



## X SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

### APLICACIÓN DE MODELADO CFD EN PROYECTOS DE DESALACIÓN

**JOSÉ M. OSSA VILLALÓN<sup>1</sup>**  
**JOSÉ GALLARDO CANABES<sup>2</sup>**

#### RESUMEN

En el contexto de la crisis hídrica y cambio climático, se presenta la aplicación de un modelo CFD para evaluar el aumento de capacidad de una sentina de bombas que suministra agua de mar a una planta desaladora existente. El uso de esta herramienta permite resolver con gran detalle flujos complejos, complementando de esta forma técnicas más convencionales de hidráulica marítima y permitiendo tomar decisiones de diseño. Esta aplicación en particular muestra como las nuevas condiciones de flujo resultan en una alta presencia de estructuras coherentes en el flujo, visualizadas como vórtices, que representan un riesgo para la operación de la sentina según criterios de ANSI/HI-9.8. Ante esto, es conveniente considerar posibles medidas de mitigación, lo que se plantea como trabajo futuro. Sobre la base de los resultados presentados, cabe destacar el gran potencial que tienen este tipo de modelos CFD en las etapas tempranas y avanzadas de la ingeniería de obras costeras y marítimas.

---

<sup>1</sup> PRDW Consulting Port & Coastal Engineers, jossa@prdw.com

<sup>2</sup> PRDW Consulting Port & Coastal Engineers, jgallardo@prdw.com

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a la crisis hídrica que ha afectado a Chile los últimos años, se ha generado un creciente interés por proyectos de desalación, tanto para consumo humano como para procesos industriales. De esto último, destacan como ejemplo las industrias mineras y de energía. Mientras que la minería requiere agua para procesos como la lixiviación, la incipiente industria del hidrógeno verde (H2V) requiere este insumo para el proceso de electrólisis. Sin embargo, la mayoría de los proyectos mineros y de H2V se emplazan en zonas con escasez hídrica, como por ejemplo el norte de Chile y algunos sectores de la región de Magallanes. Por este motivo, muchos de estos proyectos incorporan plantas desalinizadoras como parte de su infraestructura.

En este escenario, la reutilización o repotenciamiento de infraestructura existente en el contexto de proyectos de desalación se presenta como una oportunidad atractiva. Esto debido a que, en términos de permisos y conservación de recursos naturales, es muy conveniente intervenir un área previamente utilizada con fines industriales. Sin embargo, los nuevos requerimientos de diseño pueden requerir adaptaciones de la infraestructura que deben ser verificadas en una etapa temprana de los proyectos.

Siguiendo esta línea, las técnicas de fluidodinámica computacional (CFD por sus siglas en inglés) se presentan como una herramienta con alto potencial, al permitir evaluar distintos escenarios de diseño en plazo y costos muy convenientes en comparación con otras metodologías como modelos físicos. De este modo, las adaptaciones requeridas pueden ser verificadas y optimizadas mediante CFD antes de proceder el diseño de detalles.

El presente trabajo tiene como objetivo ilustrar la aplicación de modelos CFD mediante la verificación de una sentina de bombas de una planta desaladora para un aumento de su capacidad. Para ello, se requieren simulaciones de alta fidelidad que permitan examinar el campo de flujo al interior de la sentina. De este modo, se puede determinar si existen vórtices o zonas de recirculación que puedan afectar el desempeño hidráulico de las bombas.

## 2. METODOLOGÍA

Se utiliza un modelo CFD con capacidad para resolver el flujo al interior de una estructura hidráulica compleja, como la sentina de bombas. Esta técnica permite reducir tiempos y costos asociados a la optimización y validación del diseño. La base de la metodología es la resolución numérica de las ecuaciones de Navier Stokes, que representan la dinámica de un fluido viscoso en movimiento, lo que permite predecir con gran nivel de detalle el comportamiento de fluidos bajo distintas condiciones hidráulicas. En este sentido, el nivel de detalle obtenido es comparable al de un modelo físico, con la ventaja de que es posible acceder a más información del flujo sin necesidad de perturbarlo con sensores o medios mecánicos para realizar mediciones.

El software utilizado en este caso corresponde a FLOW3D HYDRO, que cuenta con un solver de CFD enfocado en la resolución de flujos con superficie libre para aplicaciones en ingeniería hidráulica. Adicionalmente, el modelo es capaz de representar otros fenómenos tales como intrusión de aire, socavación y transporte de sedimentos.

La superficie libre se representa mediante la técnica de volumen-de-fluido, conocido como VOF por sus siglas en inglés, que permite representar un flujo bifásico con captura de la interfaz agua/aire (Hirt & Nichols, 1981). Esta técnica permite identificar deformaciones de la superficie

libre como por ejemplo aquellas inducidas por vórtices que se forman en la cercanía de las tuberías de las bombas, u otros fenómenos como por ejemplo oleaje.

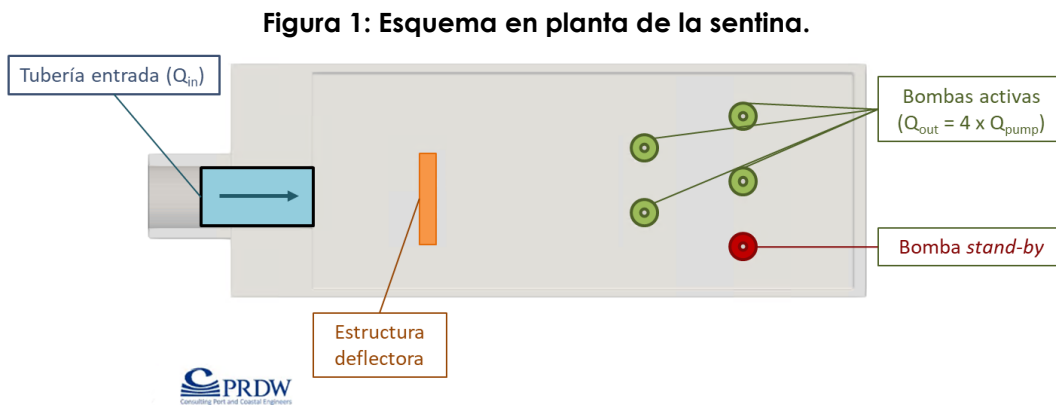
Para obtener un adecuado nivel de detalle en el flujo se utilizó la técnica LES (*Large Eddy Simulation*), que corresponde a la resolución numérica de las variables de flujo (presión y velocidad) filtradas. Es decir, la turbulencia de escala igual o mayor a una escala definida para el filtro es calculada, mientras que la turbulencia de escala menor al filtro adoptado debe ser modelada mediante un esquema de cierre (Wilcox, 2006). Esta metodología permite representar variaciones espacio-temporales del flujo, con lo cual se pueden capturar detalles relevantes tales como vórtices en el entorno de las bombas.

Cabe hacer presente que, a la fecha del presente estudio, el estándar ANSI/HI-9.8 (ANSI, 2018) recomienda el uso de modelos físicos para demostrar el cumplimiento de los criterios de flujo en la zona de la succión de las bombas. El uso de CFD es, por lo tanto, complementario a la aplicación de modelos físicos. Una ventaja evidente de un modelo CFD es la posibilidad de llegar con un diseño más optimizado a la etapa de modelo físico. Luego, el modelo CFD puede ser calibrado con los resultados obtenidos en el modelado físico, lo que permite su uso incluso después de que el modelo físico ha sido desmantelado.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL CASO Y CONFIGURACIÓN DEL MODELO

#### 3.1. Descripción del caso

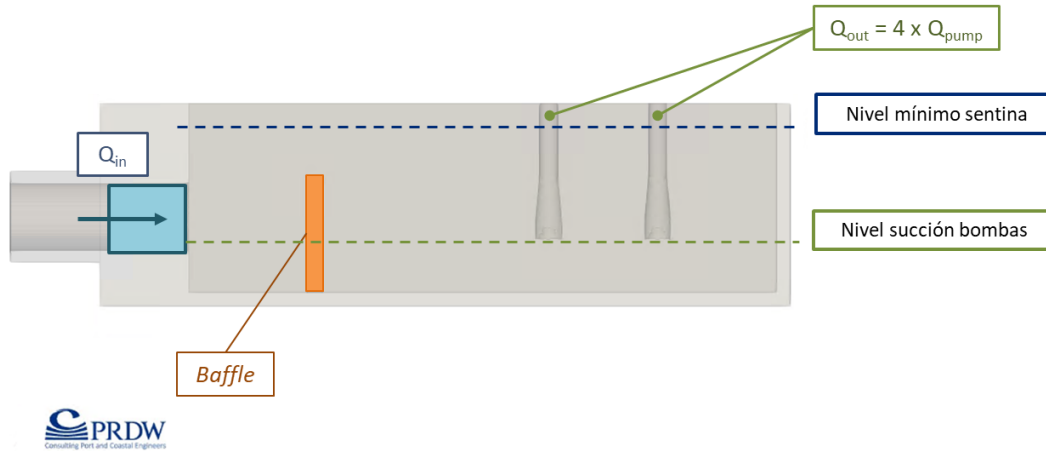
El caso de estudio corresponde a una sentina que recibe el agua mediante una tubería de captación. Dentro de la sentina existe una estructura deflectora del flujo (*baffle*) con el objetivo de quitarle energía al flujo, para luego ser impulsado por un sistema de 4 bombas activas + 1 bomba en *stand-by*. Un esquema en planta de la sentina se muestra en la **Figura 1**.



Fuente: Elaboración propia.

El modelado de la sentina se realiza para el nivel mínimo esperado de agua en la sentina, correspondiente al nivel de operación de la sentina para el nuevo caudal de captación. Una representación en elevación de la sentina se presenta en la **Figura 2**.

**Figura 2: Esquema en elevación de la sentina.**



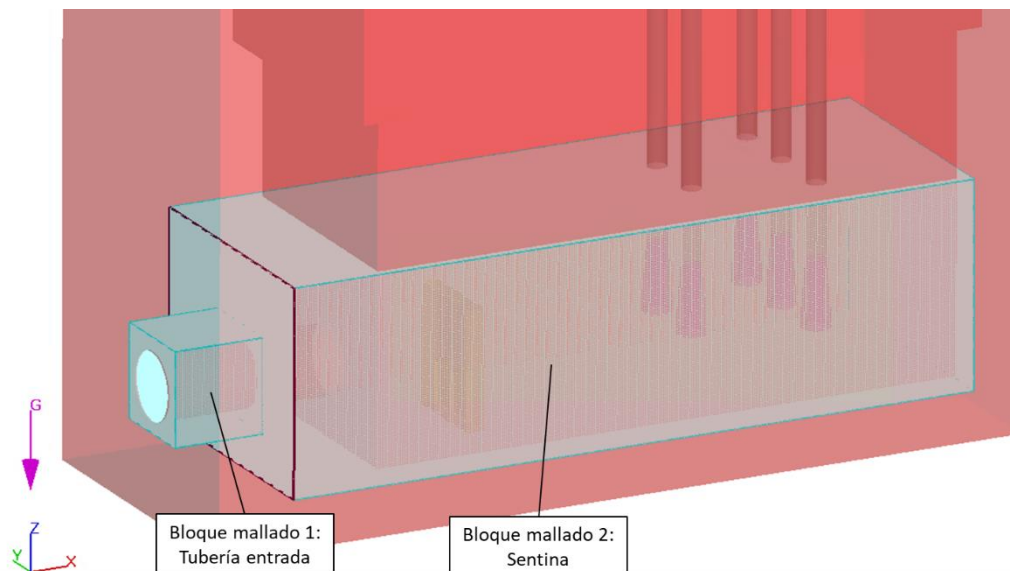
Fuente: Elaboración propia.

Dado que esta configuración corresponde a un caso confidencial, se dan los datos necesarios para la comprensión del sistema, pero no se puede entregar información sobre detalles más allá de lo mostrado en este informe.

### 3.2. Configuración del modelo

En la **Figura 3** se muestra la configuración del modelo en el software Flow-3D, representando todos los componentes del sistema; la tubería de entrada, el baffle y las tuberías y toberas de las bombas. Se incluyen tanto las bombas activas (bombas 1, 2, 4 y 5) como la inactiva (bomba 3), dado que la tubería y tobera de esta última interfieren en el flujo del agua dentro de la sentina.

**Figura 3: Configuración del modelado CFD de la sentina en software Flow-3D.**



Fuente: Elaboración propia.

Una vez definida la geometría, se discretizan espacialmente las zonas del dominio computacional que corresponden a fluido, sobre el cual Flow-3D calcula las variables del flujo. Para este caso, tal como se muestra en la **Figura 3**, se realizan 2 bloques de mallado: (1) tubería de entrada y (2) sentina. En ambos bloques de mallado se utiliza una malla regular Cartesiana, es decir, con el mismo espaciamiento en las tres dimensiones espaciales, lo que permite capturar las variaciones del flujo en toda la sentina.

Se define un tamaño de celda de 5 cm, ya que al ser una simulación LES, se busca un tamaño de mallado que permita la captura de estructuras coherentes (vórtices). Como caso de verificación se utilizó un caso similar con la succión de una bomba y resultados experimentales disponibles (Lucino, Liscia, & Duró, 2010). Sobre la base de esta verificación, se constató que el modelo es capaz de predecir vórtices superficiales y subsuperficiales utilizando resoluciones similares de mallado, con aprox. 5 celdas para definir una estructura coherente o vórtice.

Al mallado se le definen condiciones de borde adecuadas, que permitan representar la dinámica del flujo al interior de la sentina. En este caso, existen dos condiciones de borde: (1) entrada de flujo por la tubería de captación y (2) salida de flujo por las tuberías de impulsión de las bombas activas. Estas condiciones de borde y las variables que se definen en cada una de ellas se indican en la **Tabla 1**.

**Tabla 1: Condiciones de borde utilizadas en el modelado de la sentina.**

Condición de Borde	Tipo	Comentario
Tubería de entrada	Presión de estancamiento	Elevación de agua en la sentina.
Bombas activas	Caudal en sumidero de masa y momento	Caudal en cada una de las bombas activas, especificado el interior de cada tobera.

El software Flow-3D tiene un algoritmo de cálculo, en el que automáticamente toma un paso de tiempo que genere estabilidad en el cálculo, según la condición CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) y el tamaño de mallado. En cuanto al tiempo total de simulación, se toma una inicialización de 120 s para desarrollo del flujo, y posterior recopilación de estadísticas por 240 s.

## 4. RESULTADOS

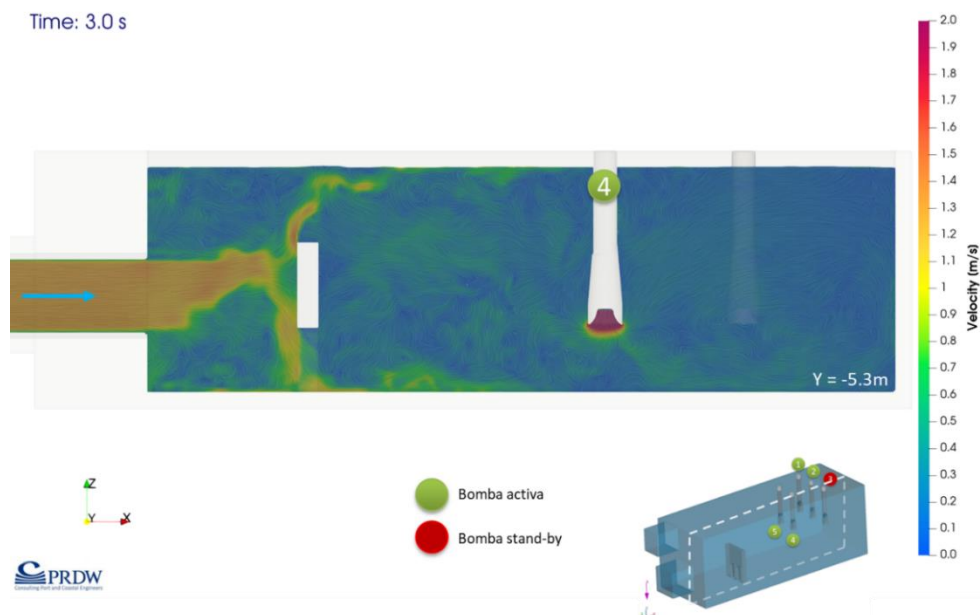
Los siguientes resultados del estudio son realizados con la simulación de 240 segundos, con datos recopilados cada 1 segundo para análisis estadístico.

### 4.1. Flujo en la sentina

La caracterización del flujo en la sentina se realiza sobre la base del análisis de la distribución de la magnitud de velocidades instantáneas. El total del caudal de captación ingresa a la sentina por la tubería de entrada y se encuentra con un deflector (*baffle*), que cumple la función de disipar parte de la energía cinética del flujo entrante, con el fin de que llegue a la zona de la succión de las bombas con velocidades más moderadas y condiciones más uniformes del flujo que ingresa en las bombas. Como se puede ver en la **Figura 4**, el caudal de entrada impacta al deflector y se desvía en diferentes direcciones, disminuyendo con ello su velocidad de entrada

promedio de 1.2 m/s. En la **Figura 4** se puede apreciar también una deformación de la superficie libre de aprox. 10 cm producto de la desviación del flujo de entrada en la dirección vertical.

**Figura 4: Plano de magnitud de velocidades en eje bomba 4, Y = -5.3 m.**



Fuente: Elaboración propia.

Luego de la estructura deflectora, en la segunda mitad de la sentina según la dirección del flujo de entrada, se encuentra la zona de succión de las bombas (ver **Figura 4**). Las velocidades en esta zona son más moderadas que las velocidades antes del deflector. Sin embargo, existe cierto grado de turbulencia en la zona de las bombas, lo que será analizado en detalle más adelante.

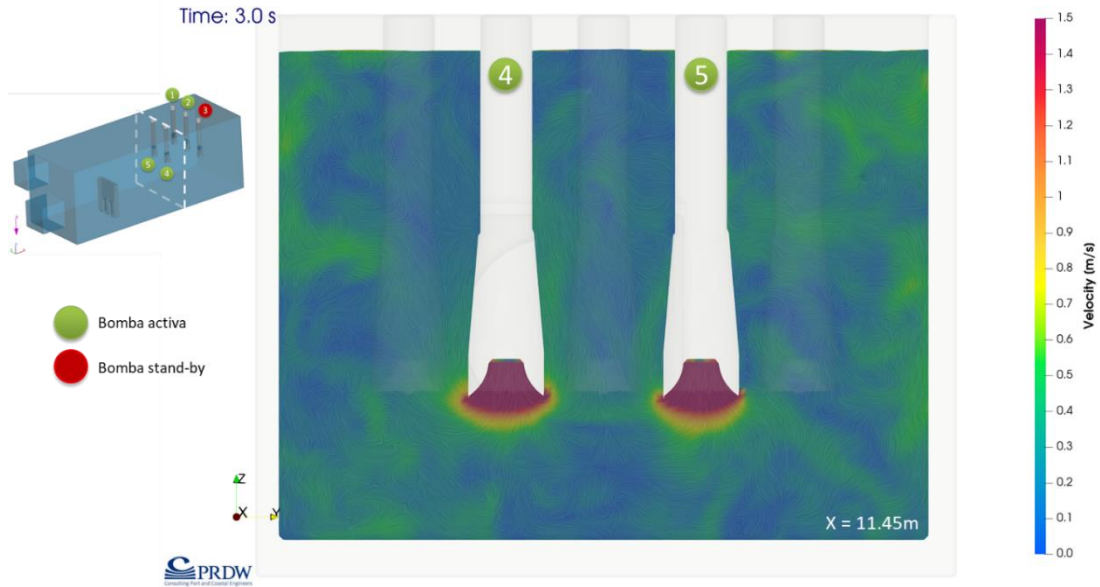
#### 4.2. Condiciones del flujo en la zona de bombas

En la **Figura 5** y **Figura 6** se presentan planos de velocidad instantánea transversales al eje longitudinal de la sentina, que cortan el eje de la tubería de succión de los grupos de bombas 4+5 y 1+2+3. Se evidencia que el flujo alcanza mayores velocidades e intensidad de turbulencia en el plano donde se encuentran las bombas 4+5 en comparación con el plano de las bombas 1+2+3, debido a que estas últimas quedan más lejos del deflector, lo que otorga más tiempo de residencia al flujo para estabilizarse.

Sin embargo, la distribución de velocidades instantáneas en la **Figura 6** indica la presencia de una estructura coherente de interacción entre la bomba 1 y la pared de la sentina, la que será analizada en detalle en la sección 4.3. Por otro lado, la distribución de velocidades en la **Figura 5** y **Figura 6** indica que existe un fuerte gradiente de velocidades en el entorno de la boquilla de succión de las bombas.

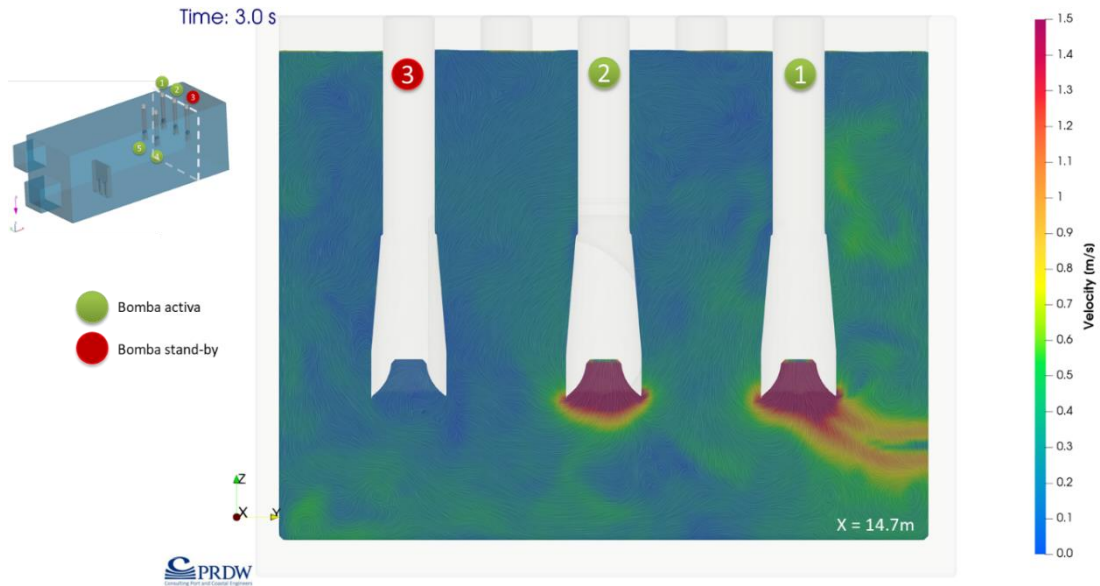


Figura 5: Plano de magnitud de velocidades en eje bombas 4 y 5, X = 11.45 m.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6: Plano de magnitud de velocidades en eje bombas 1, 2 y 3, X = 14.7 m.



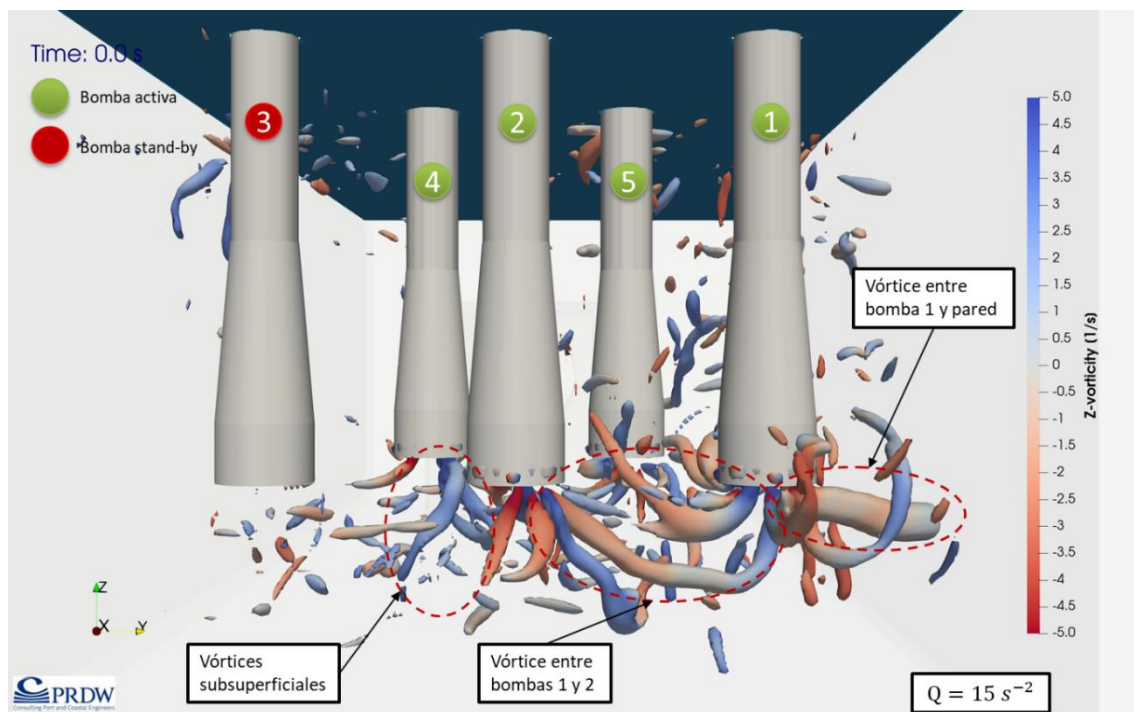
Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. Formación de vórtices

Uno de los aspectos más relevantes del estudio es el análisis de formación de vórtices en el entorno de las bombas que puedan afectar su eficiencia en la operación (ANSI, 2018), o incluso producir daños producto de vibraciones, cavitación y otros efectos. Una forma para detectar formación de vórtices es utilizar el criterio  $Q$  (Hunt, Wray, & Moin, 1988), para identificación de estructuras coherentes con rotación local.

El criterio  $Q$  es un parámetro escalar cuya función es identificar vórtices, cuya existencia queda definida por la presencia de vorticidad junto con una presión en el centro del vórtice menor que la presión del entorno. Valores de  $Q$  mayores que cero indican la presencia de estructuras coherentes o vórtices (Guyot, Pittion-Rossillon, & Archer, 2014) que se identifican como iso-superficies con  $Q > 0$ . A continuación, en la **Figura 7** y **Figura 8** se presentan las iso-superficies para valores de  $Q = 15 \text{ s}^{-2}$  y  $Q = 20 \text{ s}^{-2}$  respectivamente.

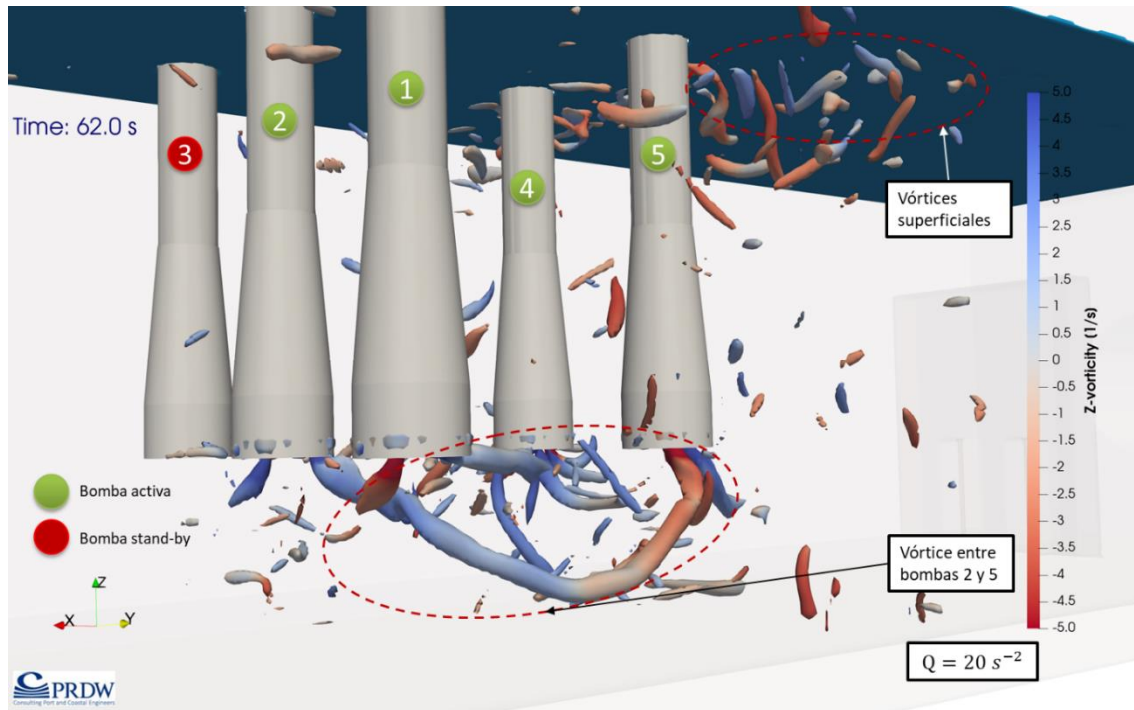
**Figura 7: Iso-superficies de  $Q = 15 \text{ s}^{-2}$  coloreadas por vorticidad  $\omega_z$  en  $t = 0 \text{ s}$ .**



Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8: Iso-superficies de  $Q = 20 \text{ s}^{-2}$  coloreadas por vorticidad  $\omega_z$  en  $t = 62 \text{ s}$ .**



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en ambas figuras, el criterio  $Q$  permite identificar vórtices con distintas orientaciones y ubicaciones. En la **Figura 7** se pueden apreciar *vórtices subsuperficiales*, que son formados por la succión de las bombas y efecto del fondo o paredes circundantes, destacando el vórtice formado entre la bomba 1 y la pared, dado que es persistente a diferentes valores de  $Q$  y se puede observar en la distribución de velocidad de la **Figura 6**, indicando su considerable intensidad. Este tipo de vórtice puede afectar el funcionamiento del bombeo generando vibraciones, ruidos, pérdidas de eficiencia e incluso cavitación si las velocidades locales de rotación son suficientemente altas.

Además, en la **Figura 8** se pueden apreciar *vórtices superficiales*, que pueden ser formados tanto por el efecto de la succión de las bombas como por turbulencia presente en el flujo que ingresa a la sentina. Este tipo de vórtice puede presentar un riesgo de intrusión de aire a las bombas. Por último, el análisis muestra vórtices de interacción entre diferentes pares de bombas; como por ejemplo entre las bombas 1 y 2 (ver **Figura 7**) o entre las bombas 2 y 5 (ver **Figura 8**). Estas estructuras coherentes son persistentes para diferentes valores de  $Q$ , mostrando que existen vórtices que se forman por interacción entre las bombas de la sentina, pudiendo afectar el funcionamiento óptimo de estas.

Un aspecto relevante en el análisis de la sentina es la variación temporal de las estructuras coherentes, tanto en ubicación como en intensidad, ya que el análisis precedente corresponde a un determinado instante en el tiempo. También interesa conocer si estas estructuras aparecen esporádicamente o son persistentes en el tiempo. Por este motivo, se incluye un análisis temporal sobre la base de la observación de las iso-superficies de  $Q$  durante los 240 segundos de simulación.

En cuanto a los vórtices superficiales, se observó que estos son transportados predominantemente en la dirección del flujo que ingresa a la sentina, disipándose rápidamente. Esto indica que el origen más probable de vórtices superficiales sea la turbulencia del flujo que proviene desde la zona del deflector, descartando efectos de la succión de las bombas.

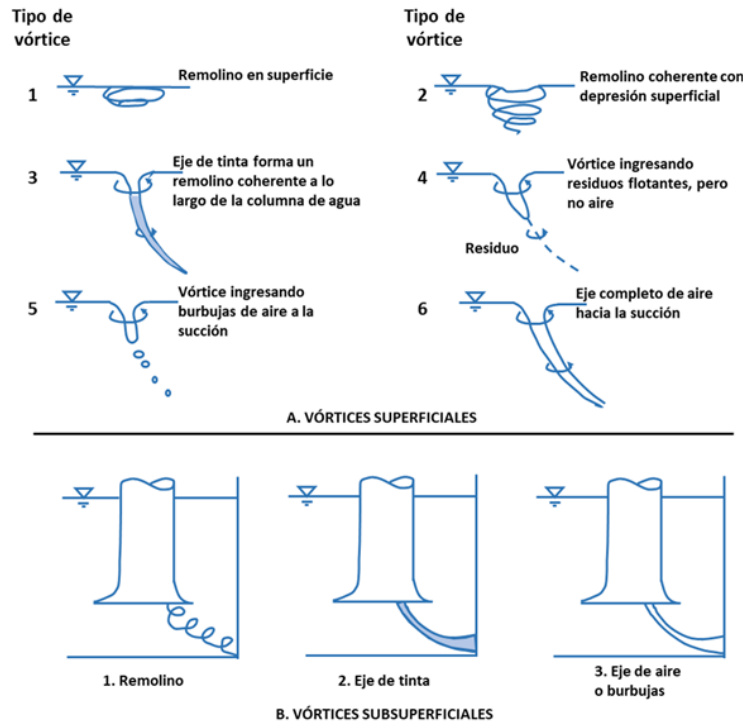
En el caso de los vórtices de interacción entre bombas, la mayor parte del tiempo se observa la presencia de un vórtice de estas características, que, si bien no es entre las mismas bombas a lo largo del tiempo de simulación, es un fenómeno persistente frecuente en el tiempo y espacio.

Finalmente, se detectan dos tipos de vórtices subsuperficiales; (1) entre el fondo de la sentina y las boquillas de succión y (2) entre la bomba 1 y la pared de la sentina. Los vórtices entre el fondo y la succión persisten la mayor parte del tiempo de simulación, variando su ubicación e intensidad. El vórtice entre la bomba 1 y la pared aparece a lo largo de 30 segundos de la simulación, sin embargo, es un vórtice que presenta intensidades altas de vorticidad.

Según el manual ANSI/HI 9.8 (ANSI, 2018), se pueden clasificar cualitativamente los vórtices superficiales y subsuperficiales según parámetros visuales (ver **Figura 9**). Según lo observado en los resultados, los vórtices superficiales podrían ser clasificados de tipo 1, es decir, rotación cercana a la superficie, pero que no corresponde a una estructura coherente.

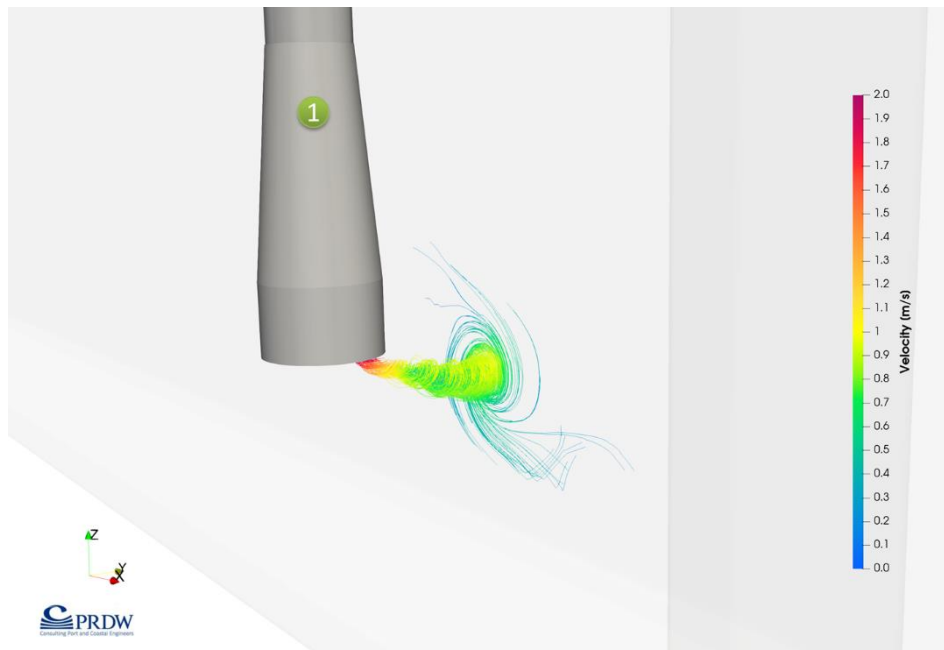
En cuanto a los vórtices subsuperficiales, se podrían clasificar de tipo 2, ya que corresponden a una estructura coherente que alcanza la boquilla de succión de las bombas manteniendo un eje de rotación estable. A modo de ejemplo, la **Figura 10** muestra las líneas de corriente del vórtice de interacción entre la bomba 1 y la pared, en donde se puede apreciar que la estructura tiene un eje bien definido y con una alta rotación de fluido en torno a este.

Figura 9: Clasificación de vórtices superficiales y subsuperficiales.



Fuente: Adaptada de (ANSI, 2018).

Figura 10: Líneas de corriente en vórtice entre bomba 1 y pared de la sentina.



Fuente: Elaboración propia.

## 5. CONCLUSIONES

En este informe se presentaron los resultados del modelado CFD de una sentina que busca aumentar su caudal de captación de su condición actual mediante 4 bombas activas y 1 en *stand-by*. El objetivo del estudio es analizar las nuevas condiciones de operación de la sentina y riesgos que implica para la operación la presencia de estructuras coherentes (vórtices) en la succión de las bombas. Adicionalmente, se destaca la utilidad del uso de CFD para evaluar aumentos de capacidad y repotenciamiento de infraestructura existente en etapas tempranas. En este sentido, un modelo CFD es equivalente a un laboratorio virtual que permite examinar el flujo con alto nivel de detalle, para asistir en la toma de decisiones de diseño.

Con respecto al flujo dentro de la sentina, se observa que el deflector (*baffle*) de la sentina es capaz de disminuir la velocidad del flujo. Sin embargo, aunque las velocidades promedio de acercamiento son bajas, existe un importante nivel de turbulencia y recirculación, lo que contraviene el principio de ANSI de que el flujo en las bombas debe ser uniforme.

Se detectaron vórtices en el entorno de la succión de las bombas que fueron analizados en el estudio. Por un lado, los vórtices superficiales no presentarían un problema para el funcionamiento de las bombas, debido a que dichos vórtices son generados por la turbulencia del flujo y no por la interacción de la superficie libre con la succión. Además, se realizó una clasificación cualitativa de dichos vórtices, obteniendo que corresponden a estructuras no-coherentes (tipo 1) según la clasificación visual de ANSI (ANSI, 2018).

Por otro lado, los vórtices subsuperficiales, que se deben a la interacción de bordes sólidos con la succión de las bombas o por la interacción entre bombas, se clasifican como tipo 2. Estas estructuras del flujo presentan un eje de rotación estable. Además, su ocurrencia e intensidad son altas, lo que podría impactar el desempeño hidráulico de las bombas.

En conclusión, los resultados muestran un flujo con baja uniformidad con importante presencia de vórtices en el entorno de la succión de las bombas de la sentina. Según los criterios de ANSI, estas condiciones podrían afectar la operación del sistema de bombeo, generando vibraciones, ruidos, pérdidas de eficiencia e incluso cavitación si las velocidades locales de rotación son suficientemente altas. Ante esto, se podrían evaluar posibles medidas de mitigación o una disminución de los caudales de operación, lo que podría ser también evaluado mediante el modelo CFD. No se descarta además la ejecución de un modelo físico, que permitiría calibrar los resultados del modelo CFD en la succión de las bombas.

## 6. REFERENCIAS

ANSI. (2018). American National Standard for Rotodynamic Pumps for Pump Intake Design ANSI/HI 9.8.

Guyot, G., Pittion-Rossillon, A., & Archer, A. (2014). *A Free Surface Vortex Modelling with a 3D CFD Comparison Between an Experimental Case and a Numeric one.*

Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.

Hunt, J., Wray, A., & Moin, P. (1988). Eddies, Streams, and Convergence Zones in Turbulent Flows. *Proceedings of the Summer Program 1988* (págs. 193-208). Center for Turbulence Research (CTR).

Lucino, C., Liscia, S., & Duró, G. (2010). *Vortex Detection in Pump Sumps by Means of CFD.*  
Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD.* DCW Industries.