



Prototipaje y pilotaje virtual de procesos para potenciar la eficacia de la industria 4.0

Los avances en la capacidad computacional han permitido tener una mejor disponibilidad de herramientas que buscan superar los desafíos que enfrenta el manejo y gestión del agua en procesos industriales. En este contexto, la integración del prototipaje (CAD, *computer assisted design*) y del pilotaje virtual de estos sistemas mediante dinámica de fluidos computacional (CFD, *computational fluid dynamics*) permite predecir flujo de fluidos, transferencia de masa y calor, reacciones químicas y otros fenómenos de transporte, por medio de la resolución numérica de las ecuaciones de conservación que gobiernan los sistemas. El prototipaje y pilotaje virtual (PPV) permite responder preguntas del tipo: ¿qué pasa si...? El objetivo de PPV es potenciar la eficacia de la industria 4.0, previniendo errores y prediciendo comportamientos, algo que conllevaría un mayor coste de dinero o tiempo si se hiciera con un modelo en mundo real.

Palabras clave

Modelación, prototipaje, pilotaje, virtual, CAD, CFD.

VIRTUAL PROTOTYPING AND PILOTING OF PROCESSES TO ENHANCE THE EFFECTIVENESS OF INDUSTRY 4.0

Advances in computational capacity have made possible to have better availability of tools that seek to overcome the challenges faced by the handling and management of water in industrial processes. In this context, the integration of prototyping (CAD, computer assisted design) and virtual piloting using computational fluid dynamics (CFD) allows predicting fluid flow, heat and mass transfer, chemical reactions, and other transport phenomena. This is achieved through the numerical resolution of the conservation equations that govern the systems. Virtual prototyping and piloting (PPV) allow us to answer questions such as what happens if ...? The objective of PPV is to enhance the effectiveness of Industry 4.0, preventing errors and predicting behaviors, something that would lead to a higher cost of money or time if it were done with a real-world model.

Keywords

Modelling, prototyping, piloting, virtual, CAD, CFD.

José Ignacio Rivas Cifuentes
ingeniero de Simulaciones de
Procesos de la Corporación Chilena de
Investigación del Agua, Cetaqua Chile

José Luis Baquedano Caprile
ingeniero de Recursos Hídricos de la
Corporación Chilena de Investigación
del Agua, Cetaqua Chile



1. INTRODUCCIÓN

El diseño y la optimización energética o de producción en los sistemas de agua en la industria constituye en ocasiones un desafío ante la complejidad de los procesos involucrados, la cantidad de variables asociadas y la dificultad para representar el comportamiento de las distintas fases (líquidos, gases, etc.).

Una solución a esta problemática es el uso de gemelos virtuales para la representación de los fenómenos o procesos industriales que se desea evaluar. Para ello se recurre a la discretización espacial y temporal del dominio de interés, la selección de condiciones iniciales y de borde del proceso y la selección de ecuaciones que permitan representar de manera adecuada la química y la física involucradas.

En este trabajo se presentan dos casos de aplicación de prototipaje y pilotaje virtual (PPV). En primer lugar, se describe el diseño y distribución de difusores de aire en las jaulas de una granja de salmones y su efecto en el impedimento de la irrupción de algas nocivas (HAB: *harmful algae bloom*), mientras que en el segundo caso se representa la descarga al mar de la salmuera rechazo de una planta desaladora de ósmosis inversa.

2. METODOLOGÍA

Los trabajos presentados se llevaron a cabo con *softwares* de código abierto. El PPV se desarrolló con OpenFOAM (*Open Source Field Operation and Manipulation*), que es una herramienta de simulación de fenómenos descritos por la interacción de fluidos, como reacciones químicas y transferencia de calor, masa y cantidad de movimiento. Para su correcta aplicación se siguen tres etapas.

2.1. PREPROCESADO

El primer paso es construir la geometría del sistema que se quiere representar, para luego proceder a discretizar el dominio ya construido en celdas o nodos para generar el mallado. El diseño de la geometría y malla se construyó con el *software* de código abierto SALOME, compatible con OpenFOAM. Las celdas fueron construidas bajo la evaluación de distintas métricas de calidad del mallado (relación de aspecto, no ortogonalidad y asimetría), que aseguran la convergencia y representatividad de los resultados. Posteriormente, se debe especificar el modelo, es decir, definir el *set* de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) que van a ser resueltas, y especificar las condiciones de borde. Todos los fenómenos pueden ser expresados en una misma fase o en sistemas multifásicos (por ejemplo líquidos o gases). También se debe definir si el régimen de flujo será laminar o turbulento.

2.2. PROCESADO

Aquí se incluye la selección de los *solvers* (funciones que se encargarán de la resolución del problema), las condiciones de borde y la elección de los criterios de convergencia. Debido a que todas las ecuaciones a resolver están acopladas (vinculadas entre sí), la solución se debe obtener de manera iterativa hasta que la convergencia establecida sea alcanzada. Con respecto a las condiciones de borde, es necesario que sean definidas adecuadamente para mantener la convergencia en la resolución numérica.

En estos trabajos se definieron condiciones de borde SymmetryPlane, brindando paredes tipo espejo en las zonas laterales del dominio, generando un reflejo al otro lado

de este y garantizando así la continuidad; y FixedFluxPressure, que se establece como una condición en la que el gradiente de presión es igual a cero, pero la gravedad y el tensor de tensión están presentes, actuando como complemento del plano de simetría. Los criterios de convergencia mayormente utilizados involucran el análisis de los residuales, es decir, la diferencia entre la iteración actual y la anterior para cada nodo o celda. Para asegurar la convergencia de la solución, esta diferencia se debe mantener en valores menores a 10^{-3} , valor que representa un criterio aceptable de dicha convergencia.

2.3. POSTPROCESADO

La solución genera una gran cantidad de datos que deben ser procesados para obtener resultados con significado. Para esto se puede usar el mismo *software* o alguna otra herramienta para presentar la geometría y la malla, gráficos de contornos de los flujos, líneas de corriente y vectores, dependiendo del objetivo que se busca. En este trabajo se utilizó el *software* ParaView, también de código abierto, para la visualización de los datos entregados por las simulaciones y dar una representación gráfica de estos.

3. RESULTADOS

3.1. IRRUPCIÓN DE MICROALGAS EN GRANJA DE SALMONES

Para el caso del control del *bloom* micro algal en granjas de salmones se definió un escenario de control y dos alternativas de solución. El escenario de control (C) consiste en un dominio con los difusores a 15 metros de profundidad, pero sin actividad y con una velocidad de agua estratificada (velocidad constante

por capas, presentando una mayor velocidad cerca de la superficie del mar que en el fondo) que se mueve de un extremo a otro en dirección longitudinal.

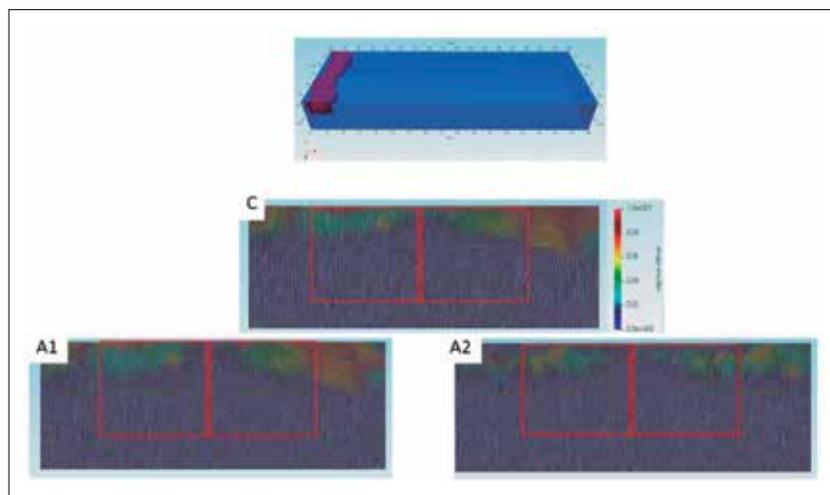
Respecto a las alternativas de solución solicitadas por el cliente, los difusores se encuentran a 15 m (A1) y 10 m (A2) de profundidad, respectivamente. En ambos escenarios se encuentran activos los difusores con una velocidad de difusión de 6 m/s y la entrada de agua al dominio es también estratificada.

Una vez que la simulación de dos fases (líquido-gas) está bien desarrollada (por ejemplo, ha pasado el tiempo suficiente para tener resultados estables), se incorpora un tercer fluido, que simula la presencia del *bloom* micro algal. Este fluido tiene una densidad similar a la del agua y representa la presencia de las microalgas que pueden aparecer alrededor de las granjas de salmones.

El modelo utilizado se basa en la formulación tipo Euler-Euler para múltiples fluidos, con un mallado de 282.851 subdivisiones compuestas por tetraedros con una variabilidad de 0,05 a 4,00 m en sus dimensiones. Se empleó un modelo turbulento $k-\epsilon$ estándar. Estas simulaciones se realizaron para cada escenario, con el objetivo de evaluar la capacidad de los difusores para desviar el *bloom* micro algal. Cada simulación tardó aproximadamente 72 h en completarse utilizando el servidor en Amazon Web Services.

La **Figura 1** muestra una vista frontal en sección transversal a 30 m dentro del dominio, que enseña cómo el fluido agregado, que representa el *bloom* micro algal (área coloreada), es transportado por los campos de agua y se ve afectado por la presencia de los difusores de aire. El escenario de control (C)

FIGURA 1. Representación del ingreso de microalgas a cultivos de salmones.



muestra una penetración completa del *bloom* micro algal.

En cuanto a la comparación entre los resultados para A1 y A2, cualitativamente se puede observar que la alternativa A1 presenta una presencia más dispersa de algas en comparación con C. En la alternativa A2, en cambio, este efecto es más significativo que el observado en A1, alrededor de la zona donde se encuentran los peces. Además, la concentración en A2, representada por el color del fluido de la microalga, tiene un efecto más suave.

Por lo tanto, estos resultados cualitativos muestran que el uso de difusores de aire tiene un impacto positivo en la disminución de la presencia de algas en las jaulas de peces y su posición. Para tener una estimación más cuantitativa de la influencia de los difusores de aire, y así evitar la penetración del *bloom* micro algal, se ha ubicado un sensor virtual que monitorea la concentración de algas a lo largo y ancho del dominio en una coordenada definida, acotada a la región que contiene las granjas de salmones.

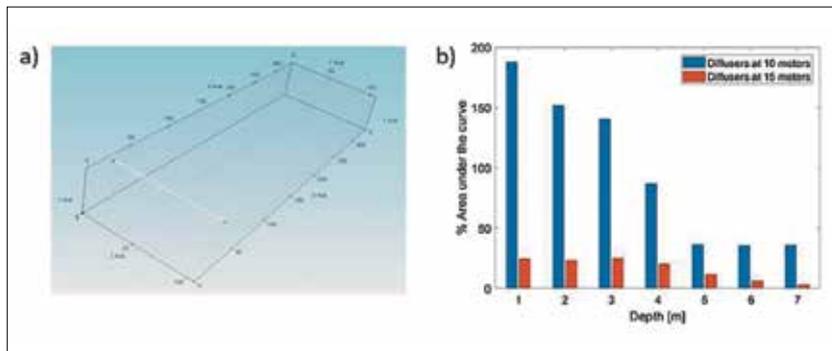
Con los resultados de las mediciones del sensor virtual, se propone una metodología de comparación

basada en áreas para valorar el efecto de los difusores respecto del escenario de control (C). Esta consistió en calcular la mediana de la concentración del marcador a cada altura para cada alternativa. Los resultados del escenario de control (C) se utilizaron como referencia para calcular la eficiencia de los difusores para las alternativas de solución. El valor mediano de la concentración de microalgas, representado por una línea recta horizontal, se utilizó para establecer el límite, de modo que se pudo calcular el área formada entre esta línea y los perfiles de concentración reales.

Se puede observar que para la primera alternativa de solución (A1, difusores a una profundidad de 15 m) la concentración de algas se reduce hasta un 25%, a medida que se acerca a la superficie, en comparación con el escenario de control. Al acercar los difusores cinco metros a la superficie (A2, profundidad de 10 m), esta reducción aumenta hasta en un 190% respecto a los valores observados en el escenario de control (C), lo que puede asociarse a una reducción (una protección) del 75% del *bloom* micro algal en las capas superiores. Como conclusión,



FIGURA 2. Comparación del desempeño de los escenarios sobre la penetración de la floración de algas. (a) Ubicación del sensor virtual (línea blanca); (b) Variación del área bajo la curva de referencia de concentración de algas para A1 (barra naranja) y A2 (barra azul) entre 1 y 7 m de profundidad.



cuanto más cerca de la superficie, mejor es la dispersión que generan los difusores sobre el ingreso del *bloom* micro algal en la granja de salmones (A2) (Figura 2).

3.2. DESCARGA DE SALMUERA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA

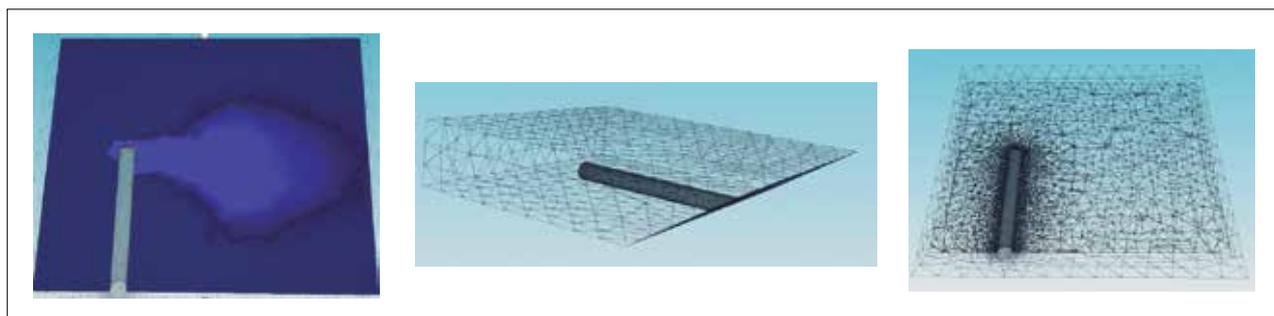
En este trabajo se analizó la descarga desde una planta desaladora de ósmosis inversa. En este caso el dominio corresponde a una sección de mar circundante al emisario submarino, estableciéndose como condición de borde la entrada de la corriente de agua de mar de forma perpendicular a la tubería que libera la salmuera.

El objetivo de este trabajo consistió en determinar una estrategia para disminuir el impacto de la pluma generada en la descarga desde

el emisario submarino. Para ello se consideraron los siguientes casos: utilizar una única tubería (Figura 3), dividir la descarga en dos tuberías, descargar el efluente desde la parte inferior de la tubería y descargar el efluente en sentido contrario a la corriente del mar.

En la Figura 3 se puede apreciar cómo se genera la pluma de salmuera en una de las hipótesis estudiadas. El análisis de diferentes casos permite identificar, en función de los campos de velocidad de las corrientes marinas y del perfil de la costa, parámetros como la longitud óptima del emisario, las características geométricas de este y otros aspectos constructivos de cara a que la pluma de descarga obtenida garantice el nulo impacto en el entorno marino.

FIGURA 3. Evaluación de la pluma de salmuera.



4. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentaron dos aplicaciones de utilización del PPV para analizar, evaluar y resolver problemas o desafíos en la gestión del agua en la industria. Estos ejemplos corresponden a procesos complejos para realizar pilotajes físicos, como la descarga de efluentes en cuerpos receptores o la incorporación de *bloom* micro algal en cultivo de salmones. Por ello, representando sus respectivos procesos de manera virtual, es posible analizar y mejorar sus rendimientos previamente a su implementación en terreno mediante el uso de PPV.

Bibliografía

- [1] Fan, W.; Pan, Y.; Liu, C.C.K.; Wiltshire, J.C.; Chen, A.; Chen, Y. (2015). Hydrodynamic design of deep ocean water discharge for the creation of a nutrient-rich plume in the South China Sea. *Ocean Eng.*, núm. 108, págs. 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.006>.
- [2] Friedrichs, K. (1967). On the partial difference equations. Págs. 215-234.
- [3] Gullberg, R. (2017). Computational fluid dynamics in OpenFOAM Mesh Generation and Quality. Págs. 1-26.
- [4] Olsen, J.E.; Skjetne, P. (2016). Modelling of underwater bubble plumes and gas dissolution with an Eulerian-Lagrangian CFD model. *Appl. Ocean Res.*, núm. 59, págs. 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.06.001>.
- [5] Sarhan, A.R.; Naser, J.; Brooks, G. (2018). CFD modeling of bubble column: influence of physico-chemical properties of the gas/liquid phases properties on bubble formation. *Sep. Purif. Technol.*, núm. 201, págs. 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.02.037>.
- [6] Servati, P.; Hajinezhad, A. (2020). CFD simulation of anaerobic digester to investigate sludge rheology and biogas production. *Biomass Convers. Biorefinery*, núm. 10, págs. 885-899.
- [7] Smith, B.L. (1998). On the modelling of bubble plumes in a liquid pool. *Appl. Math. Model.*, núm. 22, págs. 773-797.