

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS ANSI/HI 9.8-2018 MEDIANTE CFD PARA
DISEÑO HIDRÁULICO DE SENTINAS: METODOLOGÍA Y CASOS DE
ESTUDIO**

JOSÉ OSSA V.¹
JOSÉ GALLARDO C.²
ROLANDO GARCÍA G.³

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología basada en los criterios del estándar ANSI/HI 9.8-2018 para verificar el diseño hidráulico de sentinas de bombas mediante simulación CFD. La metodología permite evaluar la admisibilidad hidráulica del sistema en fases iniciales del diseño, asegurando que el flujo hacia las bombas sea uniforme, permanente, y libre de remolinos e intrusión de aire. Los resultados obtenidos con CFD permiten realizar un análisis detallado de las variables hidráulicas relevantes para estos fines. Para ilustrar las capacidades del modelo numérico, se aplica la metodología para un caso de estudio representativo de una planta desaladora. Los resultados muestran que el modelo CFD reproduce adecuadamente los patrones de flujo y la formación de vórtices, permitiendo clasificar su severidad y frecuencia según los criterios ANSI. Aunque el diseño cumple la mayoría de los criterios, se detectaron vórtices subsuperficiales no admisibles, destacando el potencial de la metodología para identificar condiciones críticas y optimizar el diseño antes de verificaciones experimentales.

¹ PRDW Consulting Port & Coastal Engineers - email: jossa@prdw.com

² PRDW Consulting Port & Coastal Engineers - email: jgallardo@prdw.com

³ PRDW Consulting Port & Coastal Engineers - email: rgarcia@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 ofrece como una oportunidad atractiva. Esto como consecuencia de que, en términos de permisos y conservación de recursos naturales, resulta 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 potencial, al permitir evaluar escenarios de diseño en plazos y costos muy convenientes en comparación con otras metodologías como modelos físicos. De este modo, las adaptaciones a la infraestructura existente pueden ser verificadas y optimizadas mediante CFD antes de proceder el diseño de detalles.

El presente trabajo tiene como objetivo presentar una metodología para la evaluación del desempeño hidráulico de sentinas de bombas, obra hidráulica presente en el sistema de captación de las plantas desalinizadoras, siguiendo las recomendaciones presentes en el estándar ANSI/HI 9.8-2018 (ANSI, 2018). Esta metodología permite comparar, en etapas tempranas de ingeniería, diferentes diseños de sentina de bombas, por medio de una evaluación de los patrones de flujo y/o determinando la presencia de vórtices o zonas de recirculación que puedan afectar el desempeño hidráulico de las bombas.

2 FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y CRITERIOS ESTÁNDAR ANSI/HI 9.8-2018

2.1 ESTÁNDAR ANSI/HI 9.8-2018

El estándar ANSI/HI 9.8-2018 corresponde a un estándar especializado para el diseño de sentinas de bombas del *American National Standards Institute* (ANSI). Tiene el propósito de proveer criterios para el diseño y admisibilidad de sentinas de bombas.

La recomendación de un determinado diseño de sentina de bombas se determina sobre la base de cumplimiento de criterios descritos en el estándar ANSI/HI 9.8-2018 (ANSI, 2018), en el cual se identifican los fenómenos hidráulicos específicos que pueden afectar desfavorablemente el desempeño de las bombas, tales como:

- Vórtices sumergidos.
- Vórtices de superficie libre.
- Formación previa de remolinos (*pre-swirl*) y fluctuaciones temporales.
- Distribución no-uniforme de velocidad, tanto espacial como temporal, en el centro del rotor.
- Intrusión de aire o burbujas de gas.

La premisa para el diseño del estándar es la siguiente: “*En general, el flujo que ingresa a las bombas debería ser uniforme, permanente y libre de remolinos e intrusión de aire. La falta de uniformidad puede causar que la bomba opere fuera de la condición óptima de diseño, y con una eficiencia más baja. Un flujo no permanente produce fluctuaciones en la carga sobre los rodets de las bombas, lo que puede conducir a ruido, vibraciones, problemas en rodamientos y fallas por fatiga de materiales en los ductos de las bombas.*” (ANSI, 2018).

Un diseño apropiado de una sentina debe ser consecuente con la premisa y asegurar que los fenómenos desfavorables del flujo descritos anteriormente se encuentren dentro de límites delineados por el estándar ANSI/HI 9.8-2018. Para lograr la premisa, el estándar entrega recomendaciones para el dimensionamiento del diámetro de las campanas de succión de las bombas, bahías de bombas, sumergencia mínima de succión, entre otras.

Por ejemplo, para sentinas de bombas rectangulares, el estándar recomienda que dentro de las bahías de bombas; (1) la velocidad de aproximación sea menor a 0.5 m/s y (2) la velocidad de flujo cruzado sea menor a un 50% de la velocidad de aproximación (ANSI, 2018).

Para evaluar la admisibilidad de una sentina de bombas, si el diseño de esta cumple con las recomendaciones geométricas y los criterios enlistados en la sección 9.8.7.1 del estándar, un modelo físico no sería necesario para verificar la admisibilidad de la sentina. En caso contrario, el diseño de la sentina de bombas debe ser sometido a un modelo físico.

Para evaluar la admisibilidad de una sentina en un modelo físico se verifican (ANSI, 2018):

- Vórtices superficiales y subsuperficiales entrando a las bombas deben ser menos severos que vórtices con un eje de tinta coherente. Esto es de acuerdo con la clasificación de vórtices que presenta el mismo estándar (ver Figura 3-1).
- Ángulos de *swirl* promedio, calculados con la rotación del flujo en la succión, deben ser menores a 5°, o menores a 7°, sólo si ocurren menos de un 10% del tiempo o para condiciones operaciones infrecuentes.
- Velocidades en diferentes puntos dentro de la campana de succión de las bombas deben estar dentro del 10% de la velocidad media de la sección.
- La desviación estándar de la velocidad dentro de la campana de succión debe ser menor a un 10% de la velocidad media temporal.

2.2 APLICACIÓN DE MODELADO NUMÉRICO

Cabe hacer presente que los criterios enunciados en el estándar ANSI/HI 9.8, cuya última publicación data del año 2018, están ideados para su evaluación mediante modelos físicos,

sin embargo, la implementación de este tipo de modelos demanda generalmente mayores recursos y tiempo que un modelo numérico, por lo que en general no suelen ser herramientas prácticas para conceptualizar diseños poco convencionales o desarrollar estudios comparativos de alternativas.

Los modelos numéricos de tipo CFD ofrecen ventajas en esta materia y también permiten obtener una caracterización más detallada del flujo, sin perturbar sus condiciones para extraer mediciones o resultados. Este tipo de modelos son reconocidos como herramientas válidas por el mismo estándar, pero requieren adaptar la evaluación de determinados criterios para homologar su aplicación. Por otra parte, dependiendo de la configuración estudiada y de los resultados que se obtengan, podría ser necesario implementar modelos físicos para validar, por ejemplo, la configuración seleccionada.

3 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EVALUACIÓN ANSI/HI 9.8

Tomando en cuenta lo mencionado en la sección §2.2, los criterios de admisibilidad que se proponen para el presente estudio se agrupan en 3 diferentes niveles de análisis. Es importante recalcar, que para que un diseño sea considerado aceptable, se busca cumplir con todos los criterios enunciados en esta sección.

3.1 NIVEL 1: DIRECTRICES GENERALES DE FLUJO SEGÚN ANSI/HI 9.8-2018

Este nivel de análisis se establece para asegurar que la premisa de diseño del estándar ANSI/HI 9.8-2018 se cumpla de manera cualitativa. Para esto se proponen 4 criterios para el flujo en la campana de succión de las bombas, mostrados en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Criterios Nivel 1 - Directrices generales de flujo.

ID	Criterio	Método verificación	Criterio de aceptación
1.1	Flujo uniforme	Verificación con campos de velocidad promediados en el tiempo.	Campos de velocidad simétricos alrededor de la succión de las bombas.
1.2	Flujo permanente	Verificación con animación temporal del campo de velocidad.	Animaciones con variaciones menores.
1.3	Flujo libre de vórtices o remolinos	Verificación con animación temporal de vórtices.	Baja densidad de vórtices subsuperficiales.
1.4	Flujo libre de intrusión de aire	Verificación con animación temporal de vórtices.	Baja densidad de vórtices superficiales.

La verificación de la presencia de vórtices se realiza generando iso-superficies del parámetro Q , el que representa un balance local entre la tasa de deformación de corte y la magnitud de vorticidad. Cuando $Q > 0$, la vorticidad predomina sobre la tasa de deformación, lo que indica la presencia de un vórtice (Jeong & Hussain, 1995).

Como este nivel de criterios corresponden a una apreciación cualitativa, su aceptación se evaluará desde una mirada general el desempeño hidráulico para asegurar cumplimiento de directrices generales dadas por el estándar ANSI.

3.2 NIVEL 2: CAMPO DE VELOCIDADES

Este nivel se establece para evaluar el desempeño hidráulico a partir de los registros de velocidad de acercamiento y en la succión de las bombas, de modo tal que se cumpla con los límites establecidos por el estándar ANSI/HI 9.8/2018 (ANSI, 2018). Para esto se proponen los criterios mostrados en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Criterios Nivel 2 – Campo de velocidades.

ID	Criterio	Método verificación	Criterio de aceptación
2.1	Velocidad de acercamiento a bombas	Se registra serie de tiempo de la velocidad de aproximación media (V_x) en un plano representativo.	Se acepta si $V_x < 0.5$ m/s al menos un 90% del tiempo de simulación.
2.2	Velocidad de flujo cruzado a las bombas	Se registra serie de tiempo de la velocidad de transversal promedio (V_c) en un plano representativo.	Se acepta si $ V_c < 0.5 V_x$ al menos un 90% del tiempo de simulación.
2.3	Velocidad de succión uniforme	Se registra magnitud de velocidad promedio temporal en puntos representativos de la sección.	Velocidad en cada punto representativo de la sección debe estar dentro del 10% de la velocidad promedio.
2.4	Velocidad de succión permanente	Se registra serie de tiempo de velocidad en cada punto representativo de la sección.	Desviación estándar en cada punto representativo debe estar dentro del 10% de la velocidad promedio temporal.

3.3 NIVEL 3: EVALUACIÓN DE VÓRTICES

En cuanto a la rotación del flujo al ingresar a las bombas, el estándar (ANSI, 2018) enuncia que se debe cumplir con los criterios mostrados en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Criterios Nivel 3 – Evaluación de vórtices.

ID	Criterio	Método verificación	Criterio de aceptación
3.1	Vórtices superficiales	Animación de vórtices mediante parámetro Q . Se clasifican los vórtices superficiales más desfavorables. Ver clasificación Figura 3-1.	Se aceptan vórtices pequeños o no coherentes (tipo 1 o 2) o con núcleo coherente (tipo 3) solo si ocurren $< 10\%$ del tiempo. No se aceptan vórtices con núcleo de aire.

ID	Criterio	Método verificación	Criterio de aceptación
3.2	Vórtices subsuperficiales	Animación de vórtices mediante parámetro Q . Se clasifican los vórtices subsuperficiales más desfavorables. Ver clasificación Figura 3-1.	Se aceptan vórtices no coherentes (tipo 1) o con núcleo coherente (tipo 2) si ocurren < 10% del tiempo. No se aceptan vórtices con núcleo de aire.
3.3	Ángulo de <i>swirl</i>	Se calcula ángulo de <i>swirl</i> (α) en sección dentro de la succión.	Se acepta si $\alpha < 5^\circ$ Se acepta si $\alpha < 7^\circ$ solo si ocurre menos de un 10% del tiempo.

Al ser criterios desarrollados para modelos físicos, se adapta la clasificación de vórtices a apreciación visual de la estabilidad de los vórtices presentes en las animaciones del modelo CFD, identificado con el parámetro Q . La clasificación de vórtices se guía por la clasificación de tipos de vórtices tanto superficiales como subsuperficiales entregada por el estándar (ANSI, 2018), observada en la Figura 3-1.

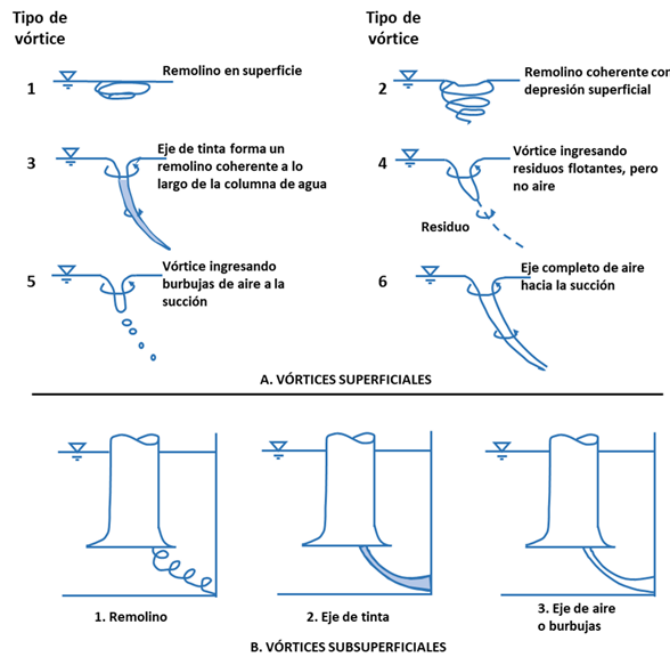


Figura 3-1: Clasificación de vórtices superficiales y subsuperficiales. Adaptado de (ANSI, 2018).

El ángulo de *swirl* será calculado en una sección dentro de la succión de las bombas, acorde con lo enunciado por (Mitra, Gudiband, Iyer, & Eldho, 2015), estimando una velocidad angular representativa ω de la sección y luego un ángulo de *swirl* α utilizando las siguientes expresiones:

$$\omega = \frac{\int_A (\vec{r} \times \vec{V}) \cdot \hat{k} (\rho \vec{V} \cdot \hat{n} dA)}{\int_A (\vec{r} \cdot \vec{r}) (\rho \vec{V} \cdot \hat{n} dA)} \quad (1)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\omega R}{V_z} \quad (2)$$

Donde \vec{r} es el vector de posición relativo al centro de la sección y \vec{V} el vector de velocidad, R es el radio de la sección analizada y V_z es la velocidad axial en el eje de la succión.

4 APLICACIÓN A CASO DE ESTUDIO

4.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO

La sentina de bombas analizada corresponde a una estructura de hormigón que recibe agua de mar por medio de una tubería de 1400 mm de diámetro interno e impulsa mediante 3 bombas principales el agua de mar hacia la planta desaladora. El diámetro de la campana de succión de las bombas y las dimensiones de las bahías de bombas siguen las recomendaciones del estándar de diseño (ANSI, 2018). Además, para lograr una distribución del flujo favorable en la sentina, esta posee un canal de aproximación y una zona de transición suave entre el canal y las bahías de bombas. Detalles de la geometría se muestran en la Figura 4-1.

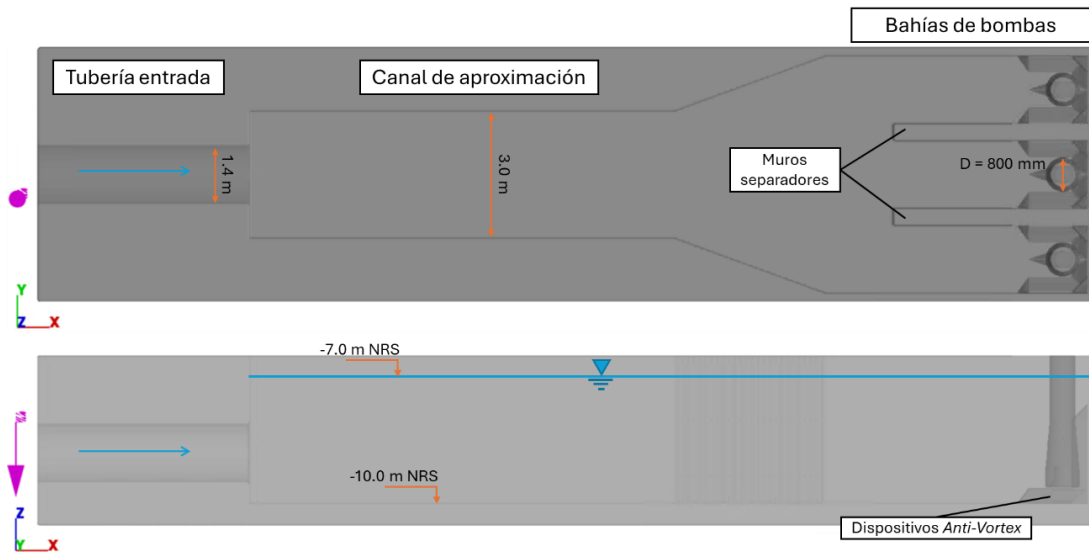


Figura 4-1: Vista de la geometría del caso de estudio en planta (panel superior) y elevación (panel inferior).

4.2 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Las simulaciones fueron realizadas en FLOW-3D HYDRO considerando flujo monofásico incompresible con determinación de la superficie libre mediante el método de volumen de fluido o VOF por sus siglas en inglés (Hirt & Nichols, 1981). El modelo fue configurado para capturar la dinámica del flujo transiente con especial atención a la formación y persistencia de vórtices que puedan impactar el desempeño hidráulico de las bombas, de acuerdo con los criterios del estándar ANSI/HI 9.8-2018 (ANSI, 2018).

Con el fin de resolver adecuadamente las estructuras de flujo tridimensionales y su variación temporal, se empleó un esquema LES (*Large Eddy Simulation*) con modelo sub-grilla de Smagorinsky dinámico y funciones de pared para representación de la capa límite.

Para la discretización espacial, se utilizó una malla Cartesiana con refinamiento local en torno a la succión de las bombas. Se empleó un tamaño de celda global de 5 cm, con refinamiento local de 2.5 cm en la región de succión, alcanzando aproximadamente 4.2 millones de celdas de fluido. El orden de aproximación de las ecuaciones de momentum corresponde a *segundo orden con preservación de monotonicidad*. La integración temporal se realizó con un paso de tiempo adaptativo, ajustado automáticamente para mantener la estabilidad del cálculo sin violar las condiciones CFL.

A partir de un análisis dimensional considerando $U = 1.0$ m/s, $L = 0.5$ m y $\nu = 1.3 \times 10^{-6}$ m²/s, se obtiene un número de Reynolds del orden de $Re = 3.8 \times 10^5$. El tamaño de celda se relaciona con la escala integral mediante $L/\Delta \approx 20$ y con la escala de Kolmogórov mediante $\Delta/\eta \approx 770$, dentro del rango práctico de aplicación para LES en obras hidráulicas complejas. Se estima que el tamaño de celda adoptado combinado con el orden de la discretización son adecuados para resolver las estructuras de flujo más energéticas, que dominan el transporte del momento en la región de succión.

Las condiciones de borde se definieron como:

- **Entrada:** condición de presión hidrostática asociada al nivel de agua dentro de la sentina (-7.0 m NRS) y un perfil uniforme de velocidad.
- **Paredes:** condición de no deslizamiento.
- **Campana de succión (salida):** succión idealizada representada como un sumidero de masa y momento con el caudal equivalente por bomba de 666.7 L/s (caudal total de 2000 L/s y sistema de bombeo 3+0).

Se realizó una primera fase de precorrida de 130 s para estabilización del régimen antes del registro de resultados. Una vez establecido el flujo, el cálculo se extendió durante 240 s de tiempo físico, almacenando datos cada 1 s para la generación de series temporales y estadísticas para la evaluación de los criterios de admisibilidad.

4.3 RESULTADOS

Con los resultados obtenidos del modelo CFD, se realiza la evaluación de todos los criterios en tres niveles presentada en la sección **§;Error! No se encuentra el origen de la referencia.** A continuación, se ilustran en detalle algunos criterios, mientras que más adelante se presenta un resumen del cumplimiento de todos los criterios.

En primer lugar, la Figura 4-2 muestra el análisis del criterio de “Flujo uniforme” (criterio 1.1), el cual se analiza con un plano del campo de velocidades promediado en el tiempo al nivel de la succión de las bombas ($Z = -9.6$ m NRS). Las velocidades en el plano muestran un comportamiento uniforme del flujo dentro de la sentina y las bombas presentan succiones con campos de velocidad simétricos.

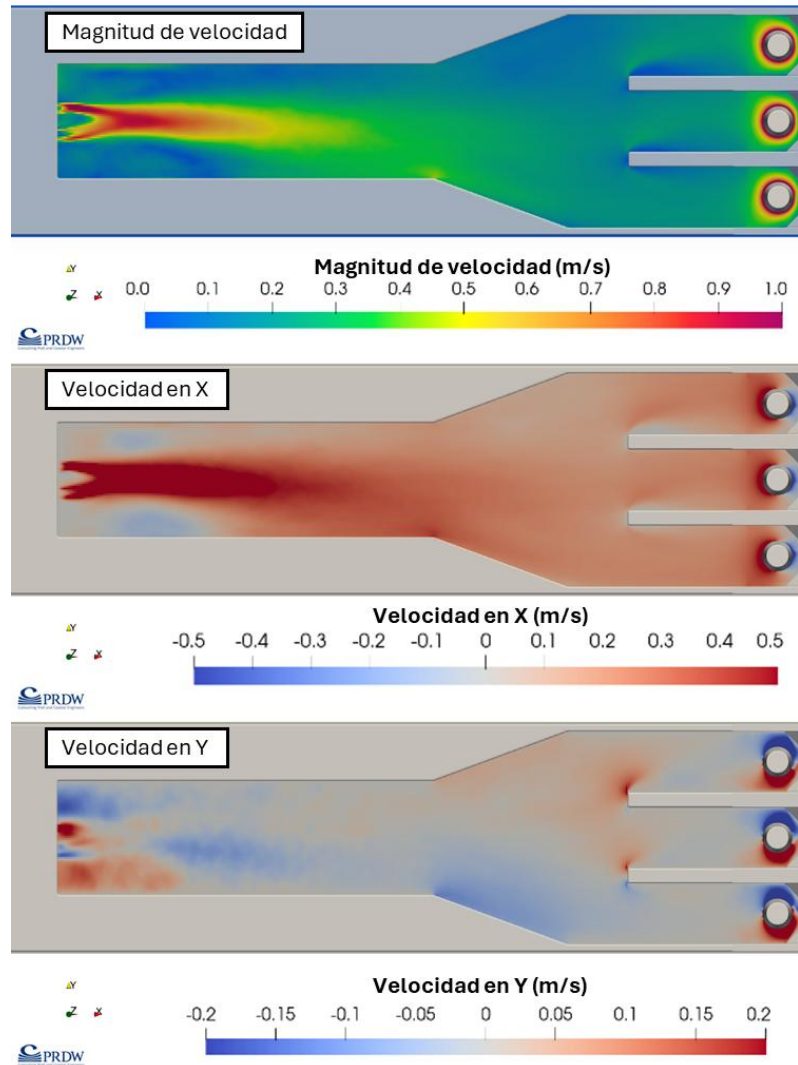


Figura 4-2: Plano de velocidades promedio en el tiempo utilizado para el análisis del criterio "Flujo uniforme" (1.1). Magnitud de velocidad (arriba), Velocidad en X (centro) y Velocidad en Y (abajo).

En segundo lugar, la Figura 4-3 muestra el análisis del criterio de “Velocidad de flujo cruzado a las bombas” (criterio 2.2), el cual se analiza calculando en cada paso de tiempo la velocidad de aproximación (V_x) y la velocidad de flujo cruzado (V_c) en planos representativos a cada bomba. La velocidad de flujo cruzado V_c debe ser menor a un 50% de la velocidad de aproximación (ANSI, 2018) al menos un 90% del tiempo, lo que se cumple en todas las bombas del caso de estudio.

En tercer lugar, la Figura 4-4 muestra el análisis del criterio de “Vórtices subsuperficiales” (criterio 3.2), el cual se analiza observando la animación de vórtices e identificando los vórtices más desfavorables y anotando el tiempo que se encuentran presente. El vórtice más desfavorable en este caso fue un vórtice subsuperficial que conectaba la succión de la bomba N°3 con la pared trasera de la sentina, el cual fue clasificado como Tipo 2 (ver Figura 3-1) y estaba presente un 75% del tiempo, lo cual no es admisible según (ANSI, 2018).

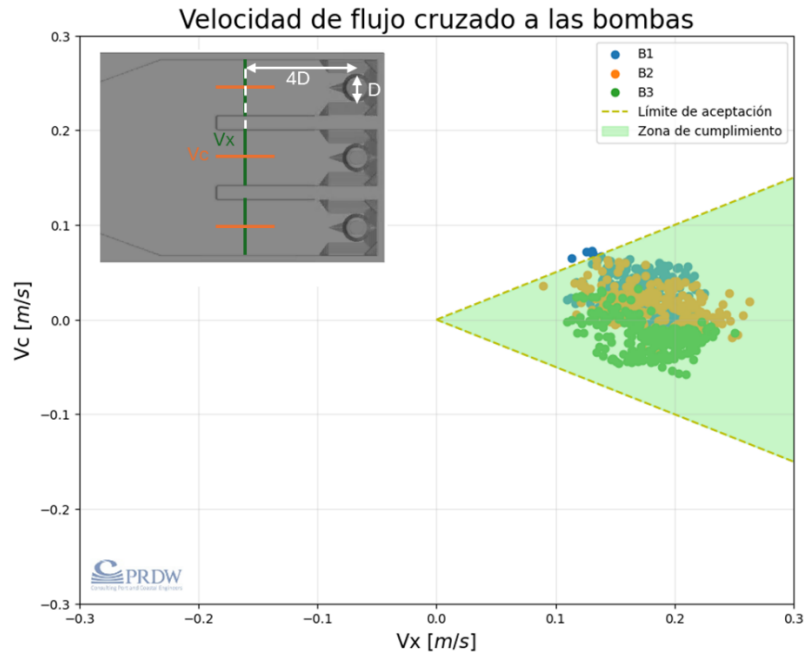


Figura 4-3: Resultados del análisis de criterio "Velocidad de flujo cruzado a las bombas" (2.2) del caso de estudio.

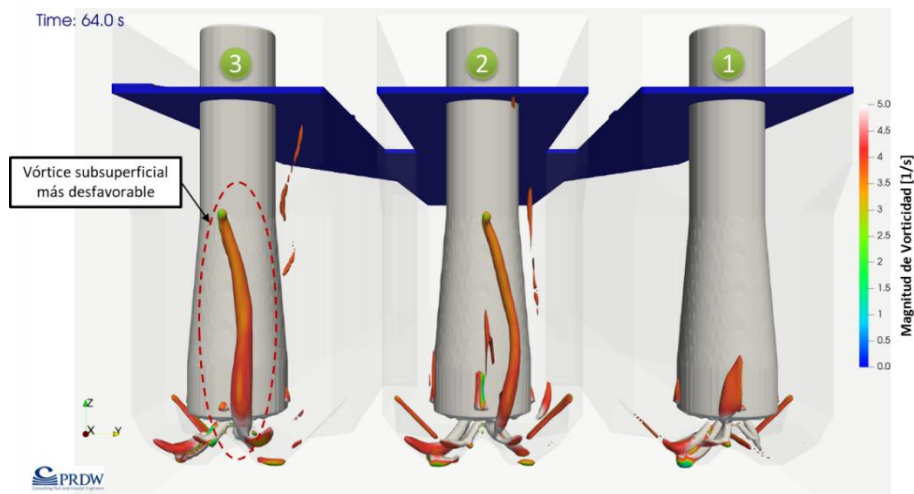


Figura 4-4: Identificación del vórtice subsuperficial más desfavorable para análisis de criterio "Vórtices subsuperficiales" (3.2).

Por último, la Figura 4-5 muestra los resultados del análisis del criterio "Ángulo de *swirl*" (criterio 3.3), el cual se calcula con los resultados de velocidad dentro de la succión de la bomba. Los ángulos de *swirl* de todas las bombas están por debajo del límite de los 5° establecido por (ANSI, 2018), lo que se considera admisible.

Con el análisis de todos los criterios, se obtiene el cumplimiento general del caso de estudio mostrado en la Tabla 4-1. Se observa que el cumplimiento general de la sentina no sería admisible, principalmente por la presencia de vórtices subsuperficiales no admisibles.

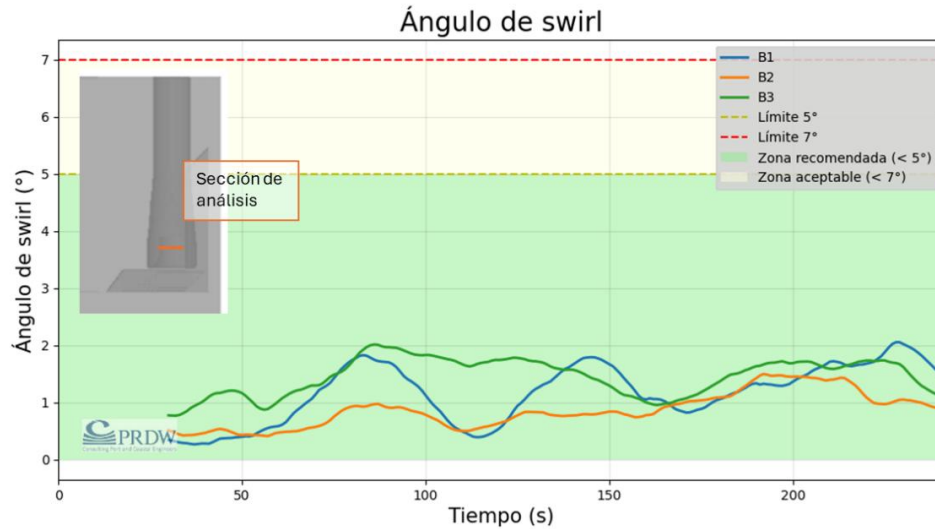


Figura 4-5: Resultados del análisis del criterio "Ángulo de swirl" (3.3) del caso de estudio.

Tabla 4-1: Resultados del cumplimiento de los criterios para el caso de estudio.

Nivel	ID	Criterio	Cumple / No cumple	Comentarios
Nivel 1 Evaluación directrices generales de ANSI/HI 9.8	1.1	Flujo uniforme	Cumple	Se aprecian campos de velocidad uniformes.
	1.2	Flujo permanente	Cumple	Se aprecian campos de velocidad permanentes.
	1.3	Flujo libre de vórtices o remolinos	No Cumple	Existe una densidad importante de vórtices subsuperficiales.
	1.4	Flujo libre de intrusión de aire	Cumple*	Poca densidad de vórtices superficiales, pero algunos conectan succión-superficie libre.
Nivel 2 Campo de velocidades	2.1	Velocidad de acercamiento	Cumple	Todas las bombas cumplen.
	2.2	Velocidad de flujo cruzado	Cumple	Todas las bombas cumplen.
	2.3	Velocidad de succión uniforme	Cumple	Todos los puntos de todas las bombas cumplen.
	2.4	Velocidad de succión permanente	Cumple	Todos los puntos de todas las bombas cumplen.
Nivel 3 Evaluación de vórtices	3.1	Vórtices superficiales	Cumple	Los vórtices superficiales se clasifican como Tipo 2, considerados admisibles.
	3.2	Vórtices subsuperficiales	No Cumple	Vórtices clasificados como Tipo 2 y presentes más de un 10% del tiempo de simulación.
	3.3	Ángulo de <i>swirl</i>	Cumple	Todas las bombas activas presentan ángulos de <i>swirl</i> menores a 5°.

5 CONCLUSIONES

El presente trabajo propone una metodología de aplicación de los criterios ANSI/HI 9.8-2018 mediante simulación CFD como una herramienta para identificar y evaluar fenómenos hidráulicos críticos en sentinas de bombas en etapas tempranas de diseño. A través del caso de referencia reproducido en FLOW-3D HYDRO, se constató la capacidad del modelo para identificar adecuadamente estructuras complejas del flujo y evaluar los criterios propuestos, que incluye la identificación de vórtices y cuantificación del ángulo de *swirl*.

La principal ventaja del método CFD sobre técnicas experimentales radica en su capacidad para entregar una caracterización espacial completa del flujo sin perturbaciones introducidas por instrumentos de medición, así como su agilidad para evaluar diversas configuraciones y condiciones operacionales, permitiendo converger rápida y económicamente a un diseño optimizado.

Sin embargo, es importante considerar las limitaciones propias del modelado CFD tales como la sensibilidad de los resultados frente a la resolución de la malla y al modelo de turbulencia empleado.

Se muestra la aplicación de la metodología en un caso de estudio, consistente en una sentina diseñada de acuerdo con las recomendaciones del estándar (ANSI, 2018). Si bien los resultados muestran un cumplimiento de la mayoría de los criterios establecidos, se observan vórtices subsuperficiales clasificados como tipo 2 presentes más del 10% del tiempo de simulación, clasificándose como no admisibles según ANSI.

La metodología establecida demuestra su potencial para reducir significativamente los tiempos y costos asociados al diseño hidráulico, permitiendo identificar problemas en etapas tempranas, como la presencia de los vórtices subsuperficiales del caso de estudio, y optimizar configuraciones, como, por ejemplo, una optimización de los dispositivos *Anti-Vortex*, antes de recurrir a validaciones experimentales definitivas.

6 REFERENCIAS

- ANSI. (2018). *American National Standard for Rotodynamic Pumps for Pump Intake Design ANSI/HI 9.8*. Hydraulic Institute.
- 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.
- Jeong, J., & Hussain, F. (1995). On the identification of a vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 285:69-94.
- Mitra, P., Gudibande, N., Iyer, K., & Eldho, T. (2015). *Algorithm for Estimating Swirl Angles in Multi-Intake Hydraulic Intakes*.