

# MODELO NUMÉRICO CFD PARA EL ANÁLISIS TERMODINÁMICO EN APLICACIONES DE INGENIERÍA COSTERA

Paola Elizabeth Rodríguez-Ocampo<sup>1</sup>, Juan Carlos Alcérreca-Huerta<sup>2</sup>, Rodolfo Silva Casarín<sup>1</sup>  
y Edgar Mendoza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – El Colegio de la Frontera Sur (CONACYT - ECOSUR), Chetumal, Quintana Roo, México.

E-mail: PRodriguezO@iingen.unam.mx, jcalcerreca@conacyt.mx, RSilvaC@iingen.unam.mx, EMendozaB@iingen.unam.mx

## Introducción

En estudios de Ingeniería Costera resulta fundamental el análisis de diversos procesos que involucran alta variabilidad en la dirección y velocidad de flujo, como es la interacción entre fluidos con diferentes densidades y temperaturas. Entre algunas de las aplicaciones que requieren un análisis detallado de flujos multifásicos y su comportamiento termodinámico, se puede mencionar: i) las descargas de agua subterránea en zonas costeras (e.g. ojos de agua), ii) descargas de agua al mar en plantas termoeléctricas o nucleoelectricas, iii) descargas de aguas residuales y, más recientemente, iv) las descargas de agua en plantas de generación de energía por gradiente térmico oceánico (OTEC, por sus siglas en inglés).

Debido a sus implicaciones en el diseño y desarrollo de tecnología, pero sobre todo a los impactos ecológicos que pudieran provocar dichas aplicaciones, es de vital importancia entenderlas desde los puntos de vista hidráulico y termodinámico en forma simultánea. Lo anterior a fin de generar la capacidad de predecir escenarios con baja incertidumbre y de proveer herramientas que permitan la toma de decisiones respecto de su manejo u operación, según sea el caso.

Al respecto, el modelado numérico CFD (Computational Fluid Dynamics) constituye un instrumento que permite evaluar detalladamente análisis paramétricos y escenarios con el fin de definir la importancia e interacción de las variables asociadas al comportamiento termo e hidrodinámico.

El presente trabajo presenta el desarrollo de un modelo CFD capaz de representar numéricamente el flujo multifásico considerando las variaciones térmicas y de densidades, sumando la implementación de condiciones de oleaje, corrientes y flujos a superficie libre para aplicaciones en ingeniería costera.

## Descripción del modelo numérico

Con el fin de resolver el análisis termodinámico en aplicaciones de ingeniería costera OpenFOAM® se eligió como el software de CFD más adecuado al ser un software libre y de código abierto, que permite modificar el código de programación de acuerdo a las necesidades de simulación requeridas (OpenCFD Ltd (ESI Group), 2017). Asimismo, dicho software se basa en la programación orientada a objetos del lenguaje C++, lo que permite que la combinación, creación o extensión de librerías por medio de la adición/modificación de módulos al código existente (Tomislav et al., 2014).

Para el desarrollo del modelo numérico aquí presentado, se partió de un módulo existente de OpenFOAM® capaz de resolver la interacción de 3 fases fluidas (dos de ellas miscibles), que fue validado por Rodríguez-Ocampo (2016) considerando distintos modelos de turbulencia.

La ecuación de conservación de momentum [1], ecuación de conservación de masa [2], ecuación de conservación de cantidades escalares [3], ecuación de la fracción de volumen [4] (método VOF), y ecuación de conservación de la energía [5], corresponden a las ecuaciones de gobierno implementadas en el modelo desarrollado:

$$\rho \left( \frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U \right) = \mu \nabla^2 U - \nabla p + \rho g \quad [1]$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad [2]$$

$$\rho \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + U \cdot \nabla \phi \right) = D \nabla^2 \phi + q_\phi \quad [3]$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + U \cdot \nabla \gamma + \nabla \cdot (U_r \gamma (1 - \gamma)) = 0 \quad [4]$$

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + q_\phi \quad [5]$$

donde  $t$  es el tiempo,  $U$  velocidad,  $\rho$  densidad del fluido,  $\mu$  viscosidad dinámica,  $p$  presión,  $g$  aceleración de la gravedad,  $\phi$  cantidad escalar,  $D$  coeficiente de difusividad,  $\gamma$  un campo escalar para la identificación de las distintas fases,  $U_r$  velocidad relativa,  $c_p$  capacidad calorífica específica,  $T$  temperatura,  $k$  conductividad térmica, y  $q_\phi$  un término fuente.

En particular, las ecuaciones [1] y [2] corresponden a las ecuaciones de Navier-Stokes (Ferziger and Peric, 2002), las cuales son resueltas por el modelo considerando el promedio de Reynolds, i.e. las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Por otra parte, para obtener la interfaz entre las fases miscibles y la no miscible (e.g. dos fases líquidas y una gaseosa), se emplea el método del volumen de fluido (VOF por sus siglas en inglés) (ecuación [4]), el cual asigna a  $\gamma$  el valor de 0 para la fase gaseosa, 1 para la fase líquida y valores entre 0 y uno en la interfaz de ambos. Finalmente, para modelar la mezcla entre las fases líquidas, las ecuaciones antes mencionadas son acopladas con la ecuación [3], que involucra al coeficiente de difusividad  $D$  para llevar a cabo el proceso de mezclamiento entre las fases. De la misma forma, se añadieron las ecuaciones correspondientes a la generación y absorción del oleaje, para representar el comportamiento hidráulico en una descarga de agua en el mar. La implementación de dichas ecuaciones de oleaje en OpenFOAM®, se desarrolló considerando la técnica de zonas de relajación presentada y descrita por Jacobsen *et al.*, (2012).

La aportación al desarrollo y escalamiento del modelo numérico consistió fundamentalmente en acoplar las ecuaciones [1], [2], [3], y [4] con la ecuación [5], a fin de incorporar la variación de la temperatura y el estado de equilibrio térmico. Para ello, se introdujo la ecuación de la energía en el modelo, de tal forma que resolviera un sistema diabático; es decir, se establece el equilibrio térmico entre las dos fases líquidas miscibles. Debido a que el mayor intercambio de calor ocurre entre las fases líquidas, y para optimizar el modelo, el equilibrio térmico solamente se plantea entre dichas fases. En otras palabras, la interfaz agua-aire se establece como adiabática y considerando, por simplicidad del modelo, al término fuente  $q_\phi$  como 0 para este trabajo.

Para cada una de las tres fases del modelo, se ingresan como datos la viscosidad cinemática y la densidad. En el caso de las fases líquidas, también se requiere ingresar sus respectivos números de Prandtl, capacidad calorífica específica y coeficiente de difusividad entre ambas. Así, la conductividad térmica  $k$  en la mezcla se obtiene por medio de la ecuación [6]

como:

$$k = \alpha_1 \rho_1 \frac{c_{p1}}{Pr_1} + \alpha_2 \rho_2 \frac{c_{p2}}{Pr_2} \quad [6]$$

Por su parte, la capacidad calorífica específica para la mezcla, así como el flujo de calor, se obtienen respectivamente como:

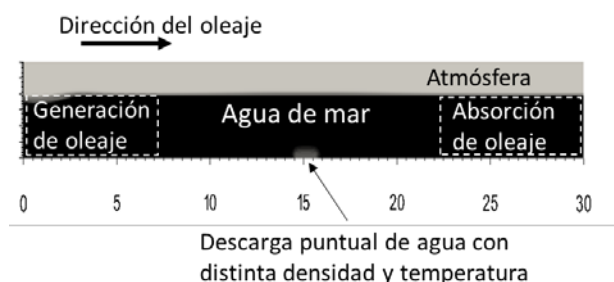
$$\rho * c_p = \alpha_1 \rho_1 c_{p1} + \alpha_2 \rho_2 c_{p2} \quad [7]$$

$$\rho * \varphi * c_p = \alpha_1 * \varphi * \rho_1 c_{p1} + \alpha_2 \rho_2 \varphi c_{p2} \quad [8]$$

En el modelo desarrollado las ecuaciones [6], [7] y [8] representan los términos asociados a la derivada parcial con respecto al tiempo, la divergencia y el laplaciano respectivamente de la ecuación de conservación de la energía [5]; la cual, como se mencionó anteriormente, se acopla con las ecuaciones de gobierno restantes.

### Calibración del modelo numérico

Para demostrar el funcionamiento del modelo generado, se planteó un caso simplificado, que representa la descarga de agua en el fondo marino (**Figura 1**). Para fines ilustrativos, este caso se resolvió en dos dimensiones y con el modelo de turbulencia más simple (zero-equation); sin embargo, cabe señalar la capacidad del modelo de realizar simulaciones tridimensionales y considerando diferentes modelos de turbulencia tipo RAS o LES.



**Figura 1.-** Dominio del caso de descarga de agua en el fondo marino.

El dominio computacional es de 30 m de largo por 3 m de alto. El fondo es horizontal y en el centro se impone una descarga puntual de agua. El nivel del agua considera una elevación de 2 m y densidad de  $1030 \text{ kg/m}^3$ , para representar el agua de mar. Respecto al campo de temperatura, se estableció una condición inicial dentro del dominio de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . En la frontera asociada a la descarga submarina, se asignó la temperatura de salida ( $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ) así como la velocidad de salida del flujo ( $0.2 \text{ m/s}$ ) y una densidad de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

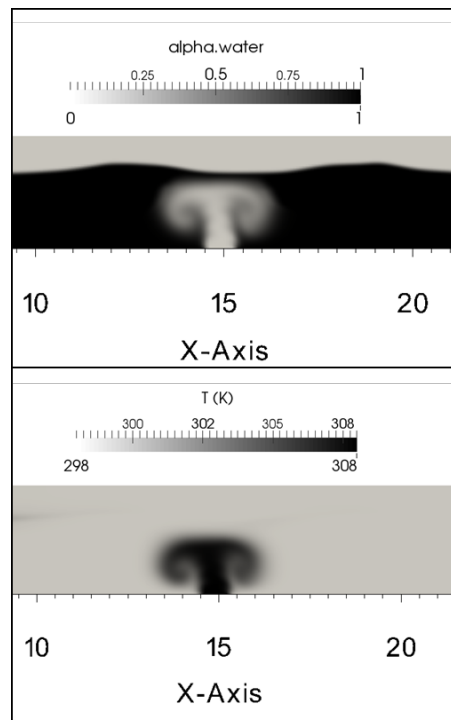
Asimismo, se estableció una zona de generación de oleaje en el extremo izquierdo del dominio, así como una zona de absorción en el extremo derecho.

Se consideró un tiempo de simulación de 20 segundos, tiempo en el cual se observó la descarga de agua con distinta densidad y temperatura al medio, la propagación del oleaje y la mezcla entre las fases líquidas (**Figura 2**).

### Discusión y conclusiones

En la **Figura 2** se observa que la distribución del campo escalar de la fase que ingresa a través de la descarga en el mar, sigue un patrón similar a la del campo escalar correspondiente a la temperatura de dicha fase, tal como se esperaba. El siguiente paso en esta investigación consistirá en validar el modelo numérico con las adecuaciones desarrolladas a través de experimentos representativos de laboratorio, que permitan

comparar la distribución del campo escalar de la temperatura y estimar el error y las limitantes del modelo. Después de dicha validación, se podrá desarrollar la calibración en un caso de estudio real in-situ y comparar con las mediciones obtenidas en campo.



**Figura 2.-** Resultados después de 20 s de simulación para las fases (alpha) y para el campo de temperatura (T).

Con ello, el modelo desarrollado podría ser implementado en la simulación de detalle de procesos de ingeniería costera que involucren factores como oleaje, corrientes, turbulencia, y la descarga submarina de un fluido con diferente densidad y temperatura. Cabe señalar que otro factor que influye notablemente en los resultados del comportamiento del flujo, es el modelo de turbulencia elegido, por lo que se debe tomar en cuenta el efecto de éste en las simulaciones. Es importante mencionar también que el modelo desarrollado no contempla cambios de fase (e.g. ebullición), por lo que se debe cuidar el rango de temperaturas entre el medio y el fluido de entrada.

La herramienta aquí presentada muestra el potencial de aplicación para análisis detallado del comportamiento hidro- y termodinámico de fluidos en sistemas y aplicaciones costeras. No obstante, es fundamental considerar las limitaciones y suposiciones que el modelo plantea y que pueden ser optimizadas en futuros trabajos.

### Referencias bibliográficas

- Ferziger, J.H., Peric, M.**, 2002. Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd ed, Vasa. Springer. doi:10.1016/S0898-1221(03)90046-0
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R., Fredsøe, J.**, 2012. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam. Int. J. Numer. Methods Fluids 1073–1088. doi:10.1002/flid
- OpenCFD Ltd (ESI Group)**, 2017. OpenFOAM. The open source CFD toolbox [WWW Document]. URL <https://www.openfoam.com/> (accessed 2.26.18).
- Rodríguez-Ocampo, P.E.**, 2016. MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS MULTIFÁSICOS: INTERACCIÓN DEL OLEAJE CON DESCARGAS SUBMARINAS DE AGUA DULCE. UNAM, Mexico.
- Tomislav, M., Höpken, J., Mooney, K.**, 2014. The OpenFOAM Technology Primer, First. ed. Sourceflux, Germany.