., 2012).

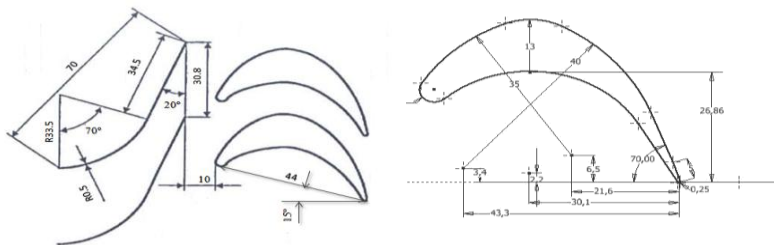
Con esta disposición de dos turbinas para un salto de presión dado (independientemente de su signo) el aire es forzado hacia los conductos donde se encuentran las turbinas, es aquí donde la mayor parte del caudal disponible atraviesa una de las turbinas, pues la otra que trabaja en sentido inverso ofrece una resistencia mucho mayor al flujo, de esta forma se busca evitar fuga de caudal que no genera prácticamente trabajo.

El primer paso en la cadena de eventos para realizar una modelización por simulación CFD de un equipo mecánico con desplazamiento de fluido es describir la geometría y la configuración del sistema generador de energía; para el caso concreto del presente estudio se trata de una turbina de impulso axial. A posterior se indican las características y el desarrollo del modelo físico y numérico; finalmente se realiza la simulación computacional CFD.

El modelo en cuestión de una única turbina utiliza para describir el funcionamiento de la turbina real en el grupo turbinado, que lo hace en ambos sentidos, invirtiendo el sentido de flujo durante las sucesivas simulaciones CFD que se han realizado.

La geometría del modelo numérico que será analizado posee las características siguientes:

- a) Estator: es el elemento fijo y posee una corona compuesta de 20 aletas directrices y no posee holgura, se las dota de un espesor de 0.5 mm, (Figura 3).
- b) Rotor: es el elemento móvil de la turbina y está formado por 30 álabes, (Figura 3).
- c) Conducto de entrada: se lo representa con una longitud de 80 mm y diámetro 300mm, es idéntico al que conecta la cámara con el estator.
- d) Conducto de salida: idéntica longitud que el anterior y representa al que conecta al rotor con la salida o atmósfera.

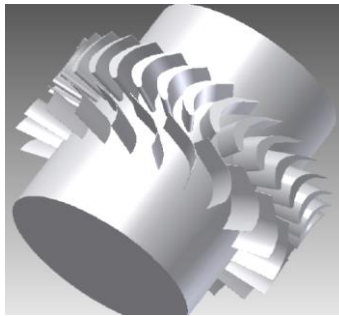


**Figura 3.** Geometrías de aleta y álabe de la turbina (Takao et al., 2011).

Un modelo físico es una serie de ecuaciones diferenciales que describen los fenómenos físicos que suceden entre el fluido y la turbina. El código Fluent resuelve estas ecuaciones de conservación de la masa, de energía y de cantidad de movimiento y así es posible conocer el comportamiento de una partícula fluida en el espacio y el tiempo. Han sido utilizadas las ecuaciones de Navier-Stokes para describir el flujo dentro de la turbina.

Condiciones de contorno: una turbina en una central OWC en la realidad funciona en forma no estacionaria porque sus condiciones de funcionamiento dependen del oleaje y por tanto se generan condiciones periódicas de caudal y presión. Basándose en la hipótesis referida al tiempo de residencia de una partícula en la turbina, se puede suponer un funcionamiento cuasi-estacionario, (Inoue et al., 1988).

Para el proceso de simulación CFD se reduce el dominio de cálculo a un solo sector angular, que representa al conjunto completo en la Figura 4; esto es posible por la periodicidad del número de aletas y álabes de la turbina. Alternativa que ahorra recursos computacionales y tiempo en los resultados.



**Figura 4.** Configuración de la turbina 3D para simulación CFD.

En el modelo numérico estudiado debido a que no es posible resolver analíticamente las ecuaciones de Navier-Stokes, se hace necesario recurrir a un método de aproximación numérica; en Mecánica de Fluidos el método más utilizado es el método de volúmenes finitos, y consiste en discretizar el dominio del problema en pequeños volúmenes llamados celdas y aplicar los balances de masa, cantidad de movimiento y energía en cada uno; siendo el centroide de cada celda el punto representativo del dominio en el que almacenan los valores de la solución.

El software empleado en la resolución del problema ha sido el código CFD comercial de uso general ANSYS© Fluent 12.1.

La generación de un mallado es necesaria para la aplicación de las técnicas numéricas por el método de volúmenes finitos en la resolución de las ecuaciones del flujo, (Thakker et al., 2005).

Las características del modelo numérico pueden verse en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resumen de las características del modelo numérico.

<b>Construcción de geometrías</b>	Autodesk© Inventor© 2011
<b>Generación de mallas</b>	GAMBIT© 2.4
<b>Código CFD</b>	ANSYS© Fluent© 12.1
<b>Mallado 3D</b>	Hexaédrico y tetraédrico, combinación de zonas estructuradas con no estructuradas.
<b>Modelo físico</b>	Fluido incompresible Velocidad/Presión en la entrada Presión en la salida
<b>Condiciones de contorno</b>	Periodicidad Entrefase Pared
<b>Turbulencia</b>	k-ε Realizable
<b>Método de resolución</b>	PBS transitorio SMM

## RESULTADOS

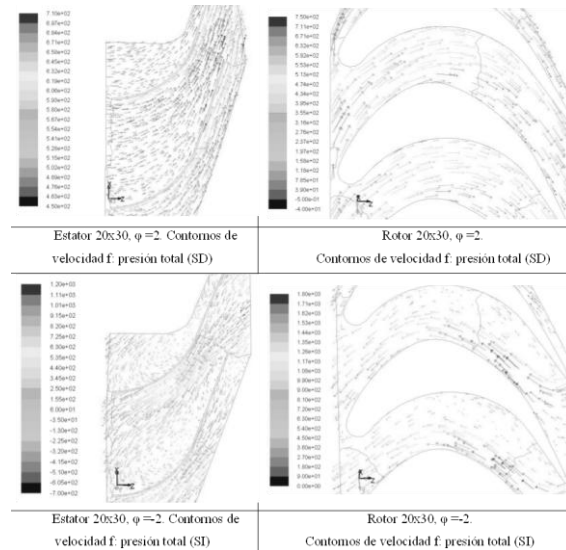
El proceso de validación se basa en la comparación de resultados experimentales con los resultados obtenidos del modelo numérico. Para validar el modelo numérico realizado se ha recurrido a resultados experimentales existentes en la bibliografía (Maeda et al., 2001, Mala et al., 2011 y Takao et al., 2011).

El análisis del comportamiento del flujo por simulación CFD modelo numérico permite comprender el comportamiento del flujo en el interior de la turbina. Se utilizan los coeficientes característicos y los ángulos de guiado de forma de conocer con precisión como interactúa el diseño en los resultados del conjunto. Debido a la limitante de extensión del presente artículo se presenta sólo un resumen de los resultados logrados.

Las conclusiones de este análisis permitirán establecer los criterios para rediseñar la geometría del equipo y proponer alternativas cuyas prestaciones superen al de la geometría original (Takao et al., 2011). Estos diseños serán factibles a publicar en una etapa sucesiva.

Metodología y secciones de análisis: el modelo computacional de la turbina axial estudiada está compuesto por cuatro volúmenes: conducto de entrada, estator, rotor y conducto de salida. Para analizar la evolución del flujo en los dos elementos principales que contienen las aletas directrices (estator) y los álabes (rotor) se han realizado una serie de cortes (planos transversales al eje de rotación y cilindros coaxiales también al eje de rotación) que permiten un análisis más detallado en las secciones fronteras entre los volúmenes.

Ha sido estudiado el comportamiento de los vectores de velocidad y la energía de presión total, para todos los coeficientes de caudal ( $\varphi$ ) en los cuales se han realizado las simulaciones CFD. A continuación se presentan los resultados más relevantes; correspondientes a la máxima velocidad del flujo donde los eventos se hacen más evidentes. Los resultados corresponden a un coeficiente de flujo  $\varphi=2$  en sentido directo (SD) y  $\varphi=-2$  en sentido inverso (SI); donde se identifica a la geometría original (Takao et al., 2011) de 20 aletas directrices y 30 álabes, en la Figura 5.



**Figura 5.** Contornos de velocidad en la geometría

## DISCUSIÓN

El diseño y las posteriores simulaciones CFD realizadas correspondientes al sistema generador a partir de energía oceánica ha permitido obtener resultados acordes a las tendencias que muestran las instalaciones experimentales difundidas por la comunidad científica para la tecnología OWC.

Las metodologías utilizadas en el caso de estudio presentadas pueden ser conducidas a estudios de otras temáticas de análisis que permitan el relevamiento de datos sobre las condiciones particulares de proyectos en las costas argentinas y su posibilidad de aprovechamiento de la energía oceánica.

Las líneas de investigación de otros grupos de I+D podrían incrementar su grado de conocimiento al implementar el uso de modelos numéricos que simulen la realidad y su posterior validación experimental a través de análisis de comportamiento del flujo para predecir resultados de las propuestas a ser evaluadas por inversores.

El interés siguiente radica en realizar a través de las técnicas presentadas en este artículo, correspondientes al modelado, validación y simulación, sucesivos aportes a los grupos de I+D+i presentes en Argentina y en etapa de desarrollo de una amplia gama de tecnologías referidas a proyectos energéticos.

Para el sistema de obtención de energía oceánica estudiado, en particular la tecnología OWC, la turbina es un elemento principal encargado de transformar el recurso neumático en potencia mecánica y posteriormente en eléctrica a través de un generador.

Las conclusiones obtenidas destacadas se presentan en los párrafos siguientes; diferenciando en particular cada estudio con el objeto de no enmascarar resultados.

Análisis del comportamiento del flujo: El ángulo geométrico de entrada del estator es adecuado cuando el fluido circula en sentido directo donde las pérdidas por choques son despreciables y las pérdidas son imputables

mayoritariamente al rozamiento. Para el caso del sentido inverso el efecto buscado se logra, pues los resultados muestran que las aletas guías entorpecen el avance del flujo generando pérdidas muy elevadas.

Se observa en la Figura 5 que los vectores de velocidad para el sentido directo (SD) en el estator están alineados con el ángulo geométrico y presentan una distribución no uniforme de presión total a medida que avanzan por el perfil propuesto por las aletas; así se identifican en las estelas los puntos de presión total menor. También se puede observar un leve desprendimiento en la cara convexa de la aleta, que hace que aumente la velocidad del flujo por la zona cóncava. Este desprendimiento parece nacer al final del tramo curvo de la aleta.

En el rotor, el flujo penetra en el canal del rotor sin producir apenas desprendimiento en el borde de ataque. En la primera parte del rotor el flujo es correctamente conducido por el rotor. Sin embargo, cuando se produce la deflexión del flujo el flujo se desprende del extradós. Esto provoca que en la salida el flujo no salga perfectamente guiado por el álabe.

Analizando el sentido inverso (SI) se observa que los vectores de velocidad chocan al ingresar en el rotor, zonas con flujo desprendido y careciendo de distribución uniforme de la presión total dentro del canal; abandonan el rotor según el ángulo propuesto por el perfil del álabe. Al penetrar en el estator se produce de nuevo un fuerte desprendimiento del flujo, que origina una fuerte pérdida de energía; y el canal se bloquea parcialmente debido al flujo desprendido provocando altas velocidades.

## RECONOCIMIENTOS

Al Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Valladolid, España donde fue desarrollada la investigación y al proyecto de EADIC, programa de movilidad de la Unión Europea, Universidad de Bologna-Italia que financió la beca doctoral del primer autor.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Inoue, M., Kaneko, K., Setoguchi, T., & Saruwatari, T. (1988). Studies on the wells turbine for wave energy generation (Turbine characteristics and design parameter for irregular wave). *JSME International Journal*, 31, 676-682.
- Jayashankar, V., Anand, S., Geetha, T., et al. (2009). A twin unidirectional impulse turbine topology for OWC based wave energy plants. *Renewable Energy*, 34,692-698.
- Jayashankar, V., Mala, K., Jayaraj, J., et al. (2010). A twin unidirectional turbine topology for wave energy. *Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy*. Bilbao, Spain.
- Kaneko, K., Setoguchi, T., & Raghunathan, S. (1992). Self rectifying turbines for wave energy conversion. *International Journal of offshore and Polar engineering*, 2.
- Maeda, H., Takao, M., Setoguchi T., et al. (2001). Impulse turbine for wave power conversion with air flow rectification system. *International Offshore Polar Engineering Conference*. Stavanger, Norway, June 17-22.
- Mala, K., Jayara, J, Jayashankar, V., et al. (2011). A twin unidirectional impulse turbine topology for OWC based wave energy plants – Experimental validation and scaling. *Renewable Energy*, 36: 307-314.
- McCormick, M., & Cochran, B. (1993). A performance study of a bi-directional radial turbine. *Proceedings of the European Wave Energy Symposium*. Edimburgh, pp. 443-448.



- Setoguchi, T, et al. (1996). Impulse turbine with self-pitch-controlled guide vanes for wave power conversion: guide vanes connected by links. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 6, 76-80.
- Takao, M., Takami A., Okuhara S., et al. (2011). A twin unidirectional impulse turbine for wave energy conversion. *Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental computational Aerothermodynamics of Internal Flows*. 4-7 July 2011, Brussels, Belgium. ISAF10-101.
- Takao M. & Setoguchi T. (2012). Air turbines for wave energy conversion. Hindawi Publishing Corporation. *International Journal of Rotating Machinery*. Article ID 717398.
- Thakker, A. and Dhanasekaran, T. S. (2005). Experimental and computational analysis on guide vane losses of impulse turbine for wave energy conversion. *Renewable Energy*, 30,1359–1372.