UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE

IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE CFD PARA ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO DEL POZO DE ASPIRACIÓN DE PLANTA ELEVADORA DE AGUAS SERVIDAS EN VIÑA DEL MAR

Memoria de titulación presentada por
GONZALO JUAN CARTES VALDÉS

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Mauricio Correa Cáceres

Profesor Co-Referente
Patricio Catalán Mondaca

Enero 2019

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE

IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE CFD PARA ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO DEL POZO DE ASPIRACIÓN DE PLANTA ELEVADORA DE AGUAS SERVIDAS EN VIÑA DEL MAR

Memoria de titulación presentada por
GONZALO JUAN CARTES VALDÉS

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Mauricio Correa Cáceres

Profesor Co-Referente
Patricio Catalán Mondaca

Enero 2019

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, deseo agradecer a mis padres Jeannette Valdés y Gonzalo Cartes, quienes han sido el pilar fundamental tras mi desarrollo universitario. Gracias a ustedes tuve una base emocional, valórica, moral y económica que me permitió un desarrollo íntegro en esta Universidad. Gracias por todo el amor incondicional.

A mi profesor guía Sr. Mauricio Correa, por toda su ayuda y gestión para lograr avanzar a esta nueva etapa en la vida.

A mi profesor correferente Sr. Patricio Catalán tanto por la ayuda y apoyo en esta memoria, como en mi desarrollo académico en la Universidad.

A Daniela Díaz, ya que sin su amor y preocupación no hubiese terminado esta memoria ni en 5 años. Muchas gracias por llevarme de la mano hacia adelante.

A Matilda Cartes, que me llenas de alegría y me permites ser un mejor hombre, padre, esposo y persona.

A ESVAL S.A. y Aguas Santiago Poniente S.A. por facilitarme los antecedentes técnicos para el desarrollo de esta memoria. Espero que a ustedes también les sirva el trabajo realizado.

Al Sr. Héctor Hernández, por haberme guiado de manera académica, profesional y personal en el desarrollo de esta memoria y en el inicio de la vida profesional.

A los ingenieros del Instituto Nacional de Hidráulica, Andrés Tapia, Rodrigo Herrera y Jaime Cotroneo. Muchas gracias por toda su asistencia tanto en el concepto de la memoria, como en aspectos técnicos del software OpenFOAM®.

Y, por último y no menos importantes, a todos mis amigos, compañeros y futuros colegas, quienes fueron parte de mi historia universitaria, de esas semanas completas en la biblioteca, de las pichangas y Copas Rotas en las que participamos, de esos momentos de respiro en Fotografía, Natación o Baile Social, de esas juntas y carretes piolas, y sobre todo por todas las alegrías y penas que vivimos juntos en esta Universidad. Gracias por todo el cariño y tiempo entregado.

Dedicado a mis orgullosos padres,

A la loca de mi hermana,

A mi incondicional Daniela,

Y a mi Mati que me llena el corazón.

RESUMEN EJECUTIVO

Una Planta Elevadora de Aguas Servidas (PEAS) es una obra hidráulica que impulsa las aguas servidas desde un pozo de aspiración mediante un sistema de bombas y línea de impulsión para su disposición en un punto hidráulicamente más alto. Estas plantas se pueden diseñar para un amplio rango de caudales de impulsión y en esta memoria se busca analizar el diseño para una PEAS de gran tamaño, esto es, de caudales del orden de 500 [L/s] o más. Cuando se analizan plantas pequeñas y medianas se puede remitir a la normativa vigente actual la NCh2472.Of2002, donde el aspecto más importante del diseño geométrico es el volumen del pozo de equilibrio/aspiración. Sin embargo, en las plantas de gran tamaño el volumen es tan elevado que la forma de éstas cobra una importancia fundamental, ya que la correcta operación de las bombas depende de evitar la formación de vórtices, aparición de subpresiones, cavitación y entrada de aire.

Dado que las bombas se ubican en un entorno de flujo tridimensional de aguas servidas, donde las componentes de velocidad son relevantes en las tres direcciones del flujo, es que esta memoria plantea la alternativa de implementar el diseño geométrico tridimensional del pozo de aspiración de una PEAS existente y operativa con un software CFD (Computational Fluid Dynamics por sus siglas en inglés, o Dinámica Computacional de Fluidos) con el fin de poder contar con una nueva herramienta de diseño y análisis. Para esto, se representará en un modelo tridimensional la planta existente, propiedad de ESVAL S.A. y ubicada en la calle 2 Norte con 4 Poniente en la ciudad de Viña del Mar, y se importará a OpenFOAM®, un software CFD libre ampliamente utilizado para la modelación de movimientos tridimensionales de fluidos, el cual basa su metodología de cálculo en el Método de los Volúmenes Finitos. Además, se generará el mallado y condiciones de borde apropiados para poder analizar el diseño geométrico de la planta elevadora de aguas servidas de ESVAL S.A. Este proceso de implementación tridimensional se realiza de forma detallada y explicativa, para cimentar los procedimientos requeridos para esta y futuras modelaciones.

Finalmente se presentan conclusiones sobre la recopilación de recomendaciones de diseño geométrico de una planta elevadora de aguas servidas, y sobre la implementación del modelo en OpenFOAM® haciendo énfasis en el costo computacional de la modelación. Con esto, se permite generar modelos para realizar consideraciones tanto para futuros diseños geométricos de plantas elevadoras de aguas servidas, como para realizar modificaciones en plantas cuyo funcionamiento sea deficiente, y en general, con este trabajo se permite dar los lineamientos clave para el análisis y desarrollo de cualquier problemática de flujo tridimensional multifase.

ABSTRACT

A Wastewater Lifting Plant (PEAS for its acronym in spanish) is a hydraulic structure which lifts wastewater from a suction well to a higher point, through a pump system and a pipeline. These plants can be designed for a wide flow spectrum, but this work analyzes a big plant's design, which means, plants with flows over 500 [L/s]. For smaller plants, the design can be referred to the current Chilean regulations NCh2472.Of2002, where the most important aspect of the geometrical design is the suction well's volume. However, in big size plants the volume is very high, so the shape of these plants has a fundamental importance, because the correct operation of the pump system depends on avoiding the vortex and low pressure appearance, cavitation, and air entrainment.

Since the pump systems are located in a tridimensional wastewater flow environment, where the velocity components are relevant in the three directions of the flow, this memory proposes to implement the well's tridimensional geometric design of an existent and operative PEAS with a CFD software (Computational Fluid Dynamics) to have a new tool for design and analysis. For this purpose, the representation in a tridimensional model of the existent plant, property of ESVAL S.A. and located in 2 Norte wih 4 Poniente in Viña del Mar City, will be imported to OpenFOAM®, an open-source CFD software widely used for tridimensional flow movements, with which the mesh and boundary conditions will be appropriately generated to analyze the plant's geometric design. This implementation process is executed in a detailed and explained way, to set the foundation of the required procedures for this and future modeling.

In the end, conclusions are presented about the PEAS's geometrical design state of art and about the OpenFOAM® modeling implementation, emphasizing in the computational cost of modeling. With this work, new models can be generated for future designs of wastewater lifting plants, or to analyze and modify inefficient operating plants; and also, the main guidelines for modeling any tridimensional multiphase flow are set and developed.

GLOSARIO

- **PEAS (Planta Elevadora de Aguas Servidas)**: Es una obra hidráulica que impulsa las aguas servidas desde un pozo de aspiración mediante un sistema de bombas y línea de impulsión para su disposición o tratamiento en un punto hidráulicamente más alto.

- **CFD (Computational Fluid Dynamics)**: Es una rama de la mecánica de fluidos que se encarga de resolver las ecuaciones que gobiernan el movimiento de fluidos mediante algoritmos y métodos numéricos realizados por un computador. Dentro de las más conocidas se encuentran ANSYS®, OpenFOAM® y CFD++®.

- **Método de los Volúmenes Finitos (MVF)**: Éste método consiste en la discretización del volumen de control total en un mallado discreto de pequeños volúmenes de control, para los cuales se integran las ecuaciones diferenciales, entregando ecuaciones discretizadas para cada volumen pequeño de control, para lo cual es necesario indicar el tipo de interpolación que existe entre los parámetros a integrar.

- **Método de Volumen de Fluido**: Este método, también conocido como *Volume of Fluid* o *VOF* por sus siglas en inglés), consiste en incluir un valor escalar a las ecuaciones de transporte de fluidos, que se encarga de modelar la interfaz agua/aire.

- **GUI (Graphical User Interface)**: Es un programa informático que trabaja como interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles. En otras palabras, proporciona un entorno visual sencillo para permitir la comunicación entre usuario y programa.

- **CAD (Computer-Aided Design)**: Son herramientas computacionales con GUI para dibujar y diseñar elementos bi y tridimensionales mediante entidades geométricas como puntos, líneas, arcos, polígonos, superficies y sólidos. Dentro de las más conocidas se encuentran AutoCAD, Google SketchUp y Blender.

SIMBOLOGÍA

- $\boldsymbol{a}$: Altura de la grada de bajada, en $[m]$.
- $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{A_i}$: Área transversal de un canal, en $[m^2]$.
- $\boldsymbol{Am}$: Área mojada de un canal que corresponde a la superficie cubierta con fluido dentro de un volumen de control. En un canal prismático es equivalente al perímetro mojado Pm multiplicada por la longitud del volumen de control $L_{V.C.}$, en $[m^2]$.
- $\boldsymbol{Ap}, \boldsymbol{Ap_i}$: Área transversal de presión de un canal. Habitualmente corresponde al área completa del perímetro mojado, en $[m^2]$.
- $\boldsymbol{Av}, \boldsymbol{Av_i}$: Área transversal de velocidad de un canal. Habitualmente corresponde al área exclusiva de escurrimiento, descontando las áreas con recirculamiento, en $[m^2]$.
- $\boldsymbol{B1}$: Abreviación de Bomba N°1 dentro de la PEAS ubicada en 2 Norte con 4 Poniente, en Viña del Mar.
- $\boldsymbol{B2}$: Abreviación de Bomba N°2 dentro de la PEAS ubicada en 2 Norte con 4 Poniente, en Viña del Mar.
- $\boldsymbol{B6}$: Abreviación de Bomba N°6 dentro de la PEAS ubicada en 2 Norte con 4 Poniente, en Viña del Mar.
- $\boldsymbol{c_{1\epsilon}}$: Constante empírica del Modelo de Turbulencia $\kappa - \epsilon$.
- $\boldsymbol{c_{2\epsilon}}$: Constante empírica del Modelo de Turbulencia $\kappa - \epsilon$.
- $\boldsymbol{c_{\mu}}$: Constante empírica del Modelo de Turbulencia $\kappa - \epsilon$.
- $\boldsymbol{C}$: Distancia horizontal entre el centro de la línea de impulsión y un muro contiguo, en $[m]$.
- $\boldsymbol{C_{Chezy}}$: Coeficiente de Chezy.
- $\boldsymbol{Co}$: Número de Courant calculado a partir de parámetros de la modelación en CFD, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{Co_{máximo}}$: Número de Courant máximo que permite la convergencia de la modelación CFD, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{C_{\tau}}$: Coeficiente de roce asociado al esfuerzo de corte τ, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{D}$: Ancho horizontal exterior del rodete de la bomba, en $[m]$.
- $\boldsymbol{\frac{D}{Dt}}$: Derivada total de una variable, corresponde a la variación temporal y convectiva de una variable y se descompone como $\frac{Df}{Dt} = \frac{df}{dt} + U_x \cdot \frac{df}{dx} + U_y \cdot \frac{df}{dy} + U_z \cdot \frac{df}{dz}$, en $\left[\frac{1}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{E_c}$: Energía específica crítica equivalente a la mínima energía para un canal con sección y caudal conocidos, en $[m]$.
- $\boldsymbol{E_i}$: Energía específica en un punto dado, en $[m]$.
- $\boldsymbol{Fr}$: Número de Froude que relaciona propiedades del flujo con la energía específica crítica E_c, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{g_i}$: Componente de la aceleración de gravedad en dirección i, en $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.
- $\boldsymbol{G}$: Distancia horizontal entre los centros de las líneas de impulsión de dos bombas contiguas, en $[m]$.
- $\boldsymbol{h_c}$: Altura crítica del canal, condición que se da para la mínima energía específica E_c, en $[m]$.

- $\boldsymbol{h_i}$: Altura de escurrimiento en un punto dado, en $[m]$.
- $\boldsymbol{h_n}$: Altura normal del canal, condición que se da cuando se alcanza flujo uniforme, en $[m]$.
- $\boldsymbol{h_{T1}}$: Altura de torrente previa a grada de bajada, en $[m]$.
- $\boldsymbol{h_{T2}}$: Altura de torrente posterior a grada de bajada, en $[m]$.
- $\boldsymbol{j(x)}$: Curvatura de la interfaz, en $\left[\frac{1}{m}\right]$.
- $\boldsymbol{J}$: Pérdida de fricción por unidad de largo en flujo de canal abierto, e s $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{K_C}$: Parámetro que relaciona la altura de la grada a con la altura crítica h_c, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{l_C}$: Distancia entre la grada de bajada y el punto donde se alcanza la altura de torrente h_{T2}, en $[m]$.
- $\boldsymbol{l_T}$: Longitud de escala de turbulencia, en $[m]$.
- $\boldsymbol{L_C}$: Parámetro que relaciona la distancia l_C con la altura crítica h_c, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{L_{V.C.}}$: Longitud de un volumen de control definido, en $[m]$.
- $\boldsymbol{m}$: Coeficiente de Manning, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{M}, \boldsymbol{M_i}$: Función Momenta, en $[m^3]$.
- $\boldsymbol{n}$: Vector normal a la interfaz con dirección desde agua a aire, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{P}$: Presión relativa equivalente a la presión total menos la presión atmosférica, en $\left[\frac{Kg}{m \cdot s^2}\right]$.
- $\boldsymbol{\overline{P}}$: Campo de Presión promedio en el dominio del fluido, que junto con el campo de Presión fluctuante $\tilde{P}$ componen el campo total de presiones P, en $\left[\frac{Kg}{m \cdot s^2}\right]$.
- $\boldsymbol{\widetilde{P}}$: Campo de Presión fluctuante en el dominio del fluido, que junto con el campo de Presión promedio $\overline{P}$ componen el campo total de presiones P, en $\left[\frac{Kg}{m \cdot s^2}\right]$.
- $\boldsymbol{P_0}$: Presión atmosférica, en $\left[\frac{Kg}{m \cdot s^2}\right]$.
- $\boldsymbol{Pm}$: Perímetro mojado correspondiente al contorno del área transversal A que está en contacto con el fluido, en $[m]$.
- $\boldsymbol{Q}$: Caudal del escurrimiento, en $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{Q_{B1}}$: Caudal de funcionamiento de la Bomba N°1 para las distintas disposiciones de bombas, en $\left[\frac{L}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{Q_{B2}}$: Caudal de funcionamiento de la Bomba N°2 para las distintas disposiciones de bombas, en $\left[\frac{L}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{Q_{B6}}$: Caudal de funcionamiento de la Bomba N°6 para las distintas disposiciones de bombas, en $\left[\frac{L}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{Q_{máx}}$: Caudal máximo de funcionamiento de la bomba indicada, en $\left[\frac{L}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{Q_{min}}$: Caudal mínimo de funcionamiento de la bomba indicada, en $\left[\frac{L}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{R_H}$: Radio hidráulico, propiedad hidráulica equivalente al área transversal A dividido por el perímetro mojado Pm, en $[m]$.
- $\boldsymbol{s}$: Pendiente del canal, en $[m/m]$ ó $[\%]$.

- $\boldsymbol{t}$: tiempo real, en $[s]$.
- $\boldsymbol{t_c}$: tiempo total de cómputo, en $[s]$.
- $\boldsymbol{Ts_i}$: Componente de la Tensión Superficial en dirección i, en $\left[\frac{Kg}{m^3 s^2}\right]$.
- $\boldsymbol{U}$: Campo vectorial de velocidades en el dominio del fluido, y es variable de manera espacial y temporal, y se descompone en la suma de los campos de velocidad en dirección x, y, z, denominados como u, v, w respectivamente, en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- $\overline{\boldsymbol{U}}$: Campo vectorial de velocidades promedio en el dominio del fluido, que junto con el campo de velocidades fluctuantes $\widetilde{U}$ componen el campo de velocidades U, en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- $\widetilde{\boldsymbol{U}}$: Campo vectorial de velocidades fluctuantes en el dominio del fluido, que junto con el campo de velocidades promedio $\overline{U}$ componen el campo de velocidades U, en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{U_i}$: Componente en dirección i del campo de velocidades U, en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- $\overline{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{i}}$: Componente en dirección i del campo de velocidades promedio $\overline{\boldsymbol{U}}$, en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- $\widetilde{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{i}}$: Componente en dirección x del campo de velocidades fluctuante $\widetilde{\boldsymbol{U}}$, en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{U_r}$: Campo de velocidad en interfaz agua-aire, en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{v}, \boldsymbol{v_i}$: Velocidad media de flujo en un canal abierto, en $\left[\frac{m}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{W}$: Peso del volumen de control, en $\left[\frac{Kg \cdot m}{s^2}\right]$.
- $\mathbf{X_{T1}}$: Parámetro que relaciona la altura de torrente aguas arriba de la grada h_{T1} con la altura crítica h_c, es $[adimensional]$.
- $\mathbf{X_{TT}}$: Parámetro que relaciona la altura de torrente aguas arriba de la grada h_{T1} con la altura de torrente aguas debajo de la grada h_{T2}, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{z_i}$: Coordenada del fondo del canal en un punto dado, en $[m]$.
- $\boldsymbol{\alpha}$: Fracción de volumen entre dos fases, su valor varía entre 0 y 1 (donde 0 indica aire y 1 indica agua), es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{\delta_{ij}}$: Función Delta de Krónecker que vale 1 cuando se analizan esfuerzos normales ($i = j$) y 0 en todos los otros casos, es $[adimensional]$.
- $\boldsymbol{\Delta c_i}$: Mínimo tamaño de celda en dirección i, en $[m]$.
- $\boldsymbol{\Delta E}$: Variación de Energía Específica entre punto final e inicial, en $[m]$.
- $\boldsymbol{\Delta H_{fricción}}$: Pérdidas de energía por fricción en un canal, en $[m]$.
- $\boldsymbol{\Delta H_{singular}}$: Pérdidas de energía por el enfrentamiento a una singularidad en un canal, en $[m]$.
- $\boldsymbol{\Delta t_c}$: intervalo de cómputo, en $[s]$.
- $\boldsymbol{\Delta x}$: Separación entre dos puntos de escurrimiento en canal abierto, en $[m]$.
- $\boldsymbol{\epsilon}$: Variable épsilon del Modelo de Turbulencia $\kappa - \epsilon$, que corresponde a la tasa de disipación turbulenta, en $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$.
- $\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\eta_i}$: Profundidad del centroide del área Ap, en $[m]$.
- $\boldsymbol{\theta}$: Ángulo del fondo del canal respecto a la horizontal, en [°].

- $\boldsymbol{\kappa}, \boldsymbol{k}$: Corresponde a la energía cinética turbulenta y también conocida como la variable kappa del Modelo de Turbulencia $\kappa - \epsilon$, en $\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$.
- $\boldsymbol{\mu}$: Viscosidad dinámica del fluido, en $\left[\frac{Kg}{m \cdot s}\right]$.
- $\boldsymbol{\nu}$: Viscosidad cinemática del fluido, en $\left[\frac{Kg}{m \cdot s}\right]$.
- $\boldsymbol{\nu_t}$: Viscosidad turbulenta planteada por Boussinesq (1877), en $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.
- $\boldsymbol{\rho}$: Densidad del fluido, según el subíndice podrá ser de agua o aire, en $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$.
- $\boldsymbol{\sigma}$: Coeficiente de tensión superficial, en $\left[\frac{Kg}{s^2}\right]$.
- $\boldsymbol{\sigma_\epsilon}$: Constante empírica del Modelo de Turbulencia $\kappa - \epsilon$.
- $\boldsymbol{\sigma_\kappa}$: Constante empírica del Modelo de Turbulencia $\kappa - \epsilon$.
- $\boldsymbol{\tau}$: Esfuerzo de corte en interfaz fluido/superficie, en $\left[\frac{Kg}{s^2}\right]$.
- $\bar{\boldsymbol{\tau}}$: Esfuerzo de corte promedio distribuida en el área mojada Am, en $\left[\frac{Kg}{s^2}\right]$.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO I
ABSTRACT II
GLOSARIO III
SIMBOLOGÍA IV
ÍNDICE GENERAL VIII
ÍNDICE DE FIGURAS XI
ÍNDICE DE TABLAS XVIII
1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 Antecedentes generales 1
1.2 Objetivos 2
1.2.1 Objetivo principal 2
1.2.2 Objetivos secundarios 2
1.3 Esquema de trabajo 2
2 ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE LAS PEAS 4
2.1 Diseño de PEAS en Chile 4
2.2 Recomendaciones de fabricantes de bombas 5
2.2.1 Fenómenos Hidráulicos Adversos 6
2.2.2 Recomendaciones de FLYGT® 8
2.2.3 Recomendaciones de GRUNDFOS® 8
2.3 Modelación vía software CFD 11
2.3.1 Caso 1: Análisis del ingreso de agua a una planta 11
2.3.2 Caso 2: Optimización del diseño geométrico 13
2.3.3 Caso 3: Uso de piezas especiales 14
3 MARCO TEÓRICO 15
3.1 Computational Fluid Dynamics (CFD) 15
3.1.1 Funcionamiento de un código CFD 16
3.1.2 OpenFOAM® 17
3.2 Modelación de flujos turbulentos 18
3.2.1 Direct Numerical Simulation (DNS) 18
3.2.2 Large Eddy Simulation (LES) 18
3.2.3 Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS) 18
3.3 Método Volumen de Fluido 21
3.4 Condición Courant-Friederichs-Lewy 22
3.5 Hidráulica de canales clásica 22
3.5.1 Ecuación de Energía 22
3.5.2 Cálculo de eje hidráulico 25
3.5.3 Función Momenta 25
3.5.4 Caída 26
3.5.5 Resalto hidráulico 27

4 ANÁLISIS GEOMÉTRICO PREVIO DE PEAS UBICADA EN VIÑA DEL MAR 29
4.1 Descripción de la PEAS existente 29
4.2 Observaciones del diseño geométrico de la PEAS 30
4.2.1 Distanciamiento de tuberías 30
4.2.2 Forma del fondo de la PEAS 31
4.2.3 Muros adicionales 32
4.2.4 Niveles de Agua 33
4.2.5 Modelación de las bombas 33
5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD BIDIMENSIONAL 35
5.1 Casos a analizar 35
5.1.1 Caso N°1: Caso base 36
5.1.2 Caso N°2: Modelo de turbulencia $\kappa - \epsilon$ 36
5.2 Resultados comparativos 36
5.2.1 Caso N°1 37
5.2.2 Caso N°2 38
5.2.3 Comparación de vorticidad bajo grada 40
5.3 Análisis de Resultados 41
5.3.1 Caso N°1 41
5.3.2 Caso N°2 41
5.3.3 Conclusiones Finales 41
6 VALIDACIÓN DEL MODELO CFD 42
6.1 Validación vía Hidráulica Clásica 42
6.1.1 Resolución vía Hidráulica Clásica 42
6.1.2 Resolución vía OpenFOAM® 45
6.1.3 Análisis de resultados 46
6.2 Validación vía comparación con PEAS real 47
6.2.1 Información de diseño 47
6.2.2 Información Operacional 48
6.2.3 Resultados de modelación 49
6.2.4 Análisis de resultados 51
6.3 Conclusiones y comentarios 51
7 MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DEL POZO DE ASPIRACIÓN 53
7.1 Previo a la modelación 53
7.1.1 Equipo computacional utilizado 53
7.1.2 Esquema de archivos 54
7.2 Fluido considerado en la modelación 55
7.3 Incorporación de geometría en la modelación 55
7.3.1 Simplificaciones en la geometría 55
7.3.2 Modelación tridimensional 55
7.3.3 Elementos de borde 58
7.4 Mallado de la modelación 58

7.5 Condiciones de borde ... 60
8 RESULTADOS Y ANÁLISIS ... 61
8.1 Obtención de resultados ... 61
8.1.1 Escenarios de resultados ... 61
8.1.2 Características de resultados ... 62
8.1.3 Post-proceso ... 63
8.2 Análisis de resultados según escenarios ... 63
8.2.1 Comparación de resultados según mallado ... 63
8.2.2 Análisis de resultados según operación de bombas ... 67
8.2.3 Análisis de resultados según geometría interna de la PEAS ... 72
8.3 Análisis sobre la modelación ... 78
8.3.1 Tiempos de modelación ... 78
8.3.2 Número de Courant ... 79
9 CONCLUSIONES ... 80
10 REFERENCIAS ... 83
11 ANEXOS ... 85
11.1 Instalación de OpenFOAM® ... 85
11.1.1 Linux ... 85
11.1.2 Windows ... 85
11.2 Esquema de archivos ... 85
11.2.1 <system> ... 86
11.2.2 <constant> ... 95
11.2.3 <0> ... 97
11.3 Procedimientos y comandos ... 102
11.3.1 Importación de geometría ... 102
11.3.2 Ejecución del modelo ... 103
11.3.3 Funciones de postproceso ... 103
11.4 Resultados de modelación ... 108
11.4.1 Mallado grueso ... 109
11.4.2 Mallado fino ... 127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°2.1 – Perfil con pendientes hacia la tubería de aspiración 5
Figura N°2.2 – Muro recto y muro con chaflán curvo 5
Figura N°2.3 – Vista en planta de la velocidad de acercamiento a la bomba 6
Figura N°2.4 – Vista en Perfil de ingreso disparejo del agua a la bomba 6
Figura N°2.5 – Vista en Perfil de formación de vórtices en la tubería de entrada 7
Figura N°2.6 – Captación de partículas de aire 7
Figura N°2.7 – Lados inclinados en el fondo del pozo 8
Figura N°2.8 – Profundidad mínima de la entrada 8
Figura N°2.9 – Incorporación de aire a la impulsión 9
Figura N°2.10 – Distanciamiento entre captación e ingreso de agua 9
Figura N°2.11 – Suavización de esquinas 10
Figura N°2.12 – Disposición en Planta de las Bombas 10
Figura N°2.13 – Geometría y modelación CFD para el ingreso de agua 11
Figura N°2.14 – Nueva geometría y modelación CFD para el ingreso de agua 12
Figura N°2.15 – Modelación CFD del pozo 13
Figura N°2.16 – Modelación CFD del pozo con muros divisores 13
Figura N°2.17 – Vista en planta del acceso a la bomba 14
Figura N°2.18 – Nueva captación y modelación CFD de sus efectos 14
Figura N°3.1 – Balance de Fuerzas en flujo uniforme 24
Figura N°3.2 – Grada de bajada antecedida y seguida de un torrente 26
Figura N°3.3 – Ábaco para determinar $\boldsymbol{hT2}$ 27
Figura N°3.4 – Ábaco para determinar $\boldsymbol{lC}$ 27
Figura N°3.5 – Representación de un resalto hidráulico 27
Figura N°4.1 – Mapa de Región de Valparaíso – Ubicación PEAS y Emisarios Submarinos 29
Figura N°4.2 – Vista en planta de PEAS 2 Norte 29
Figura N°4.3 – Vista en planta de tuberías y muros internos 30
Figura N°4.4 – Vista en corte de la planta y zona con pendientes para las bombas 31
Figura N°4.5 – Vista en planta del pozo de aspiración y sus muros internos adicionales 32
Figura N°4.6 – Curvas de operación de las bombas 34
Figura N°5.1 – Representación de la geometría bidimensional utilizada 35
Figura N°5.2 – Modelación CFD para Caso N°1 (U y nivel de agua), t = 0 [s] 37
Figura N°5.3 – Modelación CFD para Caso N°1 (U y nivel de agua), t = 20 [s] 37
Figura N°5.4 – Modelación CFD para Caso N°1 (U y nivel de agua), t = 40 [s] 38
Figura N°5.5 – Modelación CFD para Caso N°2 (U y nivel de agua), t = 0 [s] 38
Figura N°5.6 – Modelación CFD para Caso N°2 (U y nivel de agua), t = 20 [s] 39
Figura N°5.7 – Modelación CFD para Caso N°2 (U y nivel de agua), t = 40 [s] 39
Figura N°5.8 – Modelación CFD para Caso N°1 (Vorticidad, U y nivel de agua) 40
Figura N°5.9 – Modelación CFD para Caso N°2 (Vorticidad, U y nivel de agua) 40
Figura N°6.1 – Características del Canal 42
Figura N°6.2 – Eje Hidráulico en ParaView® 45

Figura N°6.3 – Eje Hidráulico calculado con ambas metodologías 46
Figura N°6.4 – Relación entre ambas alturas 47
Figura N°6.5 – Vista isométrica de PEAS Los Alerces 48
Figura N°6.6 – Reporte histórico de Nivel de Sentina en PEAS Los Alerces 49
Figura N°6.7 – Ciclo de funcionamiento a evaluar por OpenFOAM® 49
Figura N°6.8 – Corte de la sentina de aspiración para calcular el nivel 50
Figura N°6.9 – Nivel de Sentina según modelo CFD 50
Figura N°6.10 – Comparación entre registros reales y modelación CFD 51
Figura N°7.1 – Esquema de archivos requerido por OpenFOAM® 54
Figura N°7.2 – Planos de ESVAL S.A. intersectados en AutoCAD® 56
Figura N°7.3 – Contornos de Elementos 3D con elevaciones de PEAS en AutoCAD® 56
Figura N°7.4 – Representación 3D en AutoCAD® de la PEAS 56
Figura N°7.5 – Importación STL e intersección con mallado grueso. 57
Figura N°7.6 – Refinación y extracción de mallado. 57
Figura N°7.7 – Representación 3D en AutoCAD® de la PEAS 58
Figura N°7.8 – Acercamiento de mallado grueso regular en zona de tuberías 59
Figura N°7.9 – Acercamiento de mallado grueso irregular en zona de tuberías 59
Figura N°7.10 – Acercamiento de mallado fino regular en zona de tuberías 60
Figura N°8.1 – Vista en planta de los cortes realizados en el pozo de aspiración 62
Figura N°8.2 – Vista isométrica de los cortes realizados en el pozo de aspiración 62
Figura N°8.3 – Zoom de Corte A-A, con vectores de velocidad en plano XZ – Mallado Grueso 64
Figura N°8.4 – Zoom de Corte A-A, con vectores de velocidad en plano XZ – Mallado Fino 64
Figura N°8.5 – Zoom de Corte A-A, con vectores de vorticidad en plano XZ – Mallado Grueso 65
Figura N°8.6 – Zoom de Corte A-A, con vectores de vorticidad en plano XZ – Mallado Fino 65
Figura N°8.7 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ– Mallado Grueso 66
Figura N°8.8 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ – Mallado Fino 66
Figura N°8.9 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B1-B2 67
Figura N°8.10 – Zoom de Corte E-E, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B1-B2 68
Figura N°8.11 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B1-B6 68
Figura N°8.12 – Zoom de Corte E-E, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B1-B6 68
Figura N°8.13 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B2-B6 69
Figura N°8.14 – Zoom de Corte E-E, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B2-B6 69
Figura N°8.15 – Zoom de Corte D-D, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B1-B2 70
Figura N°8.16 – Zoom de Corte E-E, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B1-B2 70
Figura N°8.17 – Zoom de Corte D-D, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B1-B6 70
Figura N°8.18 – Zoom de Corte E-E, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B1-B6 71
Figura N°8.19 – Zoom de Corte D-D, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B2-B6 71
Figura N°8.20 – Zoom de Corte E-E, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B2-B6 71
Figura N°8.21 – Zoom Corte D-D, con vectores de velocidad YZ - Ambos Muros 73
Figura N°8.22 – Zoom Corte D-D, con vectores de velocidad YZ – Muros Separadores 73
Figura N°8.23 – Zoom Corte D-D, con vectores de velocidad YZ – Sin Muros 73

Figura N°8.24 – Zoom Corte E-E, con vectores de velocidad YZ - Ambos Muros..... 74
Figura N°8.25 – Zoom Corte E-E, con vectores de velocidad YZ – Muros Separadores..... 74
Figura N°8.26 – Zoom Corte E-E, con vectores de velocidad YZ – Sin Muros 74
Figura N°8.27 – Vista isométrica de los cortes realizados en el pozo de aspiración 75
Figura N°8.28 – Zoom Corte D-D, con vectores de vorticidad YZ - Ambos Muros..... 76
Figura N°8.29 – Zoom Corte D-D, con vectores de vorticidad YZ – Muros Separadores 76
Figura N°8.30 – Zoom Corte D-D, con vectores de vorticidad YZ – Sin Muros 76
Figura N°8.31 – Zoom Corte E-E, con vectores de vorticidad YZ - Ambos Muros..... 77
Figura N°8.32 – Zoom Corte E-E, con vectores de vorticidad YZ – Muros Separadores 77
Figura N°8.33 – Zoom Corte E-E, con vectores de vorticidad YZ – Sin Muros..... 77
Figura N°8.34 – Información presentada en modelación 79
Figura N°11.1 – Esquema de archivos requerido por OpenFOAM®..... 85
Figura N°11.2 – Corte sin filtrado vía Threshold. 104
Figura N°11.3 – Corte con filtrado vía Threshold. 104
Figura N°11.4 – Corte sin filtrado vía Threshold. 105
Figura N°11.5 – Slice en ParaView..... 105
Figura N°11.6 – Vista de Calculadora en *ParaView*..... 106
Figura N°11.7 – Configuración de Vistas en *ParaView*..... 107
Figura N°11.8 – Vista del Generador de Vectores *Glyph* en *ParaView*..... 107
Figura N°11.9 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A 109
Figura N°11.10 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A..... 109
Figura N°11.11 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala..... 110
Figura N°11.12 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala..... 110
Figura N°11.13 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala 110
Figura N°11.14 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala 110
Figura N°11.15 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala 111
Figura N°11.16 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala 111
Figura N°11.17 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala 111
Figura N°11.18 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala 111
Figura N°11.19 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala 112
Figura N°11.20 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala 112
Figura N°11.21 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala 112
Figura N°11.22 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala..... 112
Figura N°11.23 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala 113
Figura N°11.24 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala 113
Figura N°11.25 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala 113
Figura N°11.26 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala 113
Figura N°11.27 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala..... 114
Figura N°11.28 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala..... 114
Figura N°11.29 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala..... 114
Figura N°11.30 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala..... 114

Figura N°11.31 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A 115
Figura N°11.32 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A..... 115
Figura N°11.33 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala..... 116
Figura N°11.34 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala..... 116
Figura N°11.35 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala 116
Figura N°11.36 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala 116
Figura N°11.37 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala 117
Figura N°11.38 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala 117
Figura N°11.39 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala 117
Figura N°11.40 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala 117
Figura N°11.41 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala 118
Figura N°11.42 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala 118
Figura N°11.43 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala 118
Figura N°11.44 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala 118
Figura N°11.45 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala 119
Figura N°11.46 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala 119
Figura N°11.47 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala 119
Figura N°11.48 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala 119
Figura N°11.49 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala..... 120
Figura N°11.50 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala..... 120
Figura N°11.51 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala..... 120
Figura N°11.52 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala..... 120
Figura N°11.53 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A 121
Figura N°11.54 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A..... 121
Figura N°11.55 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala..... 122
Figura N°11.56 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala..... 122
Figura N°11.57 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala 122
Figura N°11.58 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala 122
Figura N°11.59 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala 123
Figura N°11.60 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala 123
Figura N°11.61 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala 123
Figura N°11.62 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala 123
Figura N°11.63 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala 124
Figura N°11.64 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala 124
Figura N°11.65 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala 124
Figura N°11.66 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala 124
Figura N°11.67 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala 125
Figura N°11.68 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala 125
Figura N°11.69 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala 125
Figura N°11.70 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala 125
Figura N°11.71 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala..... 126

Figura N°11.72 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala 126
Figura N°11.73 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala 126
Figura N°11.74 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala 126
Figura N°11.75 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A 127
Figura N°11.76 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A 127
Figura N°11.77 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala 128
Figura N°11.78 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala 128
Figura N°11.79 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala 128
Figura N°11.80 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala 128
Figura N°11.81 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala 129
Figura N°11.82 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala 129
Figura N°11.83 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala 129
Figura N°11.84 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala 129
Figura N°11.85 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala 130
Figura N°11.86 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala 130
Figura N°11.87 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala 130
Figura N°11.88 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala 130
Figura N°11.89 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala 131
Figura N°11.90 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala 131
Figura N°11.91 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala 131
Figura N°11.92 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala 131
Figura N°11.93 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala 132
Figura N°11.94 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala 132
Figura N°11.95 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala 132
Figura N°11.96 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala 132
Figura N°11.97 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A 133
Figura N°11.98 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A 133
Figura N°11.99 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala 134
Figura N°11.100 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala 134
Figura N°11.101 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala 134
Figura N°11.102 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala 134
Figura N°11.103 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala 135
Figura N°11.104 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala 135
Figura N°11.105 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala 135
Figura N°11.106 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala 135
Figura N°11.107 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala 136
Figura N°11.108 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala 136
Figura N°11.109 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala 136
Figura N°11.110 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala 136
Figura N°11.111 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala 137
Figura N°11.112 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala 137

Figura N°11.113 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala 137
Figura N°11.114 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala 137
Figura N°11.115 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala..... 138
Figura N°11.116 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala..... 138
Figura N°11.117 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala..... 138
Figura N°11.118 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala..... 138
Figura N°11.119 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A 139
Figura N°11.120 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A 139
Figura N°11.121 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala..... 140
Figura N°11.122 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala..... 140
Figura N°11.123 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala 140
Figura N°11.124 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala 140
Figura N°11.125 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala 141
Figura N°11.126 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala 141
Figura N°11.127 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala 141
Figura N°11.128 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala 141
Figura N°11.129 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala 142
Figura N°11.130 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala 142
Figura N°11.131 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala 142
Figura N°11.132 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala 142
Figura N°11.133 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala 143
Figura N°11.134 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala 143
Figura N°11.135 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala 143
Figura N°11.136 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala 143
Figura N°11.137 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala..... 144
Figura N°11.138 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala..... 144
Figura N°11.139 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala..... 144
Figura N°11.140 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala..... 144
Figura N°11.141 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A 145
Figura N°11.142 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A 145
Figura N°11.143 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala..... 146
Figura N°11.144 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala..... 146
Figura N°11.145 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala 146
Figura N°11.146 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala 146
Figura N°11.147 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala 147
Figura N°11.148 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala 147
Figura N°11.149 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala 147
Figura N°11.150 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala 147
Figura N°11.151 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala 148
Figura N°11.152 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala 148
Figura N°11.153 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala 148

Figura N°11.154 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala 148
Figura N°11.155 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala 149
Figura N°11.156 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala 149
Figura N°11.157 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala 149
Figura N°11.158 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala 149
Figura N°11.159 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala 150
Figura N°11.160 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala 150
Figura N°11.161 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala 150
Figura N°11.162 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala 150
Figura N°11.163 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A 151
Figura N°11.164 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A 151
Figura N°11.165 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala 152
Figura N°11.166 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala 152
Figura N°11.167 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala 152
Figura N°11.168 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala 152
Figura N°11.169 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala 153
Figura N°11.170 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala 153
Figura N°11.171 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala 153
Figura N°11.172 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala 153
Figura N°11.173 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala 154
Figura N°11.174 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala 154
Figura N°11.175 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala 154
Figura N°11.176 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala 154
Figura N°11.177 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala 155
Figura N°11.178 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala 155
Figura N°11.179 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala 155
Figura N°11.180 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala 155
Figura N°11.181 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala 156
Figura N°11.182 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala 156
Figura N°11.183 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala 156
Figura N°11.184 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala 156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°2.1 – Tipos de PEAS y su capacidad 4
Tabla N°3.1 – Balance de Ventajas y Desventajas de OpenFOAM® 18
Tabla N°3.2 – Coeficientes Empíricos del modelo $\boldsymbol{\kappa} - \boldsymbol{\epsilon}$ 21
Tabla N°3.3 – Fuerzas involucradas en Balance de Fuerzas en Volumen de Control 24
Tabla N°3.4 – Parámetros utilizados en Ábacos 26
Tabla N°4.1 – Dimensiones entre bombas y muros 30
Tabla N°4.2 – Verificación de las dimensiones 31
Tabla N°4.3 – Niveles de Agua 33
Tabla N°4.4 – Características de cada bomba (Operacional) 33
Tabla N°4.5 – Disposiciones Operacionales Reales (Caudal máximo) 33
Tabla N°6.1 – Resumen de características hidráulicas en ambos Tramos 42
Tabla N°6.2 – Resultados de Eje Hidráulico en la primera etapa 43
Tabla N°6.3 – Resultados de Eje Hidráulico en la segunda etapa 43
Tabla N°6.4 – Resultados de Ábacos de Caída 43
Tabla N°6.5 – Resultados de Eje Hidráulico post-Caída 44
Tabla N°6.6 – Resultados de Eje Hidráulico mediante la Hidráulica Clásica 44
Tabla N°6.7 – Resultados de Eje Hidráulico mediante OpenFOAM® 46
Tabla N°6.8 – Error relativo absoluto entre resultados vía Hidráulica Clásica vs OpenFOAM® 46
Tabla N°7.1 – Recomendaciones de Condiciones de Borde para cada Elemento de Borde 60
Tabla N°7.2 - Condiciones de Borde utilizadas en cada Elemento de Borde 60
Tabla N°8.1 – Resumen de Figuras para comparación de Resultados según Mallado 63
Tabla N°8.2 – Resumen de Figuras para comparación de Resultados según Config. de Bombas 67
Tabla N°8.3 – Resumen de Figuras para comparación de Resultados según Geometría Interna 72
Tabla N°8.4 – Tiempo de modelado para ambos mallados 78

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

Una Planta Elevadora de Aguas Servidas (PEAS) es una obra hidráulica que impulsa las aguas servidas desde un pozo de aspiración mediante un sistema de bombas y línea de impulsión hacia su disposición en un punto hidráulicamente más alto. Estas plantas cuentan, en esencia, con tres partes:

- Pozo de Aspiración: Lugar donde se acumulan las aguas servidas para ser aspiradas por las bombas. Dependiendo del diseño de la capacidad de bombeo del sistema de bombas, es el volumen requerido de almacenamiento.
- Sistema de bombas: Corresponde a la configuración de bombas utilizadas en la PEAS, las cuales, en función de su diseño, pueden impulsar un cierto caudal a una cierta elevación.
- Línea de Impulsión: Es el sistema de tuberías que transportan las aguas servidas hasta el punto de disposición de éstas. Un correcto diseño de la línea de impulsión puede significar una importante reducción en costos en la configuración de bombas, al generar menores pérdidas de fricción.

En esta memoria se busca analizar el diseño geométrico del pozo de aspiración de una PEAS de gran tamaño ubicada en la calle 2 Norte con 4 Poniente en la ciudad de Viña del Mar, propiedad de ESVAL S.A., esto es, de caudales del orden de 500 [L/s] o más, ya que cuando se analizan plantas pequeñas y medianas el aspecto más importante del diseño geométrico es el volumen del pozo de equilibrio/aspiración, de acuerdo a la norma vigente actual la NCh2472.Of2002. En cambio, en las plantas de gran tamaño el volumen es tan elevado que la forma geométrica del pozo de aspiración cobra importancia, ya que la correcta operación de las bombas depende de evitar la formación de vórtices, aparición de subpresiones, cavitación y entrada de aire, las cuales se pueden evitar con una geometría apropiada.

Dadas estas condiciones, es que esta memoria plantea implementar el diseño geométrico tridimensional del pozo de aspiración de una PEAS existente y operativa con un software CFD (Computational Fluid Dynamics por sus siglas en inglés, o Dinámica Computacional de Fluidos) con el fin de poder contar con una nueva herramienta de diseño y análisis. Para esto, se representará la planta elevadora de aguas servidas en un modelo tridimensional en un software CAD y se importará a OpenFOAM®, un software CFD libre ampliamente utilizado para el estudio de fenómenos en los fluidos, y particularmente para esta memoria en la modelación de movimientos tridimensionales de fluidos. Además, en esta memoria se detallará la implementación de la modelación, a través de la generación del mallado y condiciones de borde apropiados para poder analizar el diseño geométrico de una obra hidráulica real y operativa, con el objeto de poder cimentar los procedimientos requeridos para esta y futuras modelaciones.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

- Analizar el funcionamiento del pozo de aspiración de la planta elevadora de aguas servidas de ESVAL S.A. ubicada en 2 Norte con 4 Poniente en la ciudad de Viña del Mar, evaluando parámetros hidráulicos (velocidad, vorticidad y presencia de aire) con un modelo CFD.

1.2.2 Objetivos secundarios

- Detallar el proceso de implementación un modelo de flujo tridimensional de una PEAS en el software CFD OpenFOAM®.
- Recopilar recomendaciones de diseño geométrico de una PEAS y contrastarlas con el diseño actual de la PEAS de ESVAL S.A., ubicada en la calle 2 Norte con 4 Poniente, en la ciudad de Viña del Mar.
- Desarrollar el manejo y conocimiento del software CFD OpenFOAM®, para fomentar su uso en el estudio de otras obras hidráulicas.
- Implementar un modelo computacional para flujos en condiciones reales para el Departamento de Obras Civiles, presentando bases técnicas para la implementación de estos modelos en CFD para otras problemáticas futuras.

1.3 Esquema de trabajo

El trabajo desarrollado en la presente memoria se resume en las siguientes etapas que se detallan a continuación:

1. Estudio de las plantas elevadoras de aguas servidas, incluyendo el estado del arte en Chile y su manera de analizar y trabajar estas plantas en el mundo. Adicionalmente, se hace una revisión de literatura sobre la utilización de software CFD para la modelación de PEAS.
2. Estudio del funcionamiento del software OpenFOAM® para fluidos multifase (agua-aire), en conjunto con su aplicabilidad para el problema planteado.
    a. Análisis general de los softwares CFD y su aplicabilidad en este trabajo para modelar una planta elevadora de aguas servidas, y a su vez un balance de ventajas y desventajas para la utilización de OpenFOAM® como software CFD.
    b. Revisión de literatura de las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos multifase y otros parámetros que afectan en la modelación CFD.
3. Implementación de modelos preliminares: Se realiza un análisis bidimensional con un sistema plano análogo al modelo tridimensional con sus respectivas simplificaciones, con el fin de analizar cómo afecta el ingreso de condiciones de borde de manera incorrecta y de poder implementar las condiciones de borde apropiadas al modelo tridimensional.

4. Detalle de la implementación de modelo tridimensional y presentación de casos de análisis. Además, se presentan dos enfoques:
    a. Modelación de la misma geometría con mallado de volúmenes finitos distintos.
    b. Modelación con mismo mallado de volúmenes finitos, pero con geometrías distintas.
5. Análisis de resultados a través de los parámetros de interés en la mecánica de fluidos (velocidad, vorticidad, presión y presencia de aire), y comparación entre los distintos enfoques de trabajo indicados en el punto anterior.

2 ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE LAS PEAS

En este capítulo se presenta la situación actual del diseño geométrico del pozo de aspiración de una planta elevadora de aguas servidas. En la sección 2.1 se presentan las recomendaciones de diseño y lineamientos que se deben cumplir en Chile en función de la normativa vigente; en la sección 2.2 se presentan las recomendaciones de diseño del pozo de aspiración que establecen los fabricantes de bombas hidráulicas FLYGT® y GRUNDFOS®; y en la sección 2.3 se presenta la situación actual de los software CFD en la modelación de pozos de aspiración de PEAS.

2.1 Diseño de PEAS en Chile

Como se ha señalado anteriormente, la norma vigente NCh2472.Of2002 [1] estipula diversas recomendaciones mínimas de diseño a las que se deben ajustar las plantas elevadoras de aguas servidas. Sin embargo, las PEAS se pueden clasificar según su construcción y su capacidad de impulsión, tal como se señala en la Tabla N°2.1.

Tabla N°2.1 – Tipos de PEAS y su capacidad

Tipo de PEAS	Capacidad [L/s]
Prefabricada	
• Cámara de aspiración (húmeda)	6 – 30
• Cámara seca	3 – 100
Convencional (in situ)	
• Pequeña	20 – 90
• Mediana	90 – 500
• Grande	500 ó más

Bajo esta clasificación, la PEAS de ESVAL S.A. ubicada en 2 Norte con 4 Poniente en la ciudad de Viña del Mar, clasifica como PEAS construida in situ grande, ya que el caudal medio es cercano a 1200 [L/s].

En el escenario de diseño geométrico, la norma chilena se resume en las siguientes exigencias:

- La instalación de las motobombas, sea sumergida o seca, debe evitar la formación de vórtices. Para esto se debe tener en cuenta la velocidad de aspiración y la sumergencia de la boca de aspiración.
- El fondo de la cámara húmeda y del pozo de aspiración deben tener una pendiente suficiente hacia las motobombas o bien, hacia las tuberías de aspiración, para facilitar el vaciado y extracción de las aguas residuales, tal como se aprecia en la Figura N°2.1.

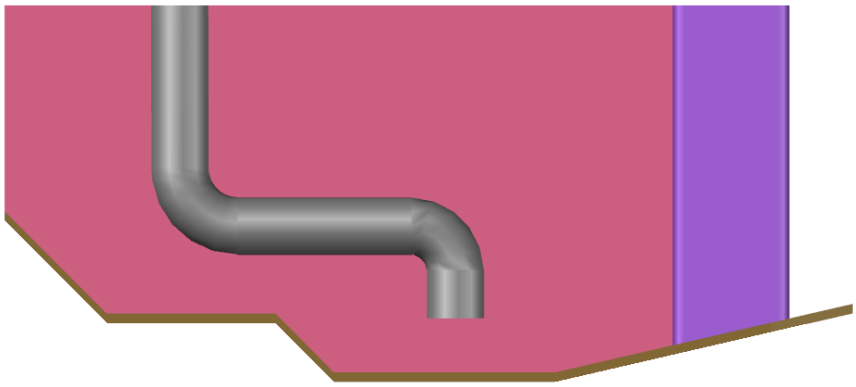

Figura N°2.1 – Perfil con pendientes hacia la tubería de aspiración

- El encuentro entre muros, radier y losa del pozo de aspiración deben llevar un chaflán, evitando aristas vivas. En la Figura N°2.2 se aprecia un muro recto, que se encuentra en 90° con la losa en una arista viva, y un muro con chaflán curvo que suaviza esta arista.

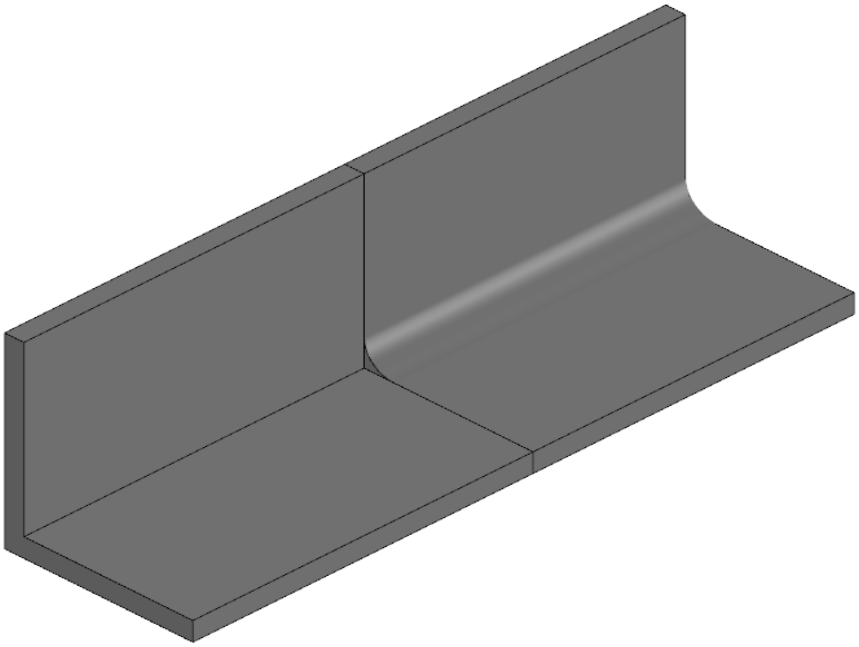

Figura N°2.2 – Muro recto y muro con chaflán curvo

2.2 Recomendaciones de fabricantes de bombas

Bajo el mismo concepto de la norma chilena, los fabricantes de motobombas de aguas servidas también hacen pruebas y diseños en sus dependencias, con el objetivo de generar recomendaciones que permitan un correcto funcionamiento de sus bombas, como alargar la vida útil de las mismas. Es por esto que primero se señalan los fenómenos hidráulicos adversos que se buscan evitar y luego se presentan los lineamientos de los fabricantes.

2.2.1 Fenómenos Hidráulicos Adversos

En un esfuerzo por generar un servicio integral, la marca sueca de bombas hidráulicas FLYGT® [2] señala diversos fenómenos hidráulicos adversos que afectan negativamente en el funcionamiento del sistema de bombas.

2.2.1.1 Excesivo pre-arremolinamiento

Si la velocidad de acercamiento del flujo a las bombas no es uniforme o simétrica, se formarán remolinos o indicios de remolino alrededor de la bomba tal como se aprecia en la Figura N°2.3, donde la "B" indica la posición en planta de la succión de la bomba. Estos remolinos afectan en la velocidad de captación de la bomba y por ende cambia la velocidad relativa de la impulsión y puede sobrecargar/reducir el rendimiento de la bomba.

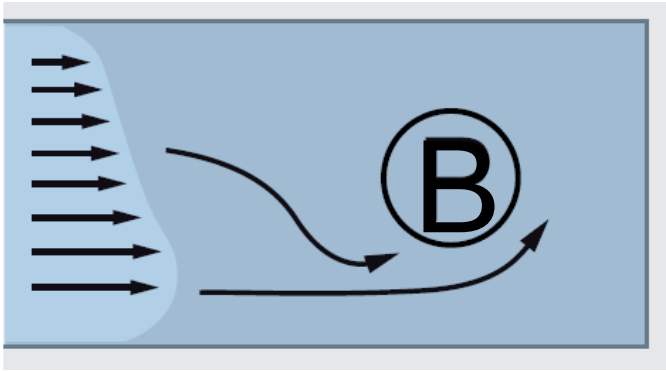

Figura N°2.3 – Vista en planta de la velocidad de acercamiento a la bomba
Fuente: Adaptación de Referencia [2]

2.2.1.2 Velocidad de captación dispareja

El diseño geométrico de la planta también puede afectar a cómo ingresa el agua a la bomba, generando un perfil no uniforme o no simétrico, como se aprecia en la Figura N°2.4 desestabilizando al impulsor pudiendo generar vibraciones y ruido.

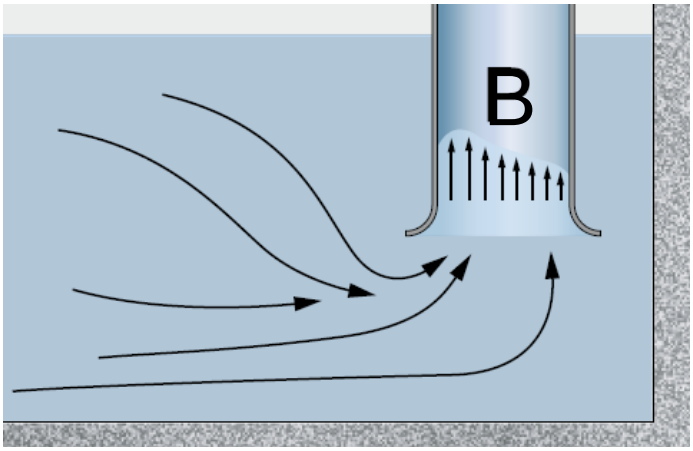

Figura N°2.4 – Vista en Perfil de ingreso disparejo del agua a la bomba
Fuente: Adaptación de Referencia [2]

2.2.1.3 Generación de vórtices

La aparición de vórtices es un obstáculo de importancia en la correcta operación de una bomba, que resultan en cavitación, cargas disparejas, ruido y vibraciones. En la Figura N°2.5 se aprecian dos tipos de vórtices que aparecen frecuentemente:

- Vórtice de superficie libre: tiene varios grados de intensidad y transfieren aire en su centro desde la superficie hasta la bomba.
- Vórtice sumergido: alcanza altas velocidades rotacionales con grandes subpresiones que se traducen en cavitación e ingreso de aire a la bomba.

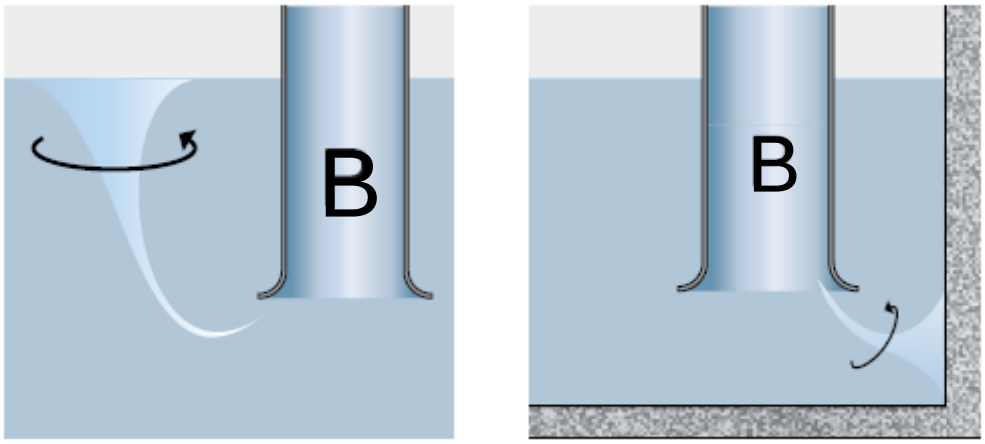

Figura N°2.5 – Vista en Perfil de formación de vórtices en la tubería de entrada
Fuente: Adaptación de Referencia [2]

2.2.1.4 Arrastre de aire

Ya sea por caída de agua, choque de ondas con muros u otros motivos, el arrastre de partículas de aire hacia la bomba es perjudicial ya que puede producir efectos desfavorables como desbalance mecánico, vibraciones y corrosión.

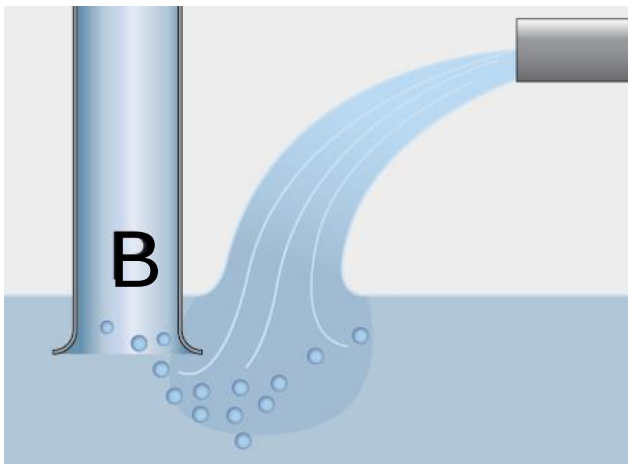

Figura N°2.6 – Captación de partículas de aire
Fuente: Adaptación de Referencia [2]

2.2.2 Recomendaciones de FLYGT®

FLYGT® [3] establece la relevancia de la turbulencia en el flujo de aguas servidas, ya que permite mantener los sólidos en suspensión, evitar la sedimentación y la floculación de los mismos sólidos flotantes. Bajo este mismo concepto, se recomienda el uso de lados inclinados en el fondo del pozo para aumentar la turbulencia del flujo, tal como se aprecia en la Figura N°2.7.

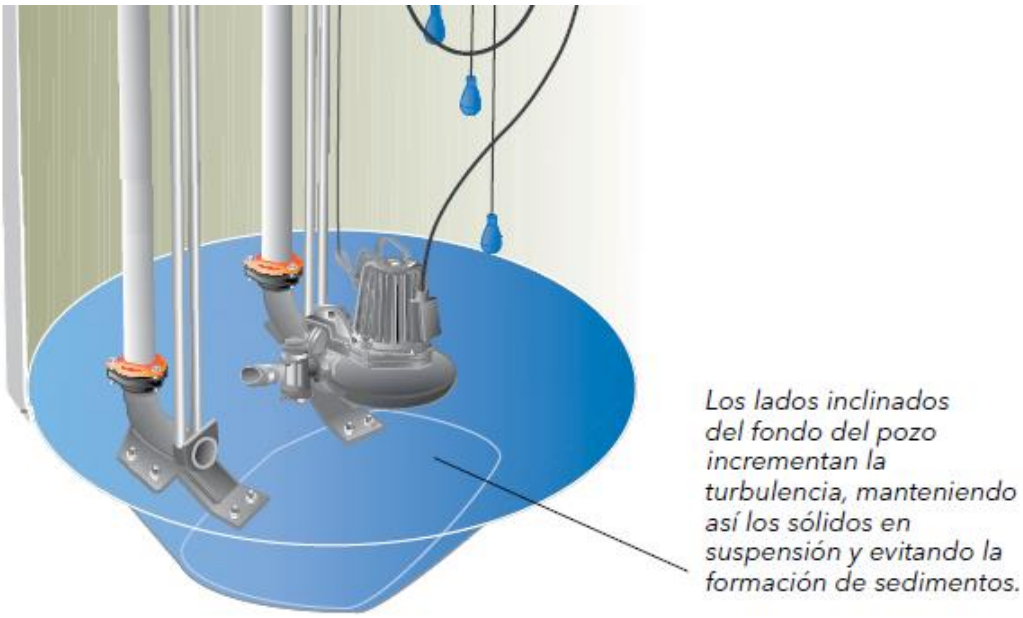

Figura N°2.7 – Lados inclinados en el fondo del pozo
Fuente: Adaptación de Referencia [3]

2.2.3 Recomendaciones de GRUNDFOS®

La marca danesa de bombas hidráulicas GRUNDFOS® [4] ofrece una guía más descriptiva y de mayor detalle a la hora de hacer consideraciones geométricas en una planta elevadora de aguas servidas. Dentro de estas recomendaciones y consideraciones se destacan:

- La entrada a la bomba debe ubicarse al menos a 2 [m] de profundidad, como se presenta en la Figura N°2.8.

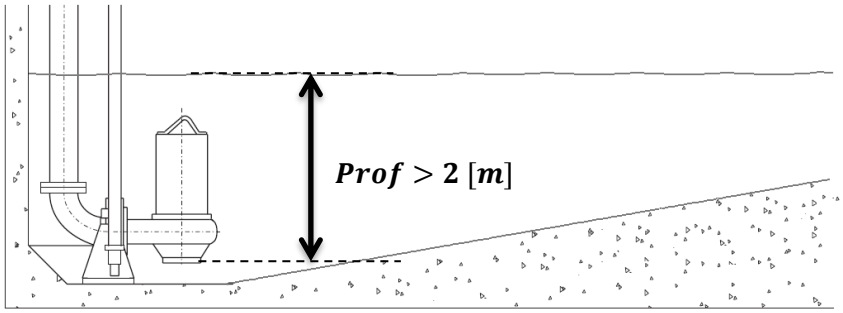

Figura N°2.8 – Profundidad mínima de la entrada
Fuente: Adaptación de Referencia [4]

- El volumen de agua que se encuentre bajo la entrada de la bomba sumergida debe ser mínimo.
- Si la entrada a la bomba que queda muy cerca de la superficie, o con grandes velocidades de flujo, entonces se permite la incorporación de aire y la formación de vórtices en el agua cuando ésta salpica, tal como se ve en la Figura N°2.9. Además, el aire incorporado tiende a quedarse en el agua en forma de pequeñas burbujas adheridas a las partículas de sólido suspendido. Por estos motivos es que la entrada de agua a la planta debe estar lo más alejada posible de la captación de las bombas como se aprecia en la Figura N°2.10, así se evita la incorporación de aire.

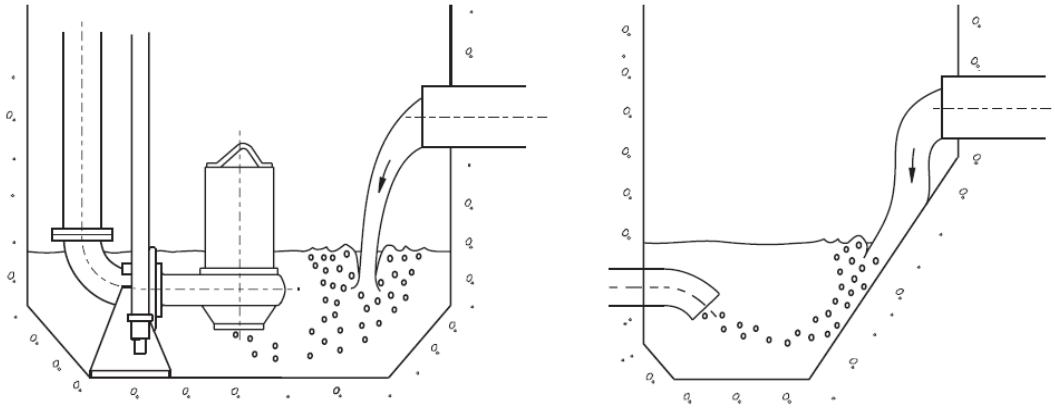

Figura N°2.9 – Incorporación de aire a la impulsión
Fuente: Adaptación de Referencia [4]

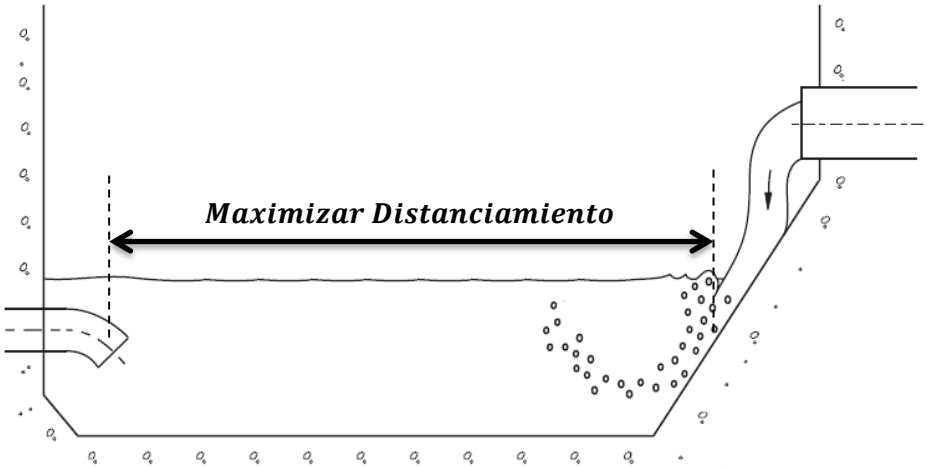

Figura N°2.10 – Distanciamiento entre captación e ingreso de agua
Fuente: Adaptación de Referencia [4]

- Todas las esquinas dentro de la geometría de la planta deben ser hasta 135°, como lo señala la Figura N°2.11. Esta indicación es similar a la que da la normativa chilena en la sección 2.1, donde se recomienda utilizar chaflanes en las esquinas.

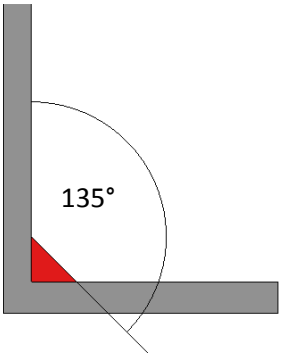

Figura N°2.11 – Suavización de esquinas

- La ubicación de las bombas entre ellas y los muros deben cumplir con el mínimo señalado en la Figura N°2.12, donde D es el ancho horizontal exterior del rodete de la bomba, E es el distanciamiento horizontal entre los centros de las líneas de impulsión de dos bombas contiguas, y C es la distancia horizontal entre el centro de la línea de impulsión y un muro contiguo.

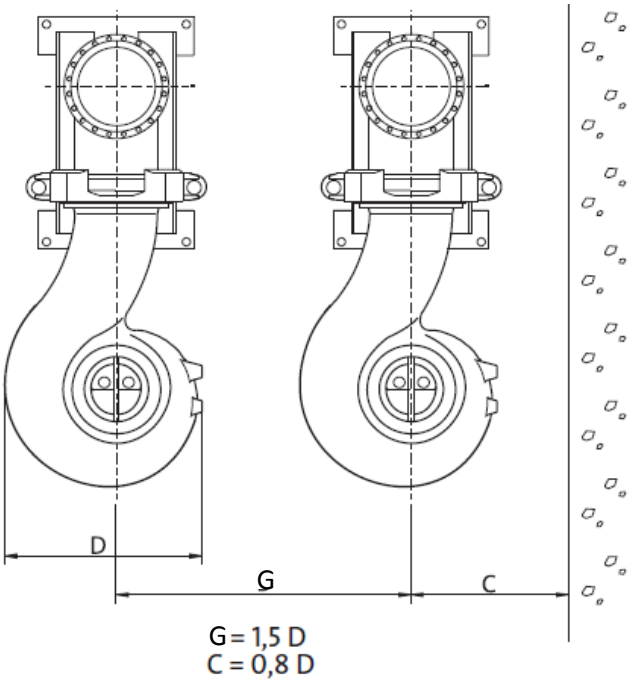

Figura N°2.12 – Disposición en Planta de las Bombas
Fuente: Adaptación de Referencia [4]

2.3 Modelación vía software CFD

La marca sueca de bombas sumergibles FLYGT® [5], con más de cien años en el rubro, señala que entender el flujo de fluidos dentro de estructuras hidráulicas es un factor crítico en el diseño de plantas elevadoras, y los software CFD son excelentes herramientas de modelación que pueden ser usados en el proceso de diseño, simulando diversas alternativas de diseño, identificando problemas en el flujo, desarrollando soluciones y evaluando estrategias de operación. Es por estos motivos que usar un software CFD es una buena alternativa ante la modelación física. A continuación, se presentan tres escenarios de problemas hidráulicos en pozos de aspiración que fueron analizados por FLYGT® y su respectiva solución a través de los software CFD comerciales más utilizados por FLYGT®: ANSYS Fluent, ANSYS CFX y CFD++.

2.3.1 Caso 1: Análisis del ingreso de agua a una planta

En una planta de tratamiento de aguas, se equipan 23 bombas centrífugas grandes FLYGT®, las cuales elevan 1000 [L/s] cada una. En el diseño original, todas las bombas se ubican en el mismo nivel y el agua ingresa al pozo de aspiración a través de 12 pórticos. Estos pórticos crean un efecto jet de alta velocidad, lo cual resulta en un flujo inestable y no uniforme que se acerca a las bombas, lo que se traduce en pre-arremolinamiento y generación de vórtices. Tanto la geometría como la posterior modelación CFD del problema inicial se aprecian en la Figura N°2.13.

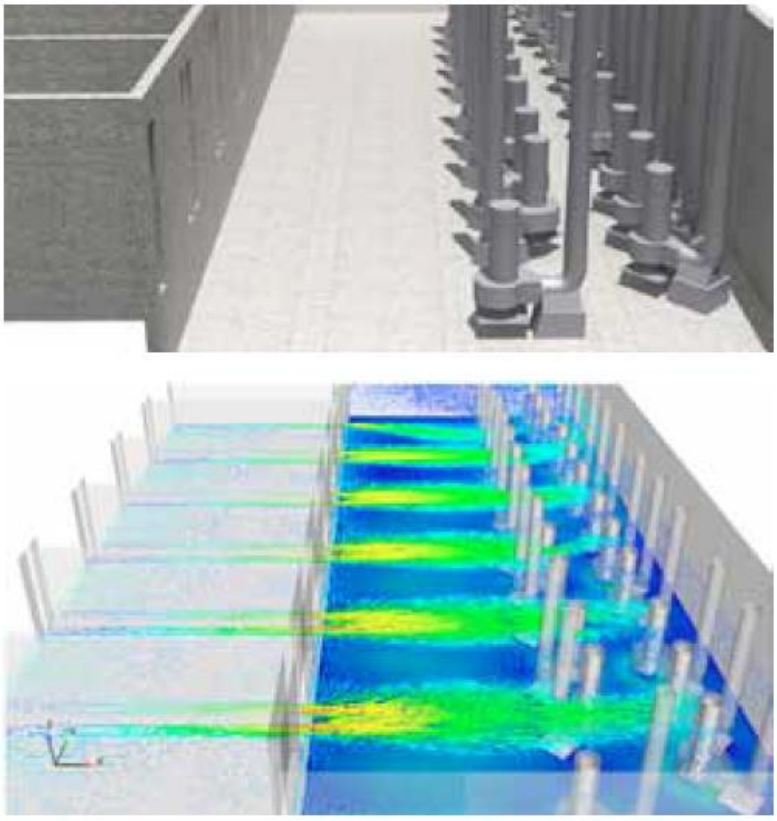

Figura N°2.13 – Geometría y modelación CFD para el ingreso de agua
Fuente: Adaptación de Referencia [5]

La alternativa de diseño propuesta por FLYGT® tiene un muro difusor justo aguas abajo de los pórticos, el cual disipa la energía de los jets y distribuyen el flujo en todo el ancho del pozo de aspiración. Otra modificación en el diseño fue ubicar las bombas en dos niveles distintos, de tal manera de reducir la interferencia entre bombas. La simulación CFD del nuevo diseño confirmó la distribución casi uniforme del flujo hacia las bombas, sin fenómenos hidráulicos adversos que señalar. La nueva geometría y su modelación se aprecian en la Figura N°2.14.

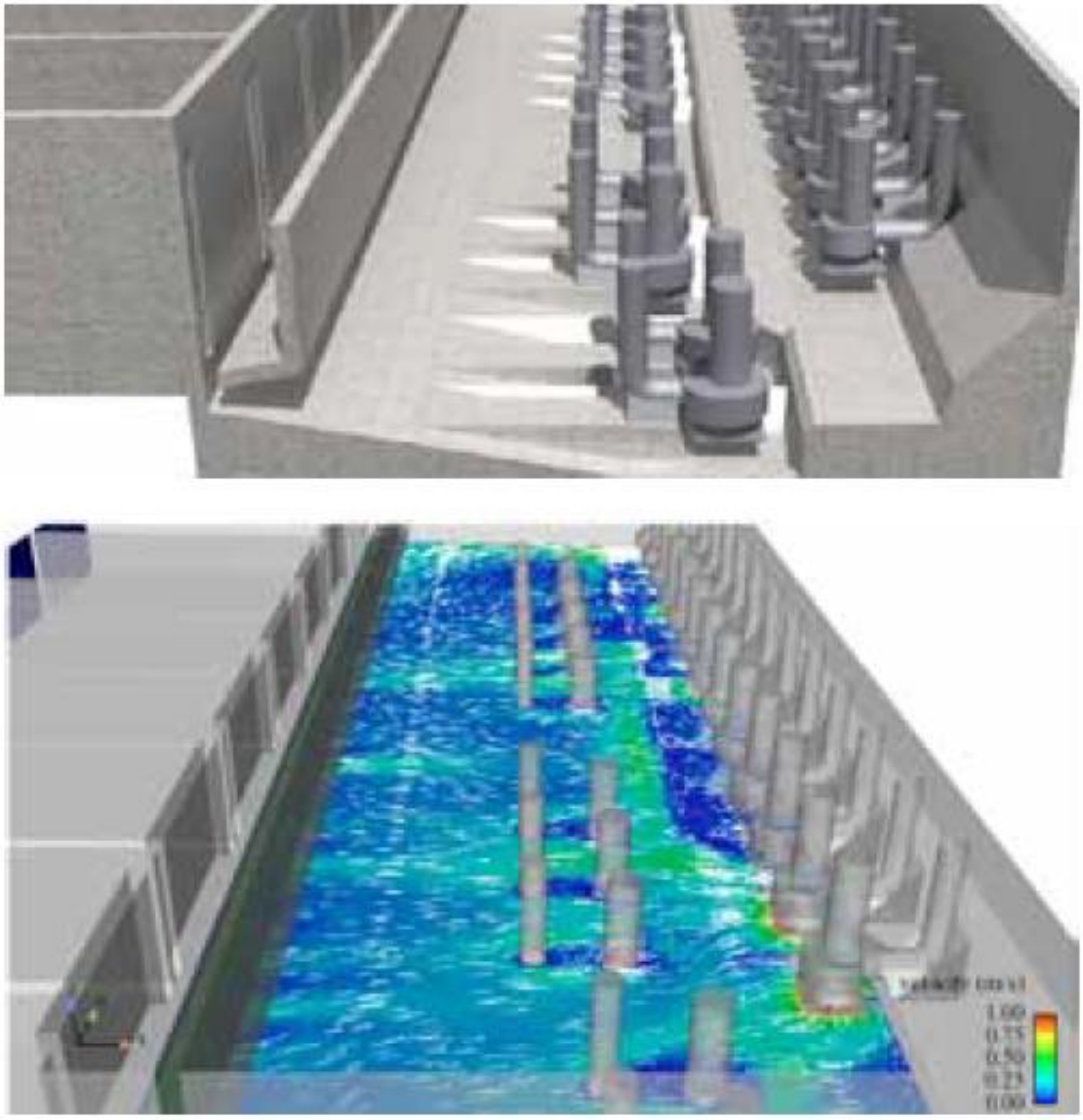

Figura N°2.14 – Nueva geometría y modelación CFD para el ingreso de agua
Fuente: Adaptación de Referencia [5]

2.3.2 Caso 2: Optimización del diseño geométrico

Esta planta elevadora de aguas lluvias fue diseñada con muros laterales divergentes con bordes agudos, dando paso a la generación de una distribución del flujo no uniforme, con altas velocidades al medio del pozo, así como se ve en la Figura N°2.15.

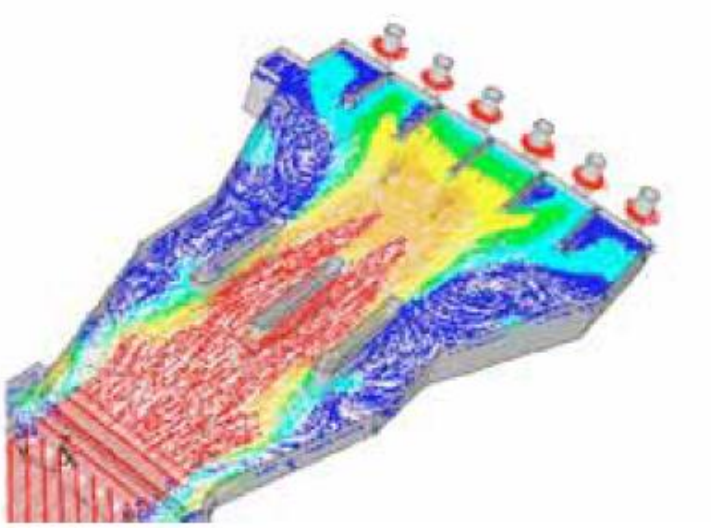

Figura N°2.15 – Modelación CFD del pozo
Fuente: Adaptación de Referencia [5]

Debido que mantener esa geometría causaría una operación irregular de las bombas con vibraciones y posible cavitación, FLYGT® propone capturar el flujo con muros divisores antes que la velocidad se eleve mucho y se formen jets. De esta manera el flujo se distribuye de manera correcta hacia todas las bombas, tal como se aprecia en la Figura N°2.16.

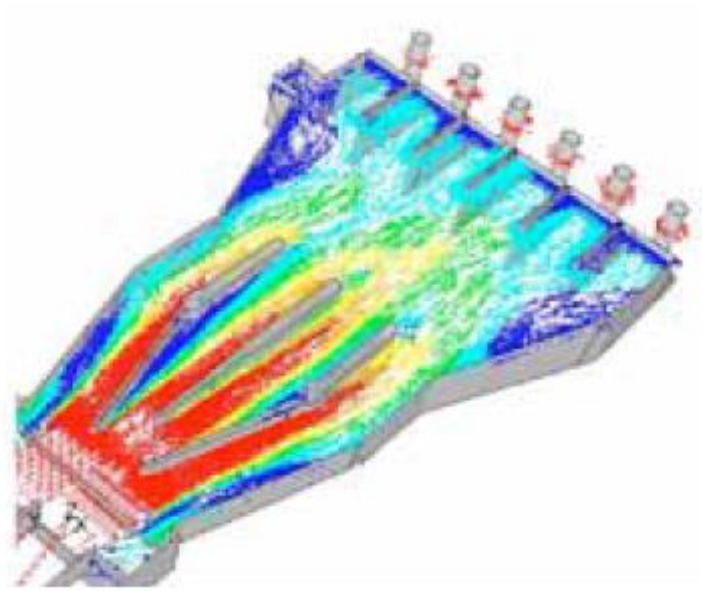

Figura N°2.16 – Modelación CFD del pozo con muros divisores
Fuente: Adaptación de Referencia [5]

2.3.3 Caso 3: Uso de piezas especiales

En la siguiente planta elevadora de aguas lluvias, se tenía el problema de un vórtice muy energético, el cual se generaba en el pozo de aspiración debido a una vuelta cerrada en la captación de la bomba, como se aprecia en la Figura N°2.17. Este vórtice entraba hasta la bomba causando ruido, vibraciones e incremento del consumo de energía.

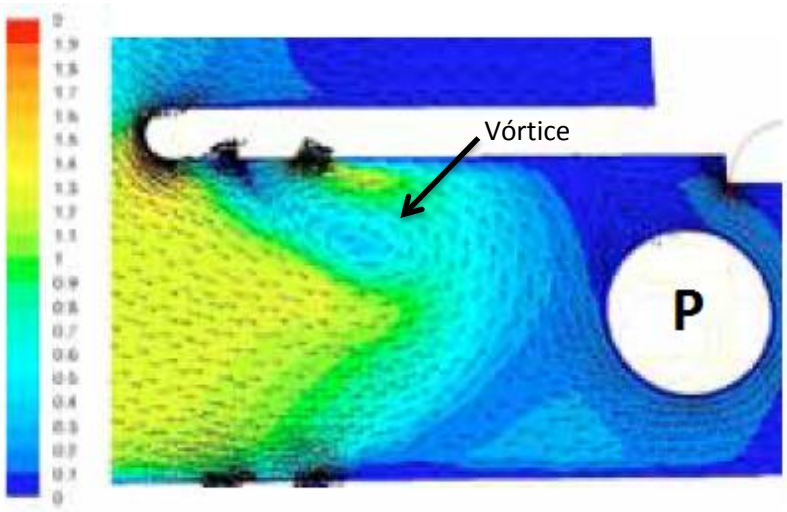

Figura N°2.17 – Vista en planta del acceso a la bomba
Fuente: Adaptación de Referencia [5]

Dado que la captación de la bomba sólo está compuesta por una tubería, FLYGT® confeccionó una boquilla para la captación de tal manera de conducir el flujo al mismo tiempo que bloquea el ingreso de aire. Tanto el diseño de esta captación como la modelación del flujo en CFD se aprecian en la Figura N°2.18.

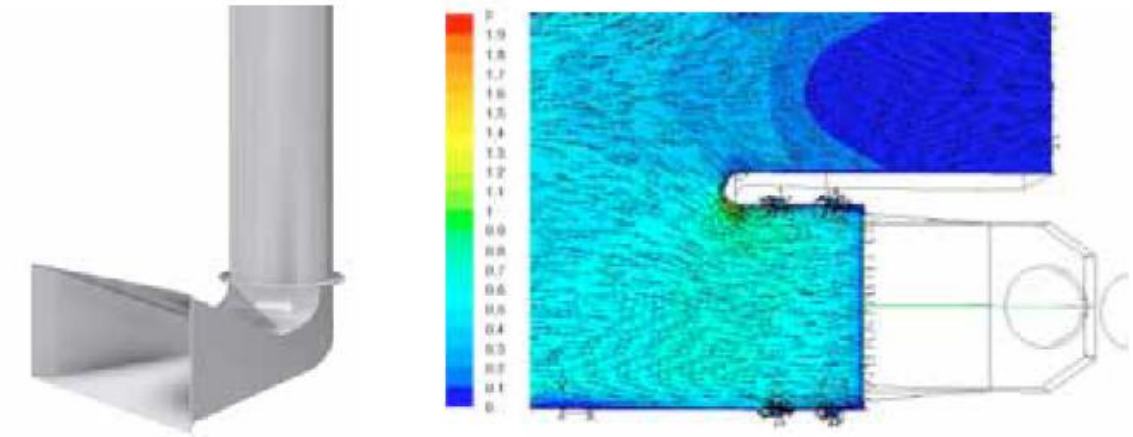

Figura N°2.18 – Nueva captación y modelación CFD de sus efectos
Fuente: Adaptación de Referencia [5]

3 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se enmarcan los alcances teóricos de la presente memoria. En la sección 3.1 se definen los softwares CFD y en particular al software utilizado para este trabajo: OpenFOAM®. Luego, en la sección 3.2 se presentan los modelos de turbulencia existentes en la actualidad, y el desarrollo matemático del modelo elegido en OpenFOAM®; en la sección 3.3 se presenta el método Volumen de Fluido utilizado por OpenFOAM® que, junto a lo anterior, resuelven numéricamente los flujos dinámicos turbulentos de un sistema de dos o más fases; en la sección 3.4 se introduce el Número de Courant, que corresponde a la relación entre el tiempo de residencia del flujo tridimensional y el intervalo de tiempo de cómputo, y se define su límite superior que permite la convergencia de la modelación; y finalmente en la sección 3.5 se definen los conceptos principales de la hidráulica clásica para considerarlos en una validación de un modelo CFD.

3.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Un software CFD [6] (Computational Fluid Dynamics por sus siglas en inglés) permite el cálculo físico de las ecuaciones relacionadas con flujo de fluidos, transferencia de calor y sus fenómenos asociados tales como reacciones químicas por medio de simulaciones computacionales. Las aplicaciones de esta técnica abarcan un amplio rango de usos industriales y no-industriales. Algunos ejemplos son:

- Escurrimiento con superficie libre.
- Modelos aero e hidrodinámicos.
- Cargas hidrodinámicas sobre estructuras ubicadas costa afuera.
- Flujos en ríos, estuarios y océanos.
- Distribución de contaminantes y efluentes.
- Procesos de mezcla y separación.
- Flujo de sangre en arterias y venas.

Actualmente existen tres grandes metodologías de trabajo para analizar y resolver las problemáticas anteriormente señaladas: Modelación a escala, simplificación de ecuaciones de la dinámica de fluidos a través de coeficientes experimentales, y la modelación numérica a través de software CFD. Sin embargo, a diferencia de otras metodologías, el uso de software CFD permite que los costos de implementación sean relativamente bajos, ya que hay que invertir en un hardware que permita el procesamiento de información y en la licencia del software CFD que se utilice, gasto que se puede ahorrar al utilizar un software de código libre. Por otro lado, la modelación con CFD puede producir grandes volúmenes de datos a un costo virtualmente nulo y con el cual se pueden analizar diversos escenarios para una misma problemática, para lo cual primero se requiere validar un caso real a través de mediciones experimentales, y a partir de ahí, generar un estudio paramétrico que permita evaluar distintas alternativas, por ejemplo, el diseño de una obra hidráulica.

3.1.1 Funcionamiento de un código CFD

Los códigos de CFD están estructurados en algoritmos numéricos para abordar problemas de flujo de fluidos, y la resolución de un problema se divide en tres etapas principales que se señalan a continuación.

3.1.1.1 Pre-proceso

Esta etapa consiste en definir todo parámetro a considerar en el modelo en CFD. Algunas de estas definiciones son:

- Definición de geometría y generación de malla: esto es el dominio sobre el cual el software calculará las ecuaciones que gobiernen al flujo.
- Selección de aquellos fenómenos físicos y químicos que van a ser modelados.
- Definición de las propiedades físicas del fluido.
- Especificación de las condiciones de borde en aquellos elementos que coinciden o tocan la frontera del dominio.

Evidentemente la calidad de la solución del problema está sujeta a las condiciones anteriormente señaladas, si la resolución del mallado es muy baja, o si las condiciones de borde indicadas no son acordes a la problemática real, entonces la solución que se obtenga no será realista. En general, mientras mayor sea el número de elementos, mejor será la solución; sin embargo, los costos en términos de hardware y tiempo de cómputo también dependen directamente de cuán fina sea la malla.

3.1.1.2 Solver

Esta etapa resuelve numéricamente el problema y existen tres grandes algoritmos para la solución numérica: diferencias finitas, elementos finitos y métodos espectrales. La mayor parte de los códigos comerciales de CFD se basan en las diferencias finitas, y para efectos de esta memoria se utilizará una formulación particular de las diferencias finitas llamado volúmenes finitos, el cual considera una discretización del volumen de control total en un mallado discreto de pequeños volúmenes de control, y para cada uno de estos volúmenes se integran las ecuaciones diferenciales, entregando ecuaciones discretizadas para cada volumen pequeño de control, para lo cual es necesario indicar el tipo de interpolación que existe entre los parámetros a integrar.

Los software CFD contienen técnicas de discretización apropiadas para el tratamiento numérico de fenómenos de transporte, convección y difusión, así como también para los términos fuentes y la tasa de cambio con respecto al tiempo. Los fenómenos físicos subyacentes son complejos y no-lineales, por lo cual se requieren métodos iterativos de solución. Los procedimientos más populares son: Algoritmos de matrices tri-diagonales, solvers línea a línea de las ecuaciones algebraicas y el algoritmo SIMPLE, el cual consiste en la utilización de una estimación del campo de presiones para resolver las ecuaciones de momentum y luego se resuelve una ecuación de corrección de la presión, que es deducida a partir de la ecuación de continuidad, para obtener la corrección del campo de presiones, el cual es utilizado nuevamente para actualizar los campos de velocidad y presión, por lo

que este proceso se itera hasta alcanzar la convergencia de los campos de velocidad y presión. Hay códigos comerciales que le dan al usuario la opción de elegir técnicas de uso más reciente como métodos de Gradiente conjugado o método de Gauss-Seidel punto a punto con aceleradores multi-malla.

3.1.1.3 Post-proceso

En esta etapa se visualizan los resultados gráficamente. El uso de mejores tarjetas gráficas ha permitido a los paquetes CFD a equiparse con herramientas de visualización muy versátiles. Estas herramientas incluyen:

- Visualización de la geometría del dominio y la malla.
- Campos de velocidades.
- Curvas de nivel (en líneas y coloreadas).
- Curvas de superficies en 2D y 3D.
- Seguimiento de partículas.
- Manipulación de objetos (traslación, rotación, escalamiento, etc.).
- Animación de flujo transiente.

En referencia al último punto (animación para la visualización dinámica de resultados), todos los códigos CFD producen resultados alfanuméricos que pueden exportarse hacia otros softwares de postproceso con mejores capacidades gráficas.

Son estos motivos los que hacen atractivo el uso de un software CFD para el diseño de obras hidráulicas y, en particular para esta memoria, el diseño geométrico de una planta elevadora de aguas servidas.

3.1.2 OpenFOAM®

OpenFOAM® [7] (por sus siglas en inglés Open Field Operation and Manipulation) es una colección de programas escritos en C++ destinada a la simulación numérica de fenómenos de mecánica de medios continuos, los cuales incluyen problemas de la dinámica de fluidos. Una ventaja importante de OpenFOAM es la sintaxis que emplea en su notación, lo cual es posible por el uso del lenguaje orientado a C++. Esta sintaxis apunta a reproducir la notación matemática convencional de la forma más fiel posible. Como ejemplo de esto, las ecuaciones en derivadas parciales se escriben con un código que hace fácil su identificación por un usuario, de este modo, permitiendo la creación de solvers con mayor rapidez y sencillez.

Cada aplicación posee un objetivo específico, desde generar e importar geometrías y mallas, a resolver ecuaciones de Navier-Stokes bajo distintas consideraciones: flujo laminar/turbulento, compresible/incompresible, de un fluido o multifase, entre otras.

Finalmente, si se hace un balance entre las ventajas y desventajas presentado en la Tabla N°3.1, se concluye que OpenFOAM® es el software idóneo para este trabajo al destacar por su gratuidad.

Tabla N°3.1 – Balance de Ventajas y Desventajas de OpenFOAM®

Ventajas	Desventajas
• Sintaxis fácil de entender por el usuario. • Paralelización automática de aplicaciones. • Amplio rango de aplicaciones y modelos instalados listos para usar. • Soporte comercial y capacitación provista por sus desarrolladores. • Descarga gratis de Internet, fácil instalación, sin costos de licencia. • Código abierto y libre para su modificación acorde al usuario.	• Ausencia de una interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés). Sin embargo, existen softwares libres y privados que proveen esta opción. • La guía de ayuda no proporciona detalles suficientes, haciendo más lenta la curva de aprendizaje. • Falta de una documentación ordenada y actualizada hace difícil su uso para el usuario principiante.

3.2 Modelación de flujos turbulentos

Los flujos turbulentos contribuyen significativamente al transporte de momentum en la mayoría de los flujos de interés práctico y, por lo tanto, tienen una influencia determinante en las distribuciones de velocidad y presión. Además, si se considera la naturaleza tridimensional y turbulenta del flujo, se hace necesario implementar algún modelo de turbulencia que permita resolver el problema de cierre. Bajo este concepto se presentan los tres esquemas más utilizados a nivel internacional.

3.2.1 Direct Numerical Simulation (DNS)

Esta simulación numérica (Simulación Numérica Directa en español) no utiliza ningún modelo de turbulencia, sino que resuelve la turbulencia en la ecuación de Navier-Stokes para toda escala física-temporal. Sin embargo, el costo computacional requerido para utilizar este método es elevado ya que requiere una malla muy fina, y sólo es utilizada para el estudio de la turbulencia, y de esta manera generar mejores modelos.

3.2.2 Large Eddy Simulation (LES)

Los modelos LES (Simulación de Grandes Vórtices en español) son modelos de turbulencia que resuelven explícitamente la turbulencia en la ecuación de Navier-Stokes para escalas más grandes, y utiliza modelos numéricos para estimar la turbulencia a pequeña escala que se disipa en forma de calor. A pesar que este modelo es mucho menos demandante que un DNS, de todas maneras tiene un costo computacional elevado que lo hace impráctico a la hora de evaluar un diseño geométrico de una obra hidráulica.

3.2.3 Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS)

El modelo matemático RANS (Ecuaciones de Navier-Stokes Promediadas sobre la Turbulencia en español), permite resolver el problema de cierre reduciendo los costos computacionales al mínimo sin entrar en una modelación de flujo laminar. Existen diversos modelos RANS para los cuales existe literatura suficiente para su implementación, entre los que se encuentran los modelos de longitud de mezcla, modelos de dos ecuaciones y modelos de esfuerzos. Dentro de éstos se destaca el modelo de dos ecuaciones $\kappa - \epsilon$, el cual ha sido ampliamente usado y validado [5] y se

basa en el supuesto que existe una razón entre la acción de los esfuerzos viscosos y de Reynolds en un flujo medio, y experimentalmente se ha comprobado que para muchos flujos isotérmicos esta razón es prácticamente constante, lo cual da validez y sustento a la selección de este modelo.

3.2.3.1 Ecuaciones de Flujo Medio y Problema de Cierre

Si bien para flujos incompresibles se cumplen las ecuaciones de Continuidad (Ec. N°3.1) y Navier-Stokes (Ec. N°3.2, Ec. N°3.3 y Ec. N°3.4) [8], a la hora de incorporar fenómenos turbulentos estas ecuaciones no se pueden resolver de manera exacta.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z}\right) = 0 \qquad \textbf{Ec. N°3.1}$$

$$\rho\frac{DU_x}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu\left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2}\right) + Ts_x \qquad \textbf{Ec. N°3.2}$$

$$\rho\frac{DU_y}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu\left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial z^2}\right) + Ts_y \qquad \textbf{Ec. N°3.3}$$

$$\rho\frac{DU_z}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu\left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2}\right) + Ts_z \qquad \textbf{Ec. N°3.4}$$

Donde, (x, y, z) corresponden a un sistema de referencia de coordenadas cartesiano, (u, v, w) corresponden a las componentes del campo de velocidad en (x, y, z) respectivamente, P corresponde a la presión relativa, ρ corresponde a la densidad del fluido, μ corresponde a la viscosidad cinemática del fluido, g_i corresponde a la componente de la aceleración de gravedad en (x, y, z), y Ts_i corresponde a la componente de la tensión superficial en (x, y, z).

Dado que la incorporación de fenómenos turbulentos no se puede realizar de manera exacta, es que se utiliza un enfoque estadístico [9], donde los valores de interés se separan en valores promedio y valores fluctuantes (o instantáneos), como se presenta en las Ecuaciones Ec. N°3.5 a la Ec. N°3.8.

$$U_i = \overline{U}_i + \widetilde{U}_i \qquad \textbf{Ec. N°3.5}$$

$$P = \overline{P} + \widetilde{P} \qquad \textbf{Ec. N°3.6}$$

Donde los valores promedio se definen como:

$$\overline{U}_i = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} U_i dt \qquad \textbf{Ec. N°3.7}$$

$$\overline{P} = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} P dt \qquad \textbf{Ec. N°3.8}$$

Y $(t_2 - t_1)$ es un tiempo extenso comparado con la escala de tiempo de los movimientos turbulentos. A partir de estas definiciones, las ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento para un fluido incompresible son:

$$\frac{\partial \overline{U}_x}{\partial x} + \frac{\partial \overline{U}_y}{\partial y} + \frac{\partial \overline{U}_z}{\partial z} = 0 \qquad \textbf{Ec. N°3.9}$$

$$\frac{D\overline{U}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - \widetilde{U}_i \widetilde{U}_j\right) \qquad \textbf{Ec. N°3.10}$$

Donde el término $\widetilde{U}_i\widetilde{U}_j$ corresponde a correlaciones desconocidas (fluctuantes) de la velocidad, pero si se analiza físicamente el término $-\rho\ \widetilde{U}_i\widetilde{U}_j$, se observa que corresponde al transporte de momentum x_i en dirección x_j, el cual actúa como esfuerzo sobre el fluido y por lo tanto se denomina esfuerzo turbulento o esfuerzo de Reynolds.

A partir de este enfoque estadístico, se obtuvieron las ecuaciones que gobiernan el movimiento con términos asociados al flujo medio $(\overline{U}, \overline{P})$ a excepción del esfuerzo turbulento señalado anteriormente el cual se hace necesario modelar.

Boussinesq (1877) introdujo el concepto de viscosidad turbulenta, el cual asume que los esfuerzos turbulentos son proporcionales a los gradientes de velocidad media, lo que se expresa según la Ecuación N°3.28.

$$-\widetilde{U}_i\widetilde{U}_j = \nu_t\left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}k\ \delta_{ij} \qquad \textbf{Ec. N°3.11}$$

Donde δ_{ij} corresponde a la función Delta de Kronecker, ν_t es la viscosidad turbulenta planteada por Boussinesq, y k es la energía cinética del movimiento turbulento que sólo se presenta cuando el Delta de Kronecker vale 1, es decir, cuando se analizan esfuerzos normales $(i = j)$:

$$k = \frac{1}{2}\left(\overline{U}_x^2 + \overline{U}_y^2 + \overline{U}_z^2\right) \qquad \textbf{Ec. N°3.12}$$

A partir de esta definición, sólo se vuelve importante determinar el valor de la viscosidad turbulenta. Sin embargo, ν_t se vuelve complejo de definir a nivel conceptual, ya que en condiciones específicas se requiere que la viscosidad turbulenta sea negativa, lo que no tiene sentido físico. De aquí se concluye que la simplificación que ν_t es isotrópica es muy limitada de realismo ante flujos más complejos, y por ende, se genera un problema de cierre al no contar con suficientes ecuaciones para determinar todas las incógnitas.

3.2.3.2 Modelo $\kappa - \epsilon$

El modelo $\kappa - \epsilon$ es un modelo empírico de movimientos turbulentos que utilizan dos ecuaciones [9]: la ecuación κ viene de una derivación de la ecuación de Kolmogorov-Prandtl, la cual establece que κ es una medida directa de la intensidad de las fluctuaciones de la turbulencia en las tres direcciones; la ecuación ϵ viene de la consideración que la tasa de disipación ϵ es igual al producto de la viscosidad cinemática (molecular) con la vorticidad fluctuante. Al ser empíricas, estas ecuaciones dejan de tener el problema de cierre y se limita un poco su aplicabilidad. Las ecuaciones necesarias para su implementación se presentan a continuación, en las ecuaciones Ec. N°3.14 y Ec. N°3.15.

$$\nu_t = c_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \qquad \textbf{Ec. N°3.13}$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + U_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\kappa}\frac{\partial \kappa}{\partial x_i}\right) + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon \qquad \textbf{Ec. N°3.14}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}\frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}\right) + c_{1\epsilon}\, \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - c_{2\epsilon}\frac{\epsilon^2}{\kappa} \qquad \textbf{Ec. N°3.15}$$

Donde los coeficientes c_μ, $c_{1\epsilon}$, $c_{2\epsilon}$, σ_κ y σ_ϵ corresponden a constantes empíricas, cuyos valores se indican en la Tabla N°3.2.

Tabla N°3.2 – Coeficientes Empíricos del modelo $\kappa - \epsilon$

c_μ	$c_{1\epsilon}$	$c_{2\epsilon}$	σ_κ	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.00	1.30

3.3 Método Volumen de Fluido

El método Volumen de Fluido, o VOF por sus siglas en inglés (Volume of Fluid), que utiliza el software OpenFOAM® [7] consiste en definir una ecuación de transporte para determinar la fracción relativa de volumen entre dos fases, o fracción de fase α, en cada celda de la malla generada para la geometría. Las propiedades físicas son calculadas en base a un promedio ponderado según esta fracción de fase. La naturaleza de este método VOF no permite definir una interfaz explícita entre fases, sino que se obtiene como una propiedad del campo de fracción de fase. La fracción de fase puede tener cualquier valor entre 0 y 1, cuyo valor es cero cuando la celda está vacía, la unidad para cuando la celda está llena, y un valor intermedio entre cero y uno asociado a la fracción de celda que tiene fluido, por lo tanto, la interfaz nunca está definida, pero ocupa un volumen alrededor de la región donde sí existe la interfaz definida.

En este método [10], adicionalmente a las ecuaciones anteriores (Navier-Stokes, Continuidad y Cierre turbulento), presenta la ecuación de transporte para el valor escalar α que toma la forma presentada en la Ec. N°3.16.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \qquad \textbf{Ec. N°3.16}$$

En OpenFOAM®, se hace necesario incluir la delimitación de la superficie mediante la introducción de un término extra dentro de la Ec. N°3.17.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) + \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha)U_r) = 0 \qquad \textbf{Ec. N°3.17}$$

Donde U_r corresponde a un campo de velocidades apropiado para delimitar la interfaz aire/agua, ya que este término artificial es activado sólo en la interfaz, puesto que si $\alpha = 1$, o si $\alpha = 0$ el último término desaparece.

La densidad en cualquier punto del dominio se calcula como un promedio ponderado de la fracción de volumen de los dos fluidos, tal como se ve en la Ec. N°3.18.

$$\rho = \alpha\rho_{agua} + (1-\alpha)\rho_{aire}$$ **Ec. N°3.18**

Luego la tensión superficial Ts es calculada como:

$$Ts = \sigma \cdot j(x) \cdot n$$ **Ec. N°3.19**

Donde n es un vector perpendicular unitario a la interfaz, la cual se calcula según la Ec. N°3.20.

$$n = \frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|}$$ **Ec. N°3.20**

Y $j(x)$ es la curvatura de la interfaz, la cual se calcula según la Ec. N°3.21.

$$j(x) = \nabla n$$ **Ec. N°3.21**

Todas estas ecuaciones vienen implementadas en la aplicación *interFoam* que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes, Continuidad y un modelo de turbulencia.

3.4 Condición Courant-Friederichs-Lewy

Esta condición [11] corresponde a un criterio de estabilidad en las ecuaciones diferenciales finitas al resolver, mediante métodos numéricos algebraicos lineales, operadores diferenciales parciales hiperbólicos. Esta condición establece un límite superior entre el tiempo de residencia del flujo tridimensional ($\Delta s_i/U_i$) y el intervalo de tiempo de cómputo, lo que queda representado en la Ec. N°3.22:

$$Co = \frac{U_x \cdot \Delta t_c}{\Delta c_x} + \frac{U_y \cdot \Delta t_c}{\Delta c_y} + \frac{U_z \cdot \Delta t_c}{\Delta c_z} < Co_{máximo}$$ **Ec. N°3.22**

Normalmente, se establece que el número de Courant máximo es igual a 1, y para ecuaciones diferenciales finitas resueltas con métodos numéricos matriciales se pueden tolerar números de Courant mayores.

Para efectos de este trabajo, se escogen intervalos de tiempo de cómputo tales que el número de Courant en la modelación sea menor a 1 de tal manera que la resolución sea óptima y converja de mejor manera a la solución, para lo cual se elige un valor de intervalo de tiempo de cómputo apropiado en función de una estimación preliminar de la velocidad y del tamaño del mallado, lo cual se puede corroborar en cada paso de la modelación en OpenFOAM® mediante el valor máximo y promedio de Courant en todo el dominio.

3.5 Hidráulica de canales clásica

3.5.1 Ecuación de Energía

A partir de las ecuaciones de Navier-Stokes vistas en las ecuaciones Ec. N°3.1, Ec. N°3.2 y Ec. N°3.3, y bajo las consideraciones:

- Flujo incompresible ($\rho = cte$)
- Flujo permanente ($\partial U/\partial t = 0$)

- Flujo inviscido ($\mu = 0$)
- Presión Hidrostática (Sin curvatura en las líneas de corriente)

Se puede llegar a la ecuación de Bernoulli [12] donde:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + y_1 + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + y_2 + z_2 = H \qquad \textbf{Ec. N°3.23}$$

Sin embargo, el término $P/\rho g + y$ es equivalente a la altura de escurrimiento más la presión atmosférica la cual se considera conocida, quedando como:

$$\frac{v^2}{2g} + h + z = H \qquad \textbf{Ec. N°3.24}$$

Luego, si se incluye el fenómeno de las pérdidas de energía (fricción o singular) se obtiene la ecuación de Energía:

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + z_1 - \Delta H_{fricción} - \Delta H_{singular} = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + z_2 \qquad \textbf{Ec. N°3.25}$$

3.5.1.1 Energía Específica

Se define como la energía por kilogramo de agua en cualquier sección de un canal medida con respecto al fondo del mismo [12], y es equivalente a:

$$\frac{v^2}{2g} + h = E \qquad \textbf{Ec. N°3.26}$$

Dado que la velocidad se puede descomponer como $v = Q/A$, y el área es función de la altura, es que la ecuación Ec. N°3.26 para una sección y caudal determinados, la energía específica es función exclusiva de la profundidad de flujo.

Para un valor de energía específica dada existen dos posibles alturas de escurrimiento, las cuales, al disminuir la energía, van convergiendo a un único valor que corresponde a la altura crítica (h_c) la cual tiene la mínima energía para la cual se puede desarrollar un flujo, por lo cual si se deriva la ecuación Ec. N°3.26 en la altura se puede encontrar su mínimo al igualar dE/dh a cero:

$$\frac{dE}{dh} = (-2) \cdot \frac{Q^2}{2g} \cdot A^{-3}(h) \cdot \frac{dA}{dh} + 1 = 0 \qquad \textbf{Ec. N°3.27}$$

$$\frac{Q^2}{g \cdot A^3(h_c)} \cdot b_{Superficial} = 1 = Fr^2 \qquad \textbf{Ec. N°3.28}$$

Conociendo la sección del canal, y a partir de la Ec. N°3.28, se puede despejar la altura crítica (h_c). Además, según el valor del número de Froude (Fr) se puede evaluar el tipo de escurrimiento:

- $Fr^2 = 1 \rightarrow$ Flujo crítico, con altura de escurrimiento igual a la altura crítica.
- $Fr^2 > 1 \rightarrow$ Flujo supercrítico, con altura de escurrimiento menor a la altura crítica.
- $Fr^2 < 1 \rightarrow$ Flujo subcrítico, con altura de escurrimiento mayor a la altura crítica.

3.5.1.2 Flujo Uniforme

Se define el flujo uniforme como al instante en el cual el balance de fuerzas internas de un escurrimiento (Figura N°3.1) es igual a cero [12]. En este punto la altura de escurrimiento se vuelve constante y las pérdidas de fricción son equivalentes a pendiente.

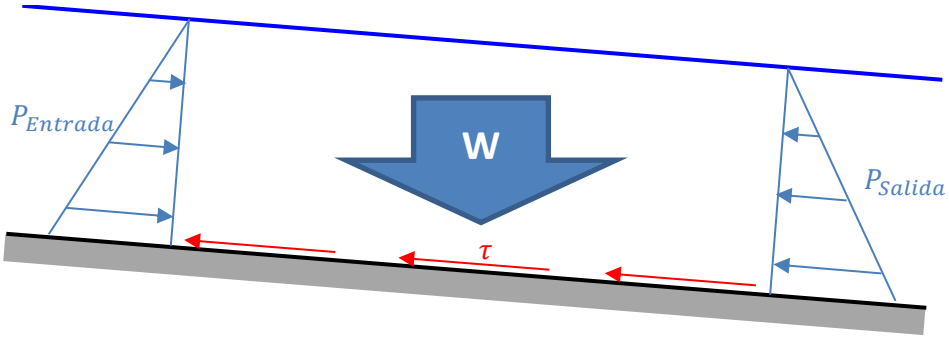

Figura N°3.1 – Balance de Fuerzas en flujo uniforme
Fuente: Elaboración propia

Luego se analizan todas las fuerzas en el volumen de control (V.C.) en la dirección del escurrimiento uniforme de acuerdo a la Tabla N°3.3.

Tabla N°3.3 – Fuerzas involucradas en Balance de Fuerzas en Volumen de Control

		Volumen	Entrada	Salida	Superficie Libre	Superficie Mojada
Fuerzas de Cuerpo		$Peso\ W$ $\rho \cdot g \cdot A \cdot L_{V.C.}$	----	----	----	----
Fuerzas de Superficie	**Presión**	----	$P_{Entrada}$ $\rho \cdot g \cdot h \cdot A$	P_{Salida} $\rho \cdot g \cdot h \cdot A$	P_0 se desprecia	Perpendicular al flujo
	Corte	----	Perpendicular al flujo	Perpendicular al flujo	Roce aire/fluido se desprecia	$\int_0^{Pm} \tau \cdot dAm$ $\approx \bar{\tau} \cdot Am$

Considerando el esfuerzo de corte promedio distribuida en el área mojada como:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{2} C_\tau \cdot \rho \cdot v^2 \qquad \textbf{Ec. N°3.29}$$

Y si además se considerando que $sin\theta \approx s$, el balance resulta:

$$v = \sqrt{\frac{2g \cdot R_H \cdot sin\theta}{C_\tau}} = C_{Chezy} \cdot R_H^{0.5} \cdot s^{0.5} \qquad \textbf{Ec. N°3.30}$$

La Ec. N°3.30 se conoce como la Ecuación de Chezy (1769), para la cual Robert Manning (1889) presentó una equivalencia del coeficiente de Chezy con la cual se obtiene la ecuación de Manning [12] presentada en la Ec. N°3.31.

$$\frac{Q \cdot m}{\sqrt{s}} = A \cdot R_H^{2/3} \qquad \textbf{Ec. N°3.31}$$

Con la ecuación Ec. N°3.31 se puede:

- Estimar la pérdida de fricción por unidad de largo (J) despejando el valor de s para una altura de escurrimiento determinada. Particularmente para el caso de flujo uniforme se obtiene que $J = s$.
- La *altura normal* de escurrimiento, que ocurre cuando se alcanza un flujo uniforme, y se calcula despejando la altura de escurrimiento.

3.5.2 Cálculo de eje hidráulico

Para los efectos de esta memoria, se utiliza el método del paso directo [12] aplicable a canales prismáticos y de fácil implementación. El método proviene de realizar un equilibrio en la ecuación de energía entre dos puntos del escurrimiento espaciado en un tramo corto (Δx), siendo conocidas las alturas de ambos puntos:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \Delta H_{fricción} \qquad \textbf{Ec. N°3.32}$$

Sin embargo, si se recuerda que $\Delta H_{fricción} = J \cdot \Delta x$, que $s = \frac{z_1 - z_2}{\Delta x}$ y que $E_i = h_i + \frac{v_i^2}{2g}$, entonces se puede despejar Δx como:

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{i - J} \qquad \textbf{Ec. N°3.33}$$

Entonces para calcular el eje hidráulico se debe seguir el siguiente algoritmo:

a. Siendo conocida una altura de escurrimiento (condición de borde, h_0), se propone la altura siguiente (h_1) a un espaciamiento predeterminado Δx.
b. Con dichas alturas se despeja Δx en la Ec. N°3.35, considerando un J promedio calculado con las dos alturas de escurrimiento.
c. Se verifica que el Δx calculado en el paso "b" y el Δx propuesto sean iguales, caso contrario, proponer una nueva altura h_1 e iterar hasta coincidir.
d. Ya con h_1 definido, se propone h_2 y se repite el algoritmo.

3.5.3 Función Momenta

Dado que hay condiciones hidráulicas que no permiten un correcto cálculo del eje hidráulico al existir pérdidas de energía no cuantificables, es que se necesita una nueva ecuación que permita las siguientes consideraciones:

- Presión hidrostática a la entrada y salida.
- Fuerza de corte se desprecia ante pérdidas de energía turbulentas.
- Análisis en la dirección del flujo (acción del peso y presión atmosférica se desprecian).

Por lo tanto se utiliza la conservación del momentum lineal [13]:

$$\rho \cdot Q \cdot (v_{salida} - v_{entrada}) = \Sigma Fuerzas\ Externas \qquad \textbf{Ec. N°3.34}$$

Las únicas fuerzas que actúan sobre el volumen de control corresponden a la presión a la entrada y salida, por lo que la Ec. N°3.34 se puede reducir a:

$$\rho \cdot Q \cdot \left(\frac{Q}{Av_{salida}} - \frac{Q}{Av_{entrada}}\right) = \rho \cdot g \cdot ((\eta Ap)_{ntrada} - (\eta Ap)_{salida}) \qquad \textbf{Ec. N°3.35}$$

Dado que hay un balance entre entrada y salida, se introduce la función Momenta como el valor constante entre entrada y salida proveniente de la conservación del momentum lineal:

$$\frac{Q^2}{g \cdot Av_1} + \eta_1 Ap_1 = \frac{Q^2}{g \cdot Av_2} + \eta_2 Ap_2 = M \qquad \textbf{Ec. N°3.36}$$

3.5.4 Caída

Al analizar una grada de bajada antecedida y seguida de un torrente, se procede a analizar los ábacos presentados por Domínguez [13] que permiten determinar tanto la altura del torrente después de la grada, una vez estabilizado el flujo, y la distancia entre la grada y esta nueva altura de torrente. Para dar claridad a los valores utilizados en los ábacos, se presenta la Figura N°3.2.

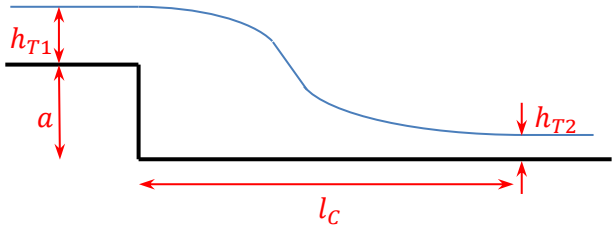

Figura N°3.2 – Grada de bajada antecedida y seguida de un torrente
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N°3.4 se presentan los parámetros utilizados en los ábacos de las Figura N°3.3 y Figura N°3.4, a los cuales se ingresa con los valores conocidos h_{T1}, a y h_c.

Tabla N°3.4 – Parámetros utilizados en Ábacos

K_C	X_{T1}	X_{TT}	L_C
$\frac{a}{h_c}$	$\frac{h_{T1}}{h_c}$	$\frac{h_{T2}}{h_{T1}}$	$\frac{l_C}{h_c}$

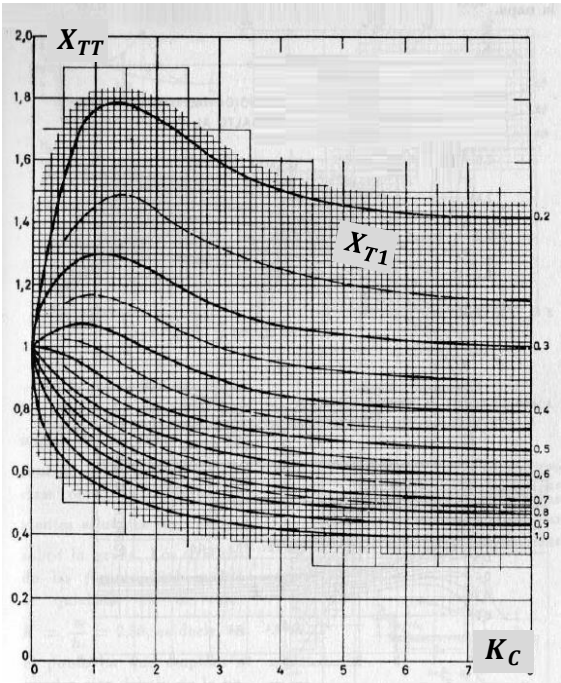

Figura N°3.3 – Ábaco para determinar h_{T2}
Fuente: Figura N°192 de Referencia [13]

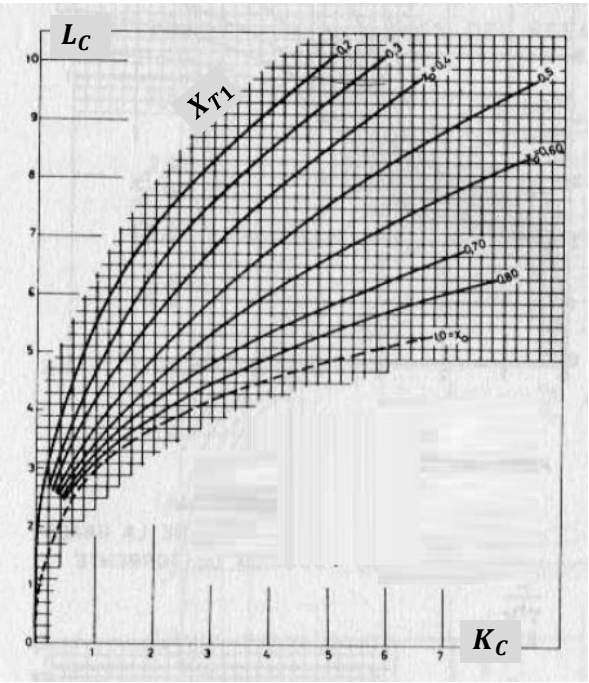

Figura N°3.4 – Ábaco para determinar l_C
Fuente: Figura N°196 de Referencia [13]

3.5.5 Resalto hidráulico

El resalto hidráulico [12] es un fenómeno que ocurre cuando se encuentra un escurrimiento supercrítico (torrente, con poca profundidad y alta velocidad) desde aguas arriba, con uno subcrítico (río, con mucha profundidad y baja velocidad) desde aguas abajo generando un aumento repentino de la altura y conlleva pérdidas energéticas difíciles de cuantificar. Sin embargo, el resalto tiene muchas utilidades, tales como disipar energía después de una caída hidráulica, disminuir la velocidad del escurrimiento para evitar socavaciones, aumentar la altura del escurrimiento, entre otras.

La metodología para ubicar el resalto [13] consiste en:

- Determinar el eje hidráulico teórico para ambos escurrimientos.
- Se calcula la momenta para cada altura, para cada escurrimiento.
- El resalto ocurre cuando ambas momentas se igualan.

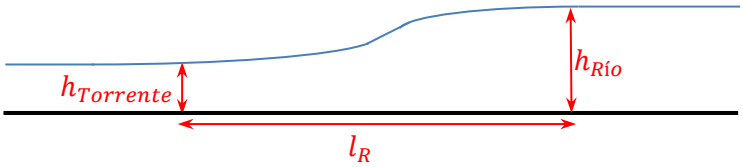

Figura N°3.5 – Representación de un resalto hidráulico
Fuente: Elaboración propia

Bajo el procedimiento anterior, se aprecia que si la momenta de uno de los escurrimientos domina sobre el otro, el resalto se va rechazando (en caso que la momenta del torrente sea mayor) o se va adelantando (en caso que la momenta del río sea mayor). Casos particulares donde uno de los escurrimientos domina por completo hasta llegar a la condición de borde, por ejemplo si la momenta del río es superior a la momenta de torrente a la salida de una compuerta, han sido estudiados con detalle por diversos autores.

Diversos estudios han analizado la longitud del resalto (l_R), y para los efectos de este trabajo se utilizan las fórmulas experimentales provenientes de las experiencias de A. Ovalle y A. Domínguez [13], quienes plantean la Ec. N°3.37, que relaciona el largo del resalto con la altura crítica y las alturas de torrente y río con momentas igualadas, situación representada en la Figura N°3.5.

$$l_R = 1.5\left(\frac{h_{Río}}{h_{Torrente}} - 0.80\right) \cdot h_c \qquad \textbf{Ec. N°3.37}$$

Esta relación es válida para aquellos casos donde $2 < \frac{h_{Río}}{h_{Torrente}} < 16$.

4 ANÁLISIS GEOMÉTRICO PREVIO DE PEAS UBICADA EN VIÑA DEL MAR

4.1 Descripción de la PEAS existente

La planta elevadora de aguas servidas (PEAS) de ESVAL S.A., ubicada en 2 Norte con 4 Poniente, Viña del Mar, Región de Valparaíso, funciona como impulsión para las aguas servidas de Viña del Mar y Reñaca, de tal manera de poder impulsarlas hasta el emisario submarino en Loma Larga, ubicado al sur-poniente del sector de Playa Ancha de la ciudad de Valparaíso, y al emisario submarino ubicado en 2 Norte, en Viña del Mar.

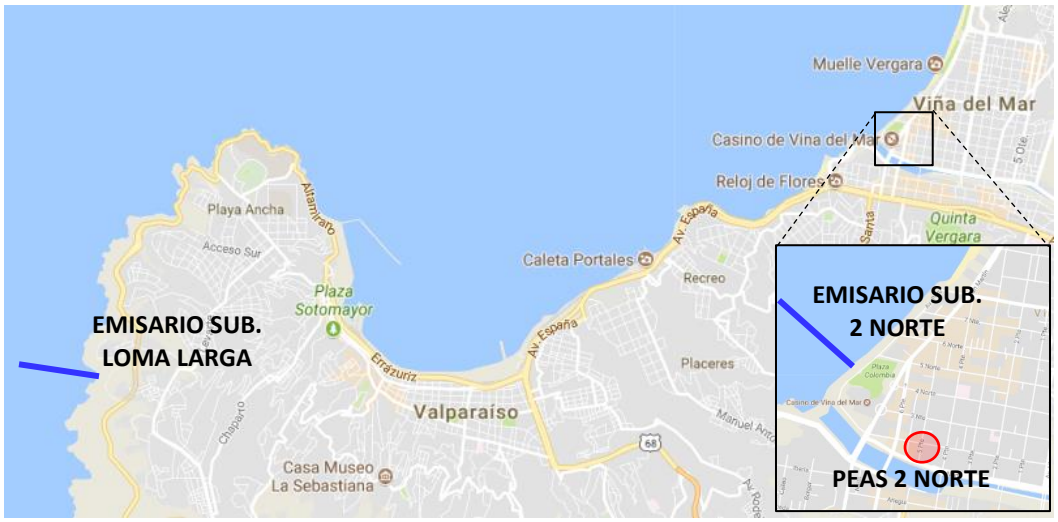

Figura N°4.1 – Mapa de Región de Valparaíso – Ubicación PEAS y Emisarios Submarinos
Fuente: Google Maps

En la Figura N°4.2 se presenta una vista en planta de la PEAS y específicamente se demarca en rojo al sector del pozo de aspiración que impulsa aguas servidas al emisario submarino ubicado en 2 Norte con Avenida Perú en Viña del Mar, ya que es esta zona la que se analizará en esta memoria.

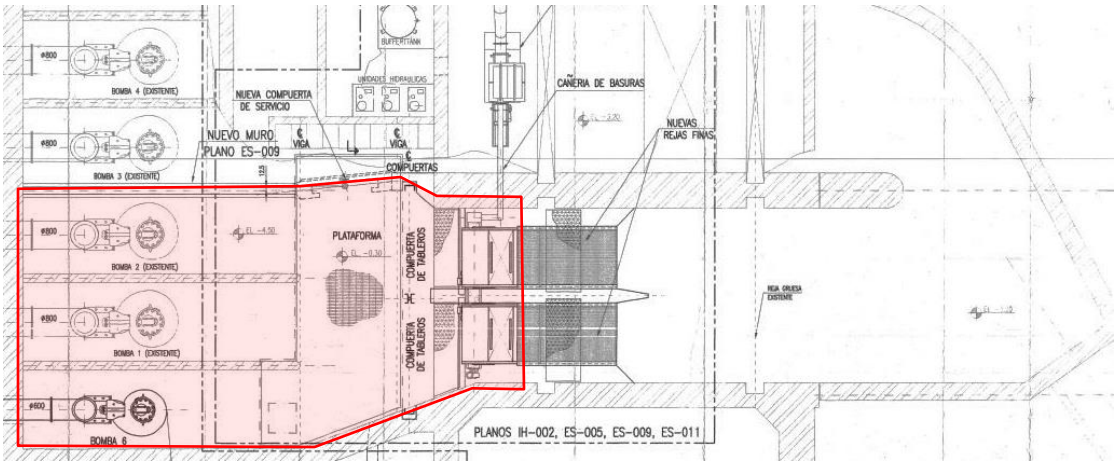

Figura N°4.2 – Vista en planta de PEAS 2 Norte
Fuente: Plano 1272-IH-001, cortesía de ESVAL S.A.

Si bien el recinto permite elevar agua tanto hacia el emisario submarino como a la planta de tratamiento en Loma Larga, para efectos de esta memoria sólo se analizará el sector que lleva aguas servidas hacia el emisario submarino de 2 Norte, ya que la sentina no está compartida de manera directa, sino que tiene una compuerta que separa el flujo e independiza los efectos de un sector con el otro, con lo que se simplifican las condiciones de borde del modelo numérico al reducir la cantidad de captaciones de 6 a 3 puntos, que son los que elevan las aguas servidas al emisario submarino de ESVAL ubicado en Av. Perú con 2 Norte, en la ciudad de Viña del Mar.

4.2 Observaciones del diseño geométrico de la PEAS

Si bien esta planta elevadora de aguas servidas, y en particular su pozo de aspiración, ya fueron diseñados y construidos, se puede analizar su diseño en función de las recomendaciones recopiladas anteriormente en la sección 2 del estado del arte del diseño geométrico. En base a éstas, se procede a analizar las siguientes cuatro características del pozo de aspiración.

4.2.1 Distanciamiento de tuberías

Tal como se señaló en el punto 2.2.3, existen recomendaciones de distanciamiento entre tuberías (bombas) y muros. En la Figura N°4.3 se aprecia una vista en planta en CAD de las tuberías y los muros internos. En el mismo AutoCAD se procedió a realizar las mediciones existentes y se presentan los resultados en la Tabla N°4.1.

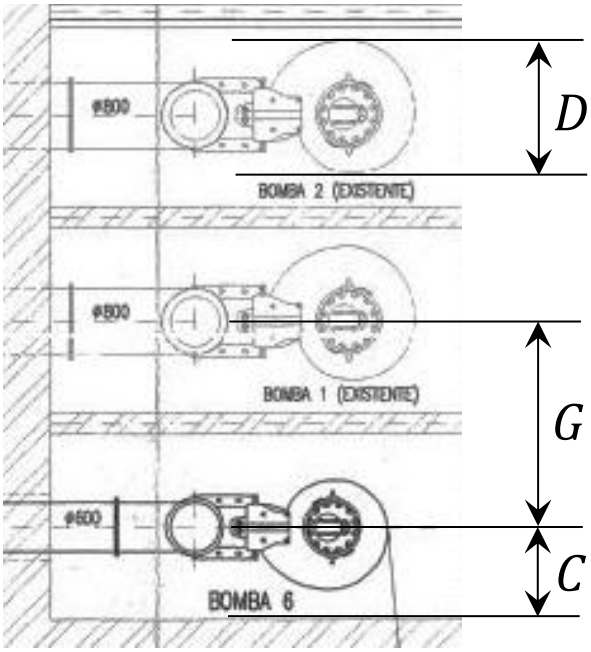

Figura N°4.3 – Vista en planta de tuberías y muros internos

Tabla N°4.1 – Dimensiones entre bombas y muros

Bomba	D [m]	C [m]	G [m]
B1 – CP3602	1.60	1.20	--
B2 – CP3602	1.60	1.08	2.28
B6 – CP3400	1.30	1.20	2.40

A continuación se presentan las relaciones entre D, G y C en las Ec. N°4.1 que ya se habían visto en la Figura N°2.12, y se verifica el cumplimiento en la Tabla N°4.2.

$$G \geq 1.5 \cdot D \quad ; \quad C \geq 0.8 \cdot D$$ **Ec. N°4.1**

Tabla N°4.2 – Verificación de las dimensiones

Bomba	G	C
B1 – CP3602	--	$1.20 \leq 1.28$ – No Cumple
B2 – CP3602	$2.28 < 2.40$ – No Cumple	$1.08 \leq 1.28$ – No Cumple
B6 – CP3400	$2.40 > 1.95$ – Cumple	$1.20 \geq 1.04$ – Cumple

El no cumplimiento de estas condiciones puede influir de diversas maneras en la correcta operación del sistema, como en la generación de subpresiones cercanas a los muros debido a su cercanía, o en el caso sin muros separadores, la generación de remolinos por influencia entre bombas.

4.2.2 Forma del fondo de la PEAS

Dentro de las recomendaciones, se señala que tener un fondo con paredes inclinadas incrementa la turbulencia, manteniendo así los sólidos en suspensión y evitando la formación de sedimentos. Esta recomendación fue utilizada en la PEAS, dando pendiente al fondo en el eje del flujo, confluyendo hacia la captación de la bomba. Esta zona se aprecia en la Figura N°4.4, donde se ve un corte longitudinal de la planta en la zona de succión de las bombas.

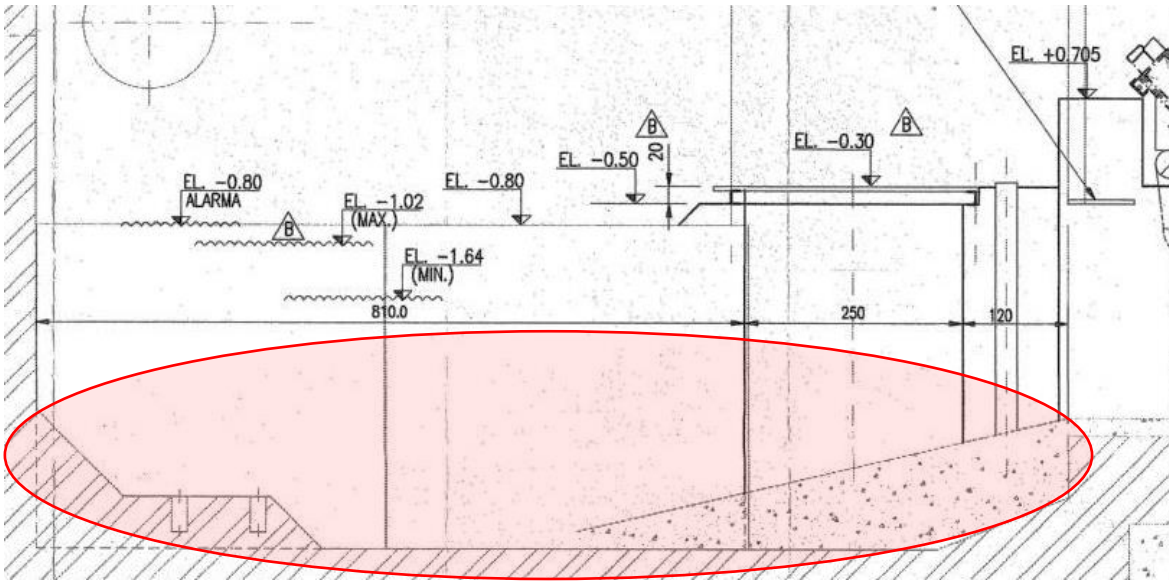

Figura N°4.4 – Vista en corte de la planta y zona con pendientes para las bombas
Fuente: Plano 1272-IH-002, cortesía de ESVAL S.A.

4.2.3 Muros adicionales

Al revisar los planos de la PEAS se comprobó la existencia de unos muros cortos redondeados como se ve en la Figura N°4.5, similares a las cepas de los puentes, los cuales se convierten en una singularidad que puede afectar al flujo y no permitir la estabilización del flujo a un escurrimiento normal de canal. Es interesante la utilización de estos muros intermedios, ya que, si la vorticidad en este sector es mayor a cero, podrían ayudar a incrementar la turbulencia, lo que mantiene los sólidos en suspensión y evita la formación de sedimentos.

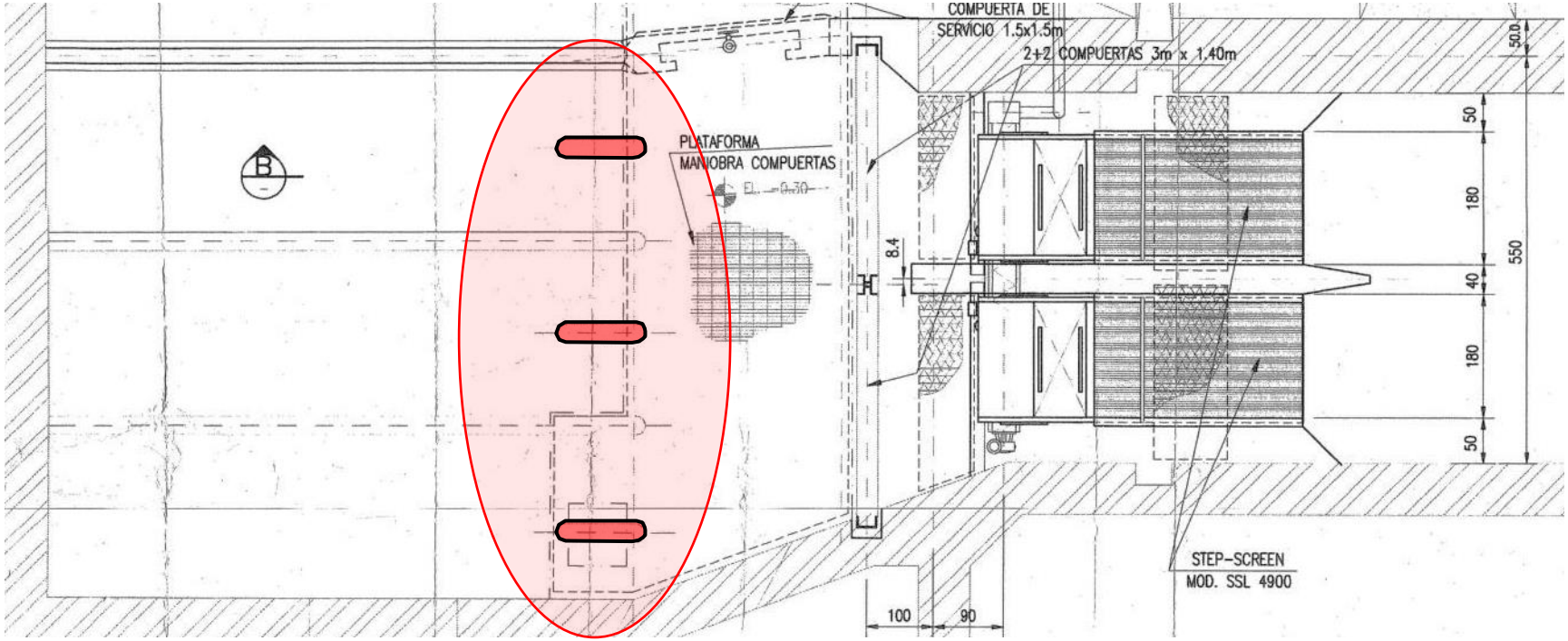

Figura N°4.5 – Vista en planta del pozo de aspiración y sus muros internos adicionales
Fuente: Plano 1272-IH-002, cortesía de ESVAL S.A.

4.2.4 Niveles de Agua

A partir del Plano 1272-IH-002, cortesía de ESVAL S.A., se conocen los niveles de agua mínimo y máximo de agua y también la profundidad de la entrada a la tubería, datos presentados en la Tabla N°4.3.

Tabla N°4.3 – Niveles de Agua

Item	Nivel de Agua
Fondo	0.00 [m]
Entrada Tubería	1.05 [m]
Nivel Mínimo	2.86 [m]
Nivel Máximo	3.48 [m]

De esta información se concluye que la carga mínima sobre la entrada de la tubería es de 1.81 [m] y no los 2 [m] mínimos establecidos por GRUNDFOS® [4].

4.2.5 Modelación de las bombas

Las bombas de interés señaladas anteriormente corresponden a las bombas N°1, N°2 y N°6, y que se pueden observar en las Figura N°4.2 y Figura N°4.3, donde su operación depende del caudal que se desea elevar. En la Tabla N°4.4 se presentan características de cada bomba, donde los caudales mínimos y máximos se asocian con el nivel de mareas y nivel real de aguas servidas dentro de la PEAS. Estas bombas están dispuestas en paralelo y pueden funcionar tanto individualmente como en grupo, lo cual genera diversas disposiciones que corresponden a las combinaciones entre ellas, las cuales se presentan en la Tabla N°4.5.

Tabla N°4.4 – Características de cada bomba (Operacional)

N°Bomba	Modelo	$Q_{mín}$ (L/s)	$Q_{máx}$ (L/s)
N°1	FLYGT CP3602.905	1458	1598
N°2	FLYGT CP3602.905	1458	1598
N°6	FLYGT CP3400.705	694	841

Tabla N°4.5 – Disposiciones Operacionales Reales (Caudal máximo)

Disposición	Bombas en uso	Q_{B1} (L/s)	Q_{B2} (L/s)	Q_{B6} (L/s)
1	Sólo N°1	1598	---	---
2	Sólo N°2	---	1598	---
3	Sólo N°6	---	---	841
4	N°1 y N°6	1443	---	366
5	N°2 y N°6	---	1443	366
6	N°1 y N°2	1098	1098	---

Estas combinaciones son efectivas mientras el funcionamiento interno de la PEAS como el funcionamiento del emisario submarino al cual elevan el caudal sea correcto. Para efectos de esta memoria se analizarán diversas combinaciones de bombas en uso, como también cambios en el mallado y la geometría interna de la PEAS, donde finalmente en conjunto se analizan las combinaciones entre disposiciones/mallado/geometría.

En la Figura N°4.6 se aprecian las curvas de funcionamiento de las bombas para las distintas disposiciones presentadas en la Tabla N°4.5.

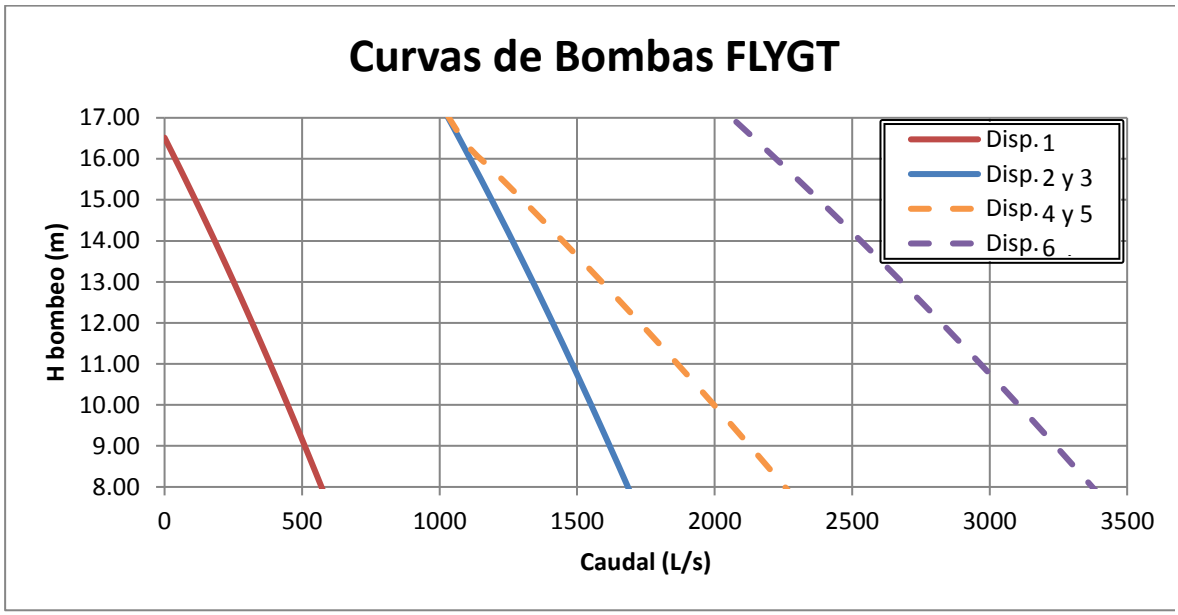

Figura N°4.6 – Curvas de operación de las bombas

5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD BIDIMENSIONAL

Este capítulo cumple el objetivo de analizar cómo las condiciones de borde afectan significativamente el resultado de un modelo, y para esto se generó un modelo simplificado bidimensional donde inicialmente se imponen condiciones de borde directamente relacionadas con el flujo (niveles de agua, presión y velocidad), y luego se incorporan condiciones de borde más específicas (condición de no deslizamiento y modelo de turbulencia). En la sección 5.1 se presentan los casos a analizar con las variaciones entre sus condiciones de borde; en la sección 5.2 se presentan los resultados comparativos entre los dos casos; y en la sección 5.3 se analizan los resultados y se concluye sobre la realización de un análisis bidimensional preliminar.

5.1 Casos a analizar

Con el fin de evaluar las condiciones de borde se analizarán tres casos, cada uno con mejoras en las condiciones de borde respecto al caso anterior. Las siguientes condiciones de borde comunes para los dos casos a analizar se asemejan con la condición de la PEAS real, la velocidad se corresponde con el caudal de salida por una succión en el caso de dos bombas Flygt CP3602, mientras que el nivel de salida de agua se corresponde con el nivel medio de agua en la PEAS, todo en conjunto a una geometría simplificada de la PEAS representada en la Figura N°5.1.

- Velocidad de entrada de $0.65\ [m/s]$ en *inlet*.
- Velocidad de salida de $1.57\ [m/s]$ en *outlet*.
- Nivel de agua a $2.6\ [m]$ sobre la losa más profunda.

Figura N°5.1 – Representación de la geometría bidimensional utilizada

Cabe destacar que se analizará una simplificación bidimensional de la PEAS, lo que se traduce tanto en una disminución en el número de celdas a calcular, como en una disminución en el número de ecuaciones a resolver, ya que las ecuaciones en la dirección “Y” no se hace necesario resolverlas.

5.1.1 Caso N°1: Caso base

El caso N°1 se analiza considerando:

- Un modelo de flujo laminar.
- Un fluido incompresible.
- Un flujo constante, con caudal de entrada igual al caudal de salida y velocidad inicial en todo el dominio igual a cero.
- La condición de no deslizamiento, dando $U = (0\ 0\ 0)\ \left[\frac{m}{s}\right]$ en todos los bordes sólidos.
- La presión atmosférica sobre el nivel de agua igual a cero.

5.1.2 Caso N°2: Modelo de turbulencia $\kappa - \epsilon$

El caso N°2 utiliza las mismas consideraciones que el caso N°1, sólo que se descarta el modelo de flujo laminar y se aplica modelo de turbulencia $\kappa - \epsilon$, cuyos parámetros de cálculo se indican a continuación.

5.1.2.1 Variable κ

Se estiman valores de la variable κ para cada elemento geométrico, en base a la Ec. N°5.1 [11]:

$$\kappa = \frac{3}{2}(\|\overline{U}\| \cdot l_T)^2 \qquad \textbf{Ec. N°5.1}$$

Donde $\|\overline{U}\|$ es la magnitud de la velocidad promedio total (tridimensional, o en este caso bidimensional) y l_T es la longitud de escala de turbulencia, la cual se puede estimar según el tipo de flujo:

- Flujo en tuberías: $l_T = 0.07 \cdot Diámetro$
- Flujo en canales pequeños: $l_T = 0.07 \cdot Radio\ Hidráulico$
- Flujo entre muros: $l_T = 0.4 \cdot Espesor\ Capa\ Límite$

5.1.2.2 Variable ϵ

Se estiman valores de ϵ para cada elemento geométrico, en base a Ec. N°5.2 [11]:

$$\epsilon = 0.09^{3/4}\frac{\kappa^{3/2}}{l_T} \qquad \textbf{Ec. N°5.2}$$

5.2 Resultados comparativos

El análisis de los dos casos se evaluó en un tiempo de 40 [s], tiempo suficiente para evaluar el comportamiento dinámico del fluido y comparar el comportamiento entre ambos casos. A continuación, se presentan los estados del flujo en su condición inicial, media y final, donde se aprecia el nivel de agua, la magnitud de la velocidad y su dirección. Adicionalmente, se compara la vorticidad bajo la grada para ambos casos, con los vectores de velocidad para visualizar la dirección del movimiento del flujo (ya que los vectores de vorticidad son en el eje z).

5.2.1 Caso N°1

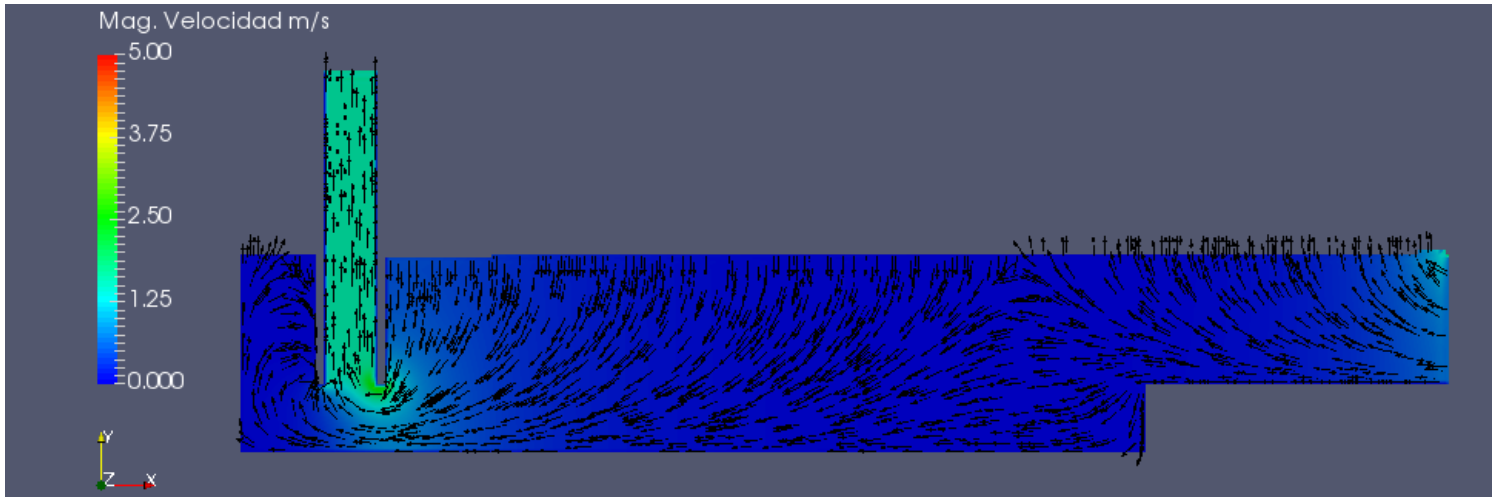

Figura N°5.2 – Modelación CFD para Caso N°1 (U y nivel de agua), t = 0 [s]

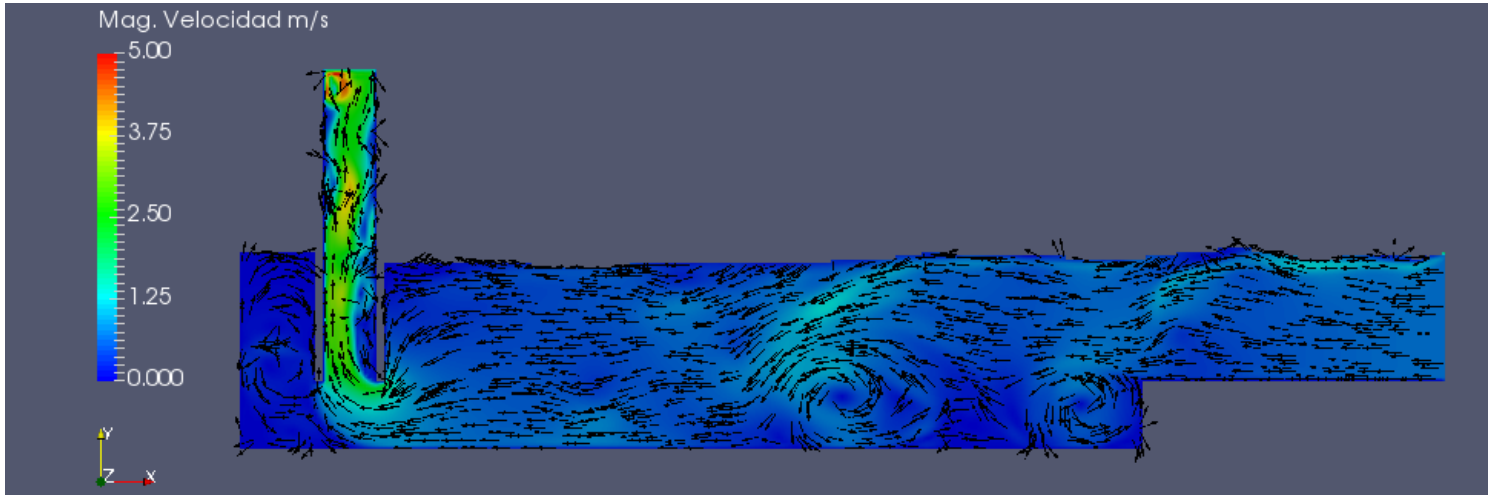

Figura N°5.3 – Modelación CFD para Caso N°1 (U y nivel de agua), t = 20 [s]

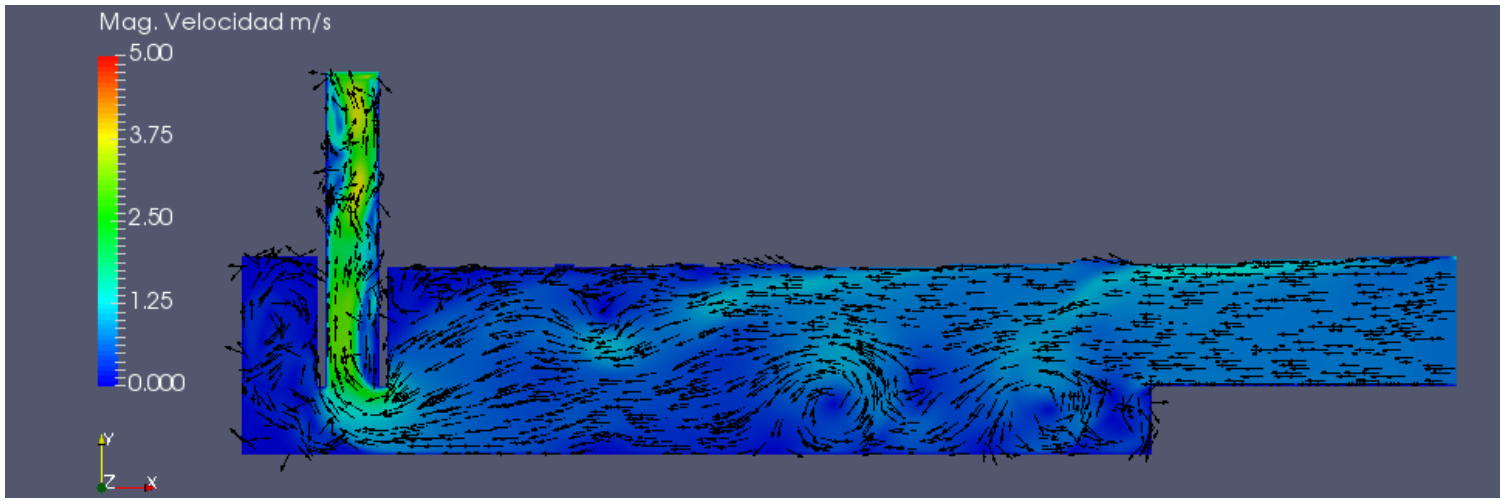

Figura N°5.4 – Modelación CFD para Caso N°1 (U y nivel de agua), t = 40 [s]

5.2.2 Caso N°2

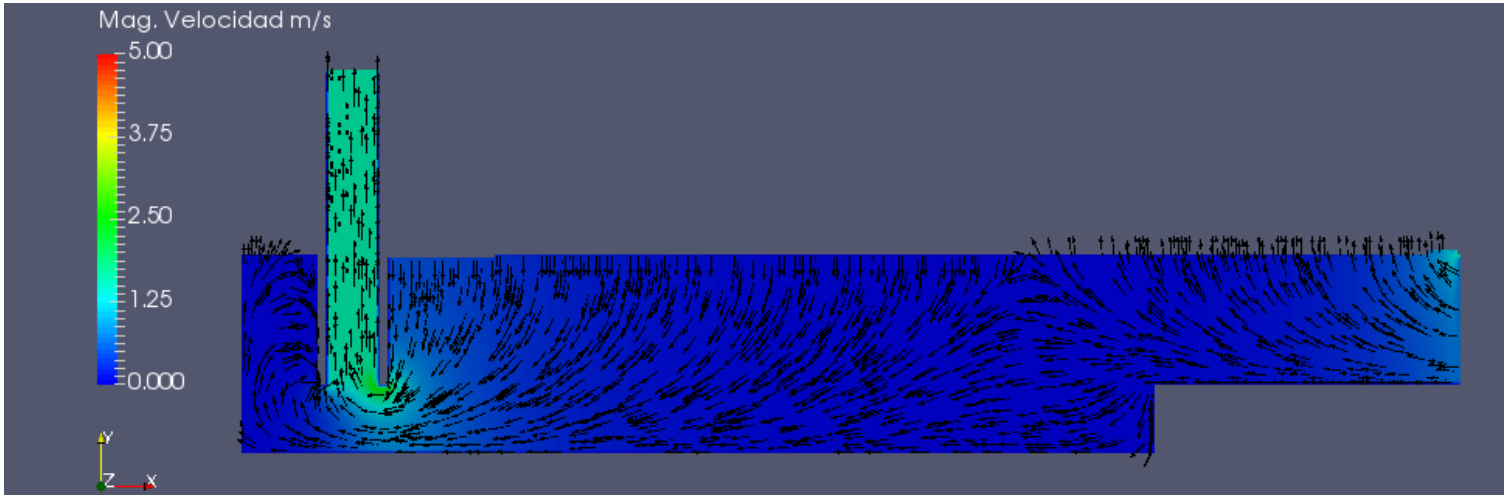

Figura N°5.5 – Modelación CFD para Caso N°2 (U y nivel de agua), t = 0 [s]

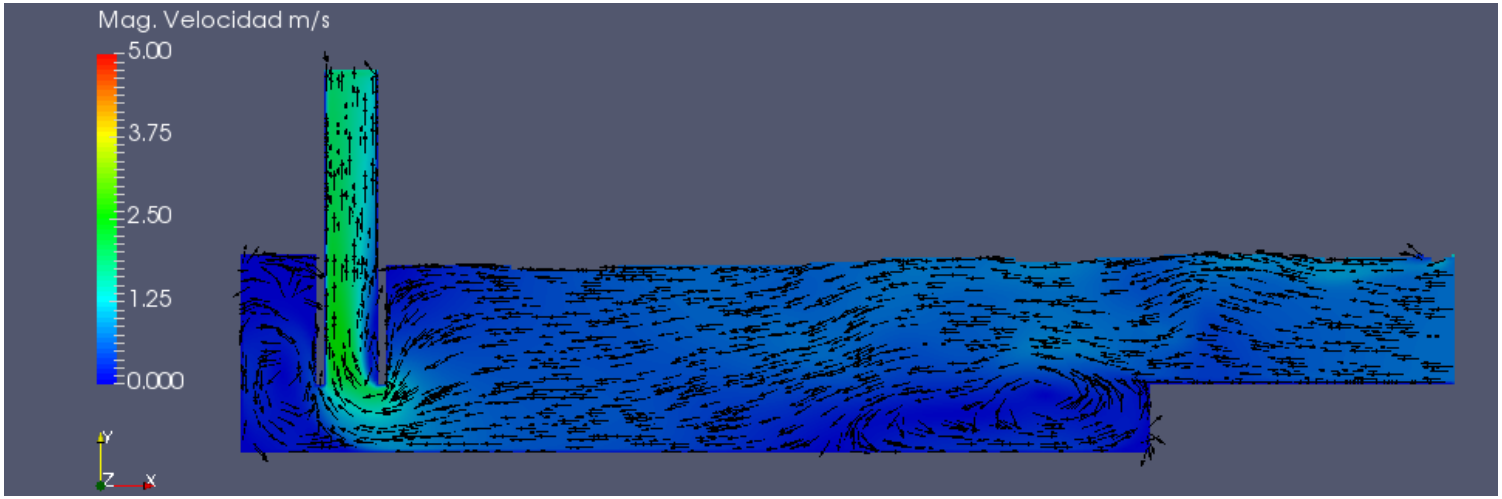

Figura N°5.6 – Modelación CFD para Caso N°2 (U y nivel de agua), t = 20 [s]

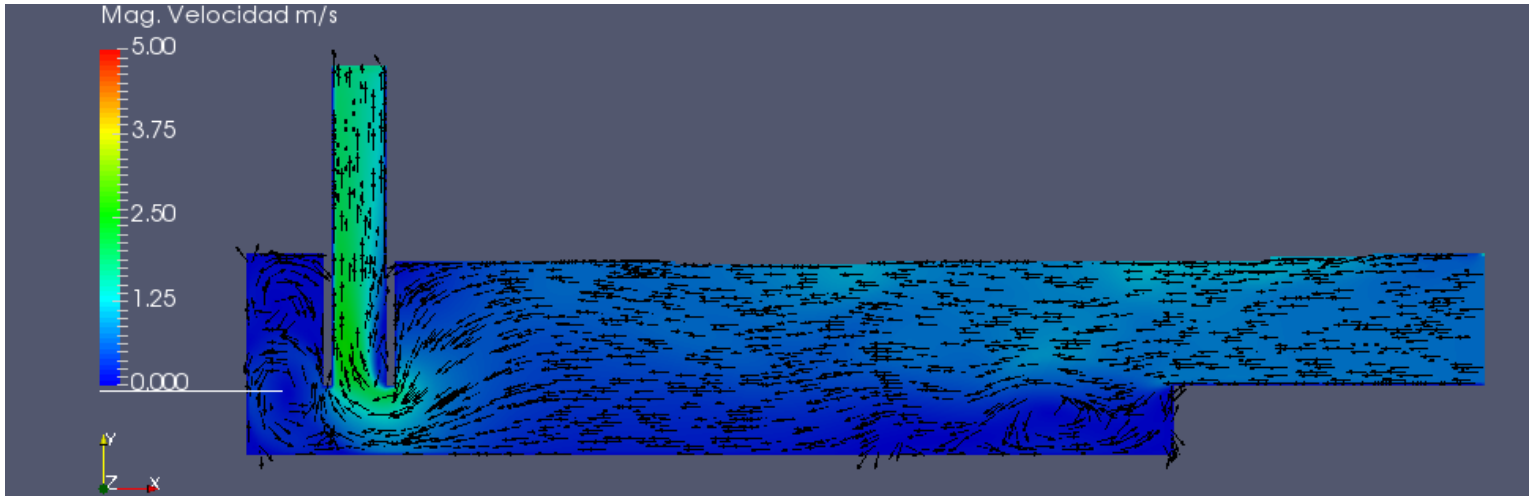

Figura N°5.7 – Modelación CFD para Caso N°2 (U y nivel de agua), t = 40 [s]

5.2.3 *Comparación de vorticidad bajo grada*

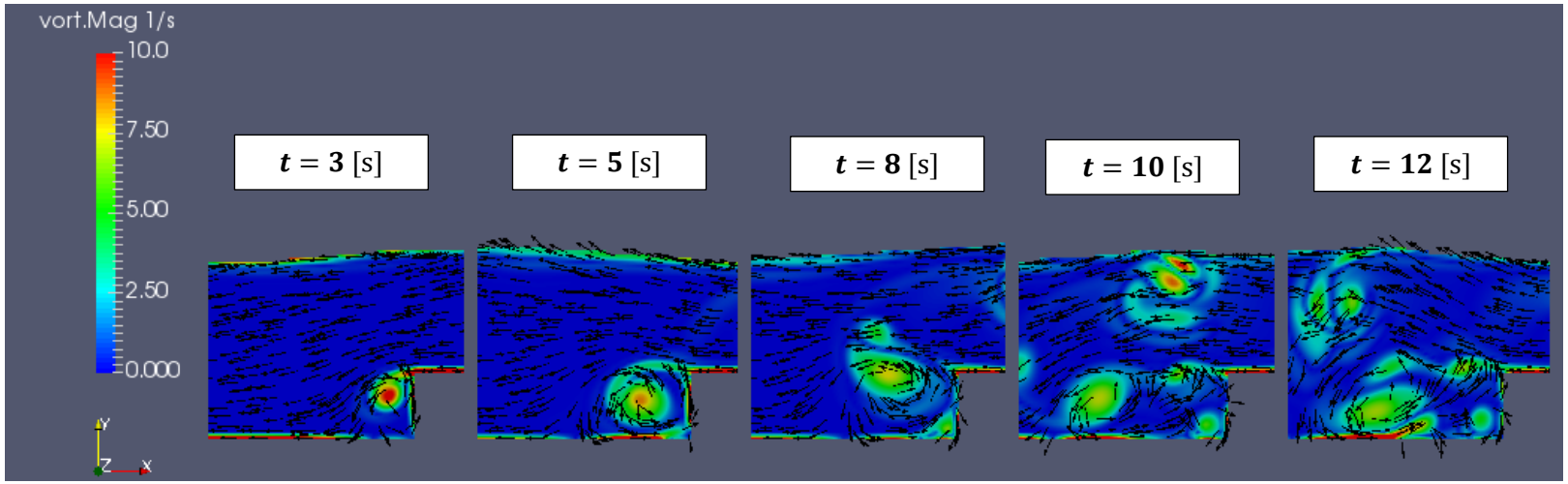

Figura N°5.8 – Modelación CFD para Caso N°1 (Vorticidad, U y nivel de agua)

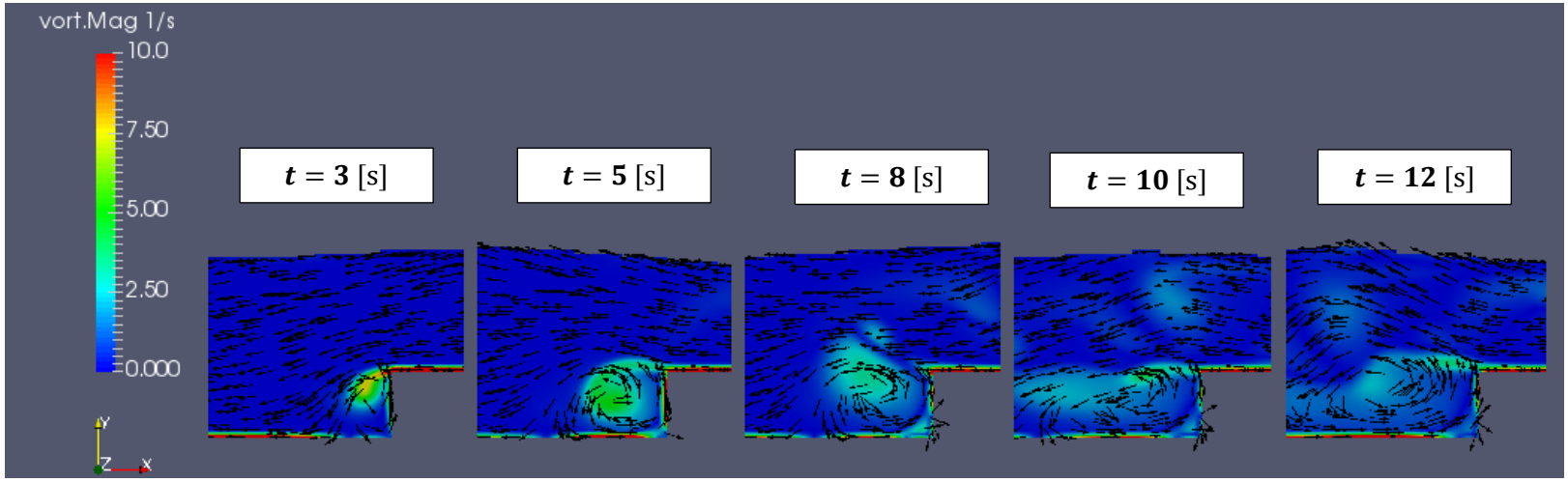

Figura N°5.9 – Modelación CFD para Caso N°2 (Vorticidad, U y nivel de agua)

5.3 Análisis de Resultados

5.3.1 Caso N°1

- Existen movimientos arremolinados aguas abajo de la grada que se transmiten hacia la captación, que se aprecian en mayor medida en la Figura N°5.4. Además, se identifican vórtices aguas abajo de la grada, los cuales se propagan en otros vórtices de distinta escala, tal como se aprecia en la Figura N°5.8.

5.3.2 Caso N°2

- Se aprecia que a medida que el flujo se desarrolla (Figura N°5.6), la zona de recirculación influencia al escurrimiento generando un aumento en el nivel de agua, cosa que se atenúa a los 40 [s] de simulación, donde la recirculación sólo se ubica bajo la grada y no genera aumentos de nivel, y se nota una canalización del flujo desde el *inlet* hasta la captación.
- Además, el flujo se estabiliza a diferencia del Caso N°1, ya que la incorporación de un modelo de flujos turbulentos permite una mejor disipación de la energía, notando sólo un vórtice en la zona de recirculación, mientras que en el Caso N°1 hay dos o más al no haber una disipación turbulenta.

5.3.3 Conclusiones Finales

- Las variaciones en las condiciones de borde permiten al usuario de OpenFOAM® visualizar variaciones en el comportamiento dinámico del fluido, las cuales permiten comprender que la utilización apropiada de condiciones de borde genera modelos que simulan más realísticamente el flujo.
- Si bien la generación de un modelo simplificado bidimensional se aleja de cualquier similitud de una estructura hidráulica real, abordar un problema de esta manera permite establecer parámetros preliminares de condiciones de borde y obtener resultados que permiten poner atención a fenómenos de interés a la hora de generar el modelo tridimensional correspondiente. Por ejemplo, si se está en una etapa de diseño en la cual aún no se cuenta con una estructura física para comparar, OpenFOAM® se transforma en una potente herramienta predictiva de análisis del comportamiento del fluido y de otros fenómenos hidráulicos, como los fenómenos adversos señalados en la sección 2.2.1.

6 VALIDACIÓN DEL MODELO CFD

Este capítulo cumple el objetivo de validar la modelación CFD bajo dos modalidades: en la sección 6.1 se analiza un problema hidráulico convencional resolviéndolo con las ecuaciones de la hidráulica clásica y mediante la modelación CFD; en la sección 6.2 se busca verificar que un modelo CFD tiene la capacidad de analizar una PEAS real por lo que se analizará la operación de una PEAS de Aguas Santiago Poniente S.A.; finalmente, en la sección 6.3 se comentan ambas validaciones y metodologías.

6.1 Validación vía Hidráulica Clásica

Se plantea un canal que transporta un caudal de 1 [m^3/s]. Este canal es rectangular de 1 [m] de ancho basal, de hormigón ($n_{Manning} \approx 0.013$), con una primera etapa de pendiente 2 [%] en los primeros 10 [m], punto en el cual existe una caída vertical de 1 [m] y los siguientes 20 [m] tienen una pendiente de 0.4 [%], terminando en un vertedero de pared delgada de 0.4 [m], todas estas características se resumen en la Figura N°6.1.

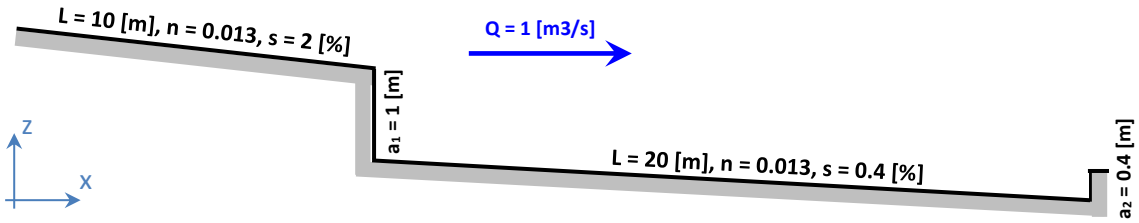

Figura N°6.1 – Características del Canal
Fuente: Elaboración propia

El caudal circulante es de 1 [m^3/s] el cual es permanente en todo el tiempo. Adicionalmente, se considera como condición de borde que la altura inicial de escurrimiento es de 0.48 [m].

6.1.1 Resolución vía Hidráulica Clásica

6.1.1.1 Cálculos generales

Primero se calcula el valor de la altura crítica y altura normal para cada tramo, de tal manera de verificar en primera instancia si el régimen de cada uno es sub o super crítico, para lo cual se calcula la altura crítica y altura normal de ambos tramos, de acuerdo a lo visto en la sección 3.5.1, y cuyos resultados se aprecian en la Tabla N°6.1

Tabla N°6.1 – Resumen de características hidráulicas en ambos Tramos

	Tramo N°1	Tramo N°2
Altura Crítica	0.467 [m]	0.467 [m]
Altura Normal	0.286 [m]	0.514 [m]
Tipo de Régimen	Supercrítico (Torrente)	Subcrítico (Río)

6.1.1.2 Cálculo desde aguas arriba

Dado que en el primer tramo el régimen es de torrente, es lógico considerar el método del paso visto en la sección 3.5.2 para determinar el eje hidráulico desde aguas arriba, considerando como condición inicial la altura de escurrimiento para x = 0 [m], de lo cual resultan los valores presentados en la Tabla N°6.2.

Tabla N°6.2 – Resultados de Eje Hidráulico en la primera etapa

x [m]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z_{FONDO} [m]	1.28	1.26	1.24	1.22	1.20	1.18	1.16	1.14	1.12	1.10	1.08
h [m]	0.48	0.41	0.39	0.37	0.36	0.36	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33
h+z [m]	1.76	1.67	1.63	1.59	1.56	1.54	1.51	1.48	1.46	1.43	1.41

6.1.1.3 Cálculo desde aguas abajo

Dado que en el segundo tramo el régimen es de río, el cálculo del eje hidráulico se determina desde aguas abajo, imponiendo la altura crítica sobre el vertedero de pared delgada como condición de entrada, de lo cual resultan los valores presentados en la Tabla N°6.3.

Tabla N°6.3 – Resultados de Eje Hidráulico en la segunda etapa

x [m]	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
z_{FONDO} [m]	0.080	0.072	0.064	0.056	0.048	0.040	0.032	0.024	0.016	0.008	0.400
h [m]	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86	0.87	0.88	0.88	0.89	0.90	0.47
h+z [m]	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	0.87

6.1.1.4 Cálculo en unión de tramos

Si bien la altura teórica de escurrimiento del río no logra sobrepasar la caída como para influenciar aguas arriba, se verifica que la momenta del torrente aguas arriba sea mayor que la momenta del río, de acuerdo a lo visto en la sección 3.5.3:

$$M_{Torrente_{x=10}} = \frac{Q^2}{g \cdot A_v} + \eta \cdot A_p = 1.194\ [m^3] \qquad \textbf{Ec. N°6.1}$$

$$M_{Río_{x=10}} = \frac{Q^2}{g \cdot A_v} + \eta \cdot A_p = 0.470\ [m^3] \qquad \textbf{Ec. N°6.2}$$

Dado que el río no logra influenciar aguas arriba, es el torrente el que influencia aguas abajo. Utilizando los ábacos vistos en la sección 3.5.4 se puede determinar tanto la altura de torrente aguas abajo de una caída (h_{T2}), como su distanciamiento de la grada (l_C), valores que se presentan en la Tabla.

Tabla N°6.4 – Resultados de Ábacos de Caída

a [m]	h_c [m]	h_{T1} [m]	K_C [m/m]	X_{T1} [m/m]	X_{TT} [m/m]	h_{T2} [m]	L_C [m/m]	l_C [m]
2.14	0.467	0.33	2.14	0.71	0.62	**0.20**	4.50	**2.10**

A partir de este punto de escurrimiento de torrente aguas abajo de la caída se determina el eje hidráulico junto con su respectivo cálculo de momenta presentado en la Tabla N°6.5, donde

adicionalmente se presentan las alturas de río calculadas en la sección 6.1.1.3 con su respectivo cálculo de la momenta, con el objeto de identificar la ubicación del resalto hidráulico intermedio.

Tabla N°6.5 – Resultados de Eje Hidráulico post-Caída

x [m]	12.10	12.20	12.30	12.40	12.50
z_{FONDO} [m]	**0.0716**	**0.0712**	**0.0708**	**0.0704**	**0.0700**
$h_{TORRENTE}$ [m]	0.203	0.214	0.226	0.238	0.250
$h_{TORRENTE}$ +z [m]	0.275	0.286	0.297	0.308	0.320
M_T [m^3]	0.523	0.498	**0.476**	0.457	0.439
h_{RIO} [m]	0.841	0.841	0.842	0.842	0.842
h_{RIO} +z [m]	0.913	0.912	0.912	0.912	0.912
M_R [m^3]	0.475	0.475	**0.475**	0.476	0.476

Con estos resultados se aprecia que en las coordenadas x = 12.30 [m] las momenta de torrente y río se igualan, punto en el cual se empieza a desarrollar el resalto hidráulico. Utilizando esas alturas de escurrimiento, de acuerdo a la sección 3.5.5, se puede calcular la longitud del resalto como:

$$l_R = 1.5\left(\frac{0.842}{0.226} - 0.80\right) \cdot 4.67 = 2.05\ [m] \qquad \textbf{Ec. N°6.3}$$

Y se verifica que $2 < \left(\frac{h_{Río}}{h_{Torrente}} = 3.72\right) < 16$ que corresponde al rango de validez de la ecuación propuesta por A. Ovalle y A. Domínguez.

Por lo tanto, luego de 2.05 [m] desde que comienza el resalto se alcanza la altura de río en la coordenada $x = 12.30 + 2.05\ [m] = 14.35\ [m]$, que de acuerdo a los cálculos del perfil eje hidráulico equivale a $h_{río(x=14.35)} = 0.85\ [m]$

6.1.1.5 Eje hidráulico consolidado

Ya teniendo todos los resultados, se tabulan para para hacerlos comparables con los resultados obtenidos mediante la modelación en OpenFOAM®, tal como se puede revisar en la Tabla N°6.6.

Tabla N°6.6 – Resultados de Eje Hidráulico mediante la Hidráulica Clásica

x [m]	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	9.99	10.01
z_{FONDO} [m]	1.28	1.26	1.24	1.22	1.20	1.18	1.16	1.14	1.12	1.10	1.08	0.08
h [m]	0.48	0.41	0.39	0.37	0.36	0.36	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33	1.33
h+z [m]	1.76	1.67	1.63	1.59	1.56	1.54	1.51	1.48	1.46	1.43	1.41	1.41
x [m]	**10.50**	**11.00**	**11.50**	**12.00**	**12.50**	**13.00**	**14.00**	**15.00**	**16.00**	**17.00**	**18.00**	**19.00**
z_{FONDO} [m]	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04
h [m]	1.06	0.79	0.53	0.26	0.29	0.44	0.74	0.84	0.85	0.86	0.86	0.87
h+z [m]	1.14	0.87	0.60	0.33	0.34	0.51	0.81	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
x [m]	**20.00**	**21.00**	**22.00**	**23.00**	**24.00**	**25.00**	**26.00**	**27.00**	**28.00**	**29.00**	**30.00**	**30.01**
z_{FONDO} [m]	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.40
h [m]	0.87	0.87	0.88	0.88	0.88	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90	0.87	0.47
h+z [m]	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	0.87	0.87

6.1.2 Resolución vía OpenFOAM®

6.1.2.1 Consideraciones previas al modelo

Gracias al análisis de sensibilidad bidimensional del capítulo 5 se consideran los siguientes supuestos para poder resolver el problema:

- Modelo de turbulencia $\kappa - \epsilon$.
- Un fluido incompresible.
- Un flujo constante de 1 [m^3/s], con caudal de entrada igual al caudal de salida y velocidad inicial en todo el dominio igual a cero.
- La condición de no deslizamiento, dando $U = (0\ 0\ 0)\ \left[\frac{m}{s}\right]$ en todos los bordes sólidos.
- La presión atmosférica sobre el nivel de agua igual a cero.

Adicionalmente se consideró un $\Delta t_c = 0.001\ [s]$, y la mínima dimensión de tamaño de celda en el eje x es $\Delta s_x = 0.1\ [m]$, por lo que si se considera un N° de Courant máximo de 1.0, la velocidad máxima admisible es de 100 [m/s]. Dado que este valor de velocidad excede a los valores estándares de velocidad en canales abiertos, es que se sabe que el valor a utilizar de Δt_c dará convergencia al modelo.

6.1.2.2 Resultados de la modelación

En la Figura N°6.2 se aprecia el resultado de la modelación de OpenFOAM®, ya postprocesada en ParaView®, luego de 35 [s] de modelación donde alcanza el régimen permanente. Se aprecia que sobre el sector del resalto hidráulico hay "espuma" o agua en un porcentaje muy bajo el cual simplemente recircula sobre dicho resalto.

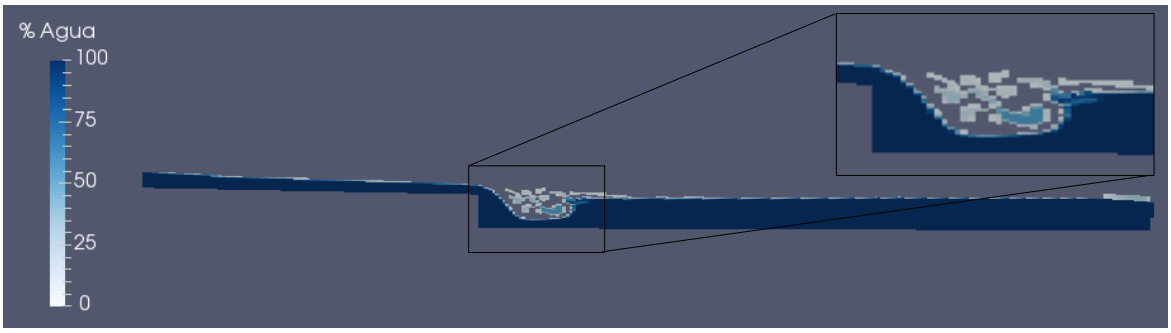

Figura N°6.2 – Eje Hidráulico en ParaView®
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, para poder analizar esta información y hacerla comparable con los resultados obtenidos mediante los cálculos de la Hidráulica Clásica, es que se hacer relevante obtener la altura de escurrimiento a lo largo del canal, tal como se puede revisar en la Tabla N°6.7.

Tabla N°6.7 – Resultados de Eje Hidráulico mediante OpenFOAM®

x [m]	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	9.99	10.01
z_{FONDO} [m]	1.28	1.26	1.24	1.22	1.20	1.18	1.16	1.14	1.12	1.10	1.08	0.08
h [m]	0.48	0.45	0.41	0.38	0.35	0.31	0.31	0.31	0.28	0.28	0.24	1.23
h+z [m]	1.76	1.71	1.65	1.60	1.55	1.49	1.47	1.45	1.40	1.38	1.32	1.31
x [m]	**10.50**	**11.00**	**11.50**	**12.00**	**12.50**	**13.00**	**14.00**	**15.00**	**16.00**	**17.00**	**18.00**	**19.00**
z_{FONDO} [m]	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04
h [m]	1.03	0.48	0.24	0.23	0.27	0.68	0.88	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90
h+z [m]	1.11	0.56	0.31	0.31	0.34	0.75	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94
x [m]	**20.00**	**21.00**	**22.00**	**23.00**	**24.00**	**25.00**	**26.00**	**27.00**	**28.00**	**29.00**	**30.00**	**30.01**
z_{FONDO} [m]	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.40
h [m]	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.93	0.92	0.93	0.94	0.92	0.83	0.43
h+z [m]	0.95	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.95	0.92	0.83	0.83

6.1.3 Análisis de resultados

6.1.3.1 Comparación de resultados

En la Figura N°6.3 presentan los ejes hidráulicos calculados por la Hidráulica Clásica (H.C.) y OpenFOAM, en este gráfico se aprecia que hay similitud entre ambos perfiles, siendo los puntos más críticos en falla la vecindad aguas arriba y aguas abajo de la caída. En la Tabla N°6.8 se presentan los errores relativos absolutos entre ambas metodologías.

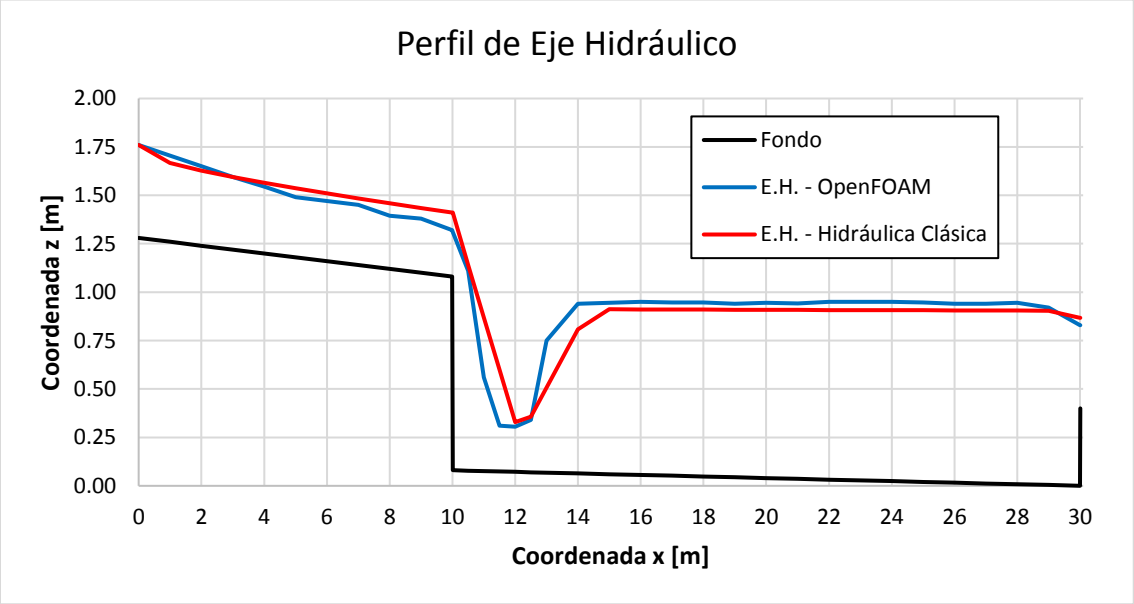

Figura N°6.3 – Eje Hidráulico calculado con ambas metodologías
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°6.8 – Error relativo absoluto entre resultados vía Hidráulica Clásica vs OpenFOAM®

x [m]	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	9.99	10.01
Error [%]	0.0 %	9.3 %	5.7 %	0.1 %	5.3 %	13 %	11 %	9.8 %	19 %	16 %	27 %	7.6 %
x [m]	**10.50**	**11.00**	**11.50**	**12.00**	**12.50**	**13.00**	**14.00**	**15.00**	**16.00**	**17.00**	**18.00**	**19.00**
Error [%]	2.8 %	39 %	55 %	9.2 %	5.6 %	56 %	18 %	4.0 %	4.6 %	4.2 %	4.2 %	3.6 %
x [m]	**20.00**	**21.00**	**22.00**	**23.00**	**24.00**	**25.00**	**26.00**	**27.00**	**28.00**	**29.00**	**30.00**	**30.01**
Error [%]	4.2 %	3.9 %	4.8 %	4.9 %	4.9 %	4.5 %	3.9 %	3.9 %	4.5 %	1.7 %	4.3 %	7.9 %

Efectivamente en las cercanías de la caída y resalto (5 ≤ x [m] ≤ 14) los errores relativos aumentan, mientras que en las etapas de desarrollo de flujo donde tratan de acercarse a la altura normal de río o torrente los errores son menores y más estables.

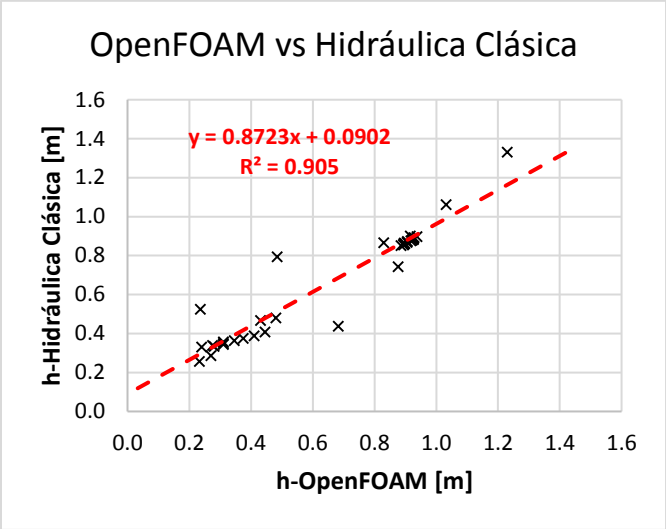

Figura N°6.4 – Relación entre ambas alturas
Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en la Figura N°6.4 se evaluó la relación entre las alturas calculadas con ambas metodologías y por el valor de R^2 se aprecia que éstas se correlacionan bien, y su pendiente está muy cerca de la unidad, lo que indica que si bien hay un factor de error, éste no es significativo para indicar que el resultado completo es erróneo. Además, se verifica que los puntos que se escapan de la correlación son aquellos donde hay singularidades como la caída y el resalto.

6.2 Validación vía comparación con PEAS real

Para el desarrollo de esta etapa, Aguas Santiago Poniente S.A. proporcionó información geométrica y operacional de su Planta Elevadora de Aguas Servidas "Los Alerces", ubicada en el Parque Logístico Empresarial ENEA, en la comuna de Pudahuel, Región Metropolitana la cual se categoriza como una PEAS pequeña según la Tabla N°2.1. Adicionalmente se elabora un modelo CFD y se comparan sus resultados con la información entregada por Aguas Santiago Poniente S.A.

6.2.1 Información de diseño

El diseño de la PEAS consta de cuatro partes: cámara de rejas, sentina de aspiración, cámara de bombas y sistema anti-golpe de ariete. Sin embargo, para el desarrollo de esta etapa sólo basta con la cámara de rejas, la sentina de aspiración y las tuberías de aspiración de la cámara de bombas, por lo que el diseño geométrico queda representado en la Figura N°6.5.

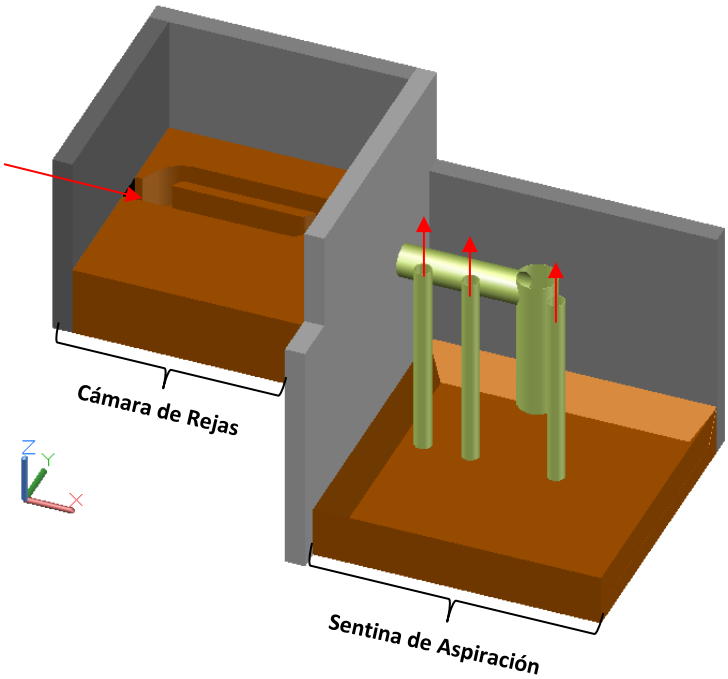

Figura N°6.5 – Vista isométrica de PEAS Los Alerces
Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, a partir de la memoria de cálculo se informa que el sistema de bombas instalado es 2+1, que significa que dos bombas están en servicio mientras una queda de reserva para emergencias. Las bombas operan según el nivel de agua en la sentina:

- Nivel de partida para Bomba N°1 es de 1.30 [m].
- Nivel de partida para Bomba N°2 es de 1.70 [m].
- Nivel de parada para sistema de bombeo es de 0.80 [m].

De acuerdo a la información de diseño, en base a las curvas de carga y las curvas características las bombas Marca Gorman Rupp Modelo T6A60-B, los caudales de elevación son:

- Caudal para sistema con una única bomba: 75 [L/s].
- Caudal para sistema con dos bombas simultáneas: 106 [L/s] (53 [L/s] c/u).

6.2.2 Información Operacional

A partir del 17 de Marzo de 2018 Aguas Santiago Poniente S.A. cuenta con información periódica y en línea respecto al nivel de la sentina a través del sistema on-line de WeTech, con lo cual se puede verificar el comportamiento de la PEAS, tal como se aprecia en la Figura N°6.6 donde se presenta como ejemplo el comportamiento de un día completo.

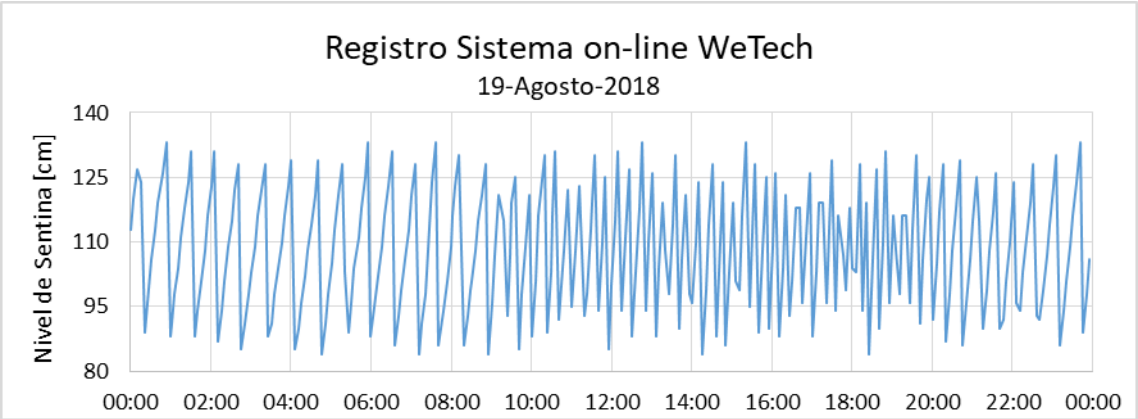

Figura N°6.6 – Reporte histórico de Nivel de Sentina en PEAS Los Alerces
Fuente: Sistema on-line WeTech de Aguas Santiago Poniente S.A.

Sin embargo, durante el año 2018 no hubo registros que indiquen que haya entrado en funcionamiento la segunda bomba de la PEAS (nivel de sentina mayor a 1.70 [m]), presumiblemente por que no hubo una ampliación masiva de nuevos clientes en el parque y por la baja tasa de lluvias en el periodo señalado, por lo que, para los efectos de este trabajo se verificará un único ciclo de funcionamiento donde únicamente entra una bomba en funcionamiento, tal como se presenta en la Figura N°6.7.

Fecha	Nivel Sentina [cm]
19/06/18 09:19:16	93
19/06/18 09:24:17	107
19/06/18 09:29:17	119
19/06/18 09:31:01	125
19/06/18 09:36:01	85
19/06/18 09:41:02	98

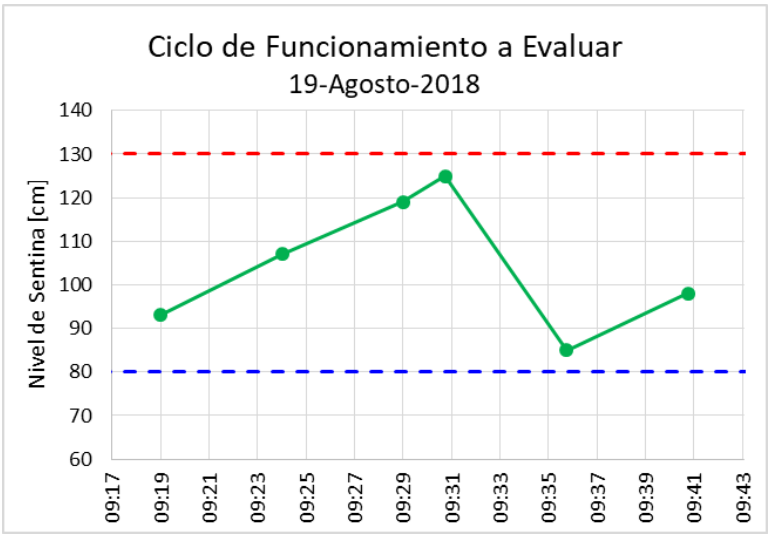

Figura N°6.7 – Ciclo de funcionamiento a evaluar por OpenFOAM®
Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que el sistema de obtención de datos de WeTech proporciona una continuidad de datos bastante segmentada ya que no permite visualizar el periodo exacto en el cual funciona la bomba de la PEAS.

6.2.3 Resultados de modelación

Para evaluar el nivel de la sentina de la modelación se utilizó el software ParaView® y se procedió a analizar la altura en el sector central de la sentina de aspiración de la PEAS. Dado que el

mallado central tiene una escala de 10 [cm], para calcular la altura se aprovechó el parámetro α, que define el porcentaje de agua al interior de una celda, y se le asignó un color en tramos de 0.5 [cm] por lo que en la Figura N°6.8 se puede observar que el nivel de la sentina se calcula como 75 [cm] por celdas 100% llenas y 7.5 [cm] por una celda de 10 [cm] con 75% de agua, resultando en un nivel de sentina equivalente a 82.5 [cm].

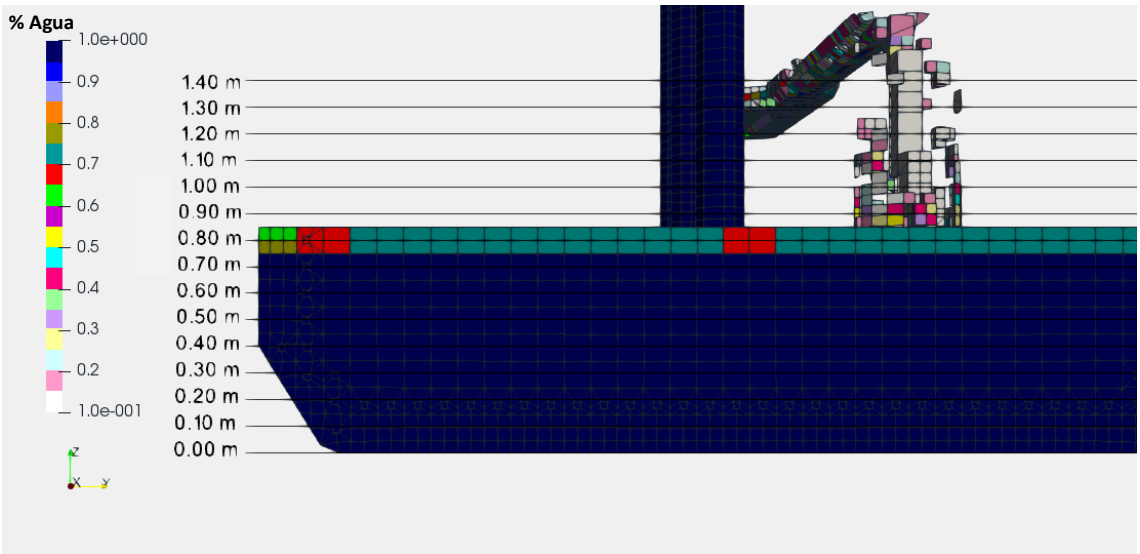

Figura N°6.8 – Corte de la sentina de aspiración para calcular el nivel
Fuente: Elaboración propia

En la Figura N°6.9 se presentan los niveles de sentina para los tiempos registrados por el sistema on-line vistos en la Figura N°6.7.

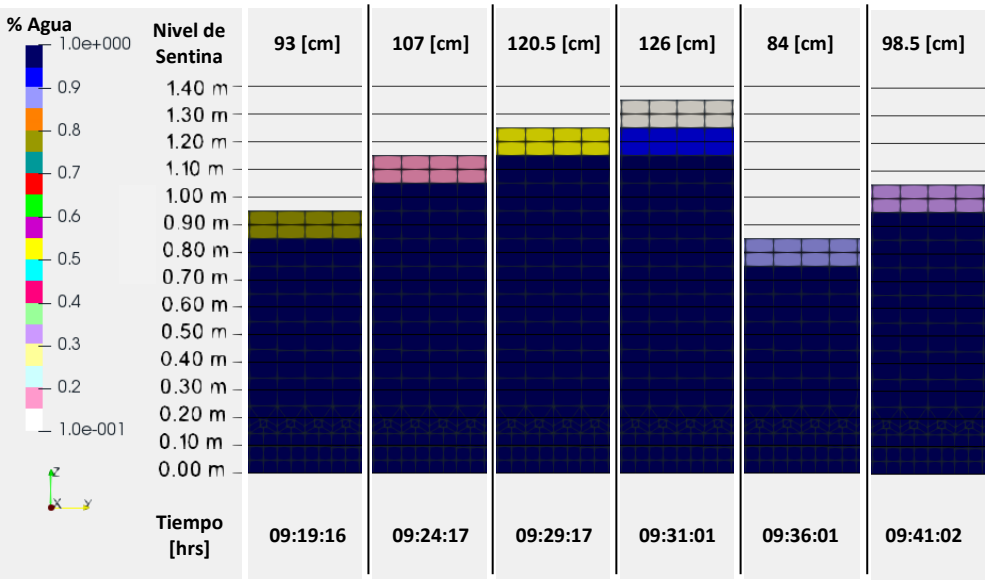

Figura N°6.9 – Nivel de Sentina según modelo CFD
Fuente: Elaboración propia

6.2.4 Análisis de resultados

En función de los resultados obtenidos por la modelación CFD se puede establecer que OpenFOAM® logra representar correctamente los niveles de sentina, como se aprecia en la Figura N°6.10.

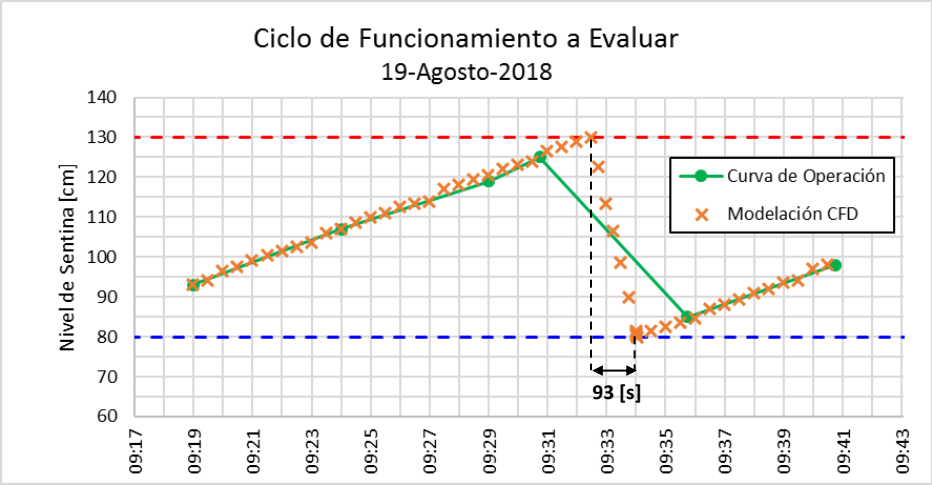

Figura N°6.10 – Comparación entre registros reales y modelación CFD
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, la modelación CFD adicionalmente permite estimar el tiempo efectivo de vaciado de la PEAS en base al tiempo de partida y parada de la bomba, lo cual es información útil para una sanitaria, ya que permite estimar la energía consumida por la bomba y hacer un análisis de eficiencia energética o incluso cambiar la configuración de partida/parada de bombas para mejorar el funcionamiento.

6.3 Conclusiones y comentarios

Se concluye que OpenFOAM® es una herramienta que permite evaluar fenómenos hidráulicos multifase de manera correcta, lo cual se verifica al contrastar modelos CFD con dos tipos de enfoque:

- Hidráulica Clásica: Al comparar un modelo CFD y los cálculos obtenidos mediante la hidráulica clásica se verifica que el error relativo absoluto promedio es de un 10.7 [%], y la correlación entre resultados vista en la Figura N°6.4 es un buen indicador de la similitud entre metodologías. Es importante señalar que hubo puntos en los cuales los resultados diferían mucho, los cuales en la Figura N°6.4 corresponden a aquellos puntos que se escapan de la línea de tendencia, y en el eje hidráulico corresponden a aquellos puntos en la vecindad de la caída. Se estima que este error viene de la metodología de la Hidráulica Clásica y no de OpenFOAM®, ya que dentro de los supuestos base de la Hidráulica Clásica está la presión hidrostática, la cual no permite la curvatura de las líneas de corriente y es en estos puntos donde efectivamente existen grandes curvaturas de los filetes, lo que induce a un error.

- Comparación con PEAS Real: Al contrastar la operación real de una PEAS con la modelación CFD se puede verificar que no sólo permite representar la situación, sino que también permite obtener mayor información (tiempo de operación de bomba) siendo consistente con los registros periódicos captados por Aguas Santiago Poniente S.A.

Adicionalmente, se destaca el trabajo de memoria de título de Roy Segura [17], Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María, la cual consiste en la comparación de resultados teóricos, experimentales y vía CFD para evaluar cuál metodología es más eficiente al analizar el escurrimiento en un canal abierto, lo que bajo otro enfoque se traduce en una validación de un modelo CFD con la Hidráulica Clásica y con un modelo experimental.

Finalmente, se valida la modelación CFD como una metodología adecuada de cálculo para analizar una obra hidráulica como una Planta Elevadora de Aguas Servidas.

7 MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DEL POZO DE ASPIRACIÓN

En este capítulo se presentan, de una manera simple, las consideraciones en la modelación numérica CFD del pozo. Para esto, en la sección 7.1 se presentan algunas consideraciones previas a la modelación; en la sección 7.2 se señalan las propiedades físicas de los fluidos considerados en el modelo; en la sección 7.3 se presenta la geometría y sus condiciones de borde asociadas, en función de los aspectos anteriormente señalados en este trabajo; finalmente en la sección 7.4 se hace mención al proceso de mallado realizado con *snappyHexMeshDict*. Si bien en este capítulo se explican los aspectos más generales de la modelación, en el Anexo se pueden revisar tanto el detalle de los comandos utilizados, como los archivos y diccionarios más importantes para efectuar la modelación.

7.1 Previo a la modelación

7.1.1 Equipo computacional utilizado

Para dar contexto, OpenFOAM® permite el trabajo simultáneo con multiprocesadores con una aplicación llamada OpenMPI®, por lo que en grandes empresas se utilizan clústers de sobre 40 procesadores de última generación trabajando en conjunto, dividiendo la cantidad de cómputos en el número de procesadores. Bajo este esquema, CFD Support® [14] presentó cuatro configuraciones de hardware en función de su costo:

- PC N°1: 1 CPU Intel Xeon E5-16XX, 8 núcleos, 64 GB de memoria RAM, Tarjeta de video dedicada, 2 discos duros. Costo (USD): $3,100.
- PC N°2: 2 CPU Intel Xeon E5-26XX, 24 núcleos, 128 GB de memoria RAM, Tarjeta de video dedicada, 2 discos duros. Costo (USD): $7,100.
- PC N°3: 2x2 CPU Intel Xeon E5-26XX, 48 núcleos, 256 GB de memoria RAM, Tarjeta de video dedicada, 2x2 discos duros. Costo (USD): $14,100.
- PC N°4: 4x2 CPU Intel Xeon E5-26XX, 96 núcleos, 512 GB de memoria RAM, Tarjeta de video dedicada, 4x2 discos duros y bus de comunicaciones InfiniBand. Costo (USD): $37,000.

Para esta memoria se utilizó una laptop Sony® VAIO modelo VPCEG25FL, que consta de:

- Procesador de 2da generación Intel® Core i5-2430M de 2.40 Ghz.
- Memoria RAM de 4 GB DD3 SDRAM.
- Tarjeta de video dedicada NVIDIA® GeForce® 410M GPU, 512 MB.
- Disco duro HDD 500 GB (5400 rpm)

Bajo las recomendaciones de CFD Support®, este computador no es apropiado para la modelación CFD al trabajar con hasta cuatro sub-procesadores (2 reales y 2 virtuales), por lo que el tiempo de cómputo será elevado. Como consideración adicional, el equipo ya tiene 5 años de uso exhaustivo, lo que se traduce en problemas de ventilación y sobrecalentamiento del procesador, junto con un desgaste del disco duro y la velocidad de lectura/escritura de datos.

7.1.2 Esquema de archivos

OpenFOAM® funciona con esquema rígido de archivos distribuidos en carpetas específicas, de tal manera que cuando se ejecute el programa deseado, éste sepa dónde está cada elemento necesario para la modelación, esto significa que no se pueden cambiar ni nombres, ni la ubicación de los archivos (salvo por el nombre de la carpeta contenedora). Primero es necesario tener la carpeta con el caso a analizar, en este trabajo se denominó *OpenPEAS*, y dentro de esta carpeta existen tres carpetas: *system*, *constant*, y *time directory*. Se puede resumir todo el esquema de archivos en la Figura N°7.1 y su respectivo detalle se puede revisar en el anexo.

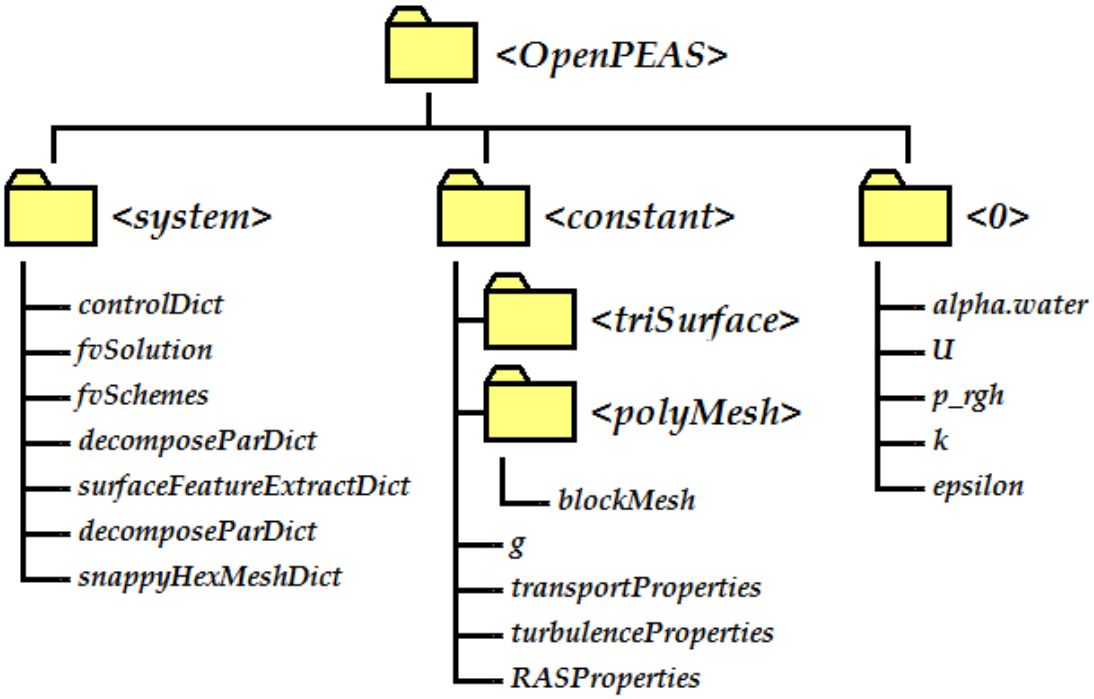

Figura N°7.1 – Esquema de archivos requerido por OpenFOAM®

7.1.2.1 Tiempo de cómputo

Los principales factores [15] que afectan al tiempo de cómputo en un modelo CFD son:

- Tipo de computador y su hardware.
- Tamaño del mallado.
- Intervalo de tiempo (Δt_c) entre iteración e iteración.
- El tiempo total deseado de modelación.

7.2 Fluido considerado en la modelación

Dado que el flujo en el pozo ocurre como la interacción entre aguas servidas y aire, es que en el modelo se incluyen ambas fases. Para los efectos de este trabajo, se utilizarán las propiedades del agua y aire.

- La densidad de las aguas servidas corresponde a $\rho_{Agua} = 1000\ [Kg/m^3]$, mientras que su viscosidad cinemática es $\nu_{Agua} = 1\mathrm{E} - 6\ [m^2/s]$.
- La densidad del aire corresponde a $\rho_{Aire} = 1\ [Kg/m^3]$, mientras que su viscosidad cinemática es $\nu_{Aire} = 1.48\mathrm{E} - 5\ [m^2/s]$.
- El coeficiente de tensión superficial considerada es equivalente a $\sigma = 0.07[Kg/s^2]$.

7.3 Incorporación de geometría en la modelación

7.3.1 Simplificaciones en la geometría

A partir de los planos suministrados por ESVAL S.A., se verifica que existen elementos adicionales en la planta, tales como rejillas, compuertas, la forma de las bombas, y bridas en tuberías. Estos elementos no se consideraron en el modelo de la geometría a utilizar en OpenFOAM®, ya que su complejidad de modelación en dibujo es elevada y no aportará mayor información al sistema y a la problemática a evaluar en esta memoria.

Como consideración adicional, no se consideró la geometría completa de la planta elevadora, sino que se representó sólo la geometría del pozo de aspiración de la planta, tal como se apreció en la Figura N°4.2.

7.3.2 Modelación tridimensional

Como se señaló anteriormente, OpenFOAM® no cuenta con una GUI que permita el ingreso ordenado de la geometría y otros parámetros, sino que consiste en un programa que lee diversos archivos con un formato determinado de una manera poco amigable para un usuario nuevo. Es por esto que en esta memoria se utiliza un programa CAD que permite el dibujo tridimensional de la planta y su posterior exportación a formato *Stereo Lithography* (STL), el cual sí puede ser interpretado por OpenFOAM® para importar la geometría.

Para poder generar el modelo tridimensional de la planta se importaron los planos, escaneados como imágenes y suministrados por ESVAL S.A., y se dispusieron en la escala y posición correspondientes, según si eran vistas en planta o corte, tal como se aprecia en la Figura N°7.2. Luego, se dibuja en planta el contorno de la planta y, con el plano del corte, se agregan las cotas necesarias.

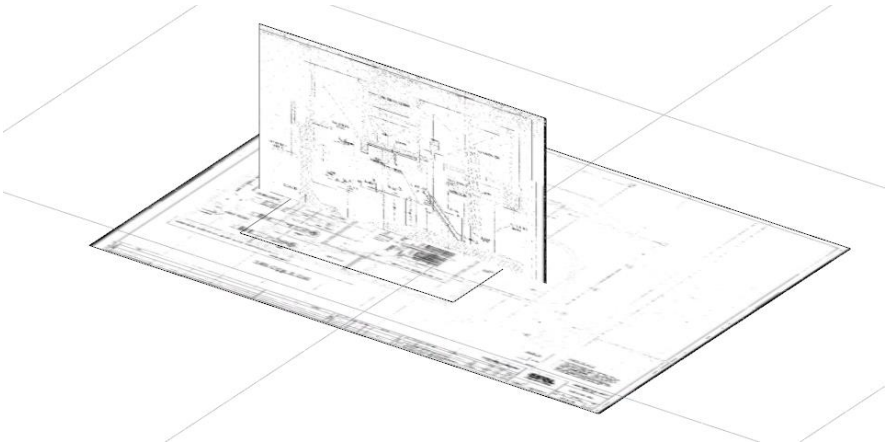

Figura N°7.2 – Planos de ESVAL S.A. intersectados en AutoCAD®

En la Figura N°7.3 se aprecian los contornos de los elementos sólidos, con su respectiva cota; por ejemplo, se aprecian como circunferencias los inicios y remates de las tuberías y codos que definen la captación de la PEAS.

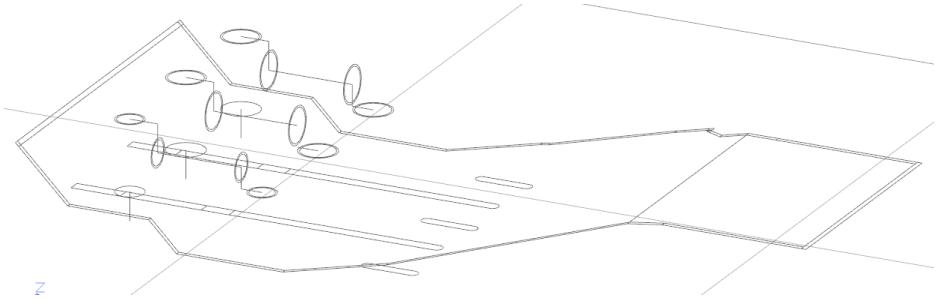

Figura N°7.3 – Contornos de Elementos 3D con elevaciones de PEAS en AutoCAD®

En la Figura N°7.4 corresponde a una representación tridimensional de la PEAS construida a partir de los contornos vistos en la Figura N°7.3, y generados en el software AutoCAD®.

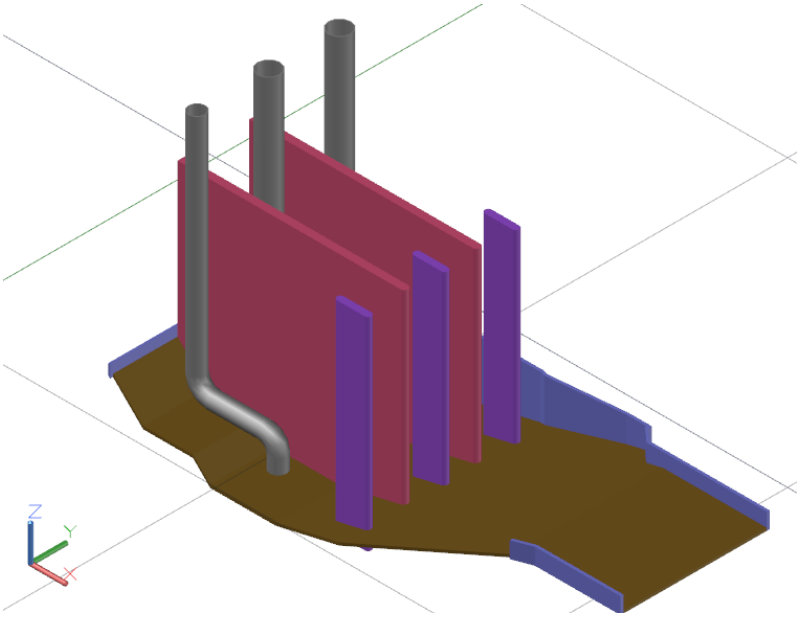

Figura N°7.4 – Representación 3D en AutoCAD® de la PEAS

Dado que para poder importar a STL se necesitan sólidos y no líneas de contorno, se da un espesor a las losas y muros externos y se utiliza la función *extrude* para transformar a sólidos la mayor parte de los elementos. Los espesores utilizados en losas, muros externos y techo son irrelevantes a la hora de tener el modelo final en formato OpenFOAM®, ya que el mallado es en todo el dominio interno de la planta.

7.3.2.1 Importación de geometría y mallado

SnappyHexMesh es una aplicación de OpenFOAM® que tiene doble función: la primera es convertir la geometría de formato STL a formato OpenFOAM®; y la segunda es generar un mallado en la geometría, de tal manera de utilizar rápidamente la geometría convertida. Conceptualmente consiste en importar la geometría en formato STL e intersectarla con un mallado grueso tridimensional, así como se ve en la Figura N°7.5.

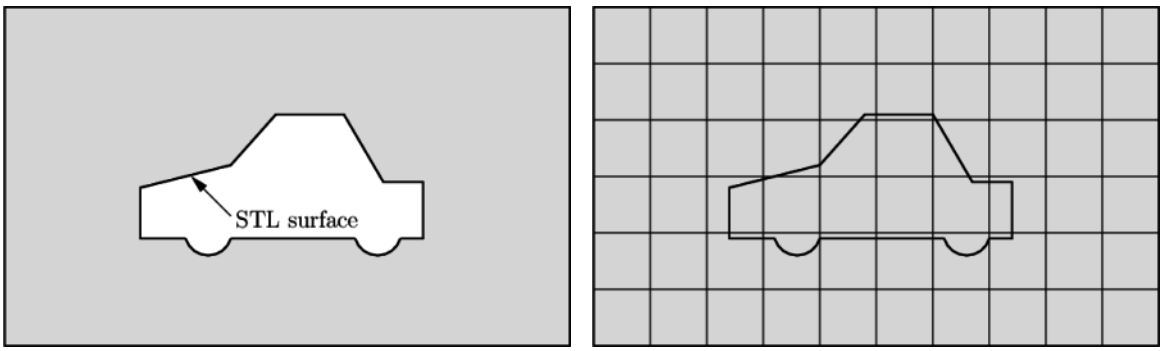

Figura N°7.5 – Importación STL e intersección con mallado grueso.
Fuente: Adaptación de Referencia [7]

Luego se refina el mallado para sectores con geometría compleja, y finalmente se descarta el interior o exterior de la geometría. Para el caso ejemplo del automóvil se descarta el interior ya que no es de interés ver el flujo de aire dentro del auto, mientras que para la PEAS se descarta el exterior, esto se aprecia en la Figura N°7.6.

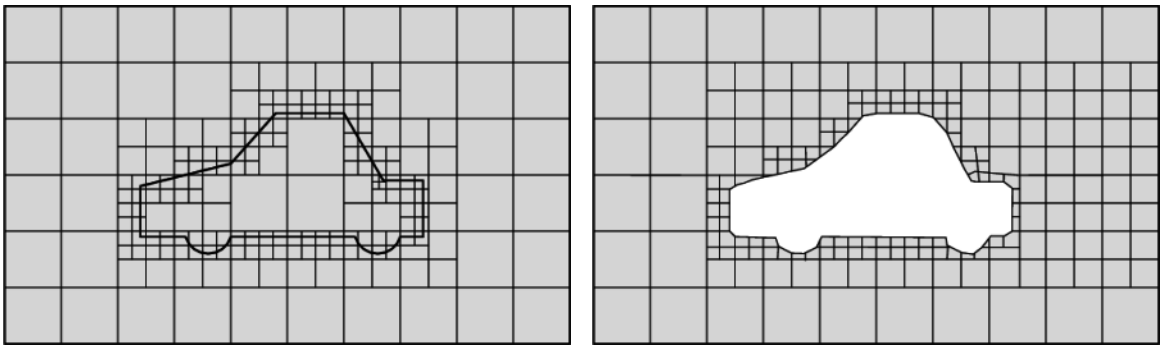

Figura N°7.6 – Refinación y extracción de mallado.
Fuente: Adaptación de Referencia [7]

La geometría que posee el pozo de aspiración de la PEAS coincide casi en su totalidad con la de la Figura N°4.2, con la salvedad que se hicieron simplificaciones geométricas que se señalaron en la sección 7.3.1. El nivel de agua dentro del pozo de aspiración coincide con un nivel medio entre los niveles máximo y mínimo de operación.

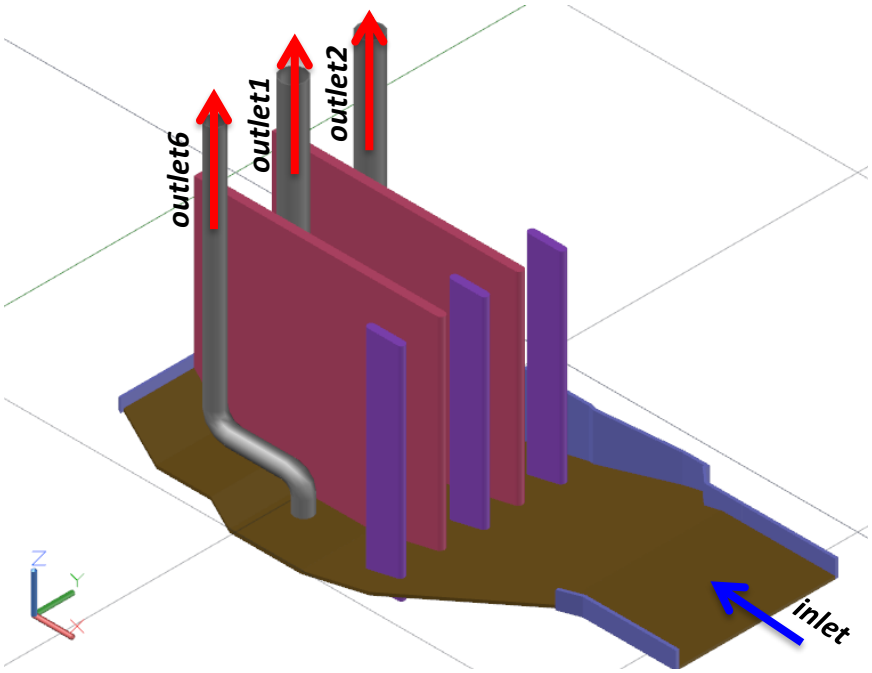

Figura N°7.7 – Representación 3D en AutoCAD® de la PEAS

A continuación, se describen tanto los elementos de borde, como sus condiciones de borde iniciales.

7.3.3 Elementos de borde

En la Figura N°7.7 se aprecian algunos de los elementos de borde asociados al flujo de agua, y en la Figura N°7.4 se aprecian los elementos de borde sólidos, a continuación se describen cada uno.

- **geom**: Elementos de borde que corresponden a los elementos geométricos sólidos: losa (*los*), muro externo (*mext*), muros separadores (*mint1*), muros internos adicionales (mint2) y tuberías (*tub*); estos elementos se pueden ver en conjunto en la Figura N°7.4.
- **atmosfera (*atm*)**: Elemento de borde que se encuentra en el techo del pozo de aspiración y se caracteriza por permitir el flujo libre de agua y aire hacia afuera del pozo.
- **Inlet (*inl*)**: Elemento de borde que da el flujo de agua a una velocidad constante, asociada al caudal de salida de la PEAS.
- **outlet1 (*out1*), outlet2 (*out2*) y outlet6 (*out6*)**: Elementos de borde que están ubicados en forma de tapón en cada tubería.

7.4 Mallado de la modelación

Para la modelación se tuvo que revisar la configuración del diccionario *snappyHexMeshDict* para poder generar mallados en función de la geometría generada en CAD. Este mallado consiste en hexaedros irregulares que se ajustan a la superficie, y cada uno de estos hexaedros se puede refinar en función de la cercanía con la superficie sólida. Para lograr una mejor modelación de los fenómenos hidráulicos, se recomienda utilizar un tamaño de celda en la malla muy pequeño (del

orden de 10^{-3} [m] o menor); sin embargo, usar un tamaño de malla tan pequeño causa que el tiempo de cómputo sea demasiado elevado. Bajo este concepto se presentan dos mallados:

- Un mallado grueso regular con ancho de celda de 20 [cm] no es capaz de representar de manera fiel la geometría importada, ya que como se ve en la Figura N°7.8, se genera una singularidad en donde van los muros intermedios ya que no logra detectar bien los bordes sólidos, y debido a estas singularidades no esperadas no se puede ejecutar la modelación, (el número de Courant se dispara). Para subsanar esta situación y utilizar igualmente un mallado grueso, se propone un mallado grueso regular (ancho de celda igual a 20 [cm]) combinado con un mallado fino (ancho de celda igual a 10 [cm]) ubicado en todos los bordes sólidos y con un ancho de 20 [cm], tal como se aprecia en la Figura N°7.9.

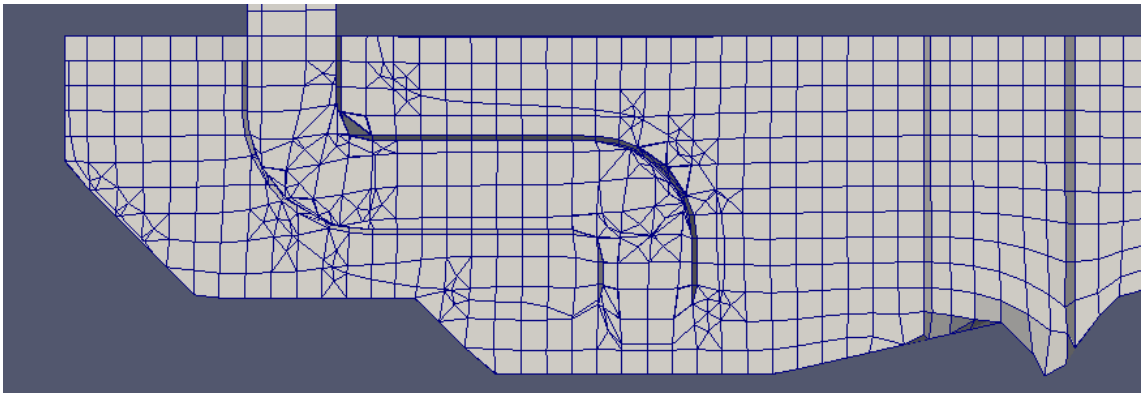

Figura N°7.8 – Acercamiento de mallado grueso regular en zona de tuberías

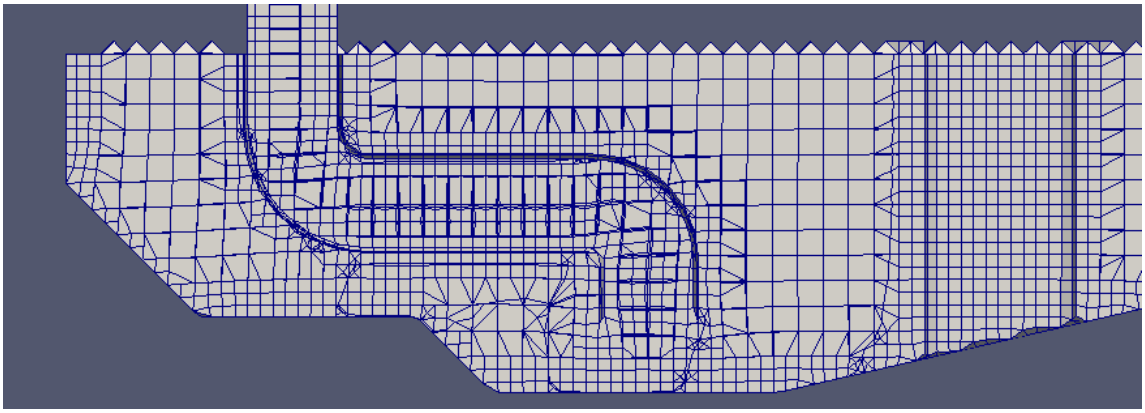

Figura N°7.9 – Acercamiento de mallado grueso irregular en zona de tuberías

- Además, se propone un mallado fino regular que tiene un tamaño de celda promedio de 10 [cm] parejo para todo el dominio, tal como se aprecia en la Figura N°7.10.

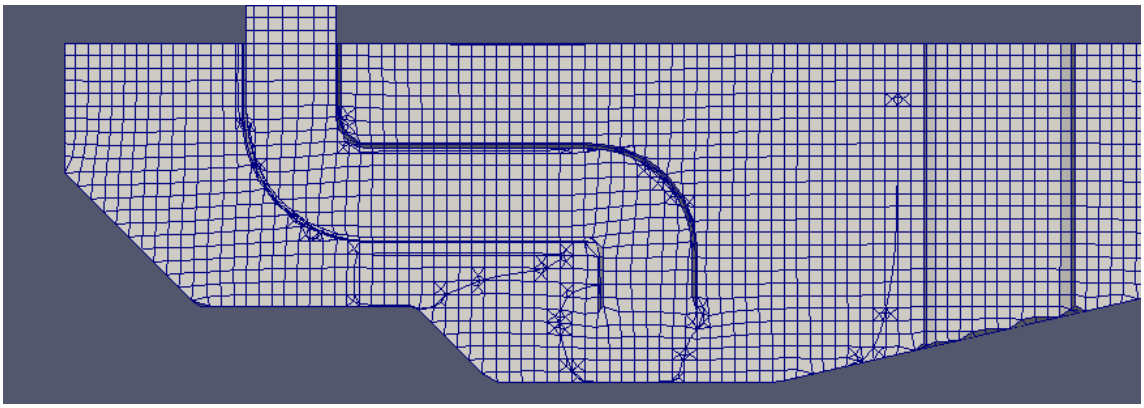

Figura N°7.10 – Acercamiento de mallado fino regular en zona de tuberías

7.5 Condiciones de borde

Para poder poner las condiciones de borde, se remitió a las recomendaciones planteadas por Rusche [16], y las utilizadas por Roy Segura [17], que se resumen en la Tabla N°7.1:

Tabla N°7.1 – Recomendaciones de Condiciones de Borde para cada Elemento de Borde

Variable	Muros	Inlet	Outlet
Velocidad (U)	*Fixed Value*	*Fixed Value*	*Fixed Value*
Presión (p_rgh)	*Fixed Flux Pressure*	*Fixed Flux Pressure*	*Fixed Value*
Cantidad de agua (alpha.water)	*Zero Gradient*	*Fixed Value*	*Zero Gradient*
Kappa κ (k)	*Fixed Value*	*Fixed Value*	*Zero Gradient*
Epsilon ϵ $(epsilon)$	*Fixed Value*	*Fixed Value*	*Zero Gradient*

En la Tabla N°7.2 se presenta un resumen de las condiciones de borde efectivamente utilizadas en cada elemento de borde.

Tabla N°7.2 - Condiciones de Borde utilizadas en cada Elemento de Borde

Elementos de Borde	Velocidad (U)	Presión (p_rgh)	Cantidad de Agua (alpha.water)	Kappa (k)	Epsilon (epsilon)
geom	*fixedValue*	*fixedFluxPressure*	*zeroGradient*	*kqRWallFunction*	*epsilonWallFunction*
inlet	*variableHeightFlowRate_InletVelocity*	*zeroGradient*	*variableHeightFlowRate*	*kqRWallFunction*	*epsilonWallFunction*
atmosfera	*pressureInletOutlet_Velocity*	*totalPressure*	*zeroGradient*	*kqRWallFunction*	*epsilonWallFunction*
outlet1	*flowRateInletVelocity*	*zeroGradient*	*fixedValue*	*kqRWallFunction*	*epsilonWallFunction*
outlet2	*flowRateInletVelocity*	*zeroGradient*	*fixedValue*	*kqRWallFunction*	*epsilonWallFunction*
outlet6	*fixedValue*	*zeroGradient*	*zeroGradient*	*kqRWallFunction*	*epsilonWallFunction*

Para la elaboración de estas condiciones de borde se utilizaron las observaciones analizadas en el análisis de sensibilidad bidimensional visto en el capítulo 5. En particular, se hizo hincapié en el uso de un modelo de turbulencia ($\kappa - \epsilon$) y reforzar el uso de la condición de no deslizamiento.

8 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se detalla tanto la obtención de resultados como el análisis de los éstos. En la sección 8.1 se señala cómo se trabajó el post-proceso para obtener los resultados presentados en la sección 11.4 del Anexo y cómo se desglosan los resultados para su posterior análisis; en la sección 8.2 se comparan resultados bajo distintos escenarios; y en la sección 8.3 se analizan parámetros sobre la modelación.

8.1 Obtención de resultados

8.1.1 Escenarios de resultados

Para los efectos de esta memoria se ejecutaron muchas modelaciones, cada una con las mismas condiciones de borde, pero con cada uno con alguna diferencia de tal manera de poder comparar y analizar el funcionamiento de la PEAS en distintas circunstancias:

- Mallado grueso:
  - Operación de bombas 1 y 2.
    - Caso con muros separadores e intermedios.
    - Caso con sólo muros separadores.
    - Caso sin muros separadores ni intermedios.
- Mallado fino:
  - Operación de bombas 1 y 2.
    - Caso con muros separadores e intermedios.
    - Caso con sólo muros separadores.
    - Caso sin muros separadores ni intermedios.
  - Operación de bombas 1 y 6.
    - Caso con muros separadores e intermedios.
  - Operación de bombas 2 y 6.
    - Caso con muros separadores e intermedios.

Con lo cual se obtienen los siguientes escenarios de análisis:

- ***Análisis según mallado***: Se analiza cómo afecta a los resultados la utilización de un mallado más grueso o más fino, sus beneficios y sus falencias.
- ***Análisis según conjunto de bombas utilizadas***: Se evalúa el funcionamiento de la PEAS según la configuración de bombas en servicio, las cuales tienen distintas ubicaciones y caudales de bombeo.
- ***Análisis según configuración geométrica interna de la PEAS***: Utilizando la peor configuración de bombas, se evalúa el funcionamiento de la PEAS en base a tres configuraciones de muros (situación actual con muros separadores y muros intermedios frente a las bombas, caso sólo con muros separadores entre bombas, y caso sin muro alguno).

8.1.2 Características de resultados

Para poder dar contexto a los resultados, en la Figura N°8.1 se aprecian los cortes realizados al modelo para visualizar distintos puntos de interés, y en la Figura N°8.2 una representación de los cortes en una vista isométrica en ParaView®.

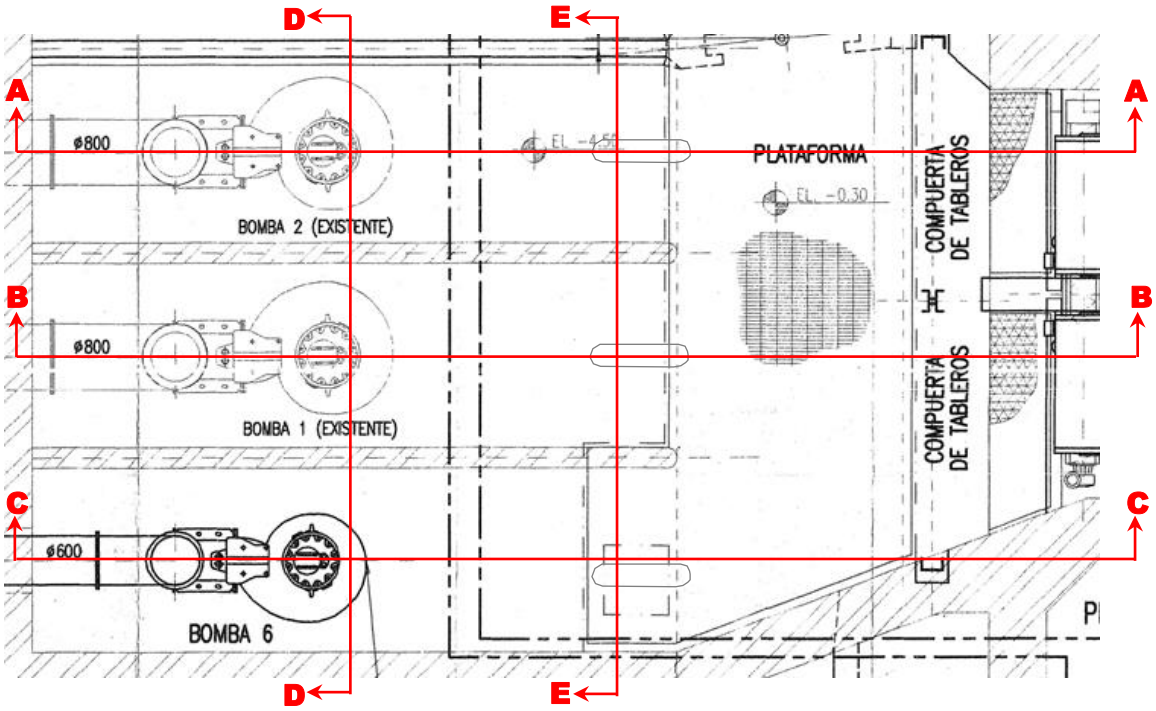

Figura N°8.1 – Vista en planta de los cortes realizados en el pozo de aspiración

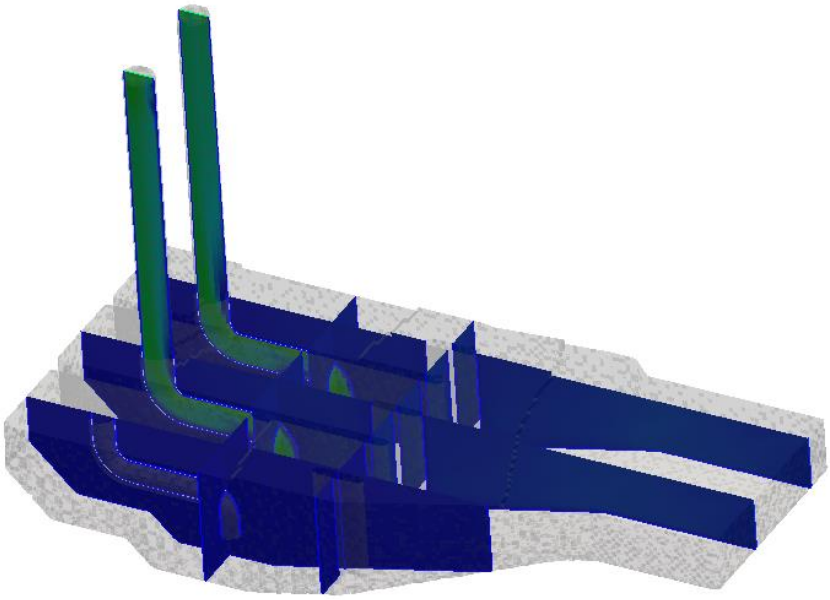

Figura N°8.2 – Vista isométrica de los cortes realizados en el pozo de aspiración

Además, para cada uno de estos cortes, se presentan resultados de:

- Magnitud de velocidad total $\|\vec{u} + \vec{v} + \vec{w}\|$ para el tiempo final. Este valor presenta dos escalas para visualizar efectos a pequeña y mediana escala.
- Magnitud de vorticidad total $\|\nabla \times \vec{u} + \nabla \times \vec{v} + \nabla \times \vec{w}\|$ para el tiempo final. Este valor presenta dos escalas para visualizar efectos a pequeña y mediana escala.
- Presencia de aire α (Sólo corte A-A), sólo con el fin de presentar comparación entre estado inicial y final para evaluar si hay aumento en el nivel de agua.

Sin embargo, hubo variables que no presentaron resultados a destacar:

- Presencia de aire α en los demás cortes (B-B, C-C, D-D, E-E), dado que en ningún caso se detectó el ingreso de aire en forma de burbuja que por la dimensión de una burbuja, no se puede identificar en el mallado.
- Presión p, ya que no hay presencia de subpresiones que generen alteraciones en el funcionamiento de las bombas, o que puedan inducir a cavitación.

8.1.3 Post-proceso

Para trabajar los resultados se ejecuta en la terminal el comando `paraView` para ejecutar al programa de post-proceso del mismo nombre. En la sección 11.3.3 del Anexo se presentan las distintas aplicaciones de ParaView® utilizadas en el post-proceso de obtención de resultados.

Para simplificar el trabajo y no tener que repetir el mismo proceso de ejecutar las diversas aplicaciones para cada caso de análisis, ParaView® permite guardar el esquema de trabajo (*Save State*), con lo cual todo el filtrado de datos, cortes, rango de colores para variables, y otras consideraciones quedarán guardados "sin referencia" de caso, lo que da la libertad de abrir el esquema de trabajo y luego llamar a cualquier caso de análisis (en el caso de este trabajo eran 8 casos), en el Anexo Digital se presenta el archivo "*EsquemaGeneral.pvsm*" el cual trae todas las configuraciones utilizadas en esta memoria.

8.2 Análisis de resultados según escenarios

8.2.1 Comparación de resultados según mallado

La manera en la cual se interpretan los resultados puede cambiar según el tipo de mallado utilizado, ya que utilizando un mallado más fino se podrá evaluar de manera más detallada el comportamiento de las diferentes variables. En la Tabla N°8.1 se señalan las distintas figuras a comparar según el tipo de mallado, corte visto y variable representada, donde el caso de análisis es la configuración de las bombas B1 y B2, con los muros separadores e internos.

Tabla N°8.1 – Resumen de Figuras para comparación de Resultados según Mallado

Configuración de bombas B1 y B2 con muros separadores e internos			
Tipo de Mallado	$\boldsymbol{U_{xz}}$ **- Plano A-A**	$\boldsymbol{Vort_{xz}}$ **- Plano A-A**	$\boldsymbol{U_{yz}}$ **- Plano D-D**
Grueso	Figura N°8.3	Figura N°8.5	Figura N°8.7
Fino	Figura N°8.4	Figura N°8.6	Figura N°8.8

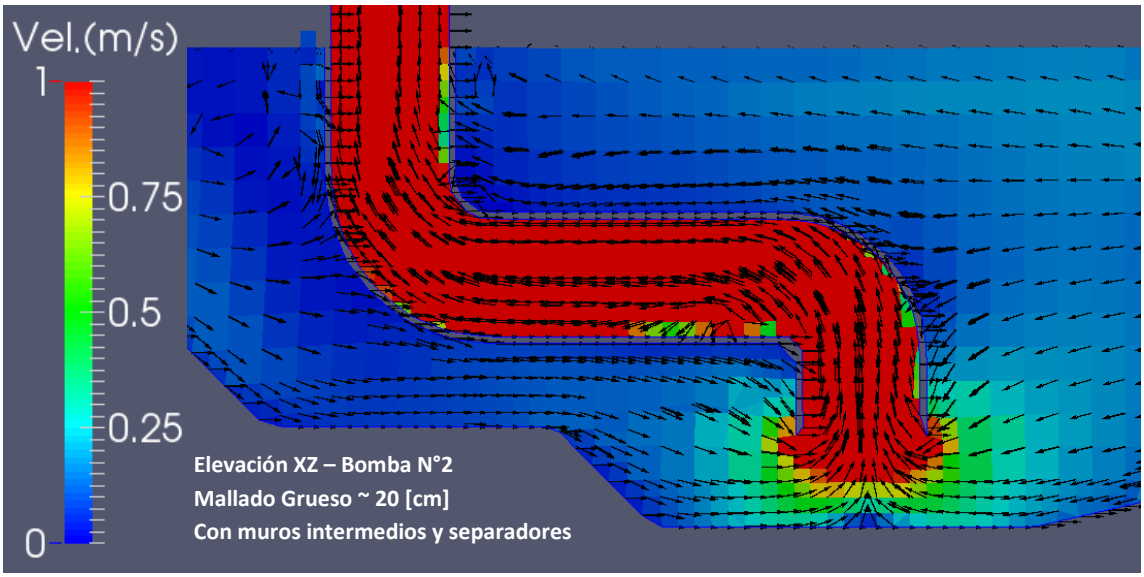

Figura N°8.3 – Zoom de Corte A-A, con vectores de velocidad en plano XZ – Mallado Grueso

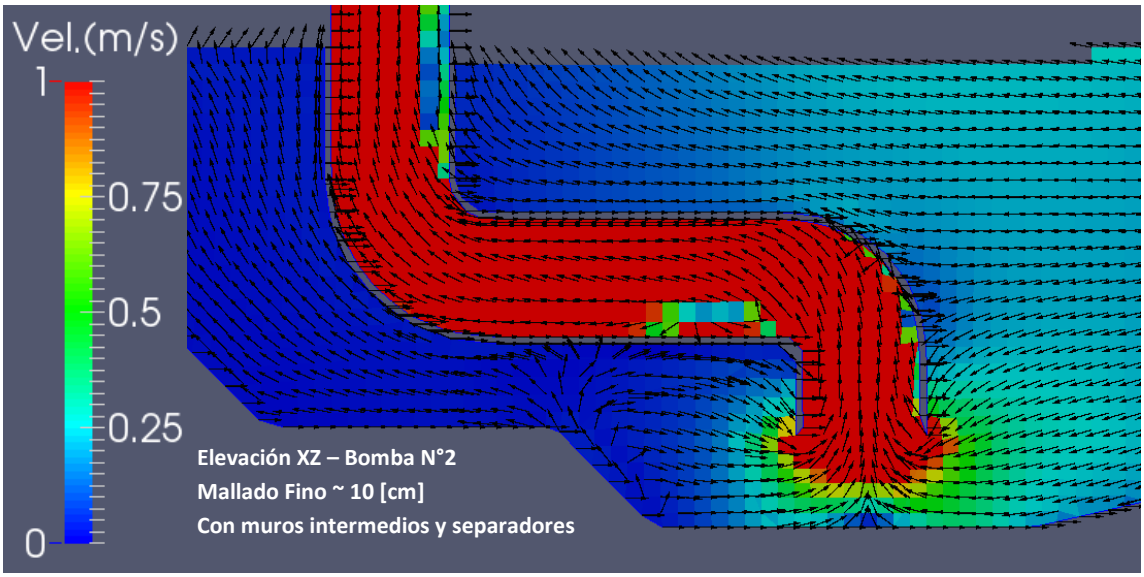

Figura N°8.4 – Zoom de Corte A-A, con vectores de velocidad en plano XZ – Mallado Fino

El aumento en la resolución permitió, entre otras cosas, visualizar que la velocidad promedio del agua en el canal de aproximación cercano a la captación es cercana a 0.25 [m/s] según el mallado fino y no 0.10 [m/s] según el mallado grueso, de acuerdo a lo que se aprecia en la escala de colores en las Figuras N°7.10 y N°7.11. Utilizando los otros resultados presentados en los Anexos, se puede concluir que la velocidad se concentra en este plano A-A dejando con velocidades menores todas aquellas celdas más cercanas a los muros separadores, lo que es consecuente con una distribución del perfil de velocidades debido al roce con las paredes, mientras que la utilización de un mallado más grueso no logra representar este efecto, teniendo una velocidad promedio en toda la sección transversal entre los muros separadores.

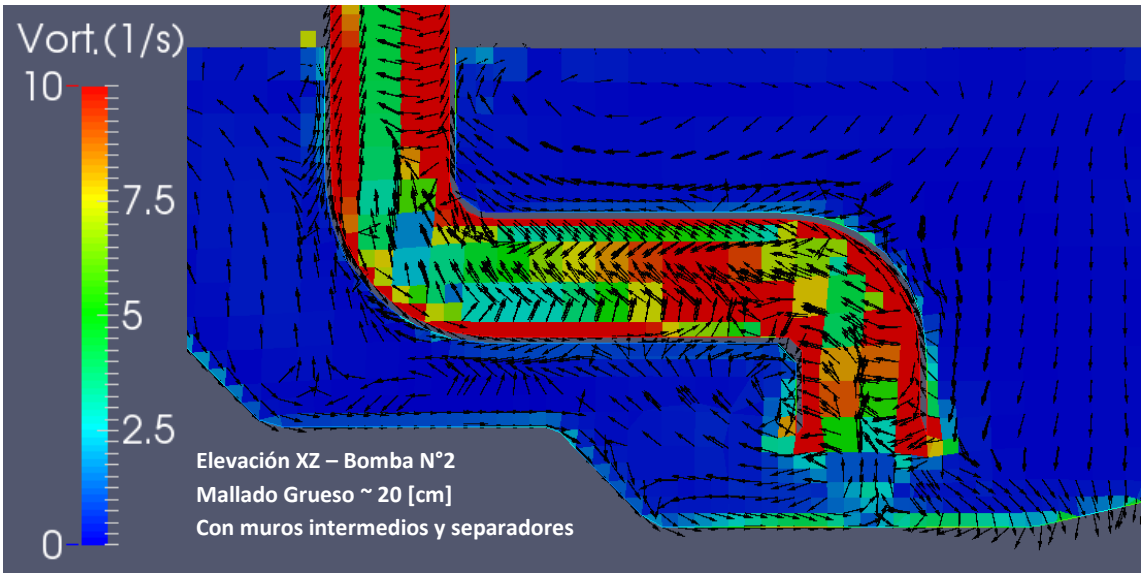

Figura N°8.5 – Zoom de Corte A-A, con vectores de vorticidad en plano XZ – Mallado Grueso

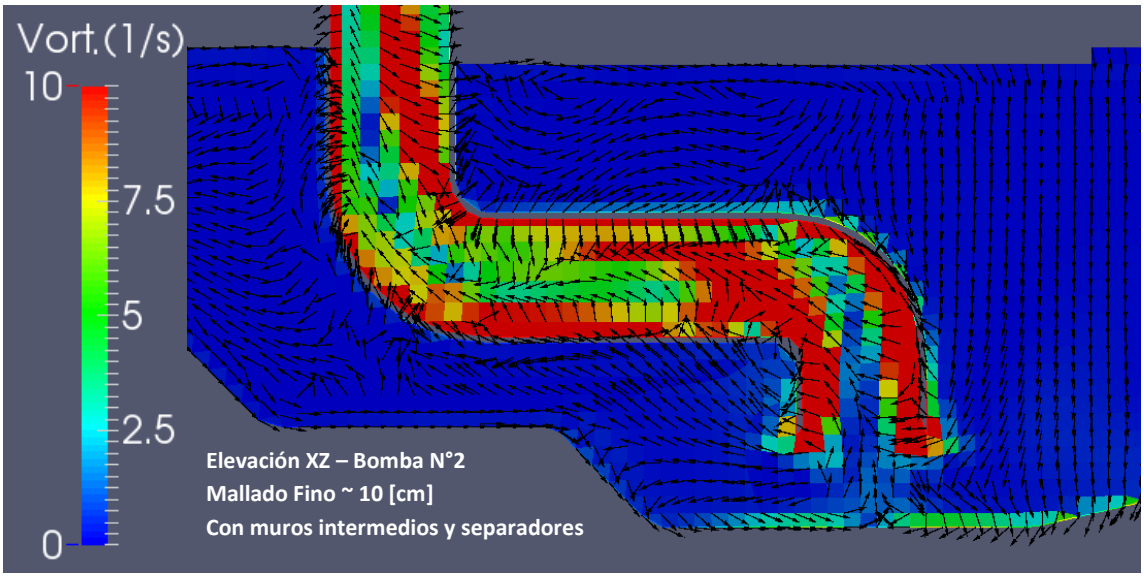

Figura N°8.6 – Zoom de Corte A-A, con vectores de vorticidad en plano XZ – Mallado Fino

Claramente se aprecia que el flujo deja de ser irrotacional en las cercanías de sólidos donde el efecto de la condición de no deslizamiento sumado a velocidades no-nulas se hace evidente, lo que se traduce en recirculaciones o turbulencias de pequeña o mediana escala. Con respecto a la utilización de un mallado aún más fino, se puede indicar que al tener más celdas (cada una con su velocidad puntual) se pueden identificar fenómenos de pequeña escala no apreciables con mallas de 10 o 20 [cm], lo que permitiría identificar de mejor manera la magnitud y dirección de la vorticidad.

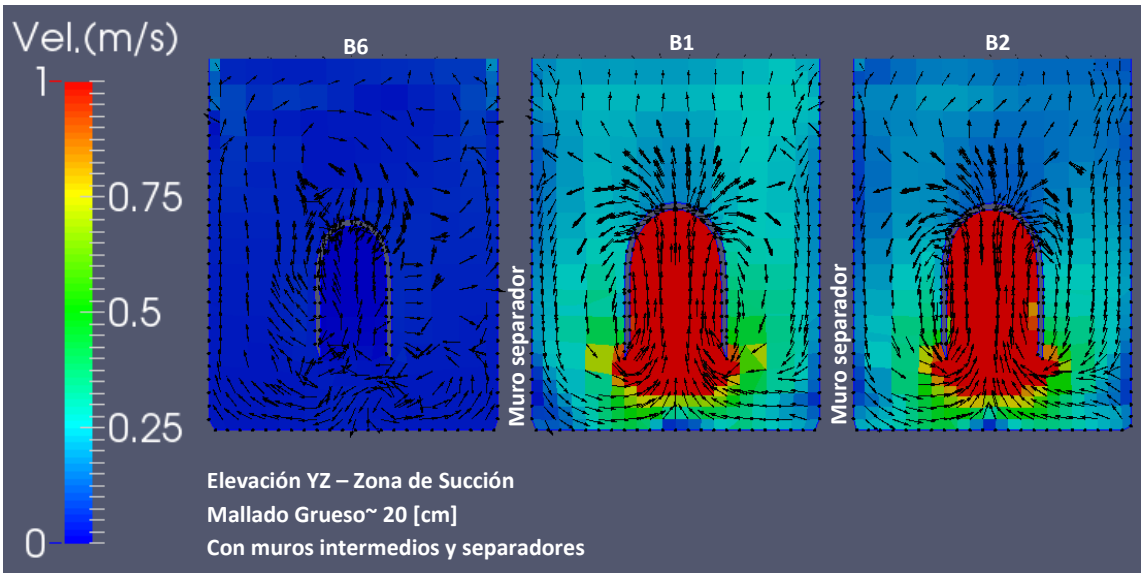

Figura N°8.7 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ– Mallado Grueso

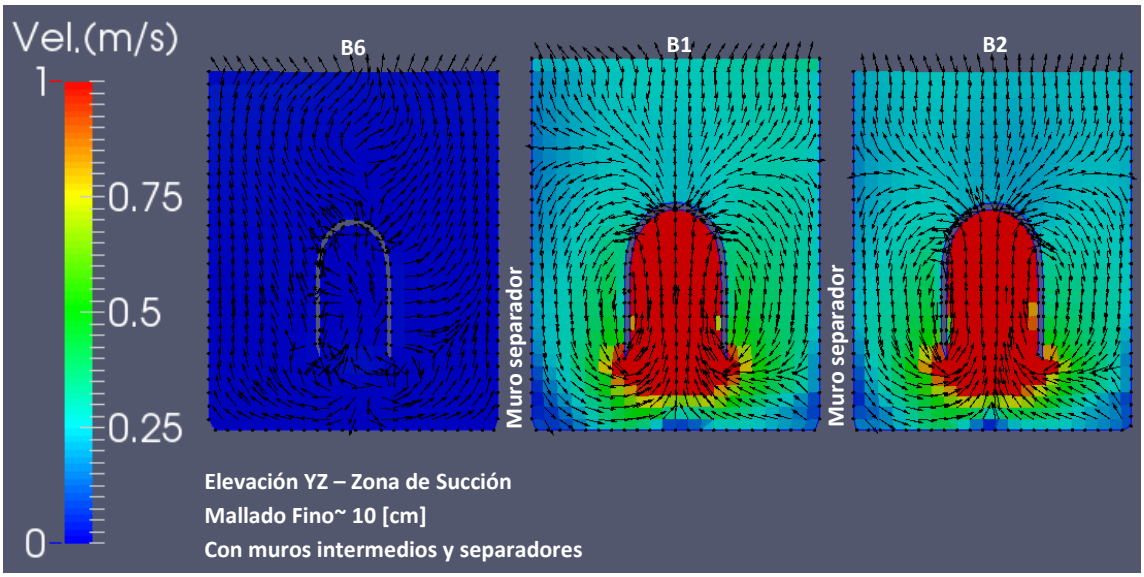

Figura N°8.8 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ – Mallado Fino

La mejora en la resolución permite acotar el rango donde la velocidad de aspiración es mayor a 0.5 [m/s], y se nota sobre todo en la bomba B1 (captación del medio), donde a la izquierda de la boca hay una celda de gran tamaño (mallado grueso) con velocidad de 0.75 [m/s] que no existe en la modelación con mallado fino. Bajo este esquema, la lectura es más continua y permitiría una mejor calibración del modelo numérico en el caso de contar con datos experimentales con los cuales contrastar el fenómeno.

Dentro de las observaciones que se pueden indicar respecto al cambio de mallado para la modelación se puede señalar que:

- La resolución para ver resultados es mejor y se aprecian más vectores que permiten una mejor lectura del fenómeno analizado, lo que va de la mano con las observaciones particulares realizadas a cada comparación.
- La mejor resolución permite identificar fenómenos de menor escala como, por ejemplo, las variaciones en la velocidad debido a la distribución del perfil de velocidad, algo que no se visualiza con tamaños de celda muy grandes.
- Al disminuir el ancho de celda en la mitad, se aumenta el número de celdas en un factor (aproximado) de 8, lo que hace que el tiempo de cálculo sea mayor al tener que resolver muchas más ecuaciones. Este concepto aplica a resoluciones aún mayores, lo que implica o mayor tiempo de proceso, o mejor hardware que optimicen los cálculos. Para los efectos de esta modelación, el aumento en el tiempo de cómputo fue de un factor de 3.7 aproximadamente, es decir, aumento de 9 horas con 32 minutos (mallado grueso) a 35 horas con 21 minutos (mallado fino).

8.2.2 Análisis de resultados según operación de bombas

Aquí se analiza el funcionamiento de la PEAS en función de la operación de las bombas, para lo cual se evaluará la velocidad y vorticidad en los cortes D-D y E-E para los tres esquemas de funcionamiento de bombas planteados en la sección 4.2.5, con la inclusión de muros separadores e intermedios; en la Tabla N°8.2 se resumen las Figuras para poder compararlas según sus características.

Tabla N°8.2 – Resumen de Figuras para comparación de Resultados según Configuración de Bombas

Configuración con mallado fino y con muros separadores e intermedios				
Configuración de Bombas	U_{YZ} **Plano D-D**	U_{YZ} **Plano E-E**	$Vort_{YZ}$ **Plano D-D**	$Vort_{YZ}$ **Plano E-E**
B1-B2	Figura N°8.9	Figura N°8.10	Figura N°8.15	Figura N°8.16
B1-B6	Figura N°8.11	Figura N°8.12	Figura N°8.17	Figura N°8.18
B2-B6	Figura N°8.13	Figura N°8.14	Figura N°8.19	Figura N°8.20

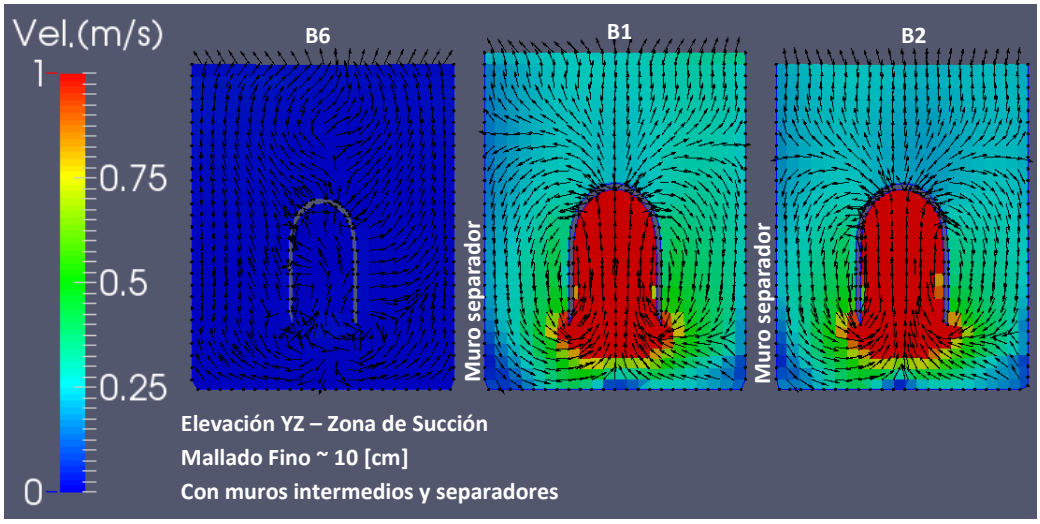

Figura N°8.9 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B1-B2

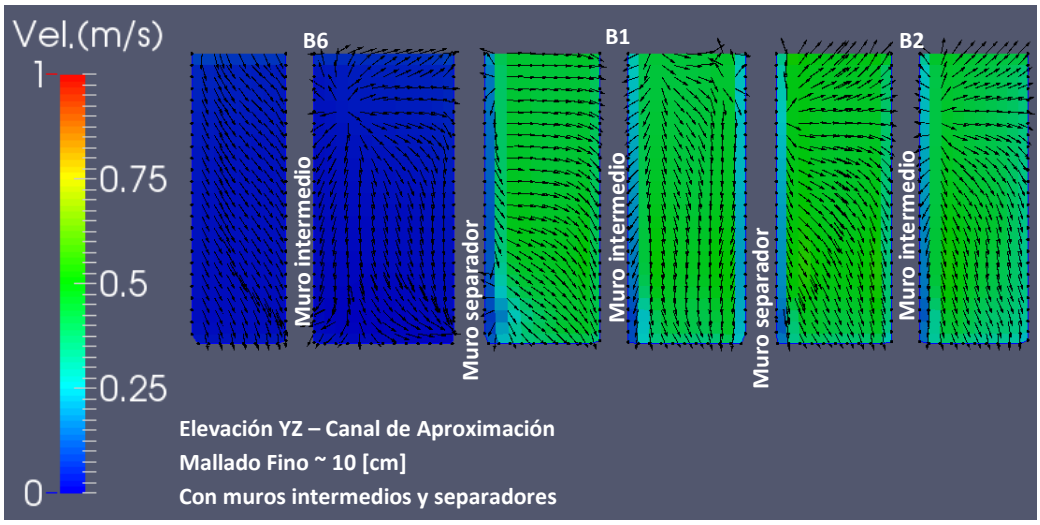

Figura N°8.10 – Zoom de Corte E-E, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B1-B2

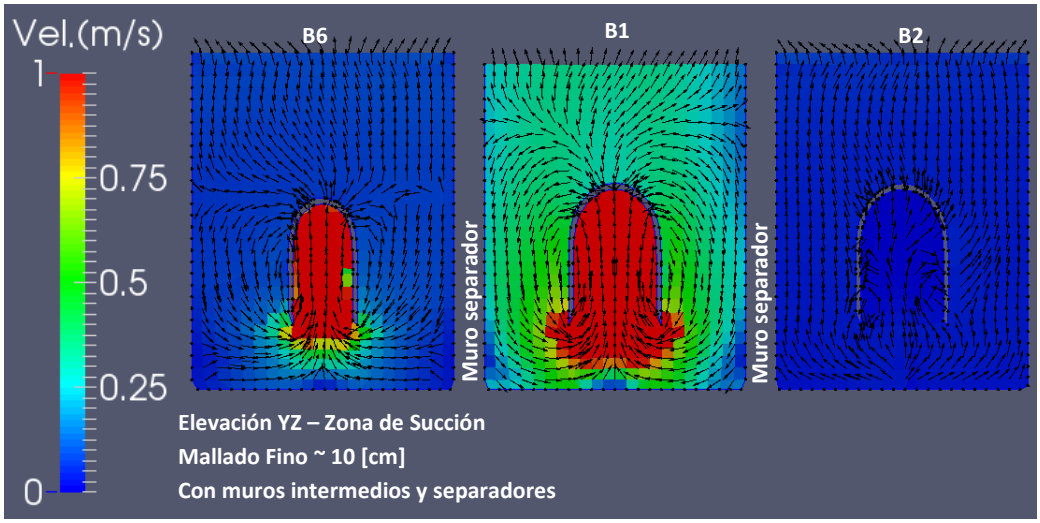

Figura N°8.11 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B1-B6

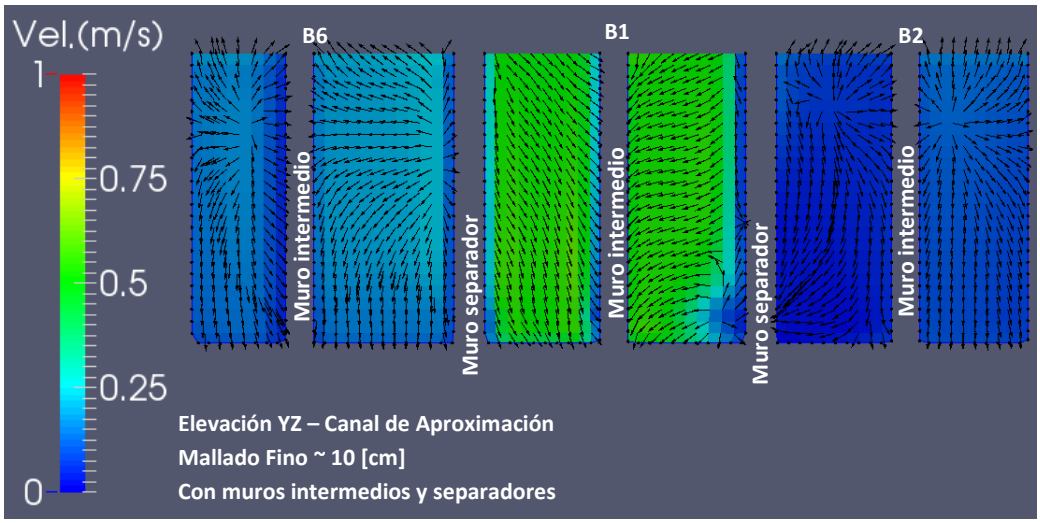

Figura N°8.12 – Zoom de Corte E-E, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B1-B6

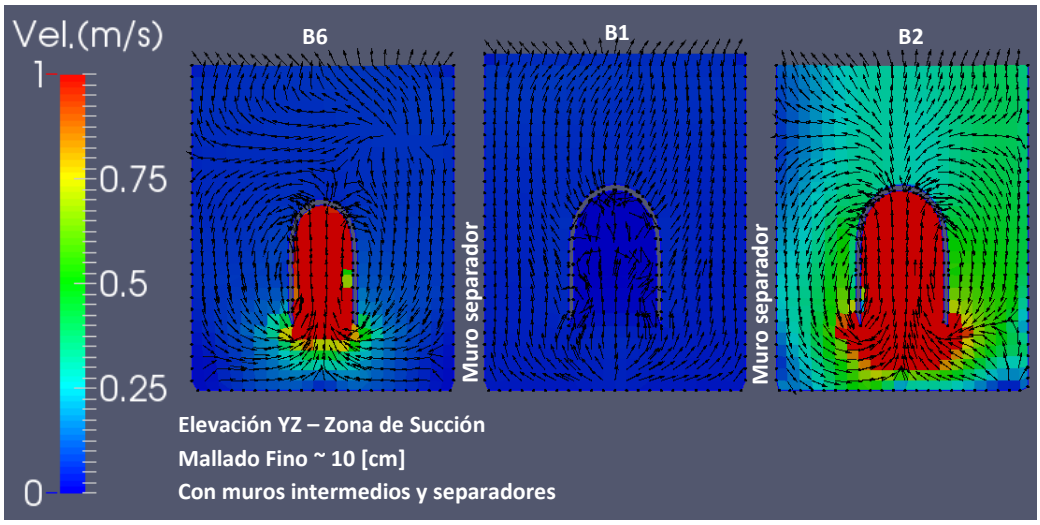

Figura N°8.13 – Zoom de Corte D-D, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B2-B6

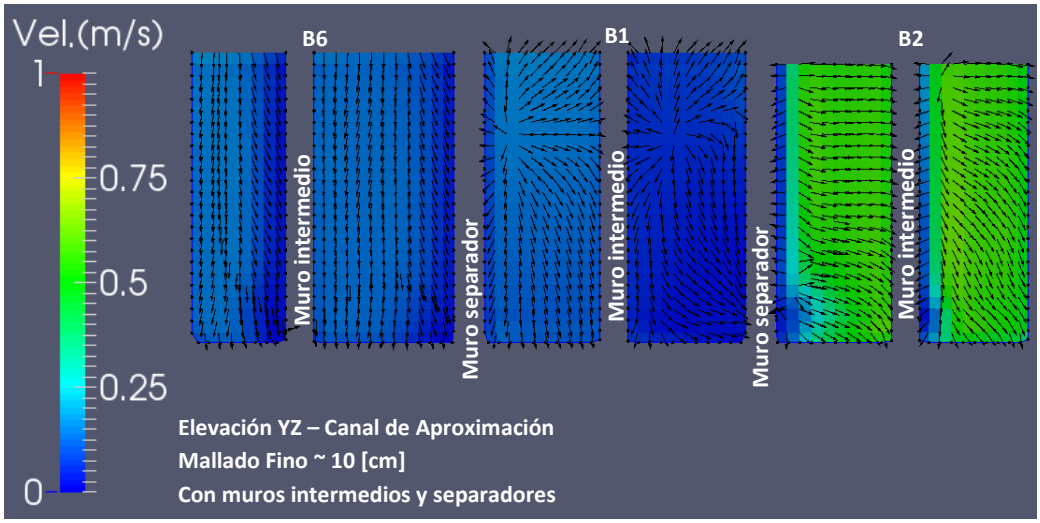

Figura N°8.14 – Zoom de Corte E-E, con vectores de velocidad en plano YZ – Bombas B2-B6

Si se hace una comparación en el análisis de los campos de velocidad, se puede señalar que en el corte D-D cuando operan las bombas B1-B2 (Figura N°8.9) las velocidades en la succión son parejas en ambas bombas, a diferencia de las otras configuraciones donde la bomba B6 no logra altas velocidades en el fondo (Figura N°8.11 y Figura N°8.13), lo que se traduce en una falencia al intentar captar sólidos que han sedimentado al fondo. Además, si se comparan los puntos de funcionamiento de los sistemas de bombas en paralelo, se aprecia que cuando se utiliza la bomba B6, las otras bombas (B1 o B2) se esfuerzan más al tratar de compensar el bajo caudal de bombeo de B6, tal como se aprecia en la Tabla N°4.5.

Adicionalmente, con respecto a las velocidades en el canal de aproximación a la succión, éstas se concentran en los canales de las bombas B1 y B2 para todos los casos, mientras que en el canal de la bomba B6 (cuando está en funcionamiento) las velocidades son menores lo que da más tiempo a los sólidos para sedimentar, lo cual se debe contrastar con la vorticidad en el canal.

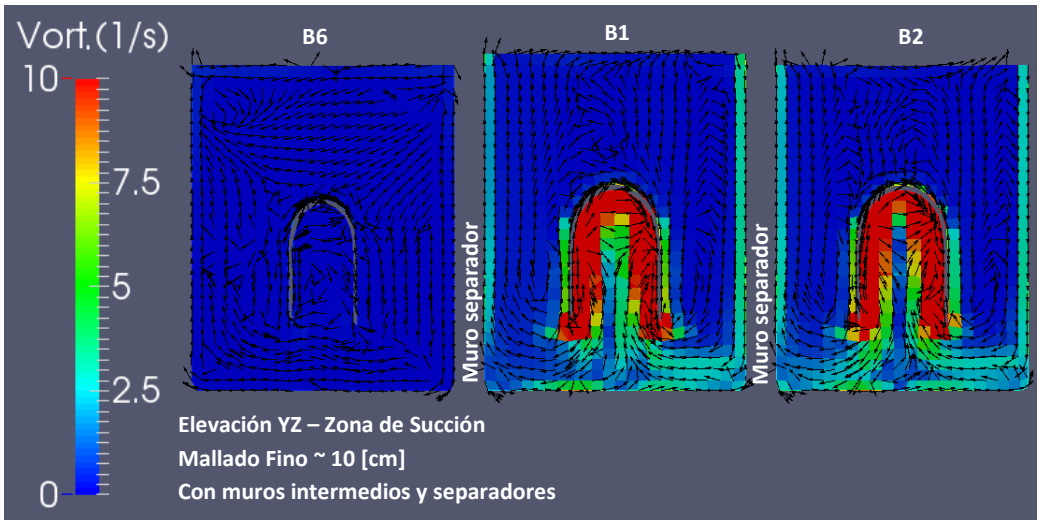

Figura N°8.15 – Zoom de Corte D-D, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B1-B2

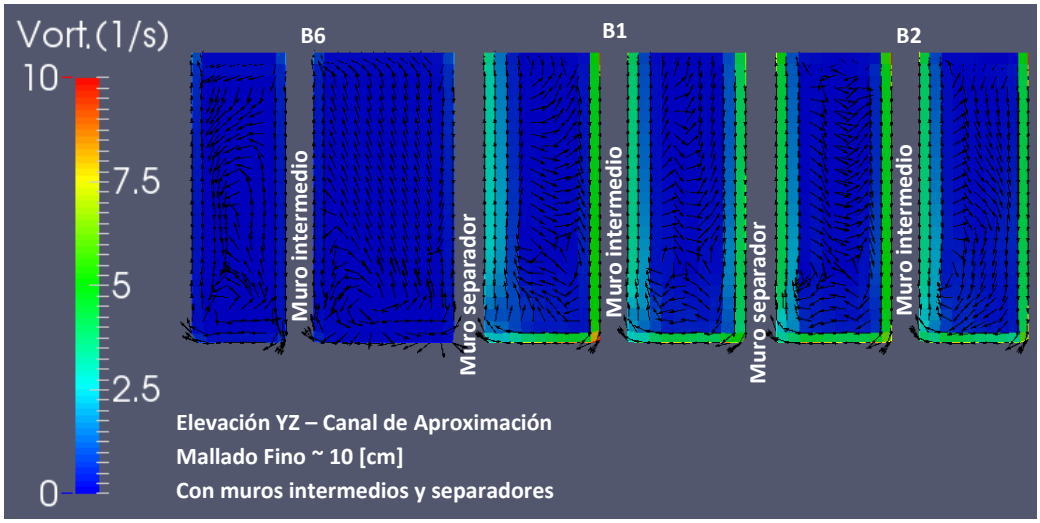

Figura N°8.16 – Zoom de Corte E-E, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B1-B2

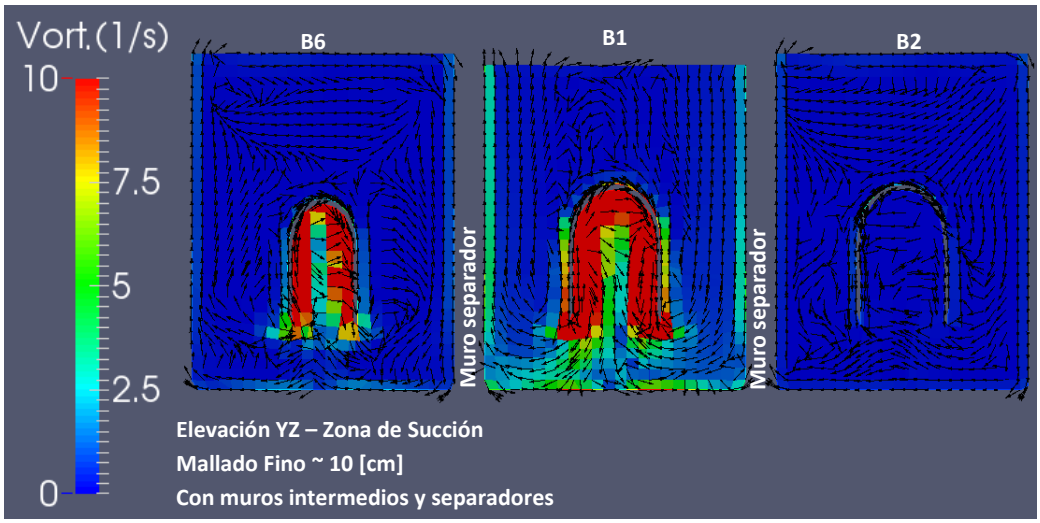

Figura N°8.17 – Zoom de Corte D-D, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B1-B6

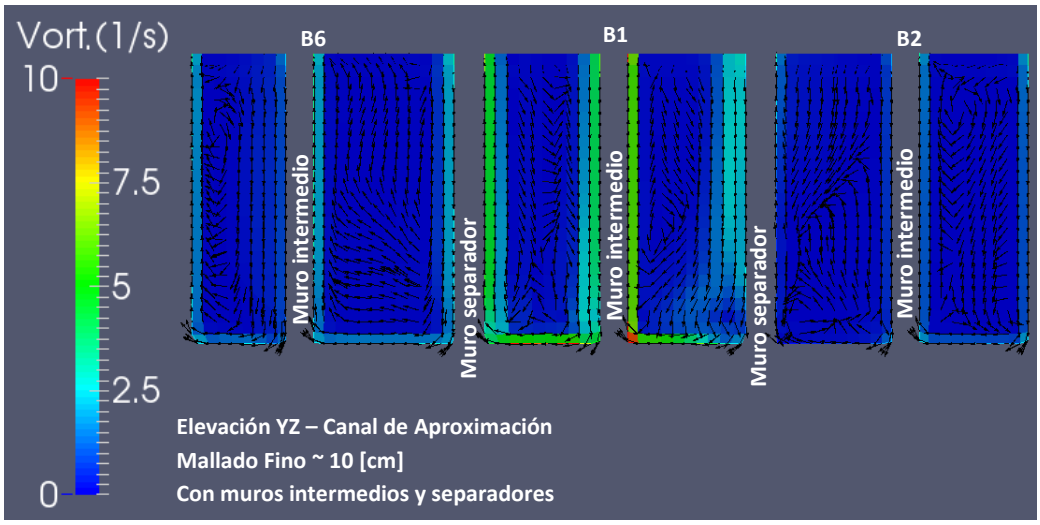

Figura N°8.18 – Zoom de Corte E-E, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B1-B6

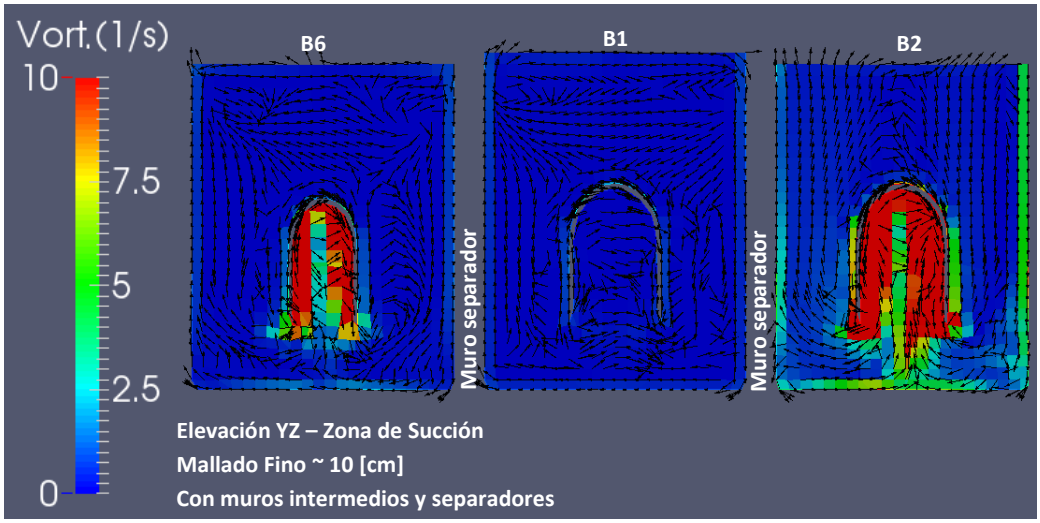

Figura N°8.19 – Zoom de Corte D-D, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B2-B6

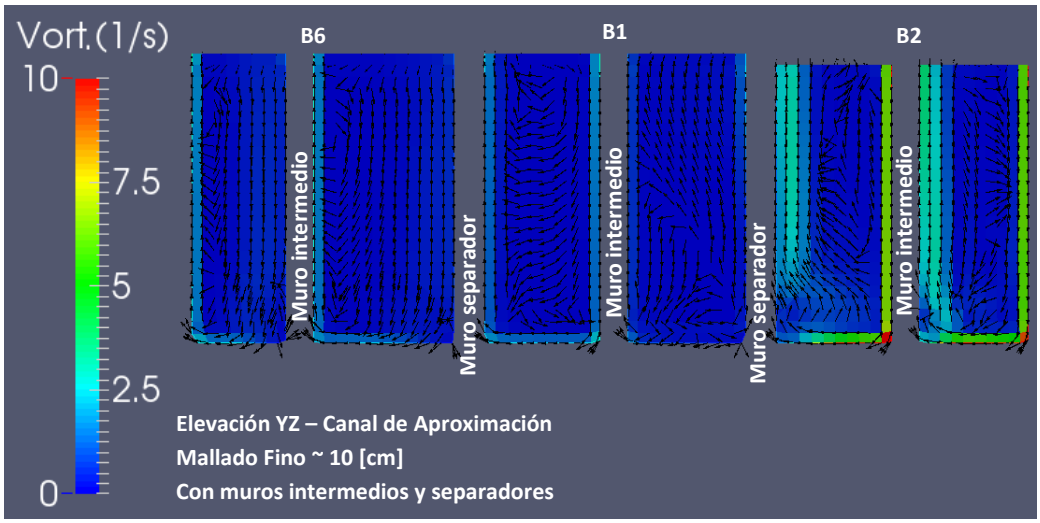

Figura N°8.20 – Zoom de Corte E-E, con vectores de vorticidad en plano YZ – Bombas B2-B6

Si se hace una comparación en el análisis de los campos de vorticidad, se puede señalar que:

- Para los tres casos, la vorticidad bajo la boca de captación de las bombas B1 y B2 es mayor a cero, lo que permite la rotacionalidad de las partículas de fluido. Esta rotacionalidad se relaciona con la aleatoriedad de los movimientos turbulentos y, lo que según los fabricantes de bombas FLYGT® favorece a mantener las partículas en suspensión y su posterior succión por las bombas, tal como se indicó en la sección 2.2.2.
- Se apreció que cuando las bombas B1 y B2 están en funcionamiento, en los canales de aproximación a éstas bombas existen vorticidades mayores a cero en las proximidades a los muros separadores e intermedios, lo que se traduce en que existen turbulencias o zonas de recirculación en estas proximidades y se evita la sedimentación de los sólidos en suspensión. A diferencia de éstos, cuando la bomba B6 está operativa, el canal de aproximación de esta bomba no detecta vorticidad lo que, junto a la baja velocidad de circulación, favorece la sedimentación de sólidos.

En general, se puede concluir que para el funcionamiento de la PEAS se recomienda:

- La utilización de la configuración B1-B2 ya que ésta presenta mayor vorticidad en la boca de aspiración de las bombas, lo que permite la succión, y posterior eliminación, de las partículas en suspensión y que se hayan sedimentado al fondo de la planta elevadora de aguas servidas.
- La utilización de la configuración B1-B2 permite un uso parejo de las bombas FLYGT CP3602.905 y además un mayor caudal de descarga total, esto se traduce en un transporte parejo de fluido a través de los canales de aproximación y no se favorece un canal sobre otro (como cuando entra en operación la bomba B6).

8.2.3 Análisis de resultados según geometría interna de la PEAS

Aquí se plantea evaluar el funcionamiento de la PEAS en función de la geometría interna de la planta, para lo cual se evaluará la velocidad y vorticidad en los cortes D-D y E-E ante la existencia de muros separadores (que generan un canal de aproximación hacia la bomba en servicio) y muros intermedios (al ingreso de los canales de aproximación), según las observaciones vistas en la sección 4.2.3. En la Tabla N°8.3 se resumen las Figuras para poder compararlas según sus características.

Tabla N°8.3 – Resumen de Figuras para comparación de Resultados según Geometría Interna

Configuración con mallado fino y operación de bombas B1-B2				
Configuración Muros	$\boldsymbol{U_{YZ}}$ **Plano D-D**	$\boldsymbol{U_{YZ}}$ **Plano E-E**	$\boldsymbol{Vort_{YZ}}$ **Plano D-D**	$\boldsymbol{Vort_{YZ}}$ **Plano E-E**
Separadores e Intermedios	Figura N°8.21	Figura N°8.24	Figura N°8.28	Figura N°8.31
Sólo Separadores	Figura N°8.22	Figura N°8.25	Figura N°8.29	Figura N°8.32
Sin muros	Figura N°8.23	Figura N°8.26	Figura N°8.30	Figura N°8.33

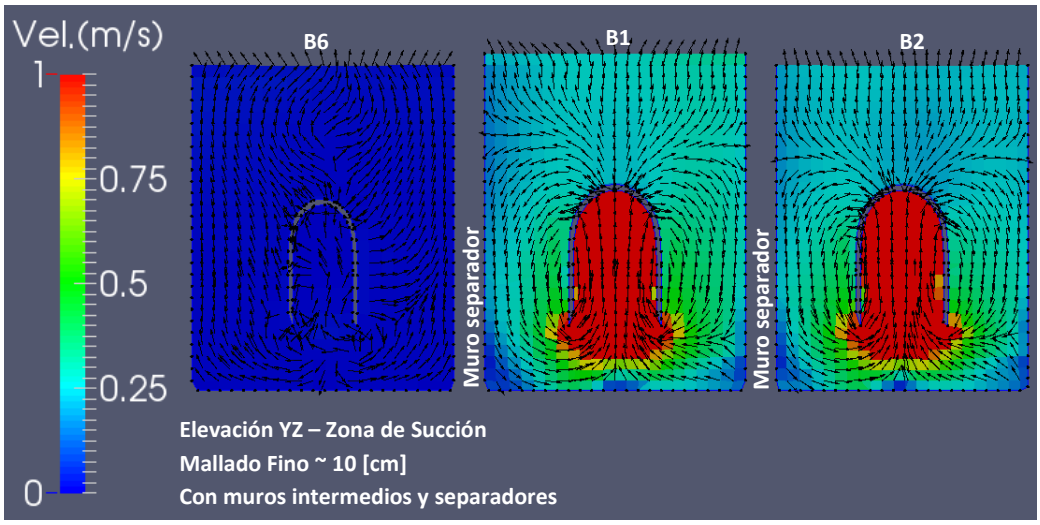

Figura N°8.21 – Zoom Corte D-D, con vectores de velocidad YZ - Ambos Muros

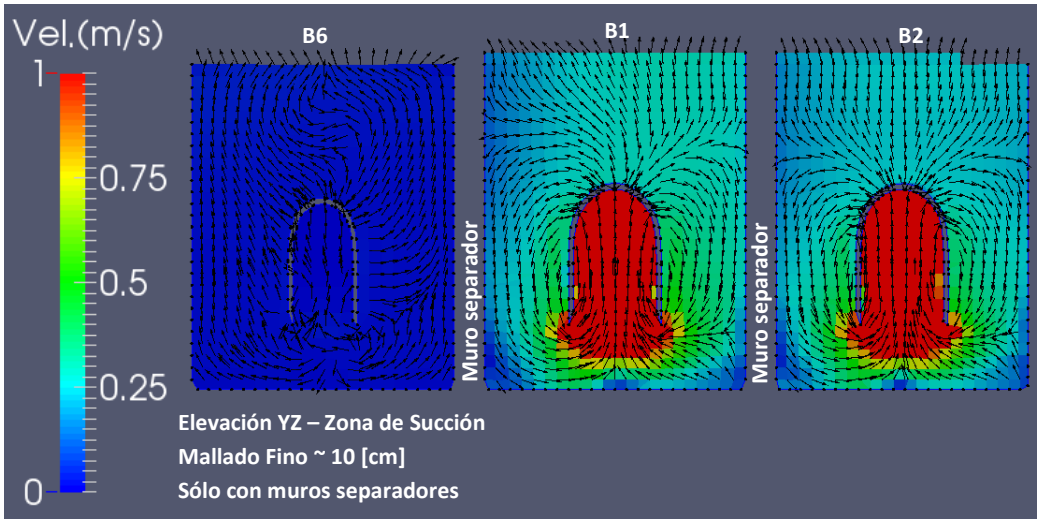

Figura N°8.22 – Zoom Corte D-D, con vectores de velocidad YZ – Muros Separadores

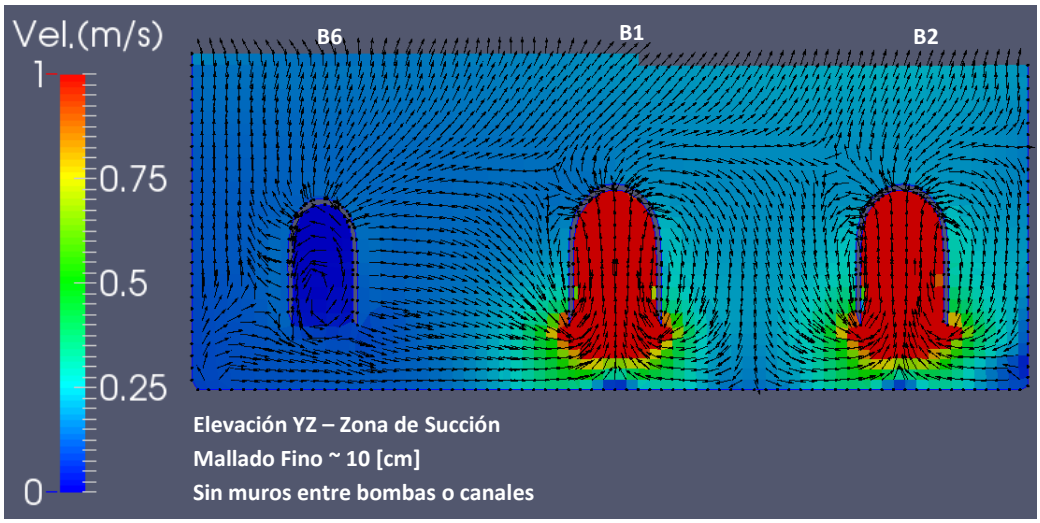

Figura N°8.23 – Zoom Corte D-D, con vectores de velocidad YZ – Sin Muros

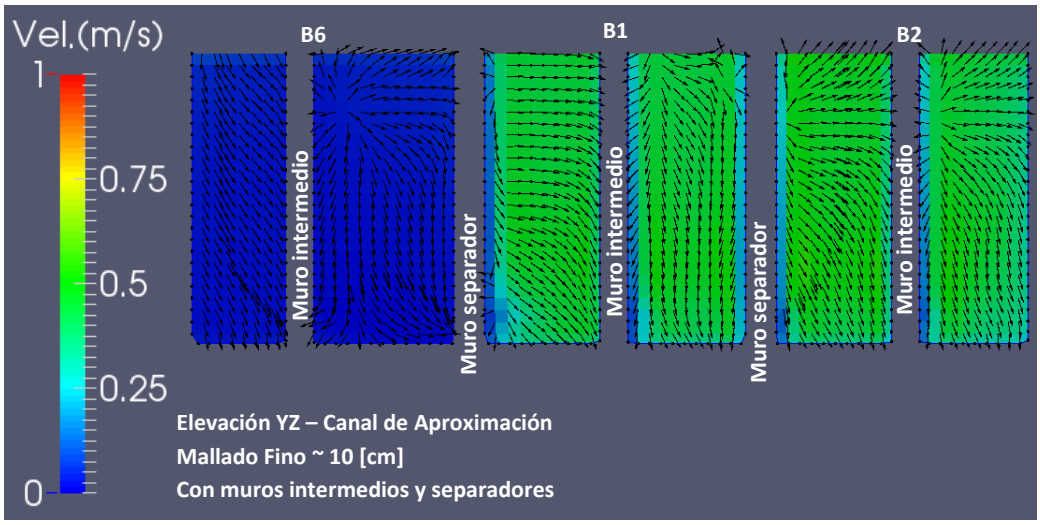

Figura N°8.24 – Zoom Corte E-E, con vectores de velocidad YZ - Ambos Muros

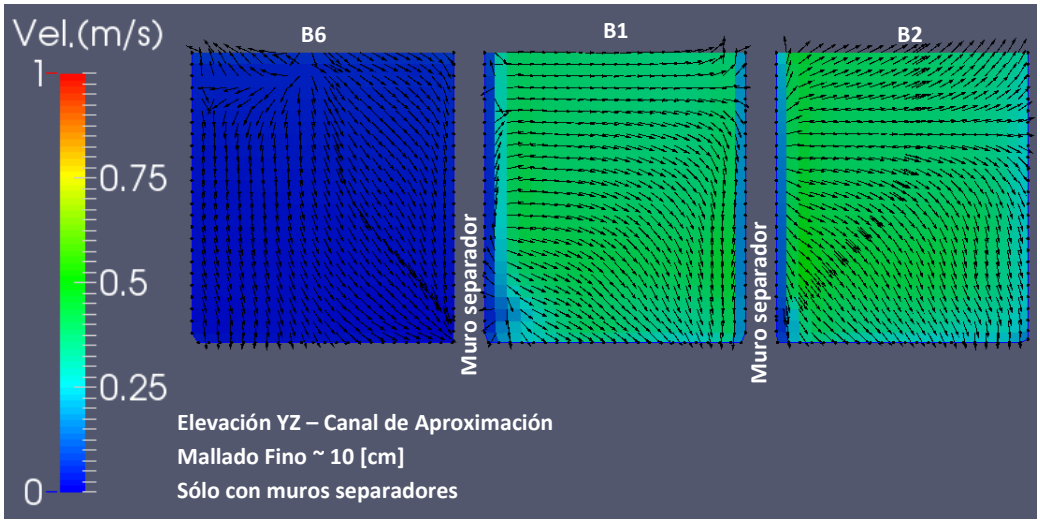

Figura N°8.25 – Zoom Corte E-E, con vectores de velocidad YZ – Muros Separadores

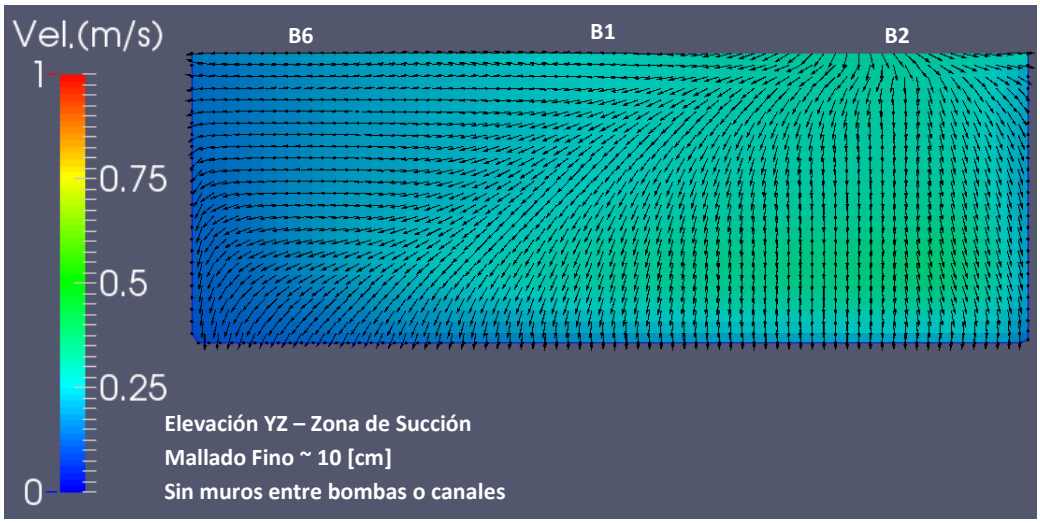

Figura N°8.26 – Zoom Corte E-E, con vectores de velocidad YZ – Sin Muros

En la Figura N°8.27 se recuerda la ubicación de los cortes presentados en los resultados anteriores para dar claridad al análisis posterior:

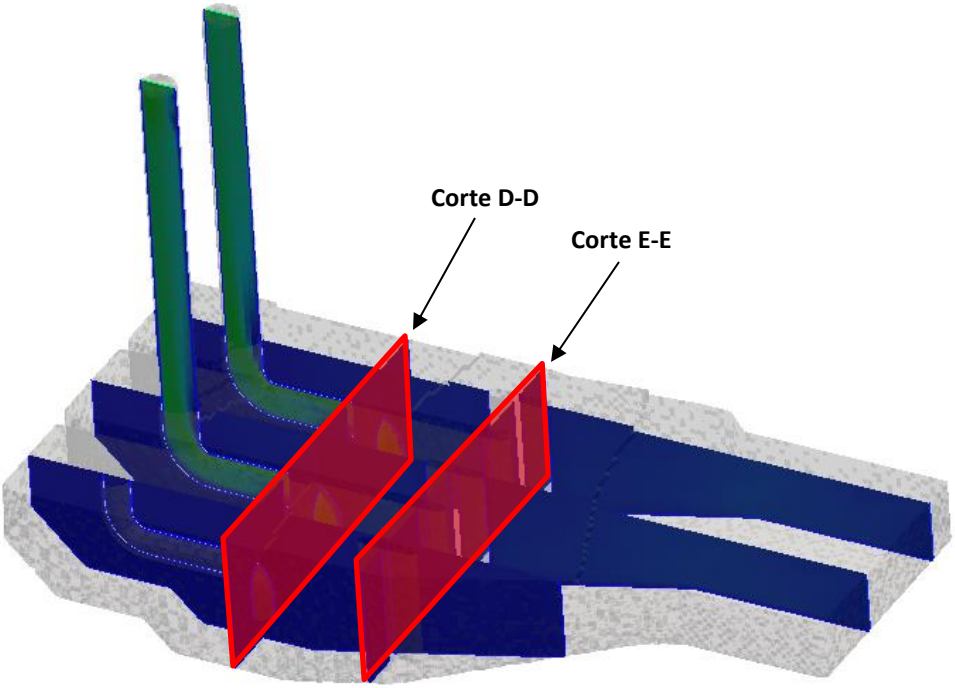

Figura N°8.27 – Vista isométrica de los cortes realizados en el pozo de aspiración

- En el corte D-D correspondiente a la zona de captación de las bombas, no se aprecian mayores diferencias ante la existencia de los muros intermedios ubicados al inicio del canal de aproximación, ya que la distancia entre este corte D-D y los muros intermedios permite la mezcla y alcanzar condiciones similares. Sin embargo, ante la ausencia de los muros separadores sí se nota la presencia de velocidades en las cercanías de la captación de la bomba B6, y esto se debe a que al no existir un canal de aproximación (generado por los muros separadores), el agua se puede desplazar a sectores sin succión. A pesar de esto, no se aprecia mayor interferencia en el flujo entre las bombas.
- En el corte E-E correspondiente al inicio del canal de aproximación, como se puede apreciar en la Figura N°8.27, se aprecia notablemente como la presencia de muros permiten concentrar el flujo, y al no variar significativamente la altura de escurrimiento, se concentra la velocidad. Adicionalmente, el caso sin muros separadores ni intermedios presenta velocidades en todo el dominio del canal de aproximación, pero aun así se logra identificar un sector con mayor velocidad en dirección al flujo, concentrado en el sector intermedio entre las bombas B1 y B2, teniendo menores velocidades en las cercanías de la bomba B6.

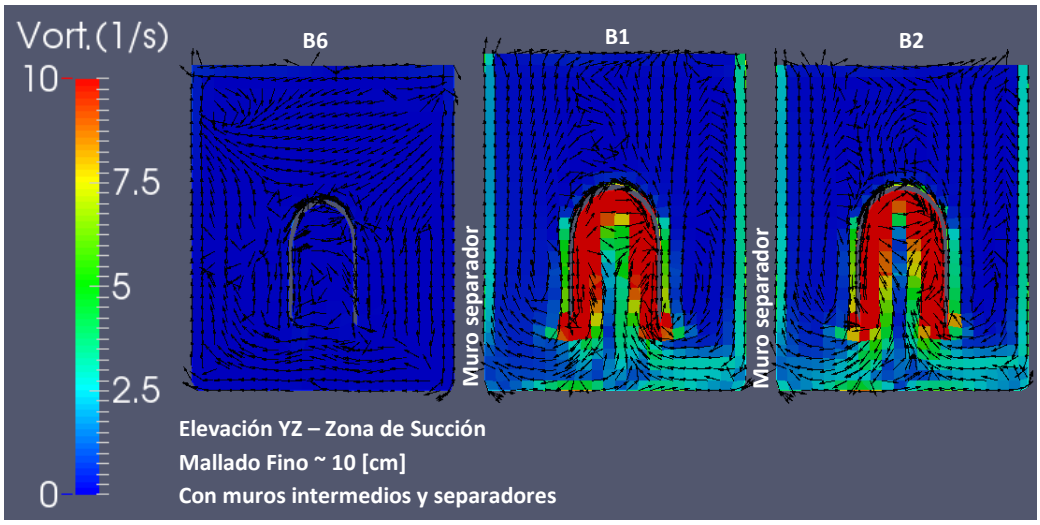

Figura N°8.28 – Zoom Corte D-D, con vectores de vorticidad YZ - Ambos Muros

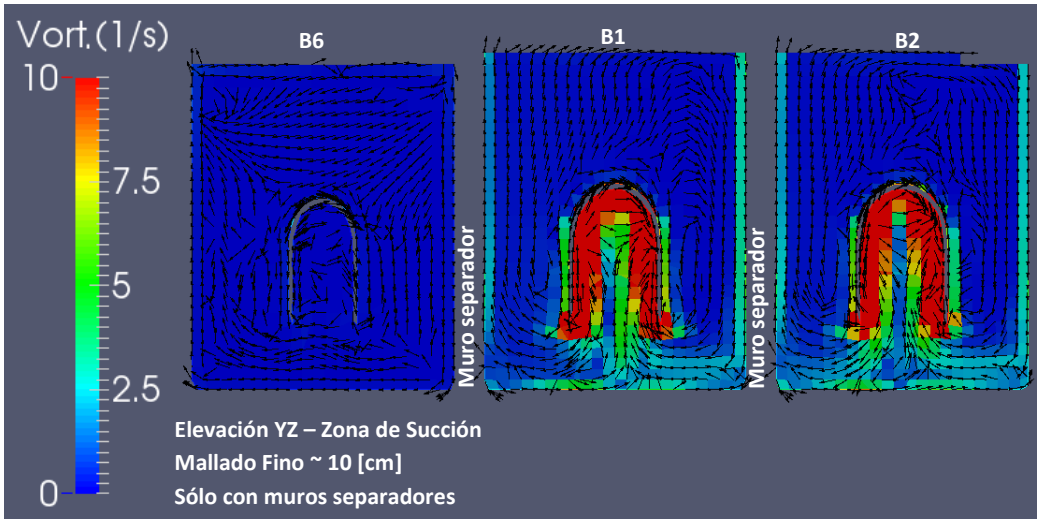

Figura N°8.29 – Zoom Corte D-D, con vectores de vorticidad YZ – Muros Separadores

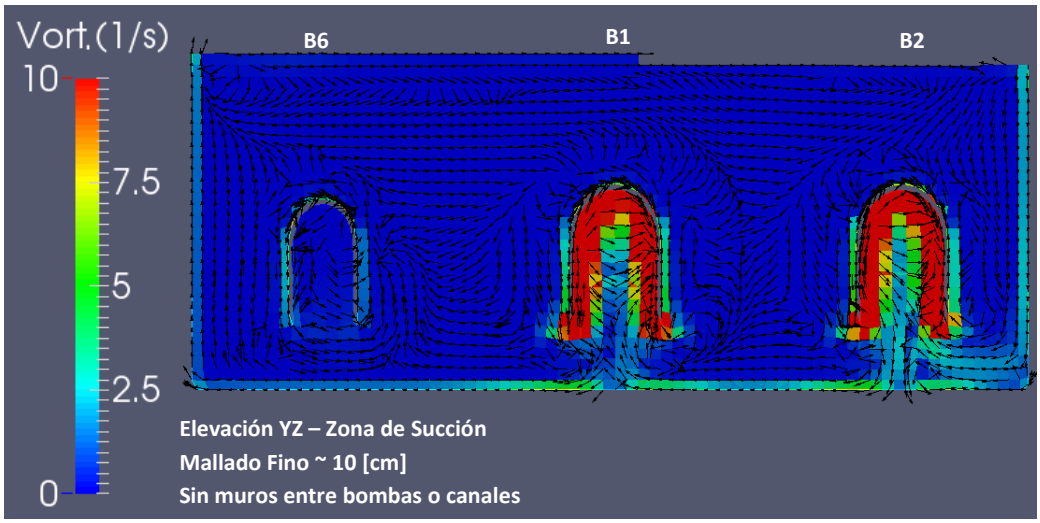

Figura N°8.30 – Zoom Corte D-D, con vectores de vorticidad YZ – Sin Muros

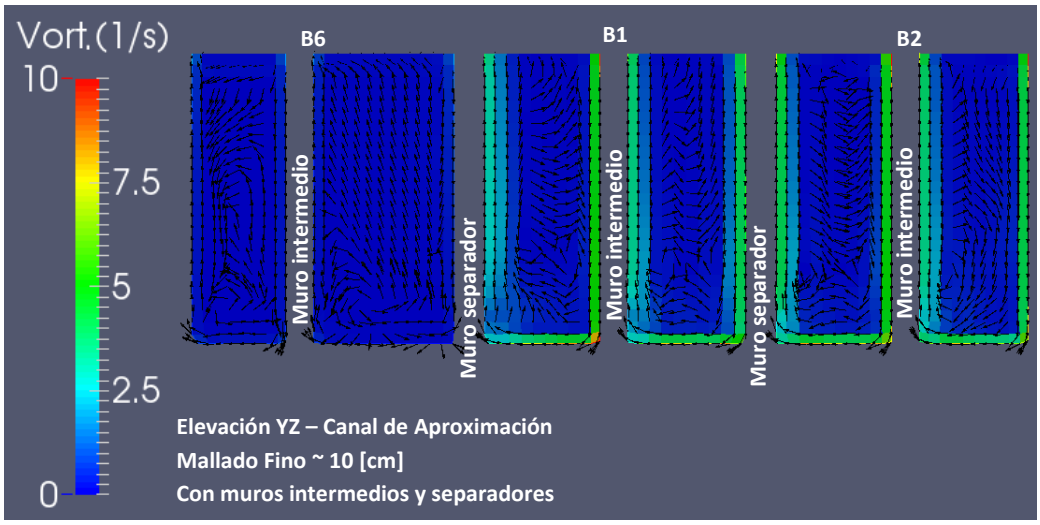

Figura N°8.31 – Zoom Corte E-E, con vectores de vorticidad YZ - Ambos Muros

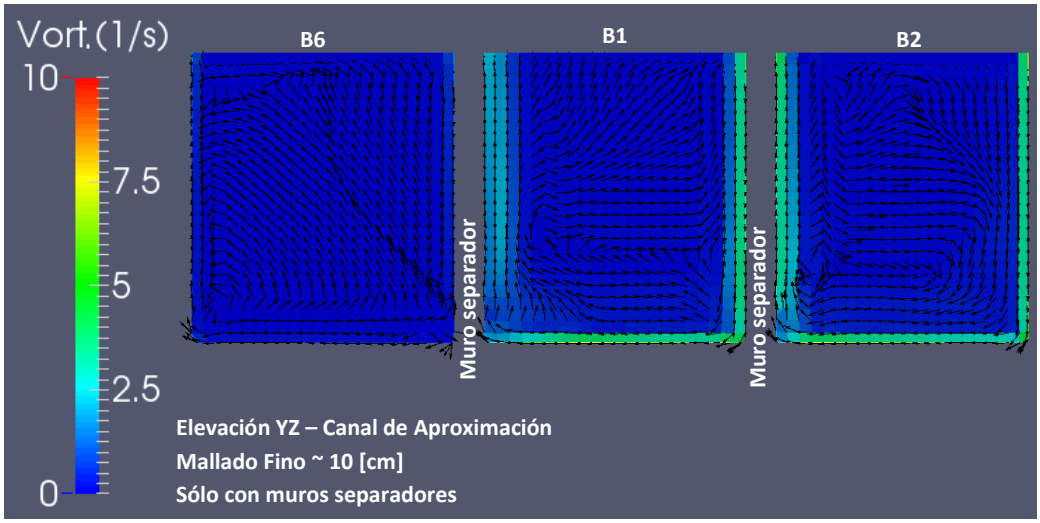

Figura N°8.32 – Zoom Corte E-E, con vectores de vorticidad YZ – Muros Separadores

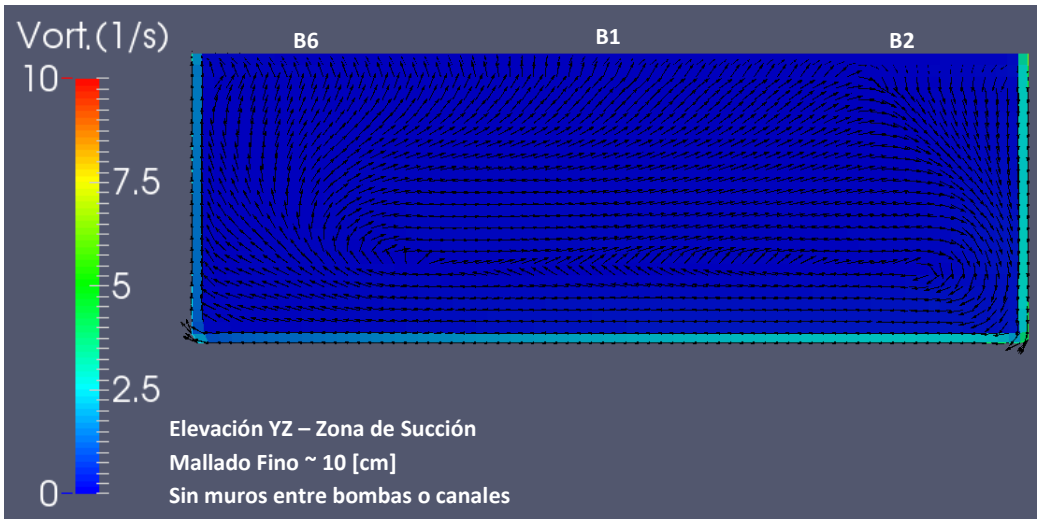

Figura N°8.33 – Zoom Corte E-E, con vectores de vorticidad YZ – Sin Muros

Si se hace una comparación en el análisis de los campos de vorticidad, se puede señalar que:

- En la medida que se eliminan muros, la vorticidad en el canal de aproximación disminuye.
- Para el caso sin muros, no se aprecian sectores entre las bombas donde haya vorticidad mayor a cero. Sin embargo, la vorticidad bajo las bocas de captación son menores que para los casos con muros separadores.
- Dada la recomendación de los fabricantes de bombas sumergidas FLYGT® vista en la sección 2.2.2, es recomendable fomentar la producción de vorticidad en el canal de aproximación para generar turbulencia, de tal manera de mantener los sólidos suspendidos y que no sedimenten. Esto sólo se produce en el caso donde existen tanto muros separadores como intermedios al inicio del canal de aproximación.

En general, se puede concluir que para el funcionamiento de la PEAS se recomienda:

- A pesar de no existir recomendación alguna de instalar muros intermedios en los canales de aproximación a la captación de bombas, se aprecia que sí cumplen el objetivo de aumentar la turbulencia y efectivamente fue una buena idea incluirlo en el diseño actual de la PEAS de ESVAL S.A.
- De acuerdo a lo anterior, es igualmente beneficioso que la velocidad de aproximación sea mayor, ya que esto permite que los sólidos suspendidos estén menos tiempo en el canal de aproximación de la PEAS y sea más rápida su eliminación.

8.3 Análisis sobre la modelación

8.3.1 Tiempos de modelación

La implementación del modelo sin llegar a ejecutar el modelado, es en esencia, igual para todos los casos; sin embargo, al momento de ejecutarlos se observa un factor relevante que debe considerar el usuario a la hora de modelar: la tasa de tiempo de modelado. Para el caso del mallado fino irregular es claro que los resultados son de mejor calidad y que el mismo modelado del pozo de aspiración es más realista, pero el tiempo que tarda en procesar la modelación es mucho mayor, esto se puede apreciar en la Tabla N°8.4.

Tabla N°8.4 – Tiempo de modelado para ambos mallados

Análisis de Tiempo de Modelación						
Tamaño de Celda	Mallado Grueso Irregular Tamaño de celda ≈ 20 [cm] y 10 [cm] en proximidad a sólidos			Mallado Fino Regular Tamaño de celda ≈ 10 [cm] en todo el dominio		
Presencia de Muros	Muros Separadores e Intermedios	Sólo muros Separadores	Sin Muros Separadores ni Intermedios	Muros Separadores e Intermedios	Sólo muros Separadores	Sin Muros Separadores ni Intermedios
Tiempo de Modelación [s]	34346	35486	31356	127311	122750	131568
Tiempo de Modelación	9 hrs 32 min	9 hrs 51 min	8 hrs 42 min	35 hrs 21 min	34 hrs 5 min	36 hrs 32 min

Se puede estimar que al reducir el tamaño de celda (hexaédrico) a la mitad, la cantidad de celdas se multiplicó en un factor de 8 y el tiempo de cómputo se cuadruplicó y se mejoró la calidad de los resultados. Es por esto que se debe analizar con cuidado el mallado utilizado en la modelación.

Además del tiempo de modelado, existe otro tiempo que puede influir en menor manera la obtención de resultados y corresponde al tiempo que le toma al equipo juntar todos los datos previamente separados por núcleo. A mayor cantidad de datos, mayor será el tiempo de reconstrucción, lo que puede variar entre minutos hasta días.

8.3.2 Número de Courant

Una vez que la modelación se inicia, se presentan distintos datos en el *display* de la pantalla de comandos en Linux, donde para cada Δt de cálculo se presenta información de convergencia en los cálculos, como se aprecia en la Figura N°8.34.

```
Courant Number mean: 0.0045166552 max: 0.56937543
Interface Courant Number mean: 0.00013553445 max: 0.043774875
Time = 7.005

smoothSolver:  Solving for alpha.water, Initial residual = 3.9173577e-05, Final residual = 1.7013112e-09, No Iterations 1
Phase-1 volume fraction = 0.22261697  Min(alpha1) = -2.7188015e-09  Max(alpha1) = 1.0012567
MULES: Correcting alpha.water
MULES: Correcting alpha.water
Phase-1 volume fraction = 0.22261697  Min(alpha1) = -1.0777532e-07  Max(alpha1) = 1.0012567
DICPCG:  Solving for p_rgh, Initial residual = 0.00079089763, Final residual = 3.3836435e-05, No Iterations 2
time step continuity errors : sum local = 3.4409652e-05, global = -4.955717e-10, cumulative = -1.7199708e-09
DICPCG:  Solving for p_rgh, Initial residual = 3.428866e-05, Final residual = 1.7137423e-06, No Iterations 15
time step continuity errors : sum local = 1.7427483e-06, global = 2.3066141e-10, cumulative = -1.4893094e-09
DICPCG:  Solving for p_rgh, Initial residual = 2.0325131e-06, Final residual = 9.6009817e-08, No Iterations 82
time step continuity errors : sum local = 9.7633242e-08, global = -1.7695858e-09, cumulative = -3.2588952e-09
smoothSolver:  Solving for epsilon, Initial residual = 9.2817038e-05, Final residual = 3.2260281e-07, No Iterations 1
smoothSolver:  Solving for k, Initial residual = 0.00088136616, Final residual = 7.2983063e-07, No Iterations 1
ExecutionTime = 46.51 s  ClockTime = 48 s
```

Figura N°8.34 – Información presentada en modelación

Para todos los intervalos, en todos los casos se entregan dos números de Courant: Número de Courant Promedio y Máximo Número de Courant. El número más interesante de los presentados es el máximo número de Courant, ya que si la solución diverge en una celda ésta divergencia se propagará a las demás celdas.

Considerando una aproximación mediante un análisis unidimensional, considerando que la velocidad máxima no supere los 5 [m/s], un ancho de celda mínimo de 10 [cm] y un Número de Courant Máximo de 1.0, se puede estimar el intervalo de tiempo de cómputo límite que permite la convergencia del cálculo es:

$$U_x \cdot \Delta t_c / \Delta c_x < Co_{máximo} \qquad \textbf{Ec. N°8.1}$$

$$8\ [m/s] \cdot \Delta t_c / 0.1[m] < 1 \qquad \textbf{Ec. N°8.2}$$

$$\Delta t_c < 0.0125\ [s] \qquad \textbf{Ec. N°8.3}$$

Como recomendación preliminar se hubiese sugerido un Δt_c de hasta 0.0125 [s], pero para dar seguridad a la convergencia se utilizó un intervalo de tiempo de cómputo de 0.005 [s]. Con este intervalo se logró, para todos los casos y tiempo, que el Número de Courant no superase el valor de 0.6, lo cual da estabilidad en la convergencia de cálculo.

9 CONCLUSIONES

OpenFOAM® es una gran herramienta para representar el movimiento de fluidos tridimensionales, y en este trabajo fue muy útil para analizar el comportamiento de las aguas servidas que circulan dentro de la Planta Elevadora de Aguas Servidas de ESVAL S.A. ubicada en 4 Poniente con 2 Norte, en la ciudad de Viña del Mar. Dentro del análisis del funcionamiento de la planta se destacan los siguientes aspectos:

- Inicialmente se observó la presencia de tanto muros separadores entre bombas como de muros intermedios en el canal de aproximación a las bombas, y estos muros intermedios tienen la particularidad que no se mencionan en ningún catálogo o normativa como recomendación de diseño. Sin embargo, su presencia es muy valorable ya que éstos generan un aumento de la vorticidad debido a la interacción con la interfaz sólida del muro y, por ende, la turbulencia en el flujo aumenta permitiendo que los sólidos suspendidos no sedimenten y sean absorbidos por las bombas. Además, la reducción en el área transversal debido a estos muros aumenta la velocidad, favoreciendo el aumento de turbulencia.
- Tanto el uso de muros separadores entre bombas como el uso de un fondo inclinado son recomendaciones bien sugeridas tanto por fabricantes de bombas como por la normativa vigente chilena, y efectivamente estas recomendaciones sí favorecen el aumento de la vorticidad y velocidad, además que permite la canalización homogénea del fluido hacia cada bomba.
- La configuración de bombas B1 y B2 efectivamente tiene el mejor funcionamiento, ya que al tener ambas bombas una gran capacidad de succión se favorece la succión de sólidos suspendidos en proceso de sedimentación, mientras que el uso de la bomba B6 no asegura esta succión y no se recomienda su uso salvo para la circunstancia de mantención de una de las otras bombas.
- Dentro de la modelación CFD con OpenFOAM® no se pudo visualizar algún fenómeno hidráulico adverso relativo al ingreso de partículas de aire o la presencia de subpresiones que generen cavitación. El motivo de esto se puede atribuir a dos posibilidades: la resolución de mallado del sistema no era suficiente para poder identificar estos fenómenos, o efectivamente el diseño geométrico de la PEAS es tan óptimo que estos efectos adversos nunca se generan.
- Dentro de la modelación CFD realizada en la validación del modelo, se apreció que gracias al modelo se rescató el dato de tiempo efectivo de operación de la bomba, información útil a la hora de mejorar la eficiencia energética de una estación de bombeo; por lo que un modelo CFD no sólo permite obtener parámetros hidráulicos de funcionamiento, sino que, si se realiza un análisis comprensivo de los resultados, también provee información útil respecto al desempeño operacional de una obra hidráulica.

En definitiva, con respecto al funcionamiento de la PEAS, se puede concluir que el diseño de ésta incorpora muchas de las recomendaciones planteadas tanto por la normativa chilena como por los fabricantes de bombas, y efectivamente estas recomendaciones favorecen una correcta operación de la PEAS al favorecer el aumento de la vorticidad y de la velocidad para una mejor succión de los sólidos suspendidos remanentes y así tener una correcta disposición de éstos.

Con respecto a la utilización de OpenFOAM® para el desarrollo de este trabajo se puede señalar que es un software muy poderoso, que tiene una alta versatilidad para modelar diversos fenómenos hidráulicos, considerando condiciones de borde complejas. Sin embargo, esta versatilidad va de la mano con ciertas desventajas, entre las que se incluyen:

- Según las exigencias de la modelación que se vaya a realizar, se requiere un hardware sofisticado y de última generación, de lo contrario se cae en una modelación no tan detallada y que se verá mermada en resolución o en cantidad de resultados para analizar.
- El sistema de archivos de OpenFOAM® es rígido y es inmodificable, lo que significa que basta con ingresar mal el nombre de un archivo o de una variable como para que la modelación no se realice.
- El formato de archivos de OpenFOAM® es complejo y poco amigable para un usuario principiante, y la modificación de éstos mediante editor de texto tampoco permite un control y orden adecuado. Sin embargo, han salido softwares comerciales como Visual-CFD® que entregan una interfaz gráfica para trabajar OpenFOAM® de manera amigable e intuitiva.
- En general no hay mucha información para principiantes y mucha parte del trabajo se basa en prueba y error, lo que se traduce en ineficiencia y pérdida de tiempo al hacer modelaciones. Una vez que se ha trabajado y aprendido el sistema básico, se puede aspirar a la utilización de aplicaciones más sofisticadas que permitan una mejor modelación del fenómeno a analizar.

A pesar de estas desventajas, en esta memoria se detallan los procesos de modelación utilizados y que pueden significar complicaciones a usuarios principiantes de OpenFOAM®, procesos tales como:

- Generación de geometría.
- Importación de geometría a sistema nativo de OpenFOAM®.
- Generación de mallado según resolución deseada.
- Ejecutar la modelación utilizando el sistema de multiprocesos de OpenMPI® para poder utilizar todos los procesadores del equipo para disminuir tiempo de modelado.
- Utilización del software de post-proceso ParaView® y el modo de utilizaciones de las aplicaciones más esenciales.

Finalmente, a partir de este trabajo surgen nuevas interrogantes de análisis que pueden generar nuevas líneas de investigación, entre las cuales se plantean:

- Modelar fluidos con interfaz agua/aire con un tercer fluido, lo que puede representar la mezcla de hipoclorito de sodio en agua potable de tal manera de verificar que se cumpla con la concentración normativa en el menor tiempo posible.
- Con el hardware adecuado, se pueden modelar efectos de cavitación al interior de una bomba cuando la succión es más alta que el nivel de succión recomendada por el fabricante. Para esto se puede analizar una condición de borde móvil, como lo es el movimiento del rodete de la bomba.

10 REFERENCIAS

[1] INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Aguas residuales - Plantas elevadoras - Especificaciones generales. NCH2472: Of. 2000. Santiago, 2000. 13 p.

[2] FLYGT, Xylem. Engineering & Expertise, Designing pump sumps, Formed Suction Intake [en línea] <https://www.wwdmag.com/sites/wwdmag.com/files/FB159-1199_Engineering_Expertise_Pump_Sumps_Suction_Intake_sm.pdf> [consulta: 18 Enero 2018]

[3] FLYGT, Xylem. Bombas sumergibles para aguas residuales y agua bruta [en línea] <https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-26_08-19-35105910.pdf> [consulta: 18 Enero 2018]

[4] GRUNDFOS. The Sewage Pump Handbook, 2012, pp 59-73 [en línea] <http://net.grundfos.com:80/doc/webnet/waterutility/assets/downloads/sewage-handbook.pdf> [consulta: 16 Agosto 2016]

[5] FLYGT, Xylem. Engineering & Expertise, Hydraulic modeling, Computational Fluid Dynamics [en linea] <http://www.wwdmag.com/sites/wwdmag.com/files/FB160-1200_Engineering_Expertise_Hyd_Model_sm.pdf> [consulta: 18 Enero 2018]

[6] VERSTEGG, Henri K. y MALALASEKERA, Weeratunge. An introduction to Computational Fluid Dynamics. 2da edición, Longman Scientific & Technical, 1995, pp 1-18, pp 62-84.

[7] OPENFOAM Foundation, The. User Guide OpenFOAM 2.3.1, 2014.

[8] POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. Mecánica de Fluidos. 3ra edición, Thomson, 2002, pp 179-193.

[9] RODI, Wolfgang. Turbulence models and their application in hydraulics – A state of the art review. 2da edición, International Association for Hydraulic Research, 1984, pp 1-30.

[10] HEMIDA, Hassan. OpenFOAM Tutorial: Free surface tutorial using interFoam and rasInterFoam, 2008.

[11] CFD Online. Courant-Friedrichs-Lewy Condition [en línea] <http://www.cfd-online.com/Wiki/Courant–Friedrichs–Lewy_condition> [consulta: 25 Octubre 2017]

[12] CHOW, Ven Te. Hidráulica de Canales Abiertos. Mc Graw Hill, 2004, pp 39-56, pp 96-108, pp 258-259.

[13] DOMÍNGUEZ, Francisco Javier. Hidráulica. 6ta edición, Editorial Universitaria, 1999, pp 192-200, pp 321-348, pp 368-390.

[14] CFD Support. Hardware Configuration for CFD [en línea] <http://www.cfdsupport.com/Newsletter_1604_en.html> [consulta: 25 Octubre 2017]

[15] INSTITUTO Nacional de Hidráulica (Chile). Ecuaciones de Fluidos que resuelve OpenFOAM con Método de Volumen de Fluido [en línea] <http://www.inh.cl/home/documents/library/Presentaci%C3%B3n%20Open%20Foam%20INH.pdf> [consulta: 18 Enero 2018]

[16] RUSCHE, Henrik. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. London, Imperial College of Science, Technology & Medicine, Department of Mechanical Engineering.

[17] SEGURA Torres, Roy Walter. Modelación Tridimensional en software CFD de un canal con ensanche y grada de bajada. Memoria (Ingeniería Civil). Valparaíso, UTFSM, Departamento de Obras Civiles, 2013, 111h.

11 ANEXOS

11.1 Instalación de OpenFOAM®

11.1.1 Linux

En Linux se debe acceder a la terminal y ejecutar:

```
VERS=$(lsb_release -cs)

sudo sh -c "echo deb http://www.openfoam.org/download/ubuntu $VERS main
> /etc/apt/sources.list.d/openfoam.list"

sudo apt-get update

sudo apt-get install openfoam231

sudo apt-get install paraviewopenfoam410
```

Una vez ejecutado esos comandos, OpenFOAM® como el software de post-proceso ParaView® quedarán instalados para su ejecución.

11.1.2 Windows

Para Windows se debe descargar e instalar la versión más actualizada desde la página:

http://www.cfdsupport.com/openfoam-for-windows.html

Sin embargo, no se recomienda la utilización en Windows ya que el proceso es más lento y no permite la utilización de OpenMPI®, aplicación que permite la utilización de múltiples núcleos del computador.

11.2 Esquema de archivos

Tal como se señaló en la sección 7.1.2, el esquema de archivos es rígido y debe ser respetado para poder ejecutar correctamente las aplicaciones. A continuación, se explicará cada archivo que se incluye en este trabajo.

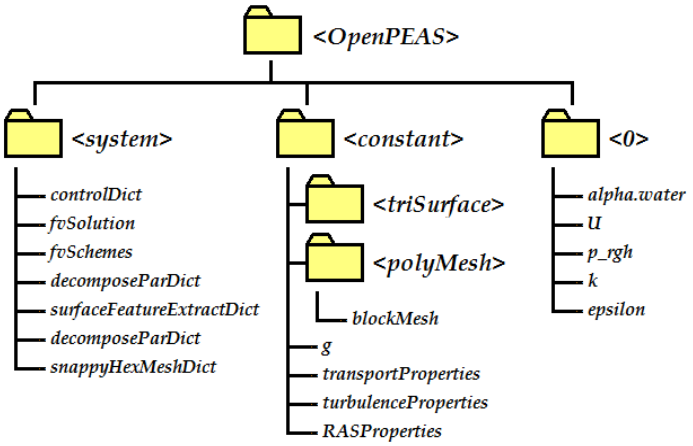

Figura N°11.1 – Esquema de archivos requerido por OpenFOAM®

11.2.1 <system>

En esta carpeta existen dos tipos de diccionarios: los de operación y los de aplicaciones. Los de operación son *controlDict*, *fvSchemes*, y *fvSolution* y son diccionarios que deben estar para cualquiera que sea la modelación, la ausencia de cualquiera de estos archivos causará que no se ejecute la modelación. Los diccionarios de aplicaciones se incluyen en función de si el usuario desea utilizar alguna aplicación adicional, como para importar mallado o la utilización de OpenMPI®.

11.2.1.1 controlDict

Este diccionario establece parámetros de control en la modelación, señalando tipo de flujo a resolver, tiempo de modelación, Δt de iteración, Δt de escritura de datos y número de decimales, entre otros parámetros.

```
application           interFoam;
startFrom             latestTime;
stopAt                endTime;
endTime               40;
deltaT                0.005;
writeControl          timeStep;
writeInterval         50;
purgeWrite            0;
writeFormat           ascii;
writePrecision        8;
writeCompression      off;
timeFormat            general;
timePrecision         6;
adjustTimeStep        no;
maxCo                 0.5;
maxAlphaCo            1;
maxDeltaT             1;
```

11.2.1.2 fvSchemes

Este diccionario señala las discretizaciones numéricas a utilizar para los distintos elementos de las ecuaciones de transporte de la mecánica de fluidos.

```
ddtSchemes
{
    default         Euler;
}
gradSchemes
{
    default         Gauss linear;
}
divSchemes
{
    div(rhoPhi,U)    Gauss linearUpwind grad(U);
    div(phi,alpha)   Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha) Gauss linear;
    div(phi,k)       Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) Gauss upwind;
    div((muEff*dev(T(grad(U))))) Gauss linear;
}
laplacianSchemes
{
    default         Gauss linear corrected;
}
```

```
interpolationSchemes
{
    default         linear;
}
snGradSchemes
{
    default         corrected;
}
fluxRequired
{
    default         no;
    p_rgh;
    pcorr;
    alpha.water;
}
```

11.2.1.3 fvSolution

Este diccionario establece los algoritmos numéricos a utilizar para cada variable de interés. Además, permite señalar coeficientes de convergencia, parámetros de tolerancia, factores de corrección entre otros.

```
solvers
{
    "alpha.water.*"
    {
        nAlphaCorr      2;
        nAlphaSubCycles 1;
        cAlpha          1;
        MULESCorr       yes;
        nLimiterIter    3;
        solver          smoothSolver;
        smoother        symGaussSeidel;
        tolerance       1e-8;
        relTol          0;
    }
    pcorr
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-5;
        relTol          0;
    }
    p_rgh
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-07;
        relTol          0.05;
    }
    p_rghFinal
    {
        $p_rgh;
        relTol          0;
    }
    "(U|k|epsilon).*"
    {
        solver          smoothSolver;
        smoother        symGaussSeidel;
        tolerance       1e-06;
        relTol          0;
```

```
            minIter         1;
        }
    }
    PIMPLE
    {
        momentumPredictor   no;
        nOuterCorrectors    1;
        nCorrectors         3;
        nNonOrthogonalCorrectors 0;
    }
    relaxationFactors
    {    equations
        {   ".*"                1;  }
}
```

11.2.1.4 decomposeParDict

Este diccionario permite indicar el número de núcleos que tiene el equipo y los distribuye para poder trabajar con múltiples procesadores simultáneos mediante OpenMPI®.

```
    numberOfSubdomains    4; // # of núcleos del CPU
    method                simple;
    simpleCoeffs
    {
        n               ( 2 2 1 ); // La multiplicación de los 3 N°s = # núcleos
        delta           0.001;
    }
    hierarchicalCoeffs
    {
        n               ( 1 1 1 );
        delta           0.001;
        order           xyz;
    }
    manualCoeffs
    {
        dataFile        "cellDecomposition";
}
```

11.2.1.5 surfaceFeatureExtractDict

Este diccionario detecta los diversos archivos STL que se obtuvieron de AutoCAD® de la geometría y los intersecta con el mallado inicial que se genera con la aplicación *blockMesh* que se explica en 11.2.2.6.1. Estos archivos STL se deben ubicar en */constant/triSurface*.

```
    geo.stl
    {
        extractionMethod    extractFromSurface;
      extractFromSurfaceCoeffs
        {
      includedAngle   150;
        }
        writeObj                yes;
    }
    inl.stl
    {
        extractionMethod    extractFromSurface;
      extractFromSurfaceCoeffs
        {
      includedAngle   150;
        }
        writeObj                yes;
```

```
    }
    out6.stl
    {
        extractionMethod    extractFromSurface;
       extractFromSurfaceCoeffs
        {
       includedAngle   150;
        }
        writeObj                yes;
    }

    out2.stl
    {
        extractionMethod    extractFromSurface;
       extractFromSurfaceCoeffs
        {
       includedAngle   150;
        }
        writeObj                yes;
    }

    out1.stl
    {
        extractionMethod    extractFromSurface;
       extractFromSurfaceCoeffs
        {
       includedAngle   150;
        }
        writeObj                yes;
    }

    atm.stl
    {
        extractionMethod    extractFromSurface;
       extractFromSurfaceCoeffs
        {
       includedAngle   150;
        }
        writeObj                yes;
}
```

11.2.1.6 snappyHexMeshDict

Este diccionario interpreta la intersección geometría/mallado de *surfaceFeatureExtractDict* y la refina para tener un mallado apropiado. La configuración de este diccionario es compleja, ya que consiste en:

- Configurar mallado de hexaedros: primero sólo se acomodan hexaedros dentro de la geometría a analizar, todos de un mismo tamaño. Claramente esta etapa requiere un refinamiento cuando hay geometrías curvas.
- Configurar ajuste de hexaedros: Esta etapa consiste en modificar la forma de los hexaedros para ajustarse a las superficies. Además, se pueden dar distintos tamaños de malla en función de la distancia al sólido en cuestión.
- Configurar capas: A pesar que está configuración no se utilizó en esta memoria, ésta permite la incorporación de capas curvas en sólidos de formas muy complejas (por ejemplo un avión).

```
// Abreviación: P.D = por defecto (no alterado)

// Paso 1: Definir procesos de refinación de mallado

castellatedMesh true;      // Mallado refinado sólo de hexaedros (cubos)
snap            true;      // Mallado refinado cortando y alterando hexaedros;
                           // en caso de ser una geometría cúbica, se recomienda
                           // dejar en 'false'.
addLayers       false;     // Agrega capas que refinan bien mallas muy curvas
debug               0;     // Permite guardar archivos de mallado para verificar
                           // el avance. "0" sólo guarda el mallado final.
mergeTolerance      1E-5;  // Es la tolerancia de convergencia. Debe ser menor
                           // que la tolerancia de escritura en controlDict

// Paso 2: Llamar los archivos con la geometría

geometry
{
       // Para los archivos, se recomienda type triSurfaceMesh.
       // Y de nombre el que uno estime conveniente
       // Geo.stl está compuesto de varios STL unidos, por lo tanto, se separa en
       // regiones para poder refinar de mejor manera las mallas
       geo.stl {type triSurfaceMesh;
                     name geo;
                     regions
                     {
                           tub          // Nombre dentro de Geo.stl
                           {
                                 name tub;    // Nuevo nombre de parche (patch)
                           }
                           mext
                           {
                                 name mext;
                           }
                           mint1
                           {
                                 name mint1;
                           }
                           mint2
                           {
```

```
                                        name mint2;
                                }
                                los
                                {
                                        name los;
                                }
                        }
                }
        inl.stl                 {type triSurfaceMesh; name inl;}
        out6.stl                {type triSurfaceMesh; name out6;}
        out2.stl                {type triSurfaceMesh; name out2;}
        out1.stl                {type triSurfaceMesh; name out1;}
        atm.stl                         {type triSurfaceMesh; name atm;}
        volume.stl              {type triSurfaceMesh; name volume;}
};

// Paso 3: Configurar el primer mallado (castellatedMesh) sólo de hexaedros

castellatedMeshControls
{
// Paso 3.1

    maxLocalCells 1000000;// # máx de celdas por CPU (P.D)
    maxGlobalCells 2000000;      // # máx de celdas (P.D) (antes de borrar)
    minRefinementCells 100;      // # de celdas malas que se permite no refinar.
                                 // Mientras más grande, menos iteraciones hace.
    maxLoadUnbalance 0.10;// Da holgura al balance durante la refinación
                          // Si es cero, todo debe balancearse.
    nCellsBetweenLevels 1;  // Es el número de capas entre niveles de refinación
                            // usado en el paso 3.2

// Paso 3.2
// A continuación se explicita cuán refinado debe estar (sólo con hexaedros)
// cada elemento geométrico que se importó.

    features // Aquí se les da el nivel de refinación a cada archivo *.eMesh
             // creado con el comando 'surfaceFeatureExtract'
    (
        {file "geo.eMesh"; level 1;}          // El nivel va de 0 a 3
        {file "inl.eMesh"; level 1;}
        {file "out6.eMesh"; level 1;}
        {file "out2.eMesh"; level 1;}
        {file "out1.eMesh"; level 1;}
        {file "atm.eMesh"; level 1;}
    );

// Paso 3.3
// Aquí se da un nivel de refinación (mín y máx) a cada elemento generado
// en el paso 2. El nivel mínimo generalmente es aplicado en la superficie
// y el nivel máximo en aquellas celdas que contengan intersecciones en un
// ángulo mayor que el definido por 'resolveFeatureAngle' definido más abajo

    refinementSurfaces
    {
    geo      {level (1 1);}
    inl      {level (1 1);}
    out6     {level (1 1);}
    out2     {level (1 1);}
    out1     {level (1 1);}
    atm      {level (1 1);}
    }

    resolveFeatureAngle 100;  // Ángulo al cual se aplicará máximo refinamiento
```

```
    refinementRegions         // Aquí se establece cómo se refinará a medida que
                              // se acercan las celdas a la superficie. Se deben
                              // establecer en orden ascendente (dist(m)-nivel)
                              // donde el ancho del nivel 0 se define en el
                              // archivo "blockMesh"
    {volume {mode distance; levels ((20 2));}}
    locationInMesh (12 143 5); // Punto que define qué sector se utilizará. En
                               // este caso, se usa un punto dentro de la PEAS
                              // para que elimine todo mallado fuera de la PEAS.
    allowFreeStandingZoneFaces true; // Indica si permite zonas sin borde.
}
// Paso 4: Configurar el segundo mallado (snap) que corta los hexaedros y
//  refina más el mallado.

snapControls
{
    nSmoothPatch    3;     // # de iteraciones de suavizado antes de verificar
                           // si hay correspondencia con la superficie (P.D)
    tolerance       4.0;   // Distancia relativa entre mallado y la superficie
                           // Mientras más chico, más preciso. (P.D)
    nSolveIter      30;    // # de iteraciones para desplazar el corte (P.D)
    nRelaxIter      5;     // # máx de iteraciones de corte de malla (P.D)
    nFeatureSnapIter 15;   // # de iteraciones de transformación de malla
                           // dentro de las iteraciones de corte de malla para
                           // acercar la malla a la superficie (P.D)
    implicitFeatureSnap false;         // Detecta geometría automáticamente,
                                       // pero ya se usó 'surfaceFeatureExtract'
      explicitFeatureSnap true;        // Mejora la detección de geometría
      multiRegionFeatureSnap false;    // Detecta geometría entre múltiples
                                       // superficies. (P.D)
}

// Paso 5: Configurar la adición de capas en el mallado para geometría (patch)
// (No se utilizó)

addLayersControls
{
    relativeSizes true; // Las capas tendrán tamaños relativos a la distancia
    layers                      // Se indica la cantidad de capas por patch
    {
        tub
        {
            nSurfaceLayers 3;
        }
        muroext
        {
            nSurfaceLayers 3;
        }
        muroint
        {
            nSurfaceLayers 3;
        }
        losa
        {
            nSurfaceLayers 3;
        }
    }

    expansionRatio 1.0;          // Factor de crecimiento de capas
    finalLayerThickness 0.05;    // Ancho de la capa más externa
    minThickness 0.01;           // Mínimo ancho de capa
    nGrow 1;                     // Si no se unen los puntos, se hacen nGrow
                                 // capas extras para extruir la capa.
```

```
    featureAngle                 90;    // Ang. al cual la sup. no se extruye
    nRelaxIter                   3;     // # máx de it. para relajar la malla
    nSmoothSurfaceNormals        1;     // # de it. en superficies normales (P.D)
    nSmoothNormals               3;     // # de it. de suavizado en dirección del
                                        // movimiento.
    nSmoothThickness             10;    // Ancho suavizado de capa sobre patches
                                        // (P.D)
    maxFaceThicknessRatio 0.5;   // Máx razón de ancho para capas con celdas
                                 // extremadamente curvadas (P.D)
    maxThicknessToMedialRatio 0.3; // Máx razón entre ancho y distancia medial
                                 // para reducir crecimiento de capa (P.D)
    minMedianAxisAngle    130;   // Ang. usado para determinar ejes mediales
                                 // (P.D)
    nBufferCellsNoExtrude 0;     // Crea región para terminaciones. (P.D)
    nLayerIter            40;    // # máx de it para añadir capas.
}


// Aqui vienen configuraciones avanzadas de mallado. Se dejaron todas por
// defecto al no haber gran detalle en qué son y cómo cambia el mallado.

meshQualityControls
{
    maxNonOrtho 65;
    maxBoundarySkewness 20;
    maxInternalSkewness 4;
    maxConcave 80;
    minFlatness 0.5;
    minVol 1e-13;
    minTetQuality 1e-9;
    minArea -1;
    minTwist 0.05;
    minDeterminant 0.001;
    minFaceWeight 0.05;
    minVolRatio 0.01;
    minTriangleTwist -1;
    nSmoothScale 4;
    errorReduction 0.75;
}
```

11.2.1.7 setFieldsDict

Este diccionario permite dar otras condiciones de borde que no se relacionan con algún elemento de borde. Como ejemplo, para este trabajo se utilizó este diccionario para imponer un nivel de agua (*alpha.water*) y llenar las tuberías con agua para la condición inicial.

```
defaultFieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.water 0
);
regions
(
    boxToCell
    {
        box (-5 130 -5) (30 150 2.9);
        fieldValues
        (
            volScalarFieldValue alpha.water 1
        );
    }
   cylinderToCell
   {
          p1     (8.156 146.174 -1);
          p2     (8.156 146.174 15);
          radius 0.37;
          fieldValues
          (
                 volScalarFieldValue alpha.water 1
          );
   }
   cylinderToCell
   {
          p1     (8.156 143.7 -1);
          p2     (8.156 143.7 15);
          radius 0.37;
          fieldValues
          (
                 volScalarFieldValue alpha.water 1
          );
   }
);
```

11.2.2 <constant>

En esta carpeta se incluyen todos los archivos que dan propiedades físicas y geométricas para la modelación numérica.

11.2.2.1 g

Este archivo da la propiedad de la gravedad, indicando su magnitud y dirección.

```
dimensions      [0 1 -2 0 0 0 0];
value           (0 0 -9.81);
```

11.2.2.2 transportProperties

Este archivo entrega las propiedades físicas de los fluidos que se están analizando. En este caso se da la densidad, la viscosidad cinemática y la tensión superficial del agua y aire.

```
phases (water air);
water
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ]  1e-06;
    rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1000;
}
air
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ]  1.48e-05;
    rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1;
}
sigma        sigma [ 1 0 -2 0 0 0 0 ] 0.07; //tension superficial agua/aire
```

11.2.2.3 turbulenceProperties

Este archivo sólo indica si se utilizará o no un modelo de turbulencia.

```
simulationType  RASModel;
```

11.2.2.4 RASProperties

Este archivo permite la elección del modelo de turbulencia.

```
RASModel        kEpsilon;
turbulence      on;
printCoeffs     off;
```

11.2.2.5 <triSurface>

Esta carpeta incluye todos los archivos STL exportados de AutoCAD®. Si estos archivos no están en esta carpeta, no se podrá importar la geometría y mallado a formato OpenFOAM®.

11.2.2.6 <polyMesh>

Esta carpeta contendrá todas las propiedades del mallado que finalmente se utilice. Además, en esta carpeta se encuentra el archivo *blockMesh*.

11.2.2.6.1 blockMesh

Este archivo define un mallado inicial grueso, que permita la intersección de la geometría de los archivos STL para su posterior refinamiento. El mallado inicial corresponde a un paralelepípedo para el cual se definieron sus vértices, caras y aristas en el formato que exige OpenFOAM®. Las caras que se definen como MaxX o MinY se deben tener en consideración a la hora de importar la geometría.

```
convertToMeters 1;
vertices
(
    (-1 139 -1) //0
    (24 139 -1) //1
    (24 149 -1) //2          //     X            Y            Z
    (-1 149 -1) //3          //MIN  0            140          0
    (-1 139 13) //4          //MAX  23           148          11
    (24 139 13) //5
    (24 149 13) //6
    (-1 149 13) //7
);
Blocks // Según el ancho del bloque a considerar y el número de celdas por
       // eje que se definen en (65 25 35) se establece el ancho de celda del
       // nivel 0 de snappyHexMesh. En este caso es igual a 40cm, por lo que
       // nivel 1 = 20cm y nivel 2 = 10cm.
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (65 25 35) simpleGrading (1 1 1)
);
edges
(
);
patches //Estos patches se deben eliminar de Boundary, después de importar
        //la malla mediante snappyHexMesh.
(
   patch maxY
   (
         (3 7 6 2)
   )
   patch minX
   (
         (0 4 7 3)
   )
   patch maxX
   (
         (2 6 5 1)
   )
   patch minY
   (
         (1 5 4 0)
   )
   patch minZ
   (
         (0 3 2 1)
   )
   patch maxZ
   (
         (4 5 6 7)
   )
);
mergePatchPairs
(
```

```
);
```

11.2.3 <0>

Esta carpeta, también conocida como *time directory*, tiene su nombre en función del tiempo inicial a considerar en la modelación. Si se llama “0” (cero), la modelación partirá en t=0. Esta carpeta, incluye todas las condiciones de borde asociadas a algún elemento de borde.

11.2.3.1 alpha.water

Este archivo indica qué elementos de borde están o no con agua.

```
dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];
internalField   uniform 0;
boundaryField
{
    los
    {
        type            zeroGradient;
    }
    mext
    {
        type            zeroGradient;
    }
    mint1
    {
        type            zeroGradient;
    }
    mint2
    {
        type            zeroGradient;
    }
    tub
    {
        type            zeroGradient;
    }
    in1
    {
        type            variableHeightFlowRate;
        lowerBound      0.0;
        upperBound      0.9;
        value           uniform 0;
    }
    out6
    {
        type            zeroGradient;
    }
    out2
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 1;
    }
    out1
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 1;
    }
    atm
    {
        type            zeroGradient;
```

```
        }}
```

11.2.3.2 U

Este archivo da las condiciones de borde de velocidad para los distintos elementos de borde.

```
    dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
    internalField   uniform (0 0 0);
    boundaryField
    {
        inl
        {
            type            variableHeightFlowRateInletVelocity;
            flowRate        2.196;
            alpha           alpha.water;
            value           uniform (0 0 0);
        }
        tub
        {
            type            fixedValue;
            value           uniform (0 0 0);
        }
        mint2
        {
            type            fixedValue;
            value           uniform (0 0 0);
        }
        mint1
        {
            type            fixedValue;
            value           uniform (0 0 0);
        }
        mext
        {
            type            fixedValue;
            value           uniform (0 0 0);
        }
        los
        {
            type            fixedValue;
            value           uniform (0 0 0);
        }
        out1
        {
            type            flowRateInletVelocity;
            volumetricFlowRate    constant -1.098; // m3/s, negative sign means
out of the domain
            value           uniform (0 0 0);
        }
        out2
        {
            type            flowRateInletVelocity;
            volumetricFlowRate    constant -1.098; // m3/s, negative sign means
out of the domain
            value           uniform (0 0 0);
        }
        out6
        {
            type            fixedValue;
            value           uniform (0 0 0);
        }
        atm
        {
```

```
            type            pressureInletOutletVelocity;
            value           uniform (0 0 0);
        }}
```

11.2.3.3 p_rgh

Este archivo da las condiciones de borde de presión en (Pa) para los distintos elementos de borde.

```
    dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];
    internalField   uniform 0;
    boundaryField
    {
        los
        {
            type            fixedFluxPressure;
            value           uniform 0;
        }
        mext
        {
            type            fixedFluxPressure;
            value           uniform 0;
        }
        mint1
        {
            type            fixedFluxPressure;
            value           uniform 0;
        }
        mint2
        {
            type            fixedFluxPressure;
            value           uniform 0;
        }
        tub
        {
            type            fixedFluxPressure;
            value           uniform 0;
        }
        atm
        {
            type            totalPressure;
            p0              uniform 0;
            U               U;
            phi             phi;
            rho             rho;
            psi             none;
            gamma           1;
            value           uniform 0;
        }
        inl1
        {
            type            zeroGradient;
        }
        out1
        {
            type            zeroGradient;
        }
        out2
        {
            type            zeroGradient;
        }
        out6
```

```
        {
            type            zeroGradient;
        }
    }
```

11.2.3.4 k

Este archivo da las condiciones de borde iniciales para “kappa” del modelo de turbulencia.

```
dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField   uniform 0.1;
boundaryField
{
   los
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }
   mext
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }
   mint1
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }
   mint2
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }
   tub
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }
     atm
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }
     in1
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }
     out6
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }
     out2
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }
     out1
     {
         type            kqRWallFunction;
         value           uniform 0.1;
     }}
```

11.2.3.5 epsilon

Este archivo da las condiciones de borde iniciales para epsilon, del modelo de turbulencia.

```
dimensions      [0 2 -3 0 0 0 0];
internalField   uniform 0.1;
boundaryField
{
    los
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
        E               9.8;
    }
    mext
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
        E               9.8;
    }
    mint1
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
        E               9.8;
    }
    mint2
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
        E               9.8;
    }
    tub
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
        E               9.8;
    }
    inl
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
        E               9.8;
    }
    out6
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
```

```
        E               9.8;
    }
    out2
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
        E               9.8;
    }
    out1
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
        E               9.8;
    }
    atm
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 0.1;
        Cmu             0.09;
        kappa           0.41;
        E               9.8;
    }}
```

11.3 Procedimientos y comandos

11.3.1 Importación de geometría

La configuración de diccionarios está en el punto 11.2 y la importación se realiza como:

1. Dejar todos los archivos STL (en ASCII) en la carpeta /constant/triSurface y generar un nuevo STL que corresponde a la unión consecutiva de todos los STL generados de AutoCAD. Se denomina a este nuevo archivo *volume.stl*.
2. Para evitar el borrado de archivos, se recomienda respaldar la carpeta */0*.
3. Configurar el diccionario *blockMeshDict* en /constant/polyMesh con un paralelepípedo que contenga todas las coordenadas de la geometría, tal como se puede visualizar en la Figura N°7.5 – Importación STL e intersección con mallado grueso.Figura N°7.5. Para esto, se recomienda evaluar los máximos y mínimos para los tres ejes coordenados en el archivo *volumen.stl*.
4. En la terminal de Linux, se dirige a la carpeta contenedora de todos los archivos, en este caso se denomina *OpenPEAS*.
5. En la terminal de Linux, se ejecuta el comando *blockMesh*. Con esto se generará un primer mallado que abarca toda la geometría.
6. En la terminal de Linux, ejecutar el comando *surfaceFeatureExtract*, con lo cual se indica que el mallado anterior se intersectará con la geometría de los archivos STL.
7. En la terminal de Linux, ejecutar el comando *decomposeParDict*, con lo cual se dividirá el número de celdas a mallar en el número de núcleos que tiene el equipo.
8. En la terminal de Linux, ejecutar *mpirun –np N snappyHexMesh –overwrite –parallel*, con esto se generará el mallado deseado dividido en N núcleos trabajando en paralelo. La duración de

este paso puede variar significativamente en función de la complejidad del mallado y del computador mismo; para este caso el proceso dura alrededor de una hora.

9. En la terminal de Linux, ejecutar *reconstructParMeshDict –constant*, con lo que arma el mallado que se hizo separadamente en los distintos procesadores y la reconstruye en la carpeta /constant/polyMesh.
10. Borrar carpetas "*processor*" generadas en el directorio principal.
11. Reconfigurar el archivo *boundary* ubicado en /constant/polyMesh, poniendo cuidado de sólo dejar los elementos reales de la geometría y no los elementos del paralelepípedo creado en el paso N°3 (ver sección 11.2.2.6.1).

11.3.2 Ejecución del modelo

Para poder ejecutar el modelo se procede a:

1. En la terminal de Linux, se dirige a la carpeta contenedora de todos los archivos, en este caso se denomina *OpenPEAS*.
2. Se ejecuta el comando *setFields*, para incluir condiciones de borde extra.
3. Se ejecuta el comando *decomposePar*, para descomponer el modelado en el número de núcleos del procesador.
4. Se ejecuta el comando *mpirun –np 4 interFoam -parallel,* para resolver el problema. Según el tamaño de mallado, Δt seleccionado y complejidad del modelo se demorará en procesar.
5. Una vez terminada la modelación, se reconstruye el modelo con *reconstructPar*.
6. Se borran las carpetas "*processor*" generadas en el directorio principal.
7. Se ejecuta el comando *paraFoam* para post-procesar el modelo mediante ParaView®.

11.3.3 Funciones de postproceso

En el software ParaView® se utilizaron las siguientes aplicaciones para poder generar las imágenes de resultados.

11.3.3.1 Filtrado por umbral (*Threshold*)

Esta utilidad permite filtrar cualquier variable entre un rango (umbral) a elegir por el usuario. Para efectos de esta memoria se procedió a filtrar según la cantidad (%) de agua presente en las celdas lo cual se ve representado en la variable $alpha.water$, de tal manera de poder visualizar sólo el entorno de agua y no el de agua/aire; para dar contexto al filtrado, se presentan tres casos:

- Sin filtrado: Se aprecia la variable de interés en todo el dominio, es decir, para todos los valores de $alpha.water$ donde puede ser aire ($\alpha = 0$) o agua ($\alpha = 1$).

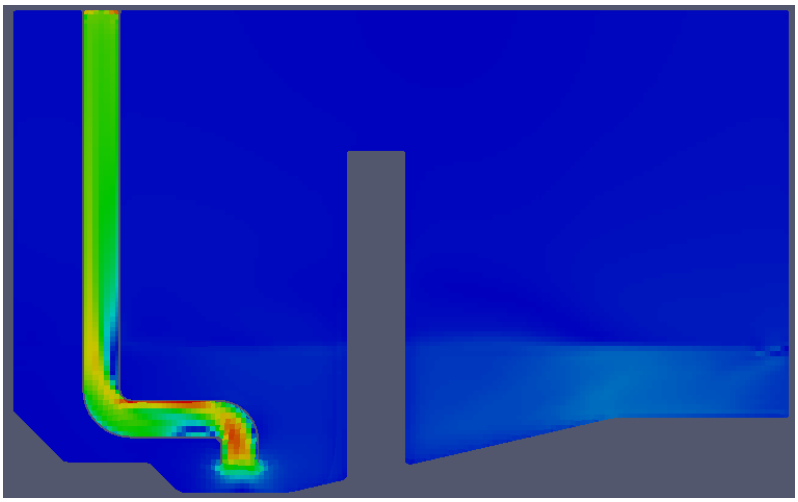

Figura N°11.2 – Corte sin filtrado vía Threshold.

- Filtrado: Dado que el mallado no es tan fino como para poder identificar una única burbuja, se hace necesario filtrar un rango de valores de $alpha.water$ para poder visualizar la presencia de agua. En el caso de este trabajo, se propone trabajar con un valor mínimo de $alpha.water$ igual a 0.7, lo que significa que se muestran celdas que tienen hasta un 70% de agua (o un 30% de aire), particularmente para la visualización de presencia de aire también se aplicó este mismo valor mínimo de filtrado, pero el rango de colores permite detectar presencia de aire hasta en un 10% dentro de una celda con color celeste/cyan (por ejemplo ver Figura N°11.9 en el Anexo de Resultados). Como valor máximo, se propone un valor de 1.0. Sin embargo, OpenFOAM® ha reportado que en la modelación algunos valores sobrepasan la unidad y los efectos de poner un valor máximo de 1.0 implica perder parte de la información, tal como se aprecia en la Figura N°11.3.

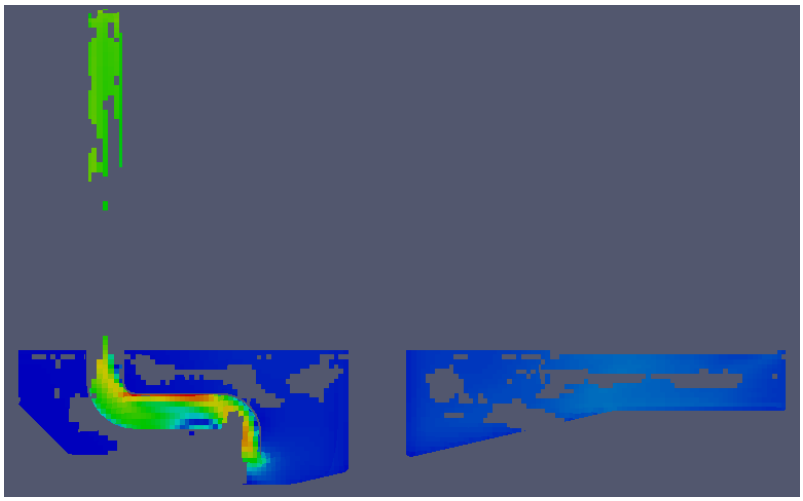

Figura N°11.3 – Corte con filtrado vía Threshold.

- Filtrado extra: Aplicando un filtro para valores de $alpha$ entre 0.7 y 1.1 se logra incluir todas las celdas donde sí existe agua.

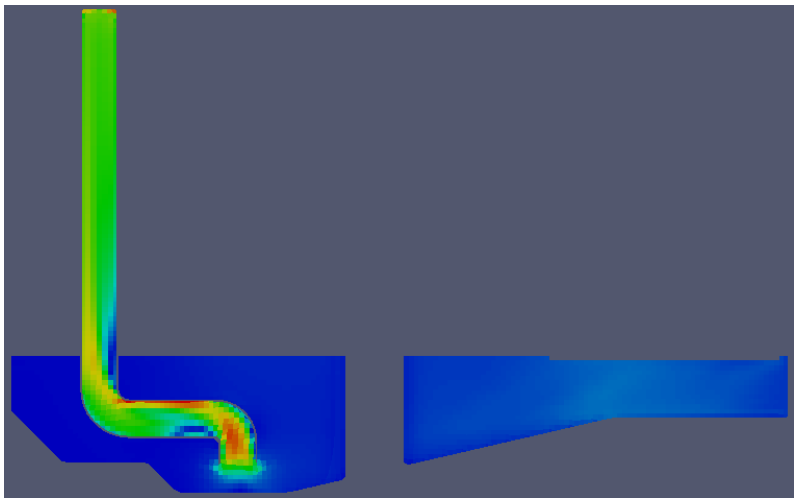

Figura N°11.4 – Corte sin filtrado vía Threshold.

El esquema de filtrado utilizado en este trabajo es el tercero, ya que por efectos de modelación hay valores de $\alpha lpha.water$ (presencia de agua) que se escapan del 100% y basta con considerarlos al extender un poco el umbral.

11.3.3.2 Cortes (*Slice*)

Esta utilidad permite generar cortes según lo que se desee, para esta memoria se generaron cinco cortes según lo señalado en el punto 8.1.2. El método de corte se puede realizar a mano alzada indicando con el *mouse* dónde se desea el corte, o dando coordenadas para generar el vector normal al corte deseado.

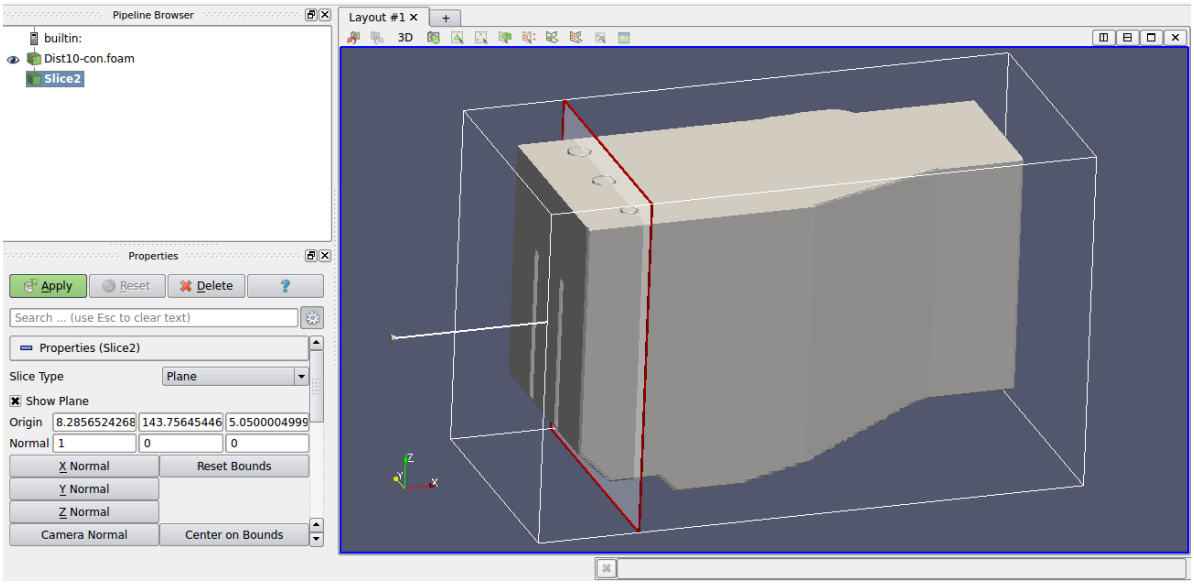

Figura N°11.5 – Slice en ParaView

Como observación, se recomienda generar el corte a la capa de filtrado por umbral (*threshold*) para evitar tener que hacer un filtrado para cada corte.

11.3.3.3 Texto (Text) y Texto 3D (*3D Text*)

Existen dos aplicaciones que permiten introducir texto en la vista, la primera permite introducir un texto en la pantalla de manera simple, rápida e intuitiva, pero con la limitante que debe ser reubicada cada vez que se desee su aparición. Texto 3D permite introducir texto mediante coordenadas, indicando el vector normal al plano del texto para saber hacia dónde será legible, y parámetros de escala y giro para una mejor ubicación. En definitiva, *Text 3D* es menos intuitivo, pero más completo.

11.3.3.4 Calculadora (*Calculator*)

Corresponde a una aplicación muy útil, que permite la generación de nuevos componentes a partir de los resultados ya definidos. Por ejemplo, usando las componentes X e Y de la velocidad, se pueden sumar vectorialmente para generar la velocidad sólo en el plano XY. Esta aplicación es amigable ya que efectivamente se presenta una calculadora con botones que permiten elegir variables y operaciones (escalares y vectoriales).

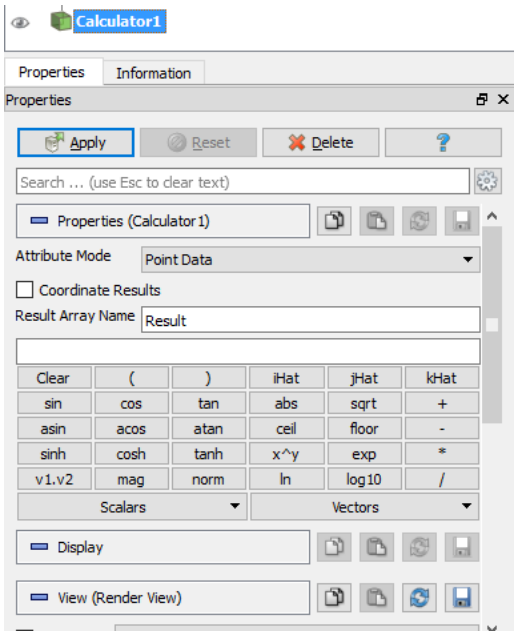

Figura N°11.6 – Vista de Calculadora en *ParaView*

11.3.3.5 Selección de vistas (*Views*)

Esta utilidad permite guardar vistas (zoom y ubicación), de tal manera de generar siempre las mismas vistas para todos los casos, independiente si se cierra el programa.

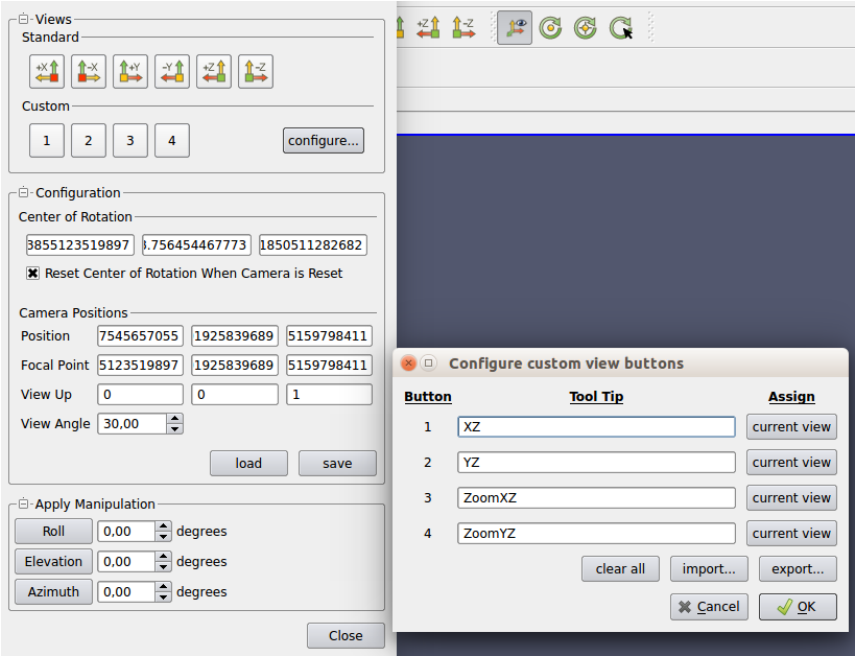

Figura N°11.7 – Configuración de Vistas en *ParaView*

11.3.3.6 Generación de vectores (*Glyph*)

La aplicación de generación de vectores es bastante completa y permite generar campos vectoriales tridimensionales considerando variables tridimensionales nativas de OpenFOAM® (velocidad y vorticidad) como también variables tridimensionales artificiales obtenidas mediante la aplicación *Calculator* de *ParaView*, lo que permitiría generar campos de vectores bidimensionales.

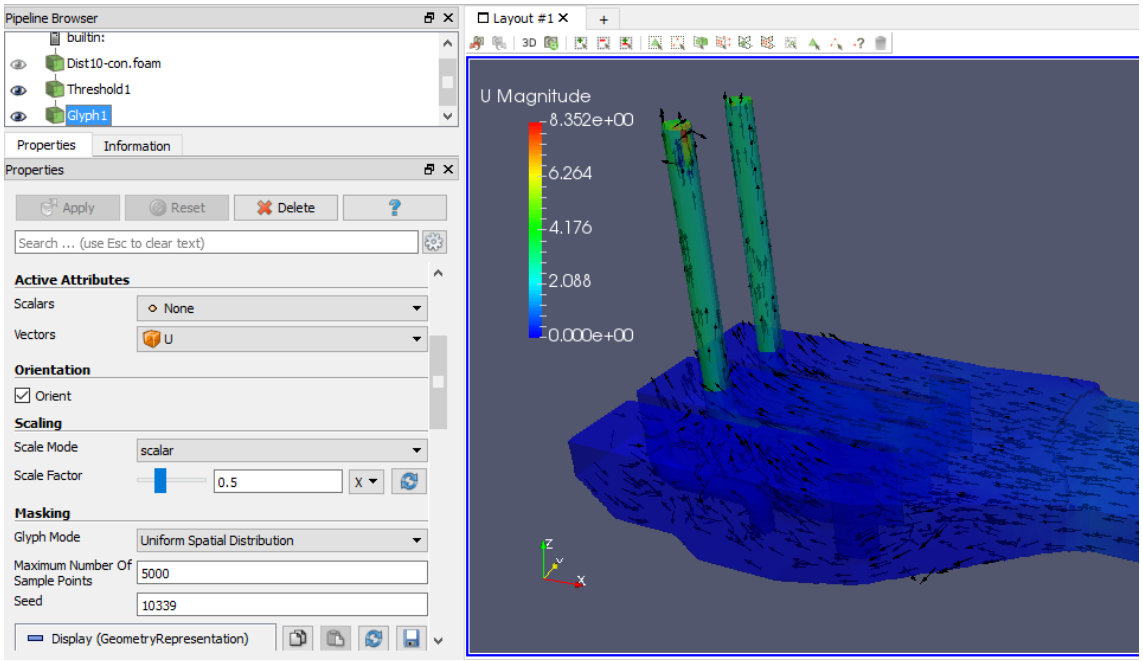

Figura N°11.8 – Vista del Generador de Vectores *Glyph* en *ParaView*

11.4 Resultados de modelación

Tal como se señaló en el punto 8.1.1, los resultados se distribuyen en los siguientes escenarios:

- Mallado grueso:
  - Operación de bombas 1 y 2.
    - Caso con muros separadores e intermedios.
    - Caso con sólo muros separadores.
    - Caso sin muros separadores ni intermedios.
- Mallado fino:
  - Operación de bombas 1 y 2.
    - Caso con muros separadores e intermedios.
    - Caso con sólo muros separadores.
    - Caso sin muros separadores ni intermedios.
  - Operación de bombas 1 y 6.
    - Caso con muros separadores e intermedios.
  - Operación de bombas 2 y 6.
    - Caso con muros separadores e intermedios.

11.4.1 Mallado grueso

11.4.1.1 Operación de bombas 1 y 2

11.4.1.1.1 Muros separadores e intermedios

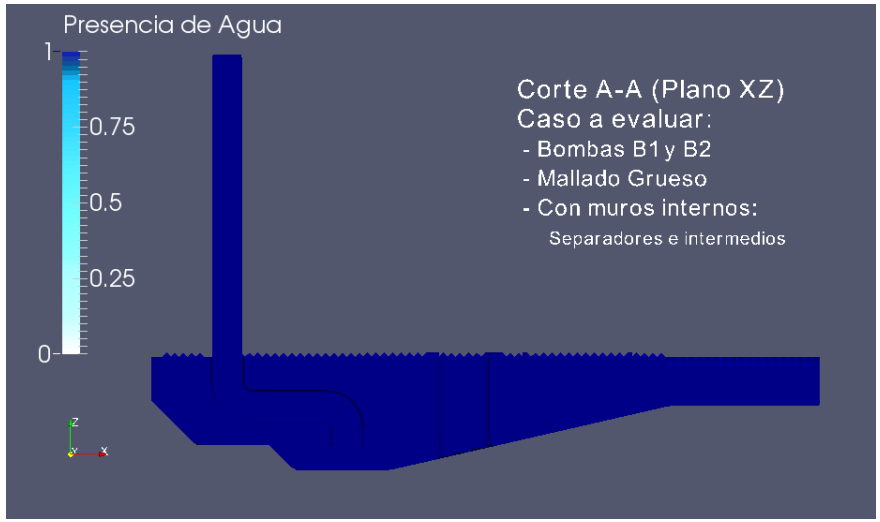

Figura N°11.9 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A

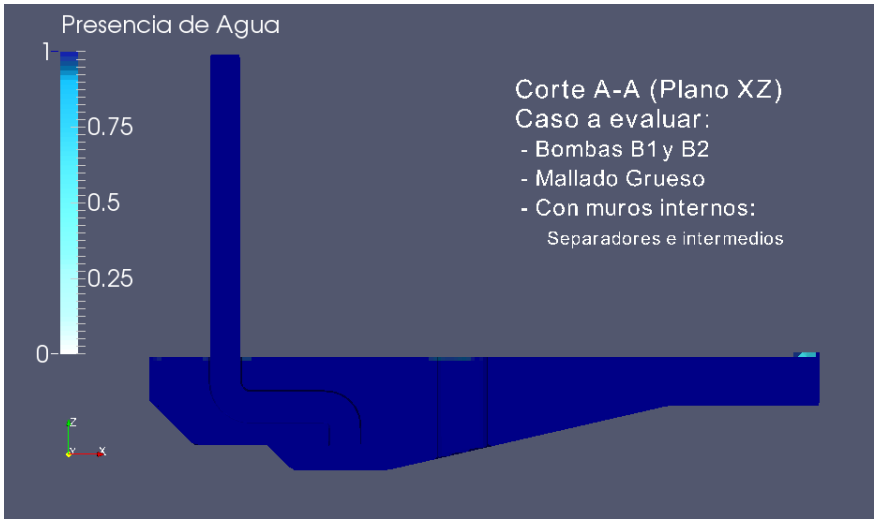

Figura N°11.10 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A

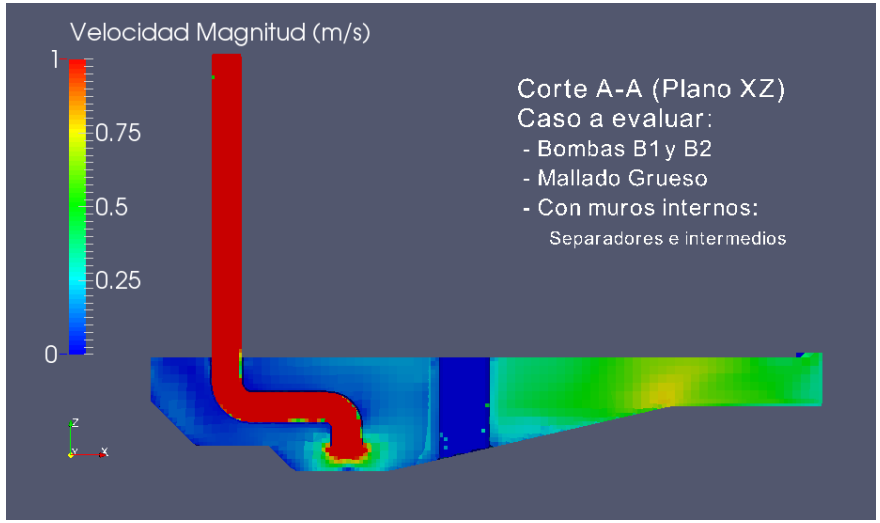

Figura N°11.11 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala

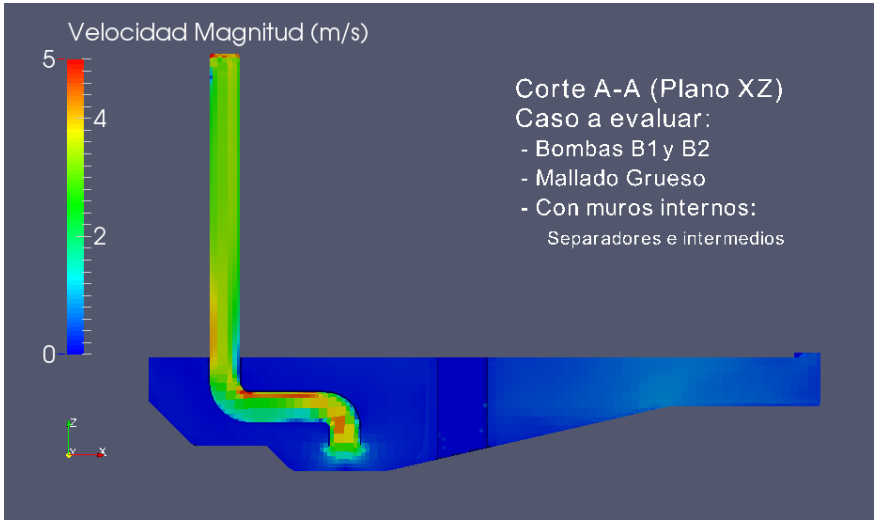

Figura N°11.12 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala

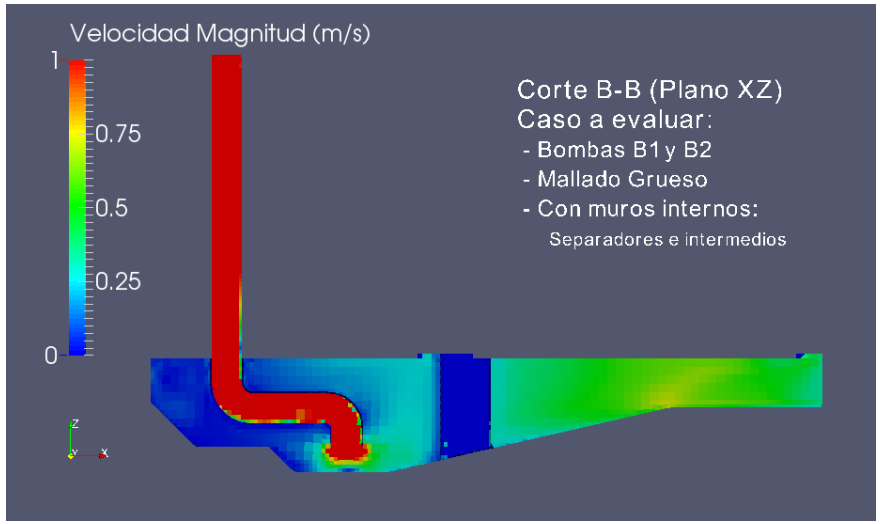

Figura N°11.13 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala

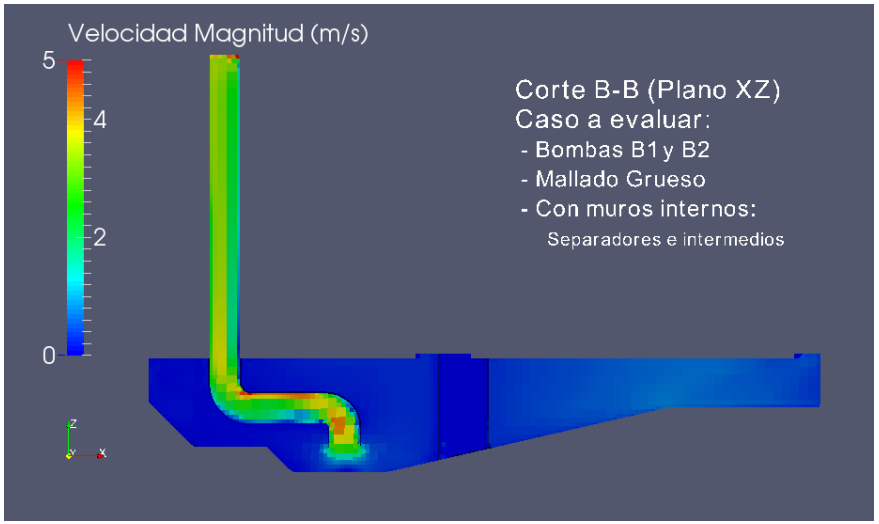

Figura N°11.14 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala

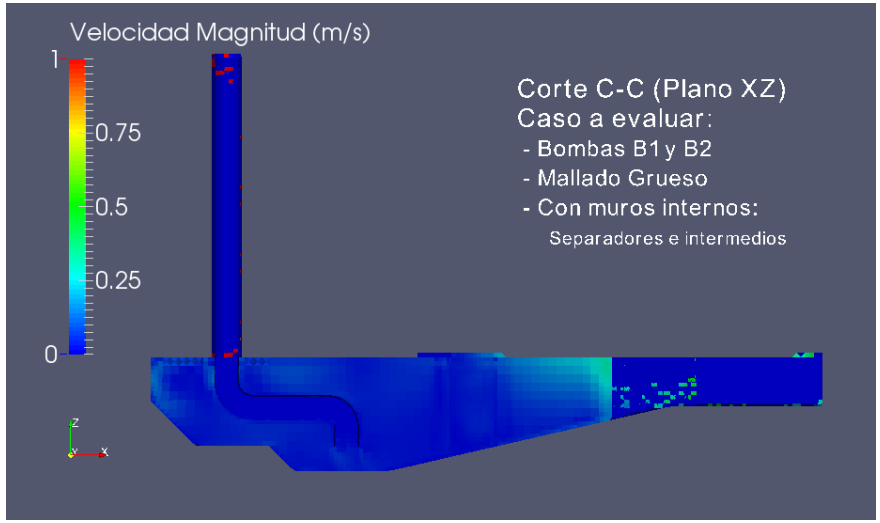

Figura N°11.15 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala

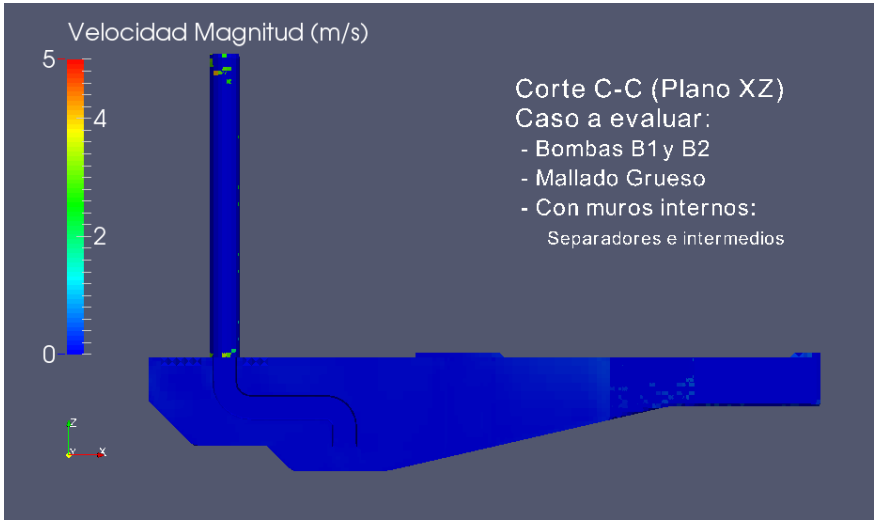

Figura N°11.16 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala

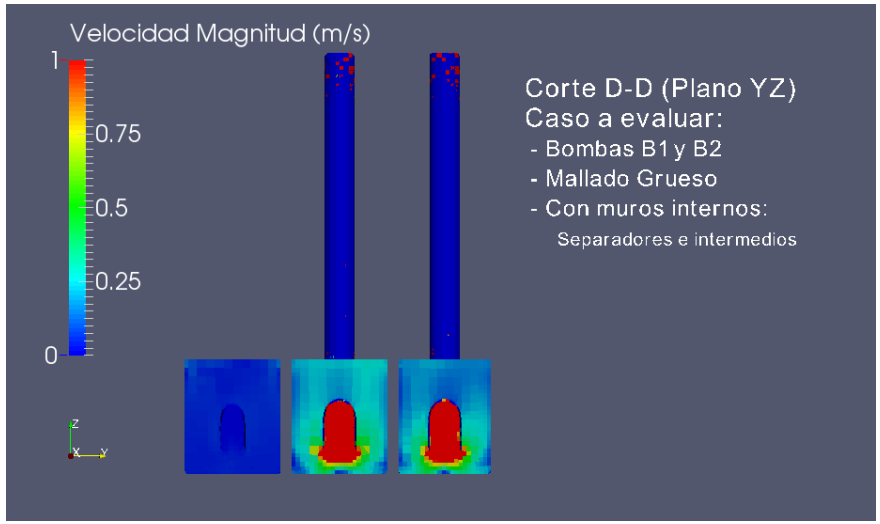

Figura N°11.17 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala

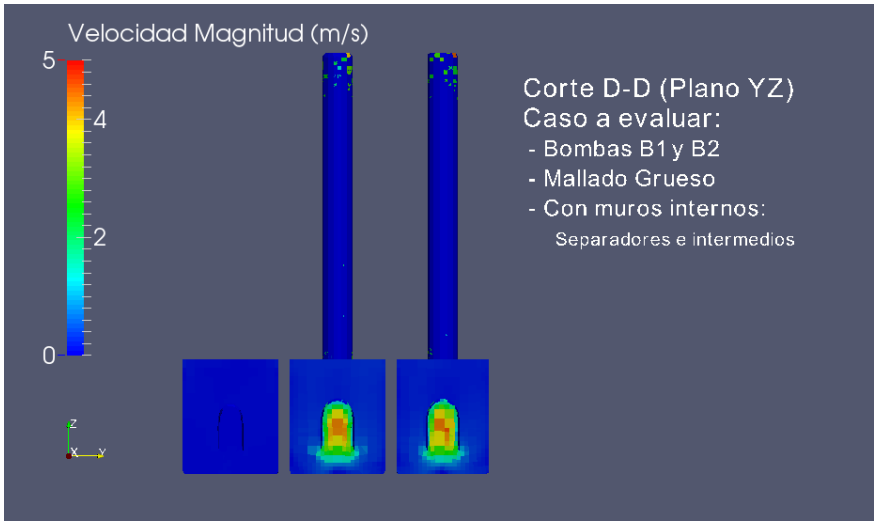

Figura N°11.18 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala

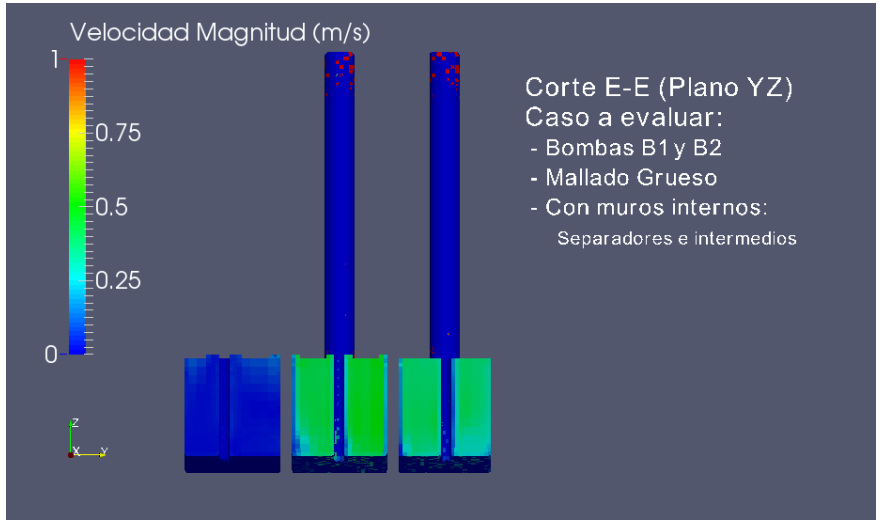

Figura N°11.19 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala

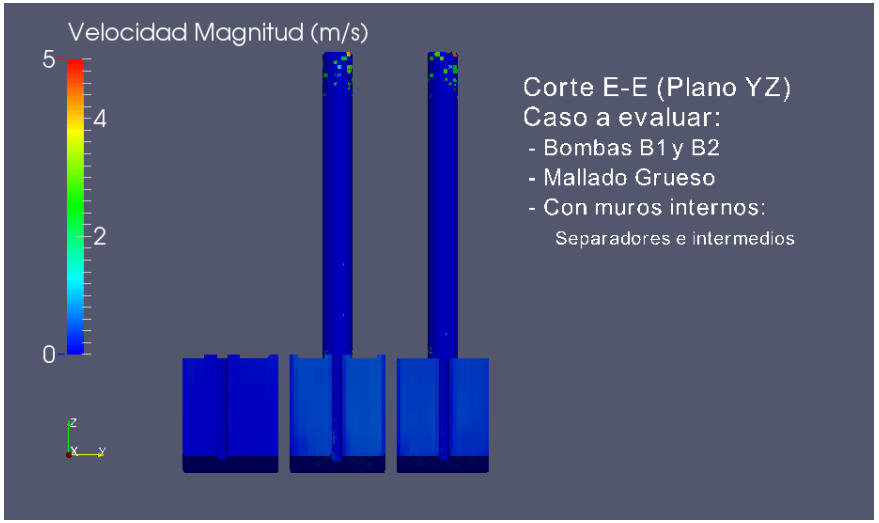

Figura N°11.20 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala

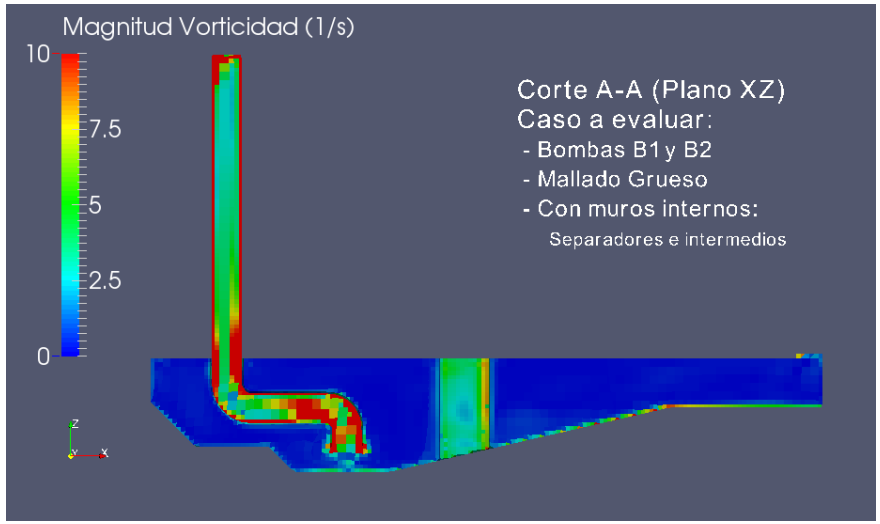

Figura N°11.21 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala

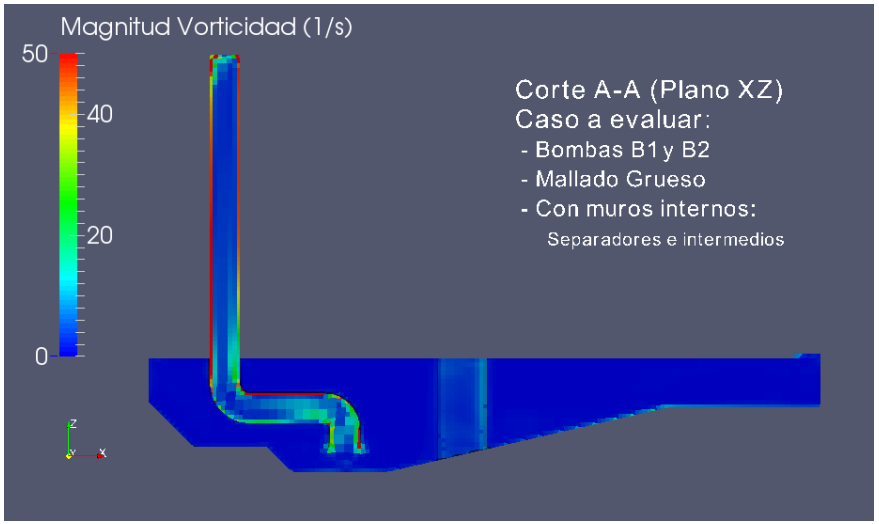

Figura N°11.22 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala

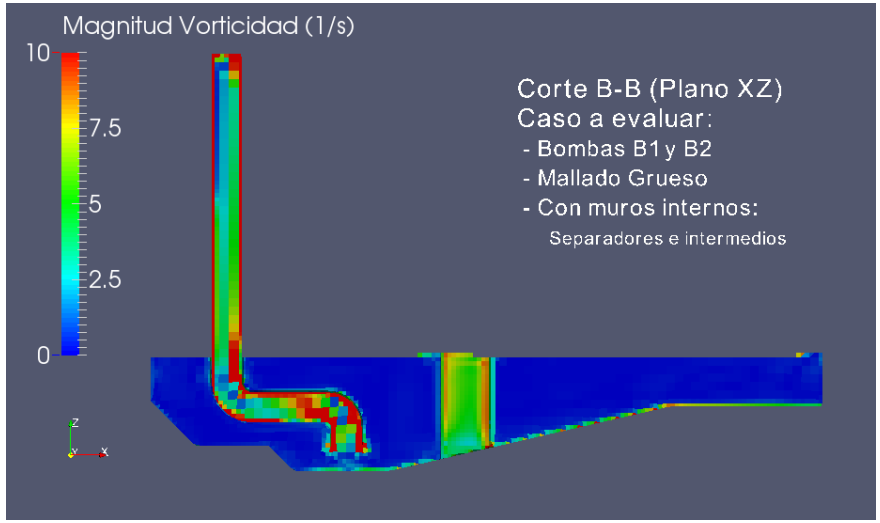

Figura N°11.23 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala

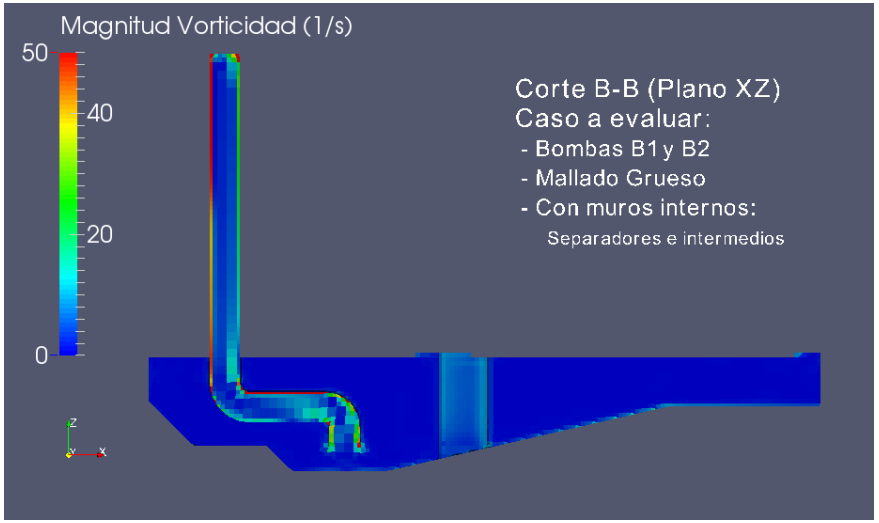

Figura N°11.24 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala

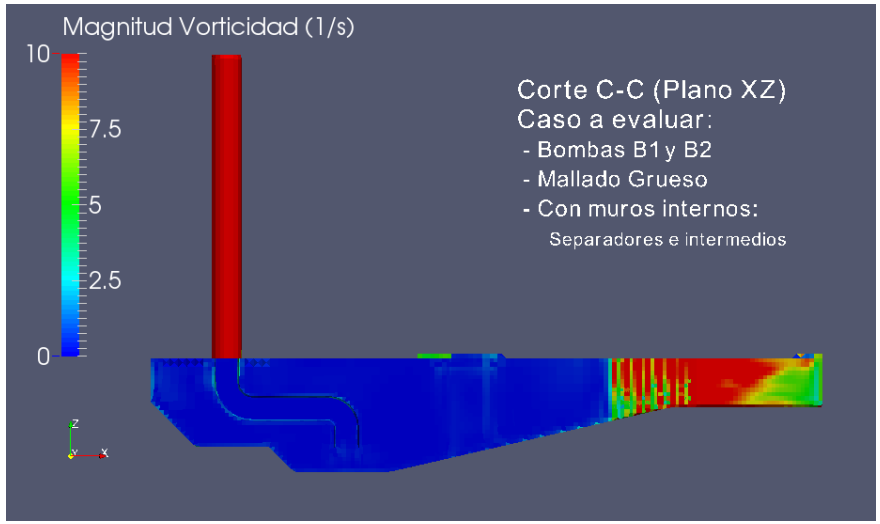

Figura N°11.25 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala

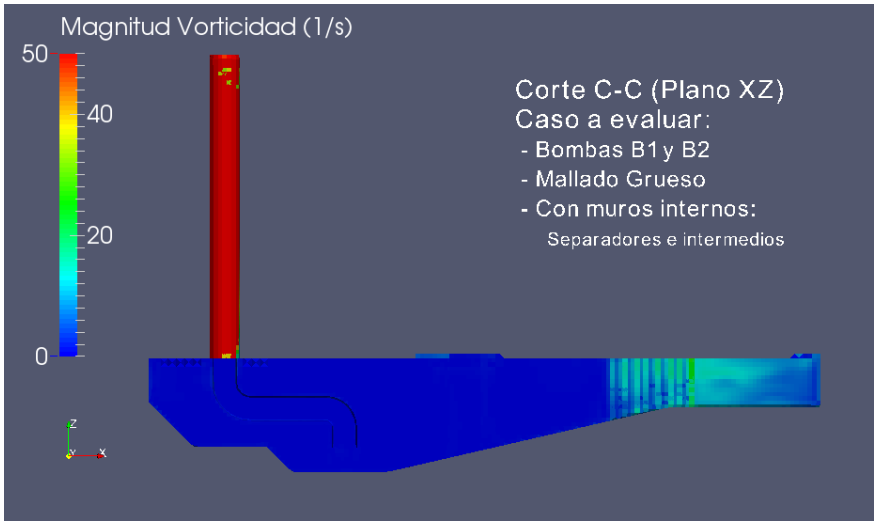

Figura N°11.26 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala

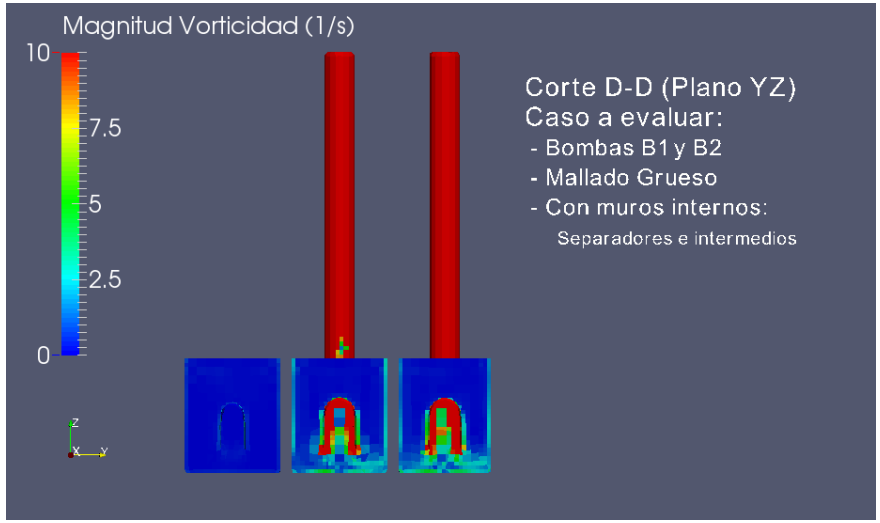

Figura N°11.27 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala

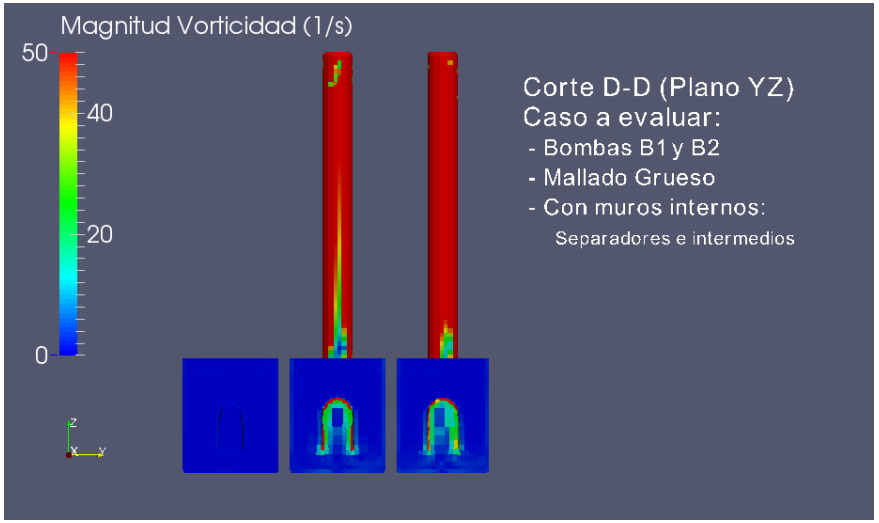

Figura N°11.28 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala

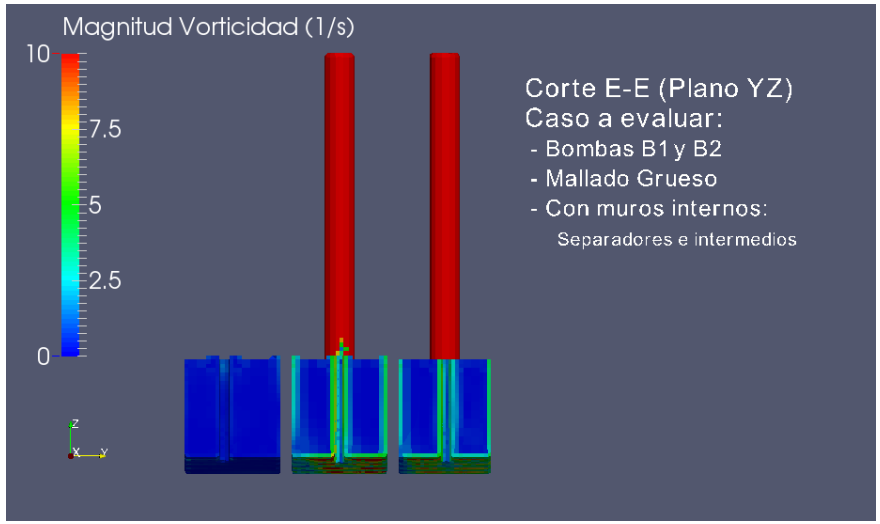

Figura N°11.29 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala

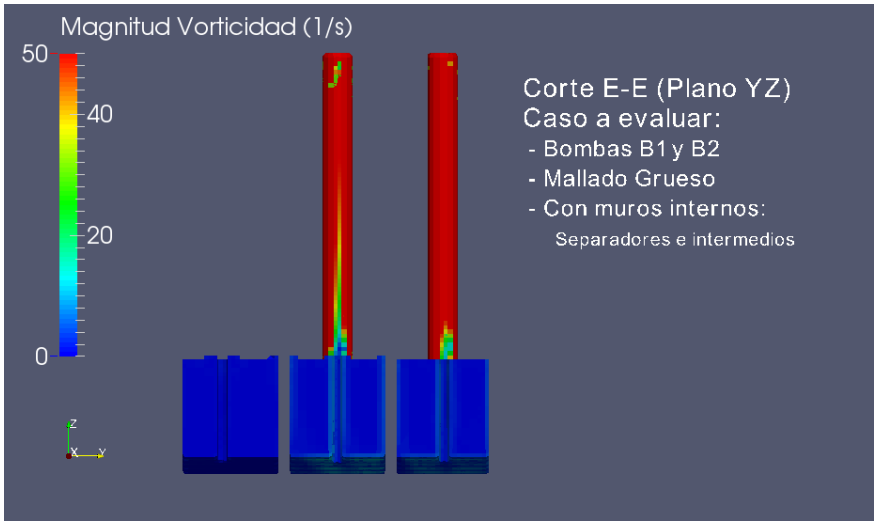

Figura N°11.30 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala

11.4.1.1.2 Sólo muros separadores

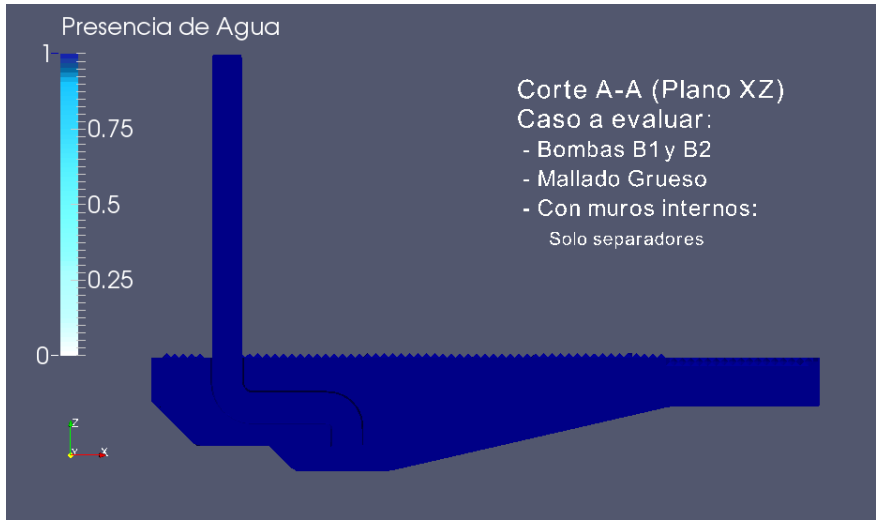

Figura N°11.31 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A

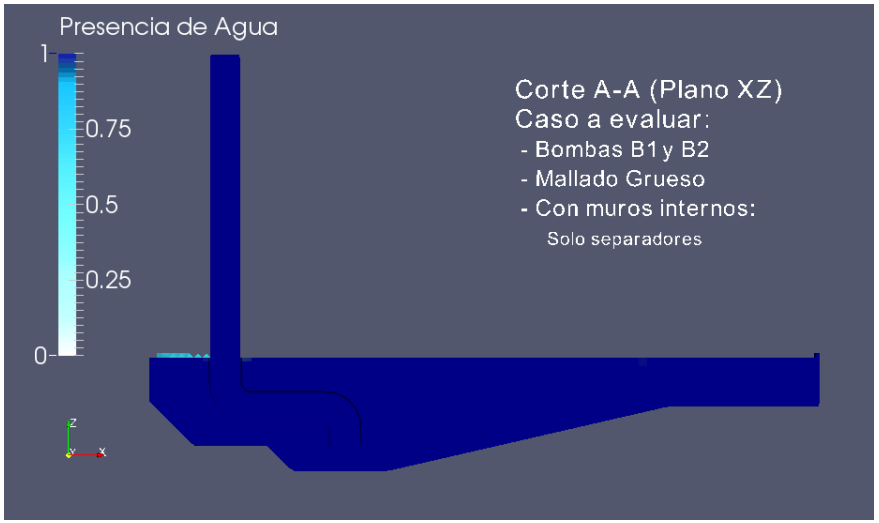

Figura N°11.32 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A

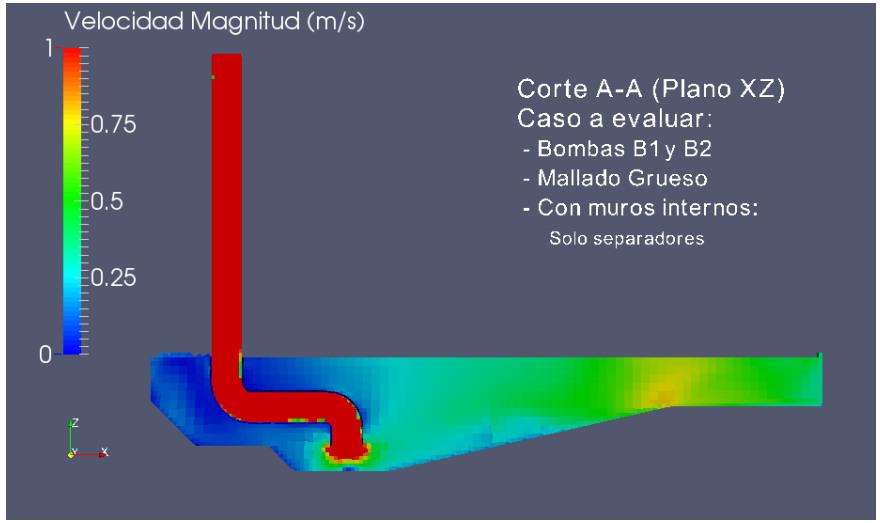

Figura N°11.33 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala

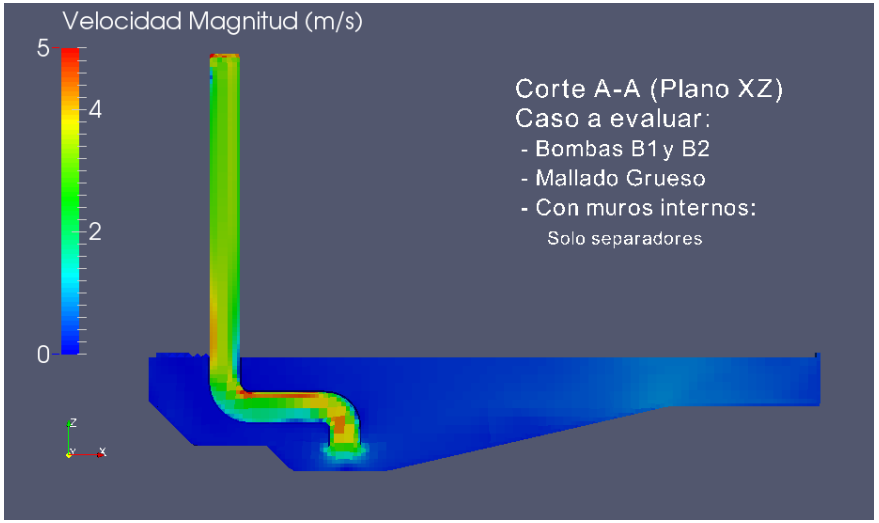

Figura N°11.34 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala

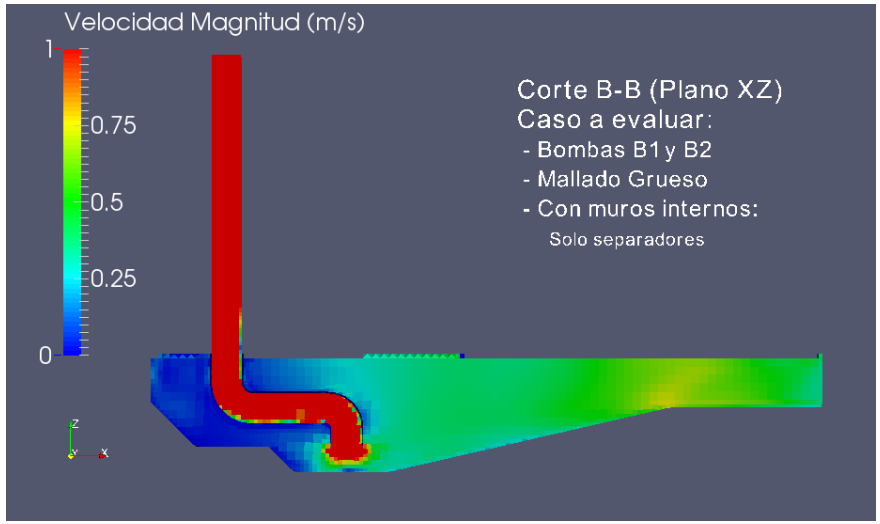

Figura N°11.35 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala

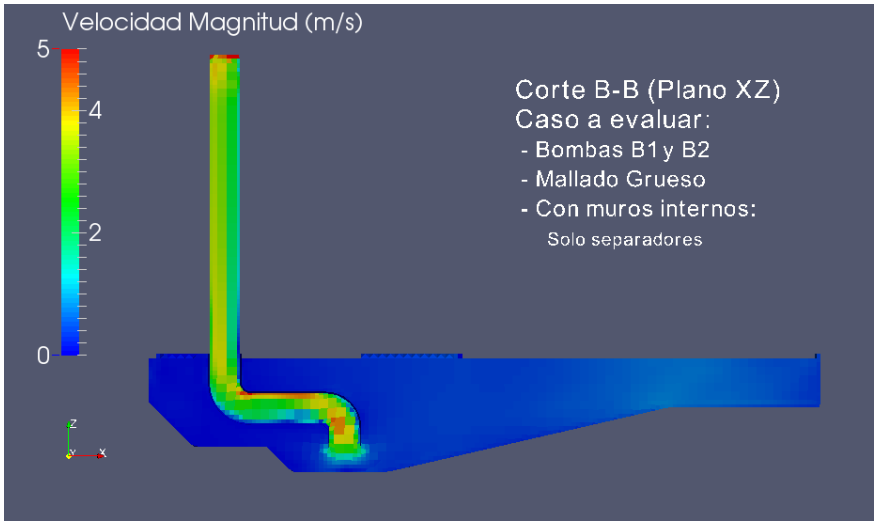

Figura N°11.36 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala

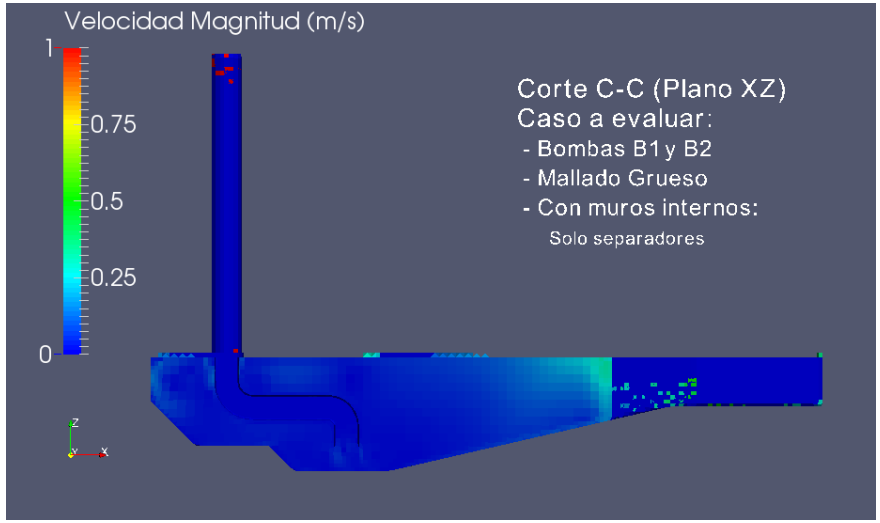

Figura N°11.37 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala

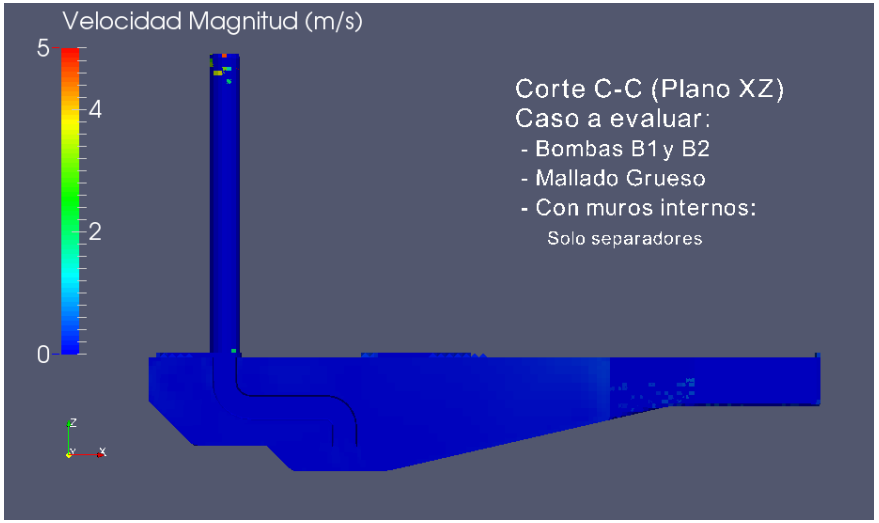

Figura N°11.38 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala

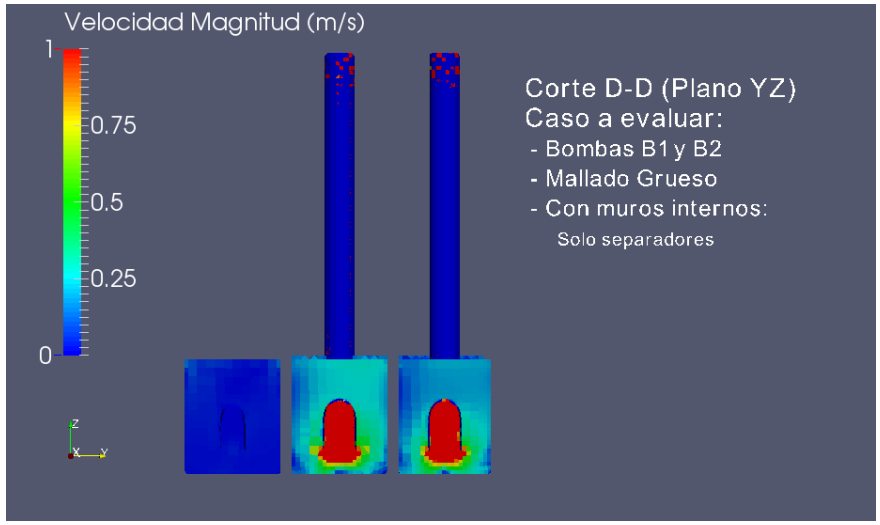

Figura N°11.39 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala

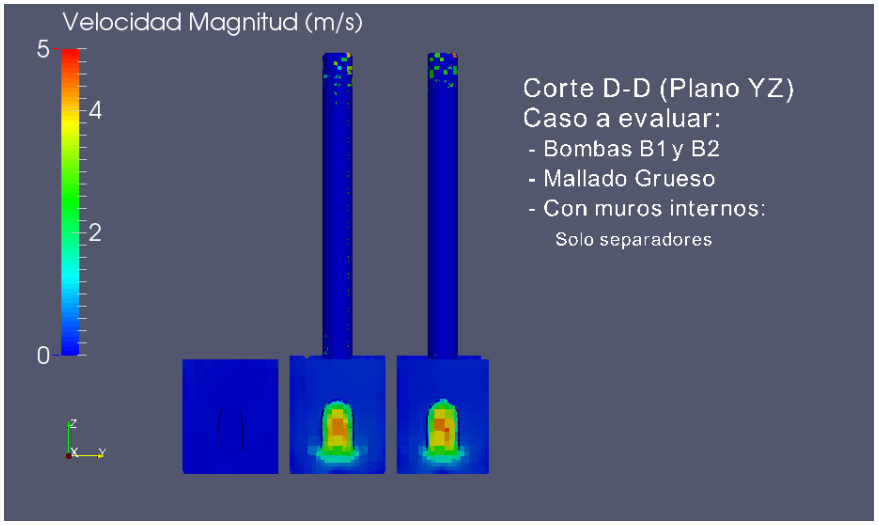

Figura N°11.40 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala

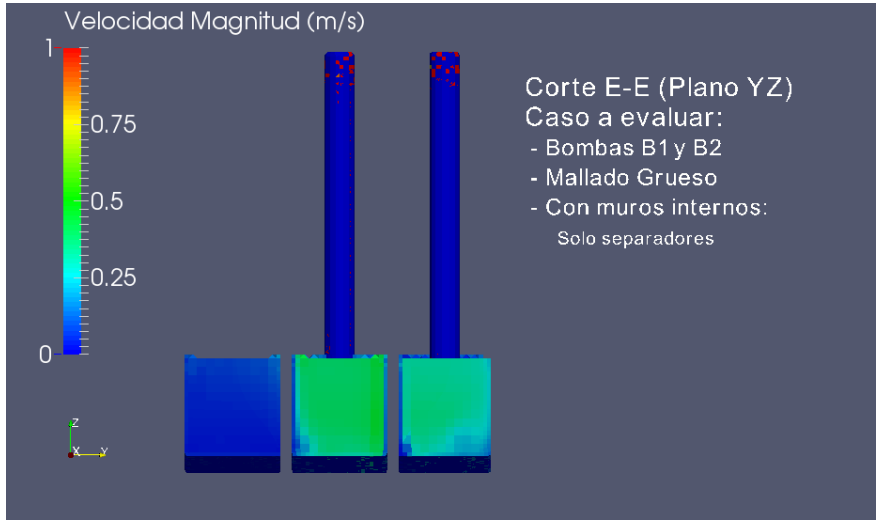

Figura N°11.41 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala

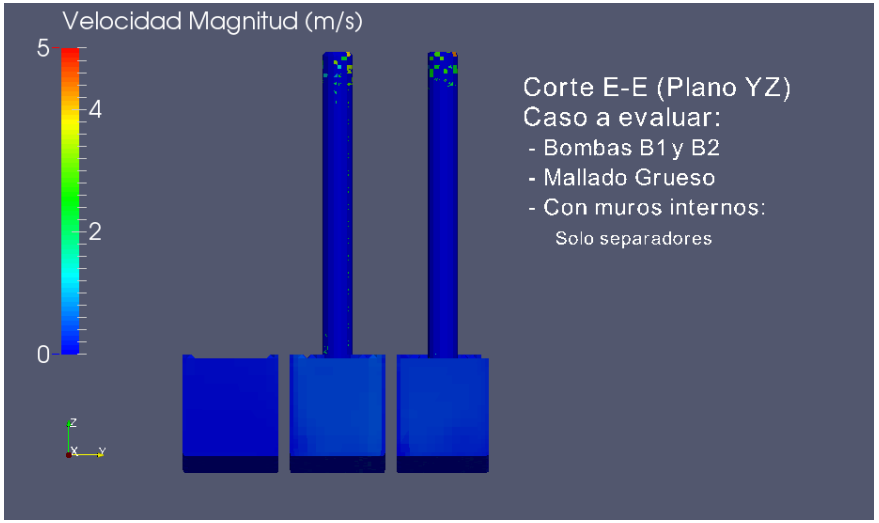

Figura N°11.42 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala

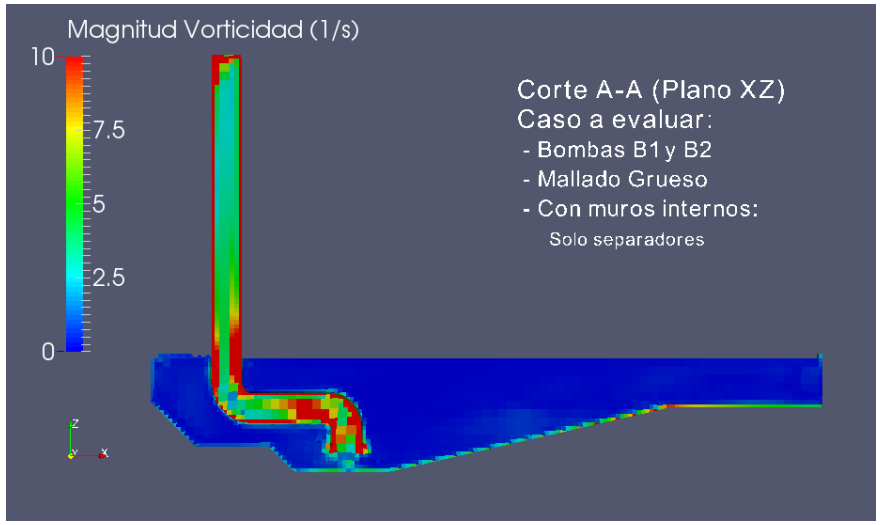

Figura N°11.43 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala

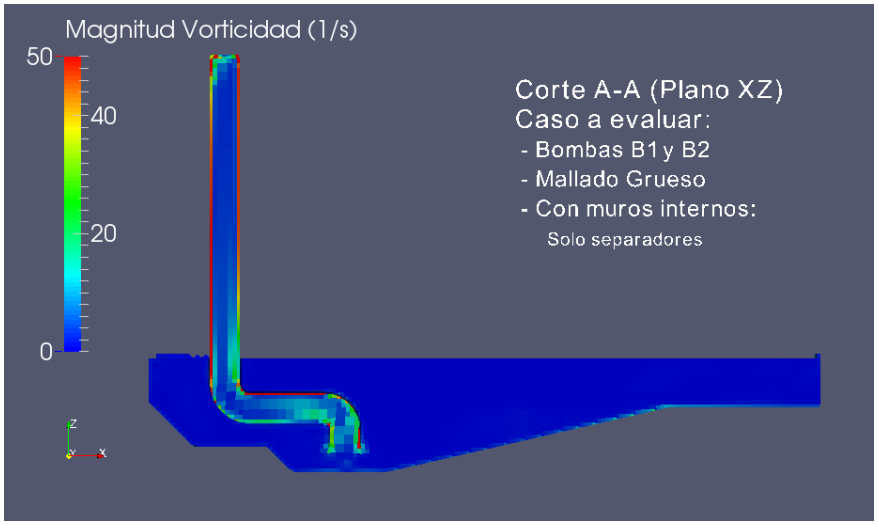

Figura N°11.44 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala

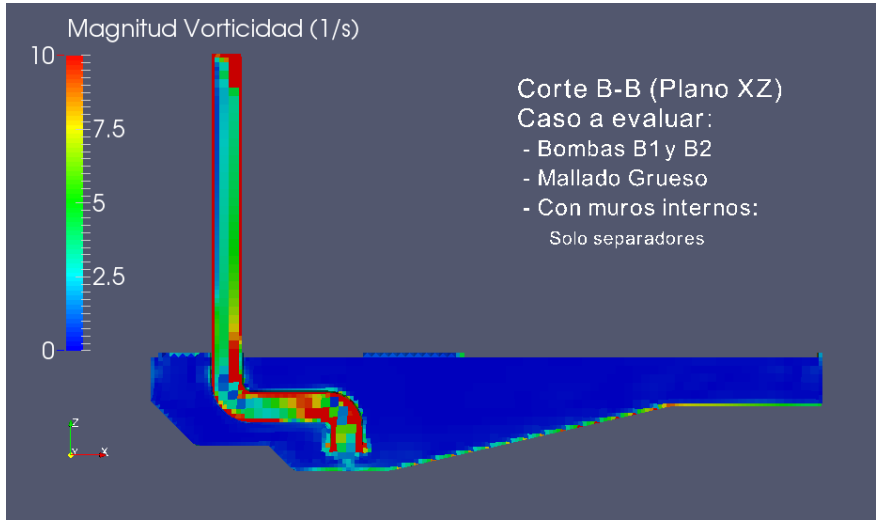

Figura N°11.45 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala

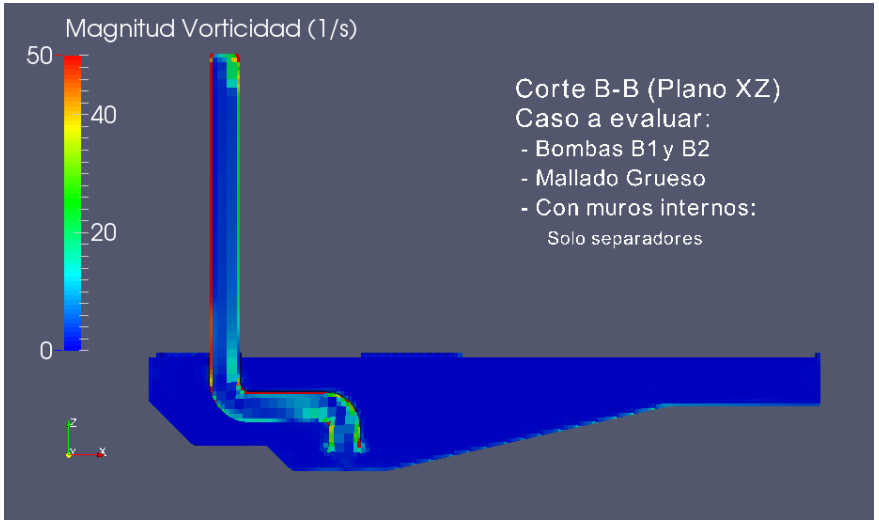

Figura N°11.46 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala

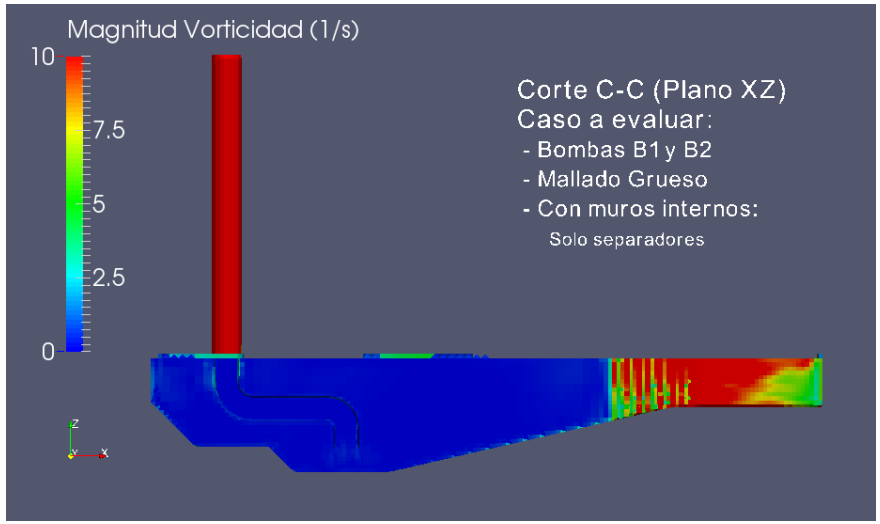

Figura N°11.47 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala

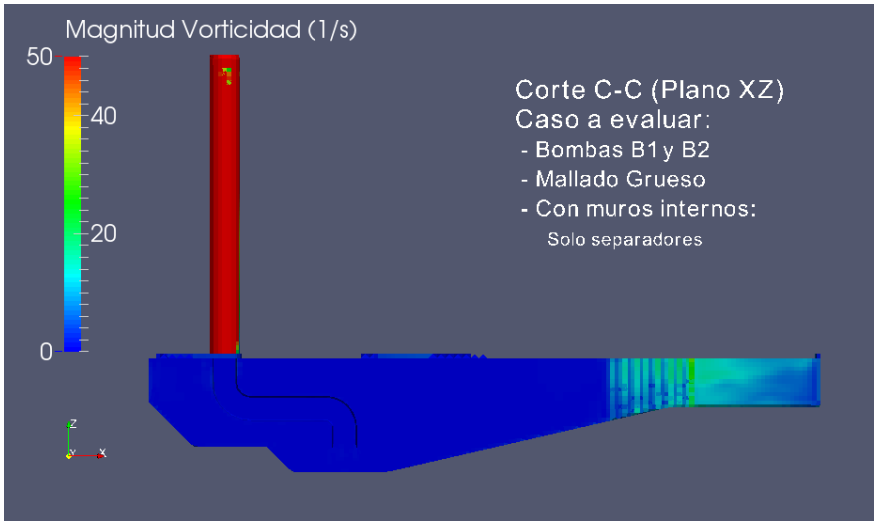

Figura N°11.48 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala

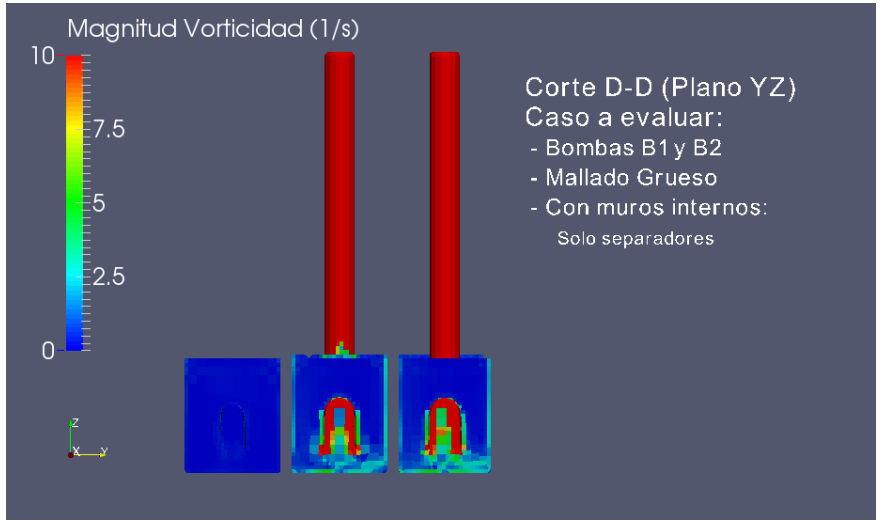

Figura N°11.49 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala

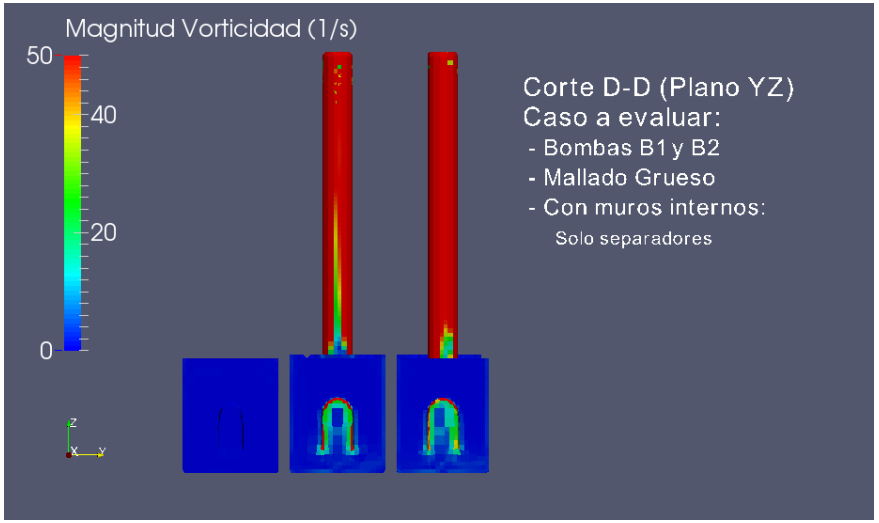

Figura N°11.50 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala

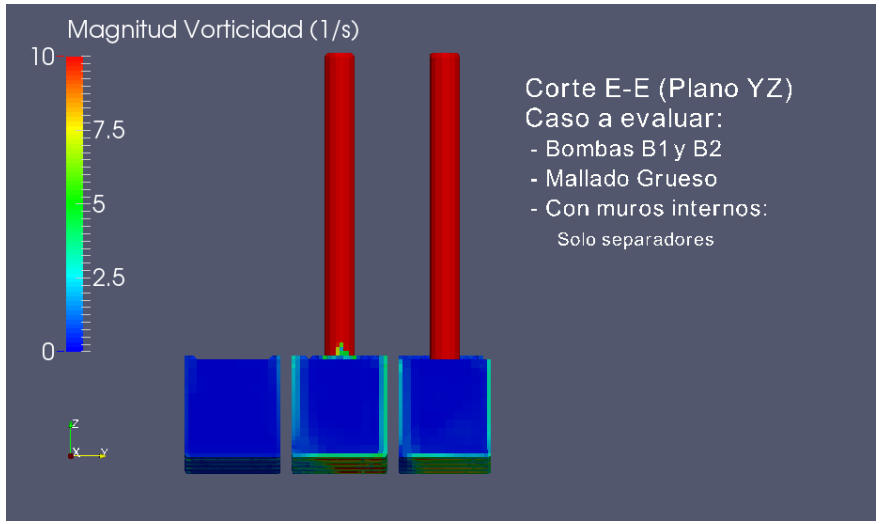

Figura N°11.51 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala

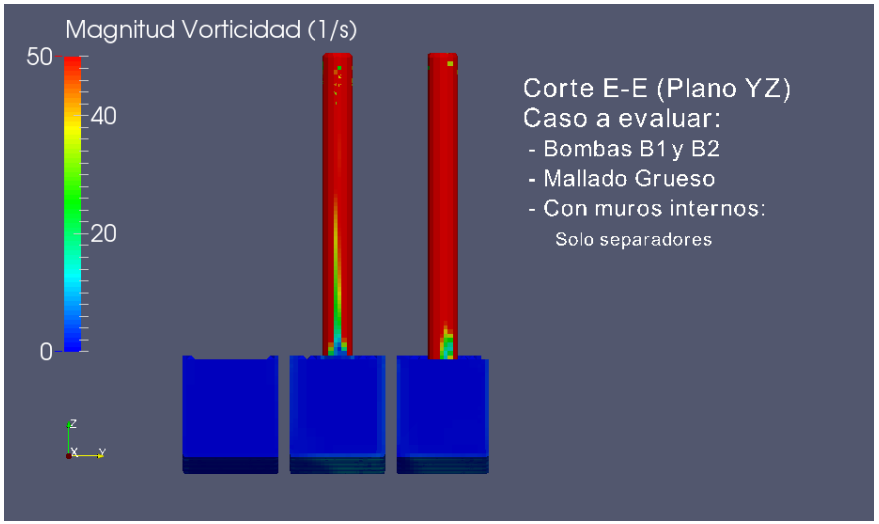

Figura N°11.52 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala

11.4.1.1.3 Sin muros separadores ni intermedios

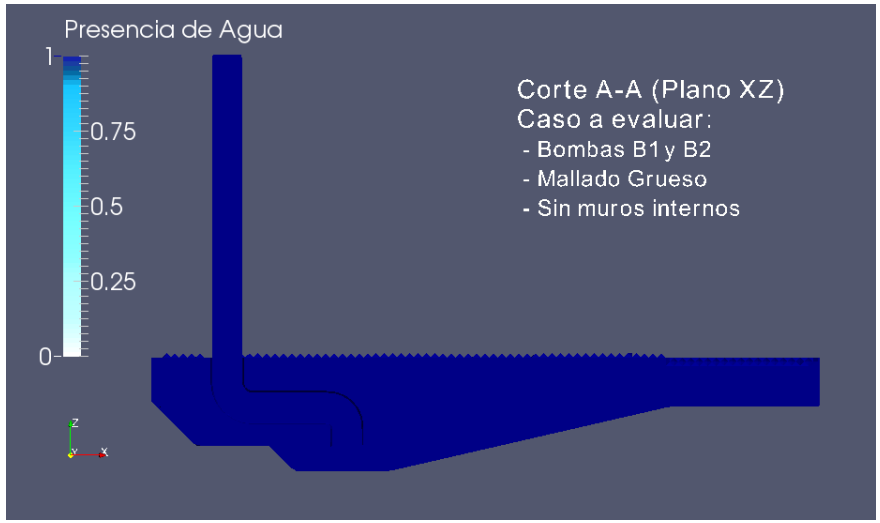

Figura N°11.53 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A

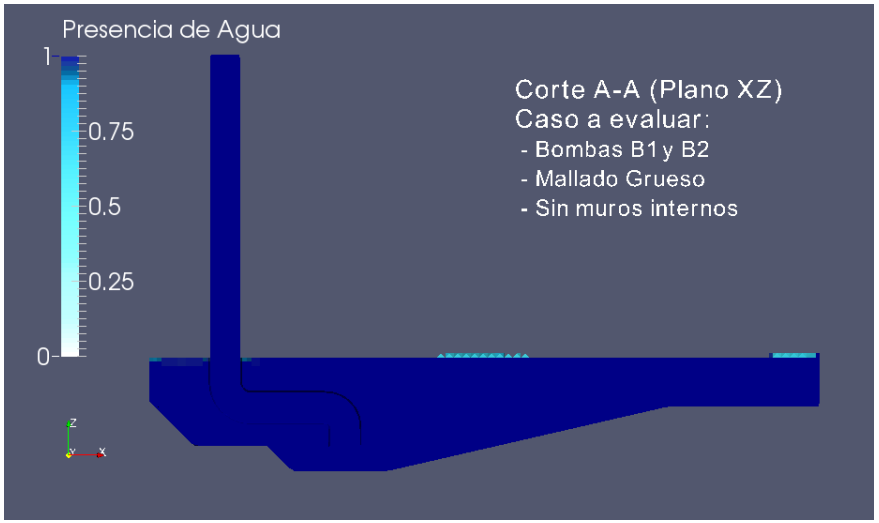

Figura N°11.54 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A

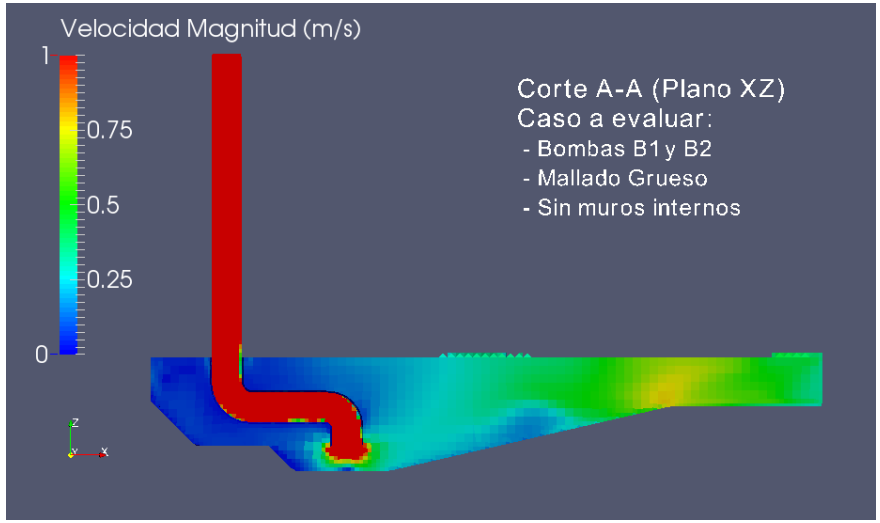

Figura N°11.55 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala

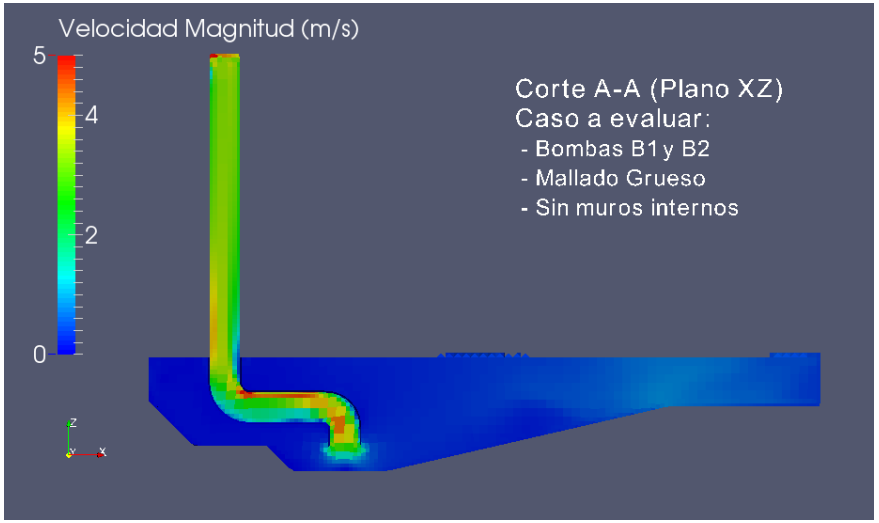

Figura N°11.56 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala

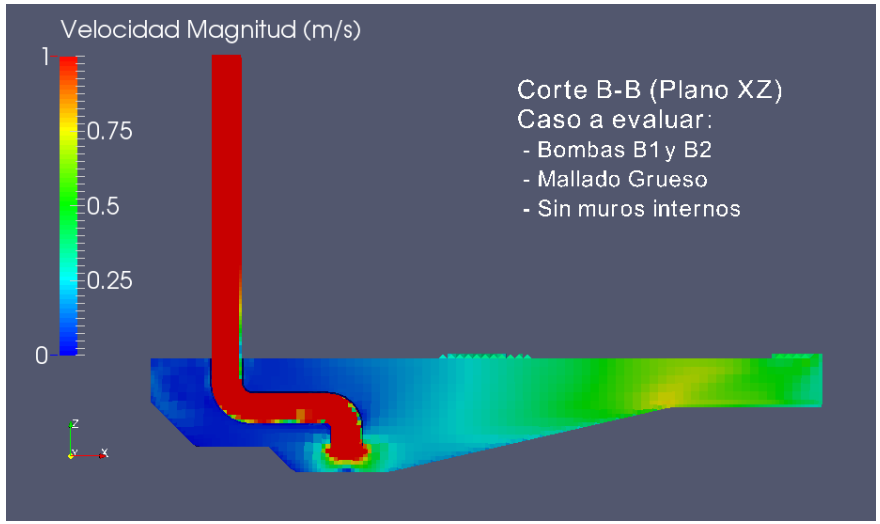

Figura N°11.57 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala

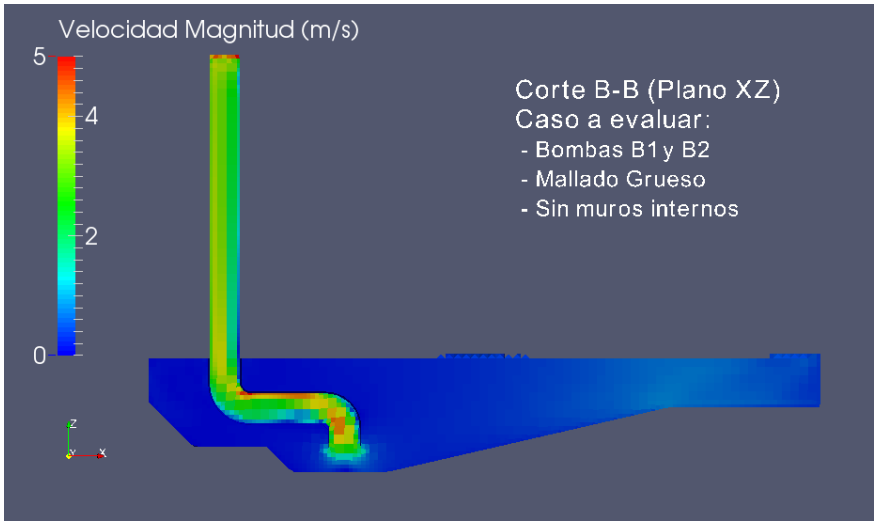

Figura N°11.58 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala

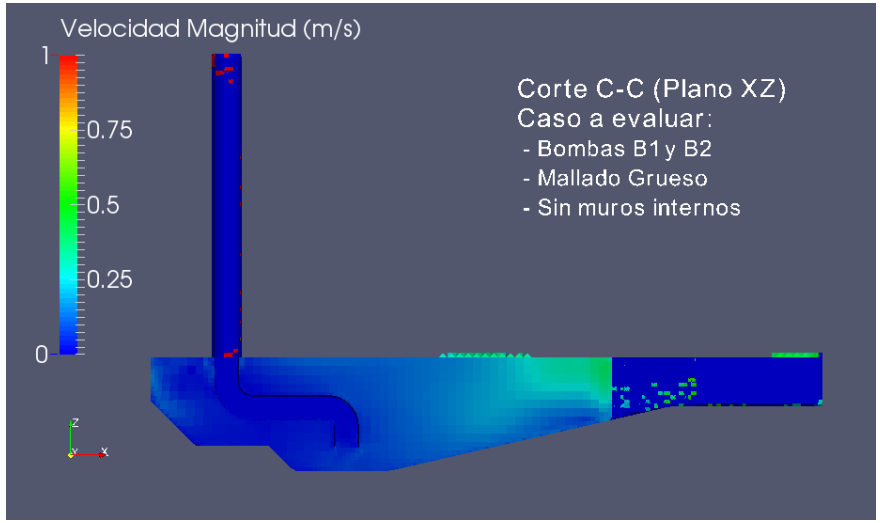

Figura N°11.59 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala

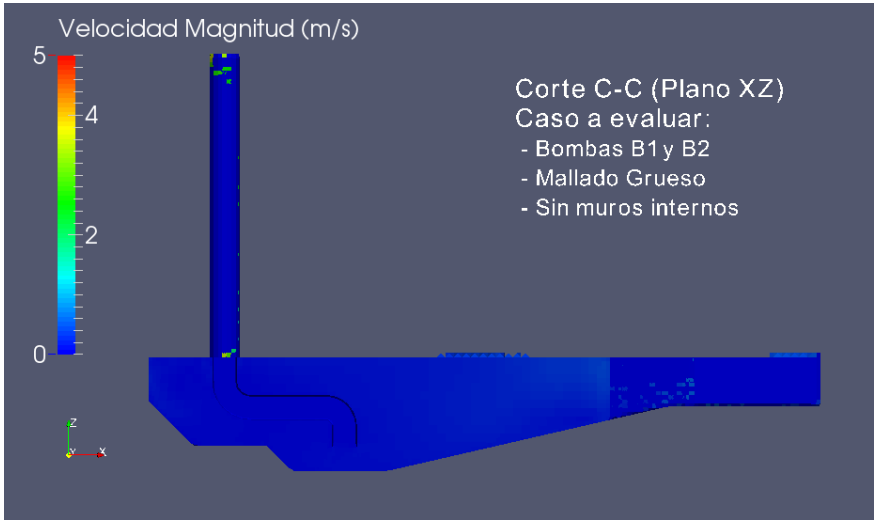

Figura N°11.60 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala

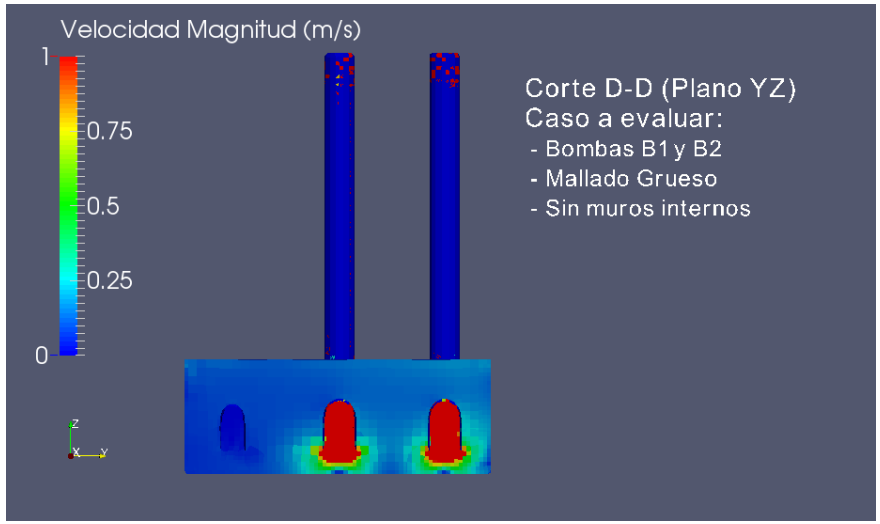

Figura N°11.61 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala

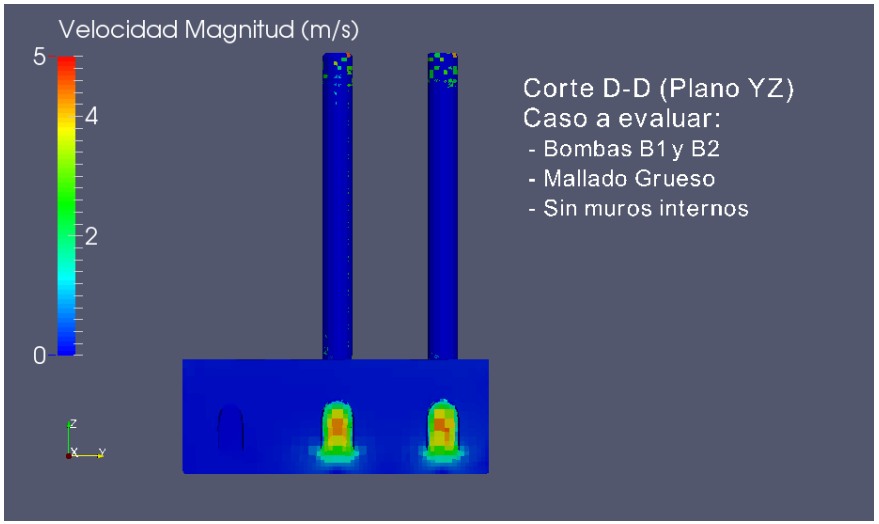

Figura N°11.62 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala

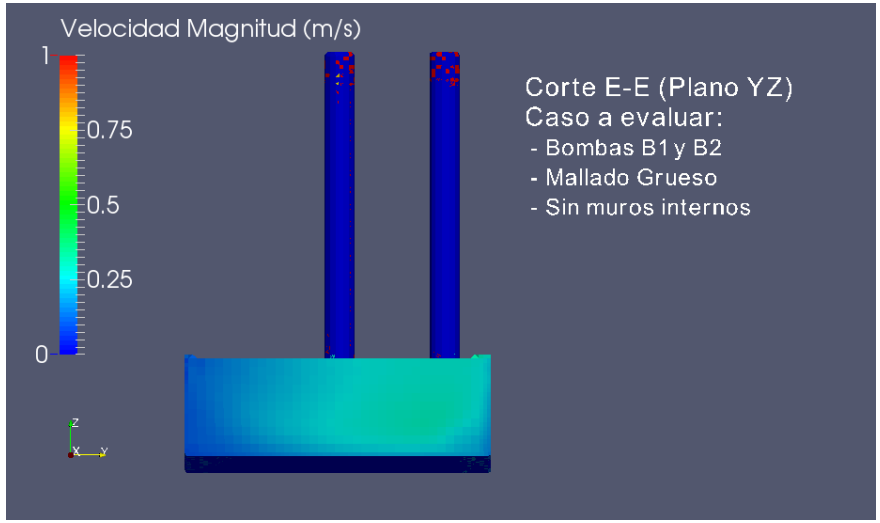

Figura N°11.63 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala

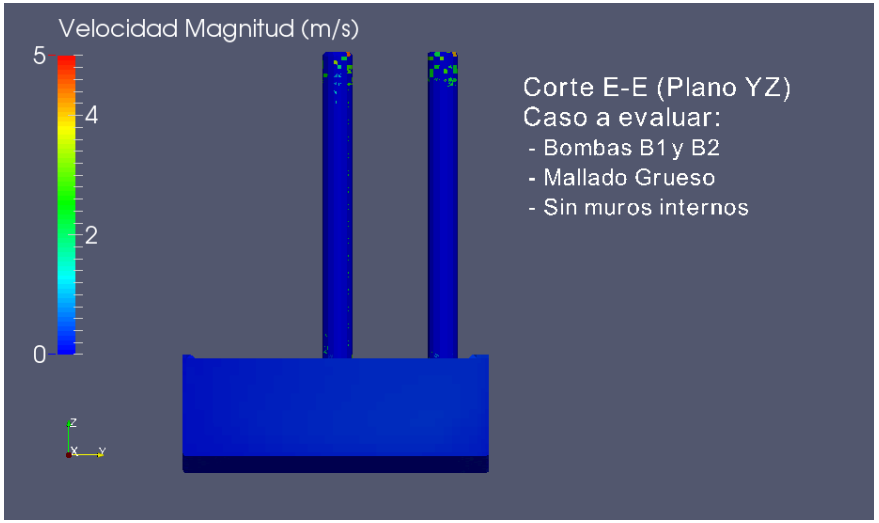

Figura N°11.64 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala

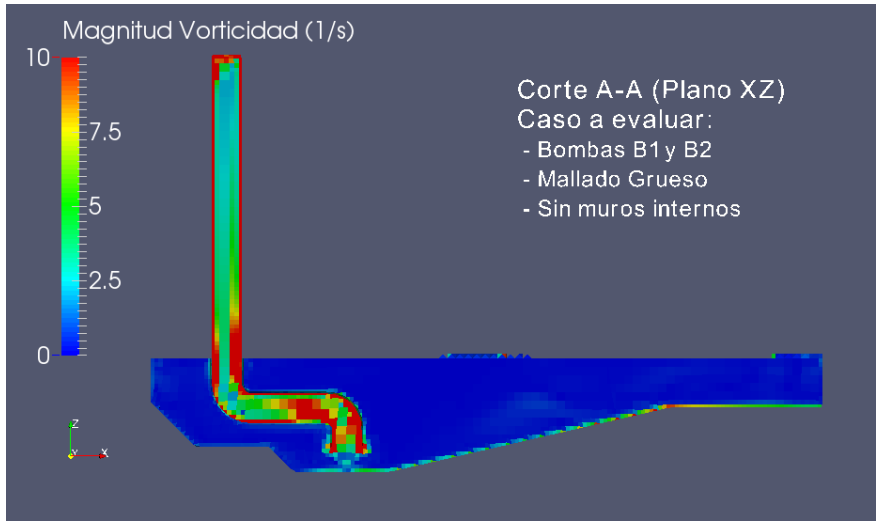

Figura N°11.65 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala

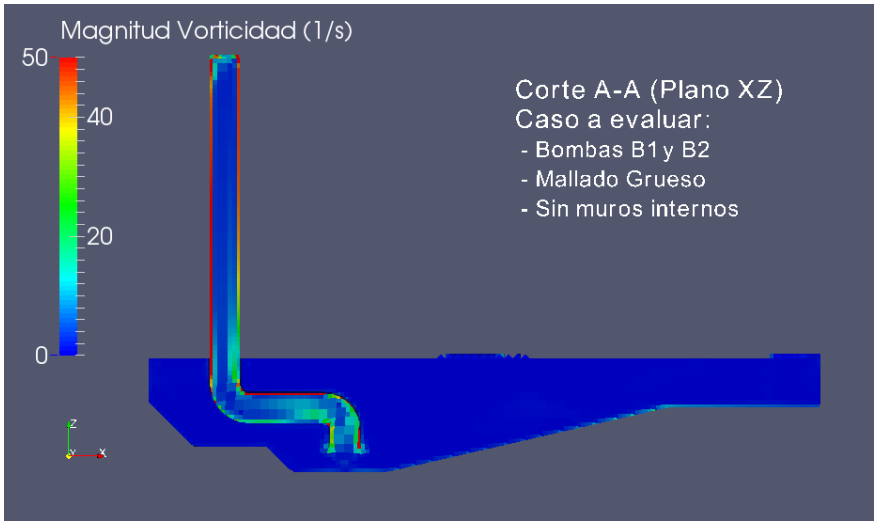

Figura N°11.66 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala

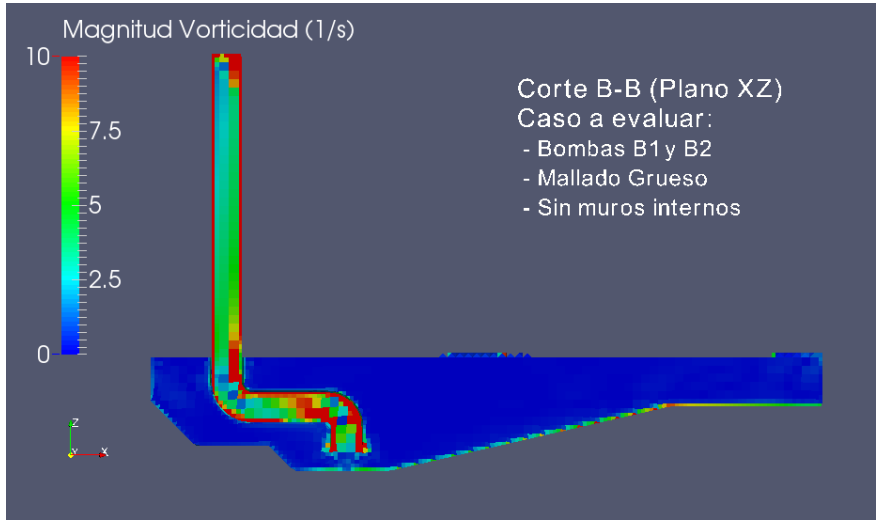

Figura N°11.67 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala

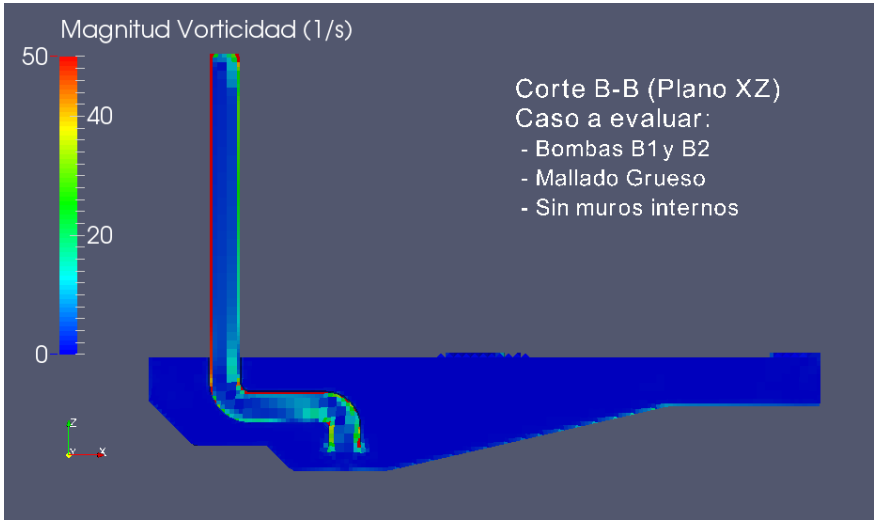

Figura N°11.68 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala

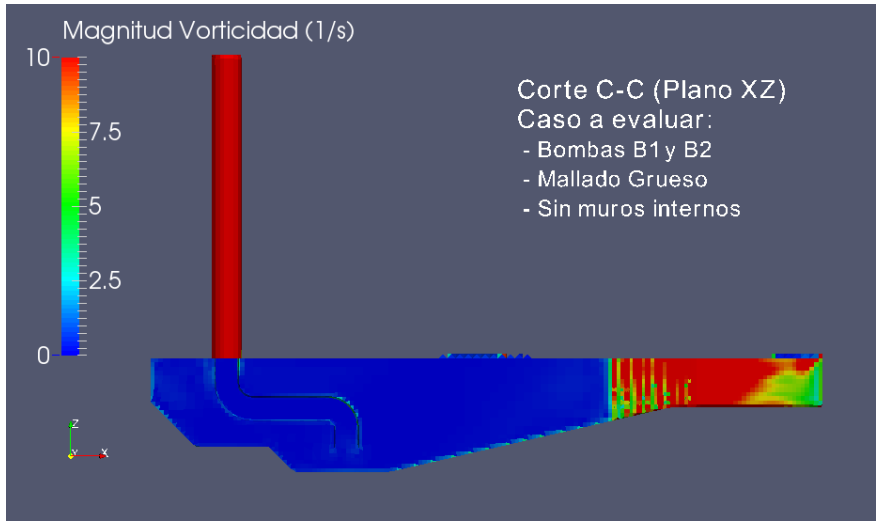

Figura N°11.69 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala

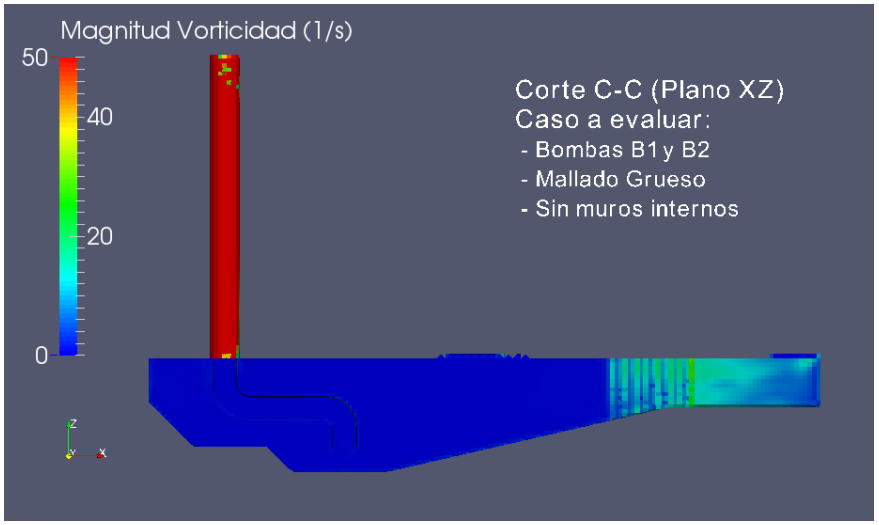

Figura N°11.70 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala

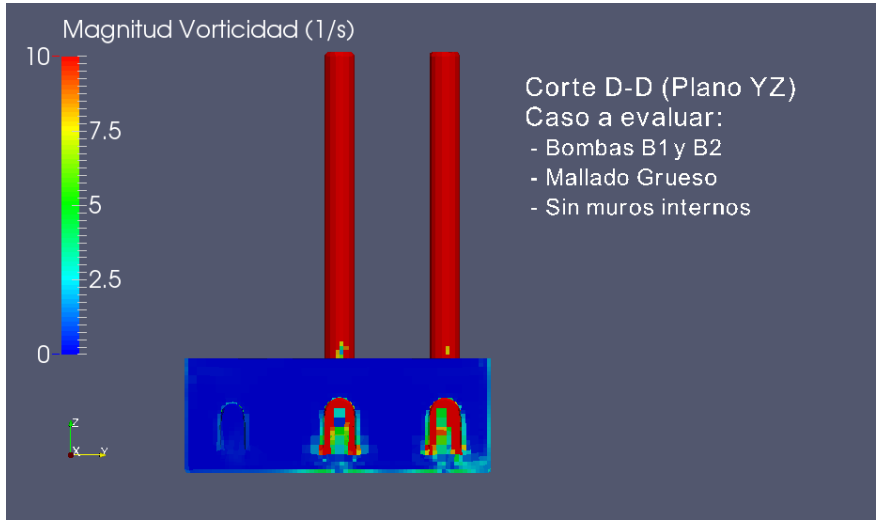

Figura N°11.71 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala

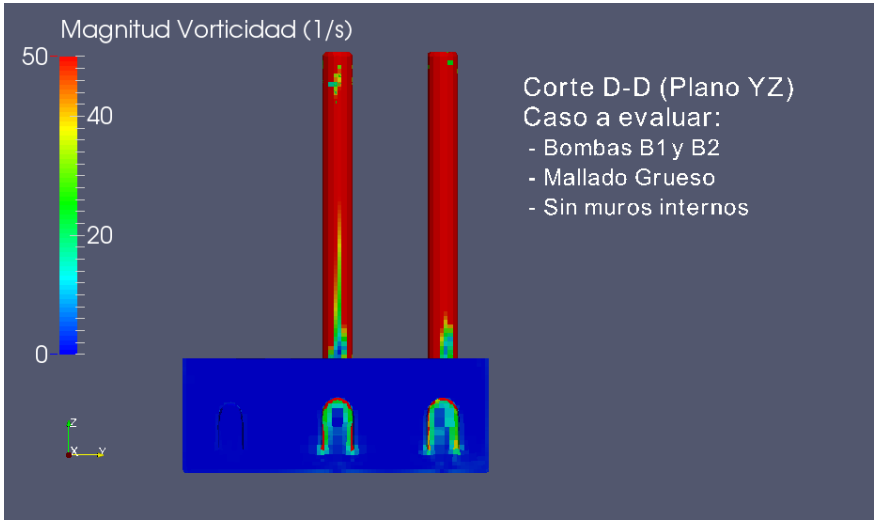

Figura N°11.72 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala

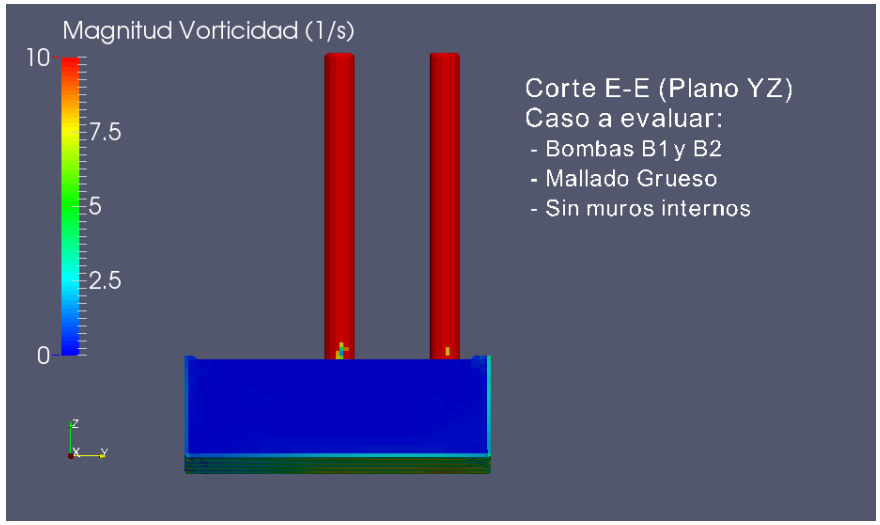

Figura N°11.73 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala

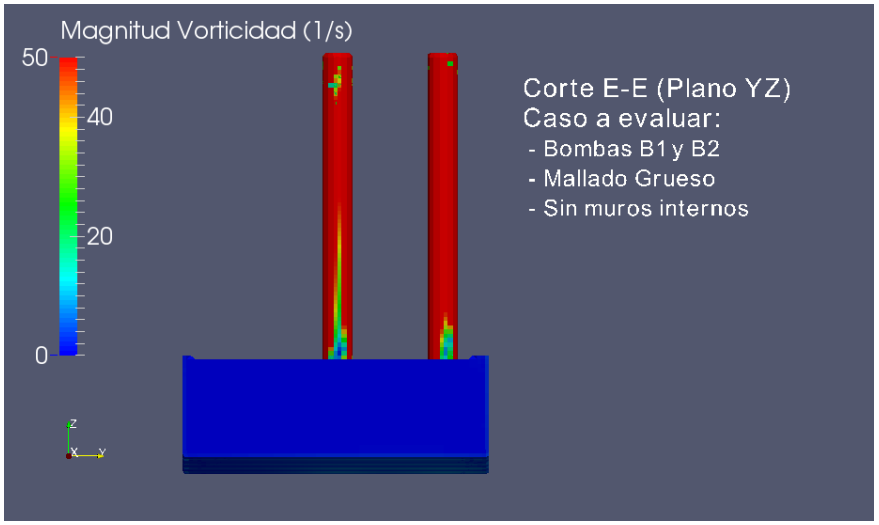

Figura N°11.74 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala

11.4.2 Mallado fino

11.4.2.1 Operación de bombas 1 y 2

11.4.2.1.1 Muros separadores e intermedios

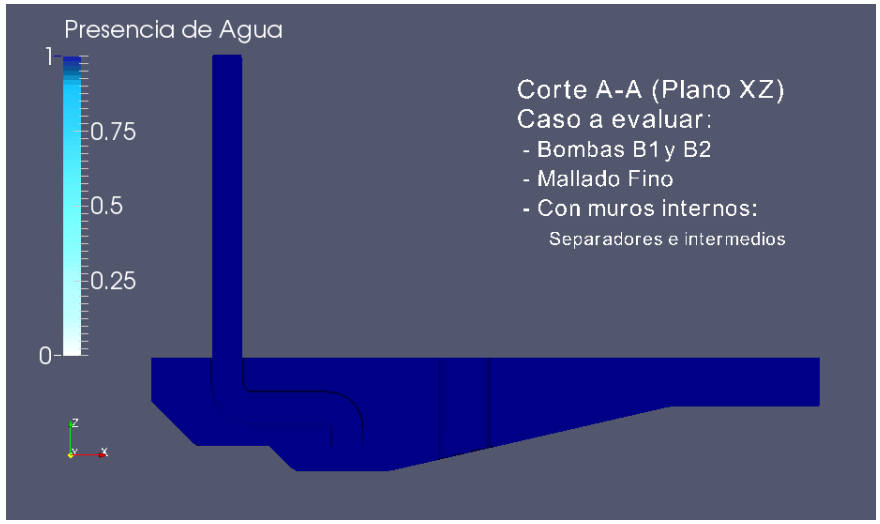

Figura N°11.75 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A

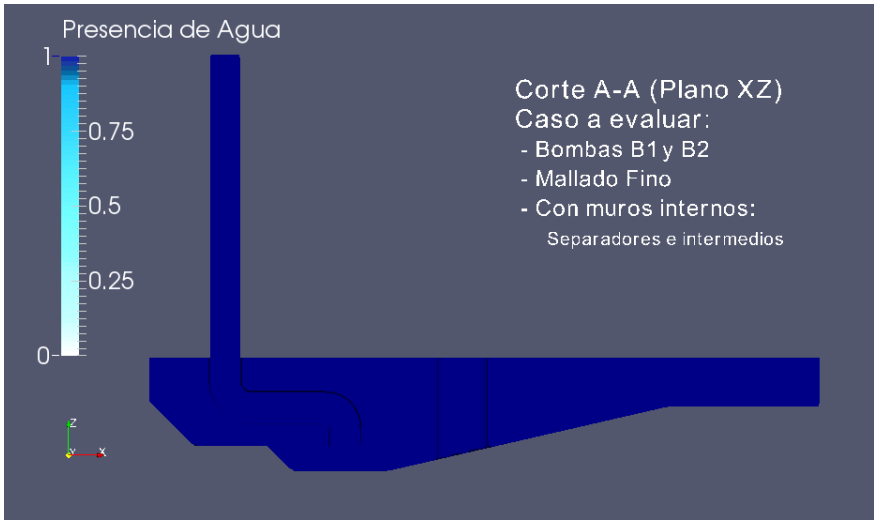

Figura N°11.76 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A

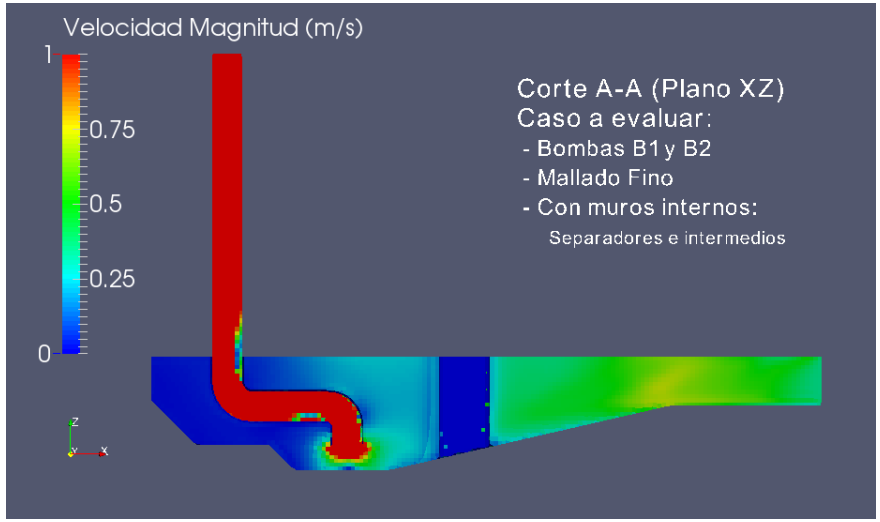

Figura N°11.77 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala

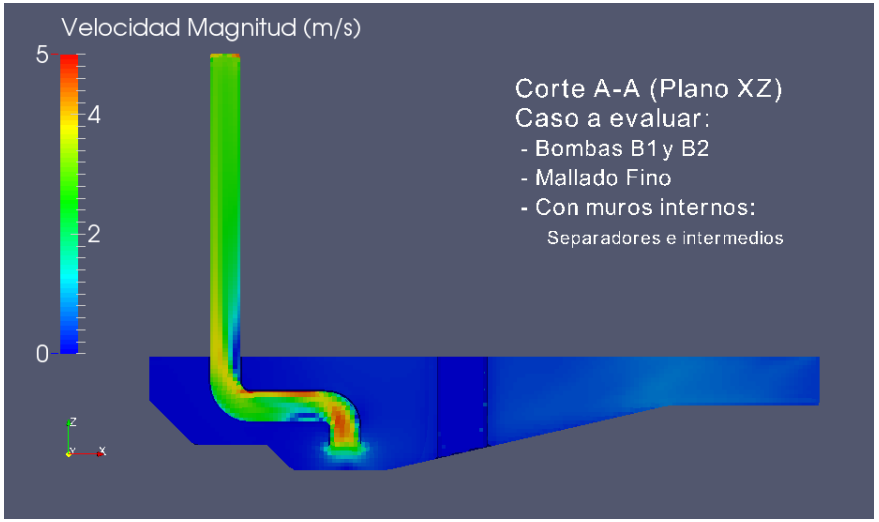

Figura N°11.78 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala

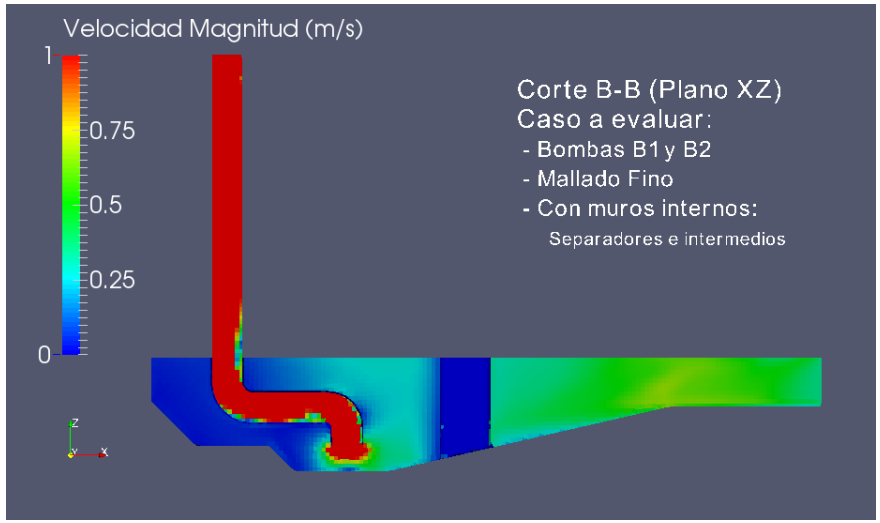

Figura N°11.79 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala

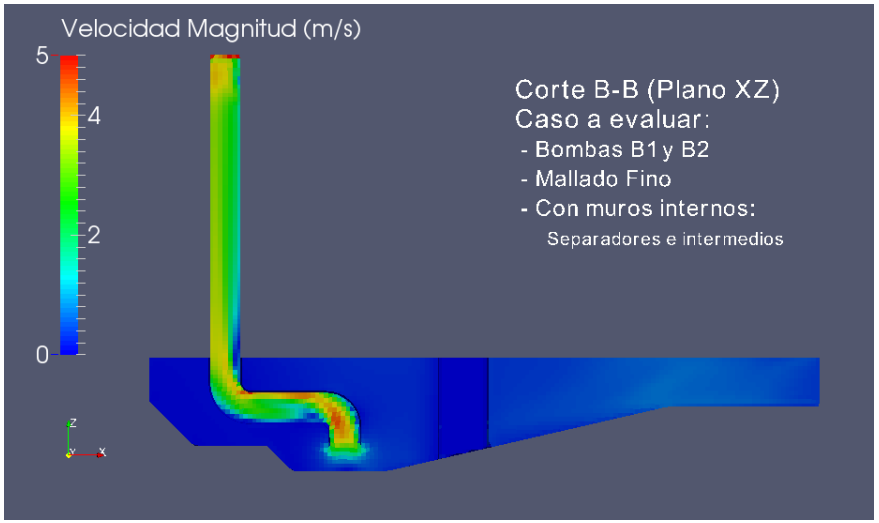

Figura N°11.80 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala

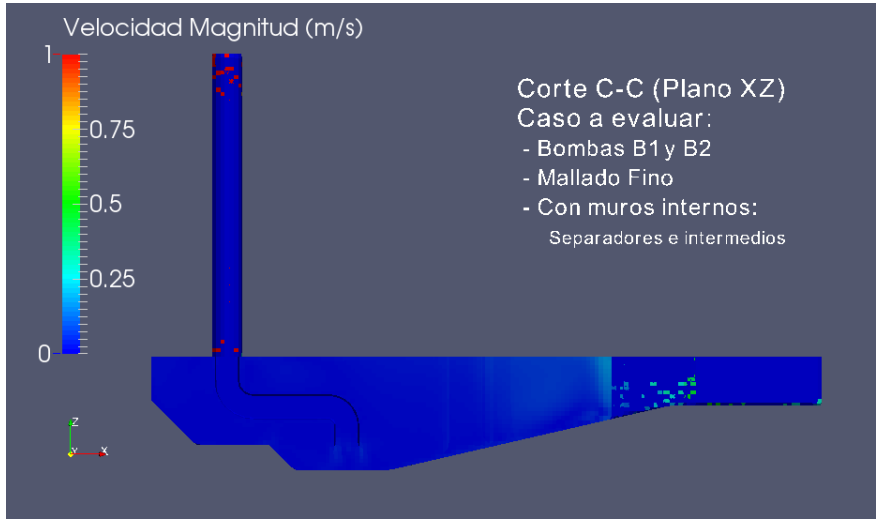

Figura N°11.81 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala

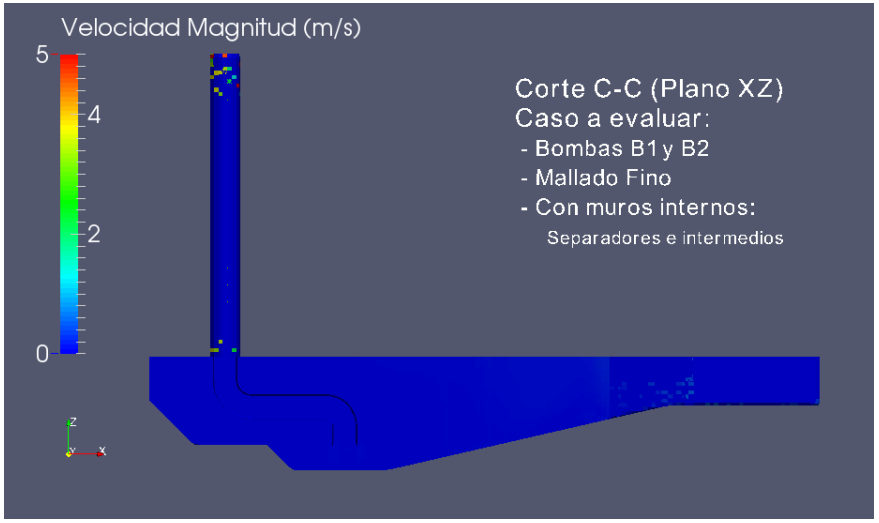

Figura N°11.82 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala

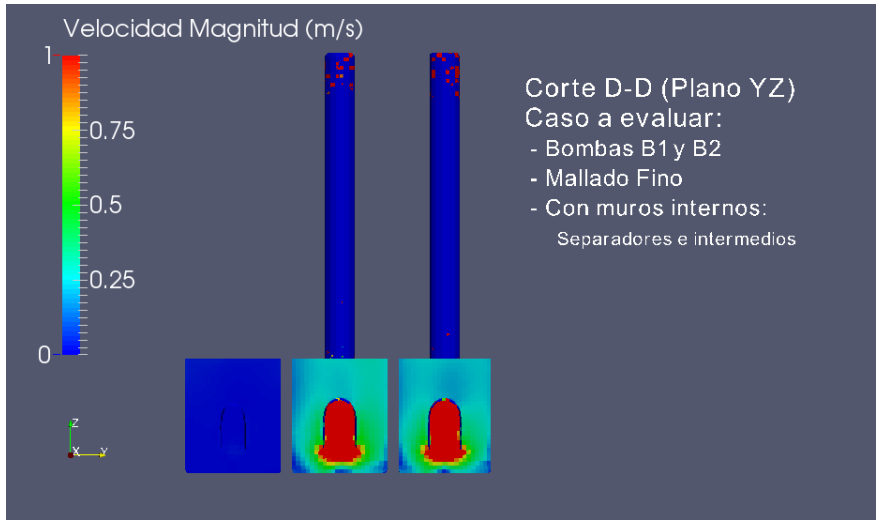

Figura N°11.83 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala

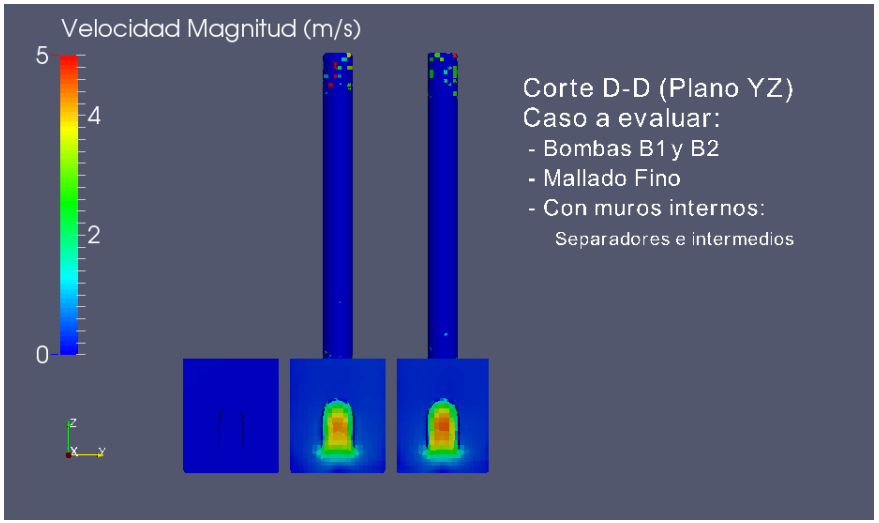

Figura N°11.84 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala

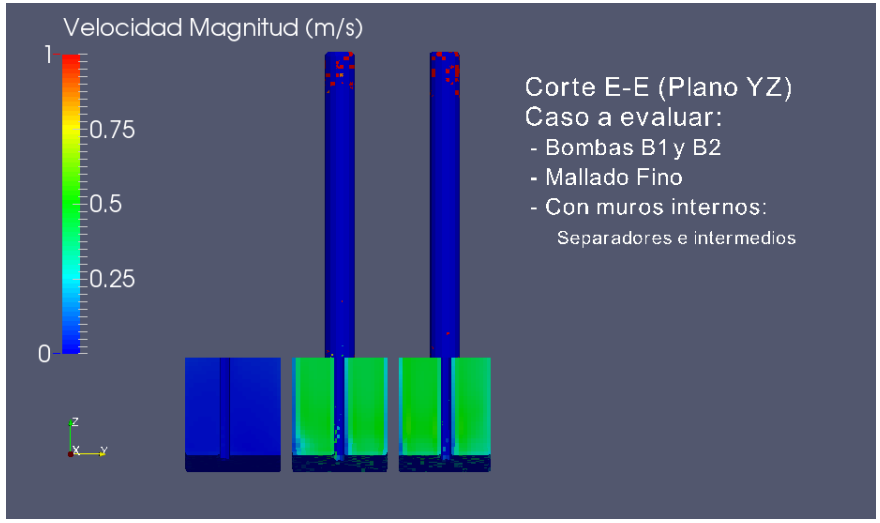

Figura N°11.85 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala

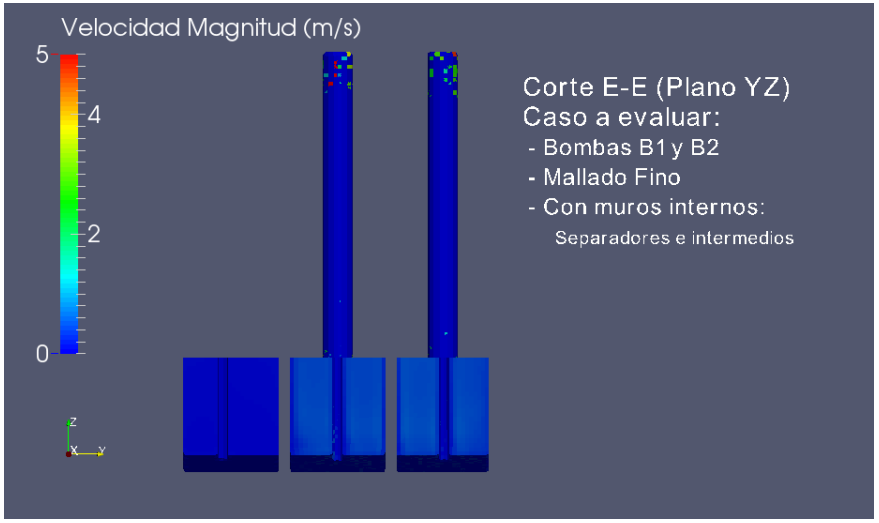

Figura N°11.86 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala

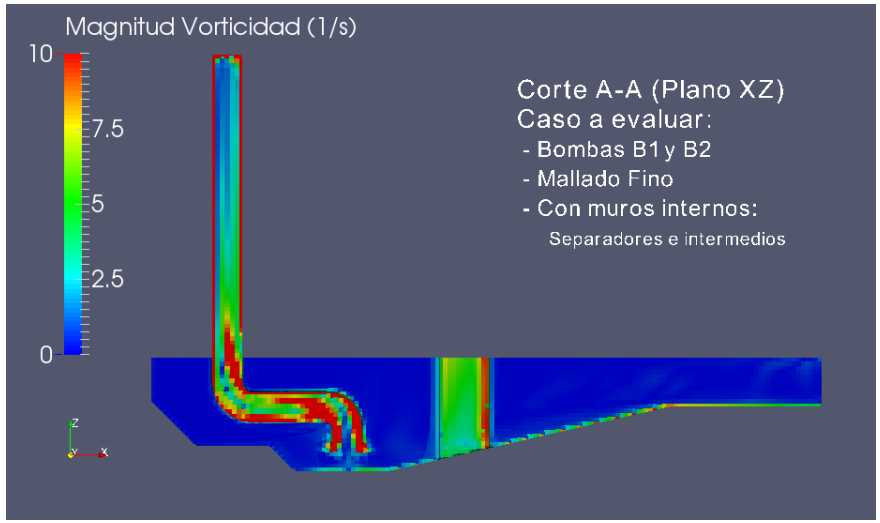

Figura N°11.87 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala

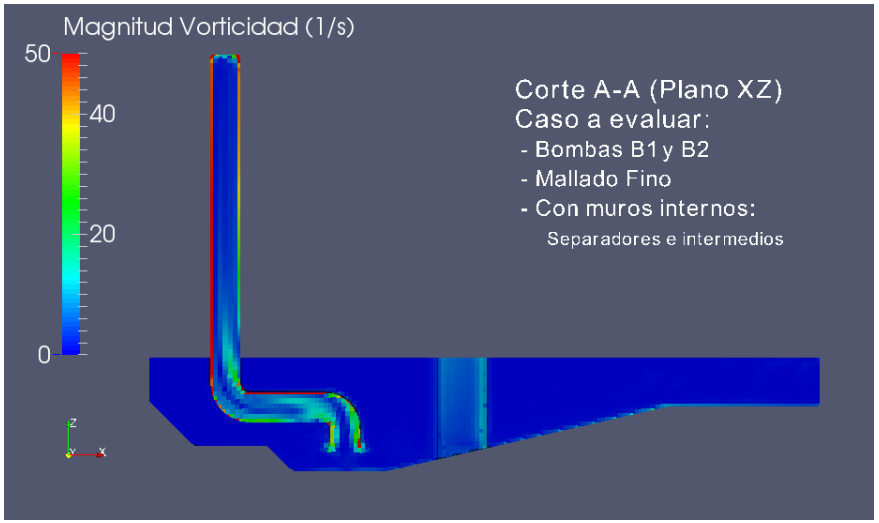

Figura N°11.88 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala

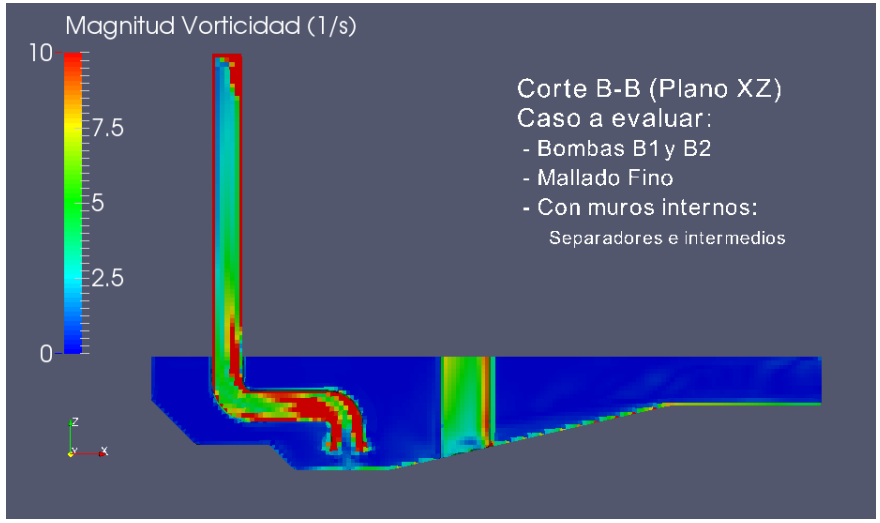

Figura N°11.89 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala

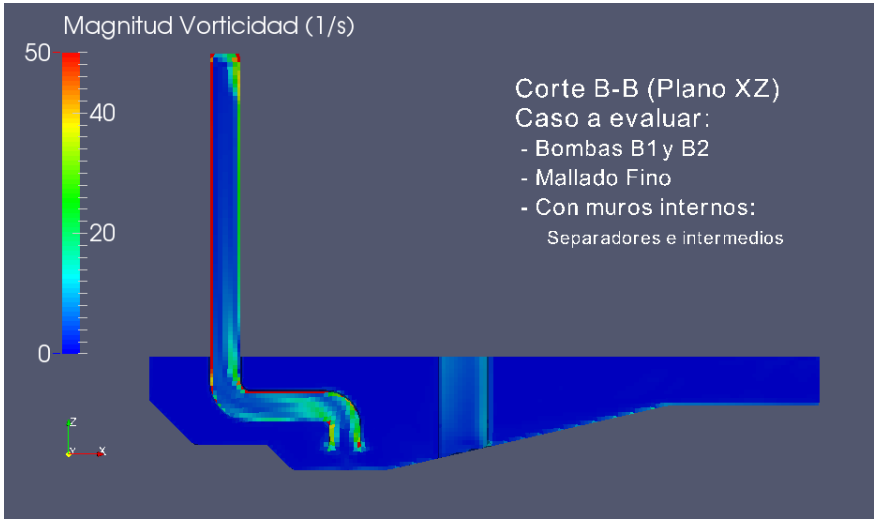

Figura N°11.90 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala

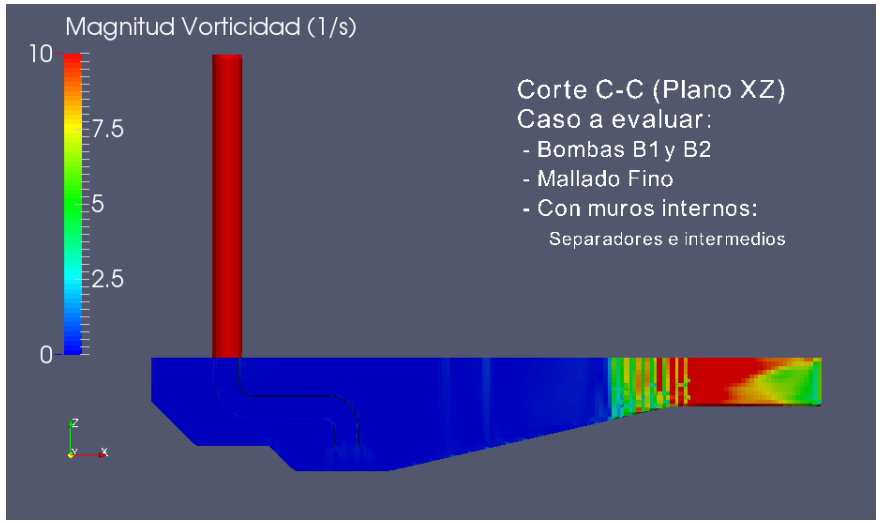

Figura N°11.91 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala

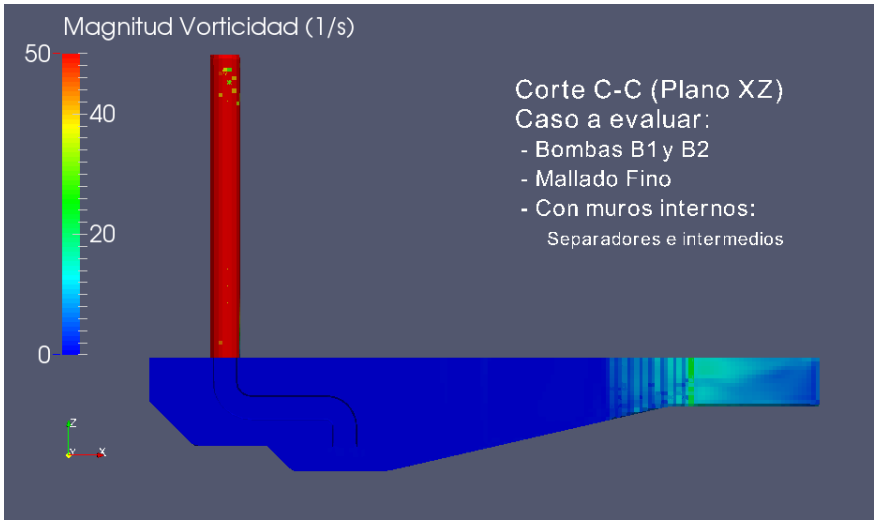

Figura N°11.92 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala

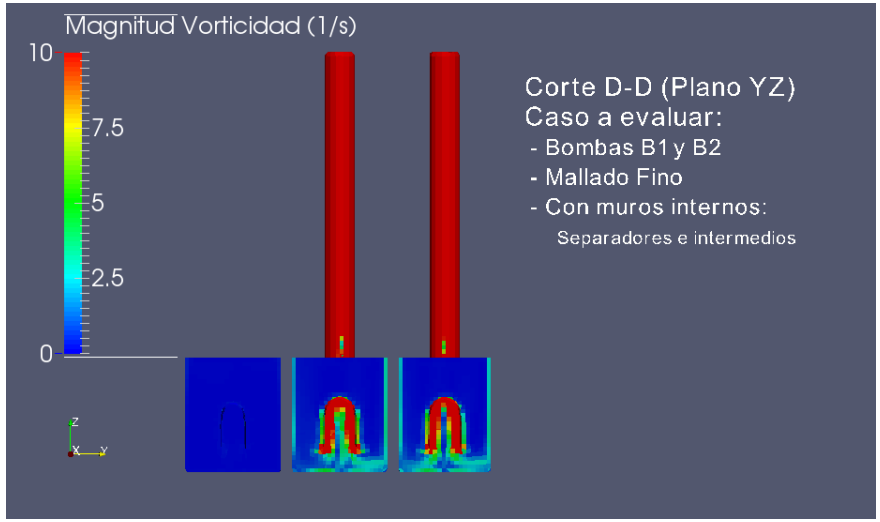

Figura N°11.93 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala

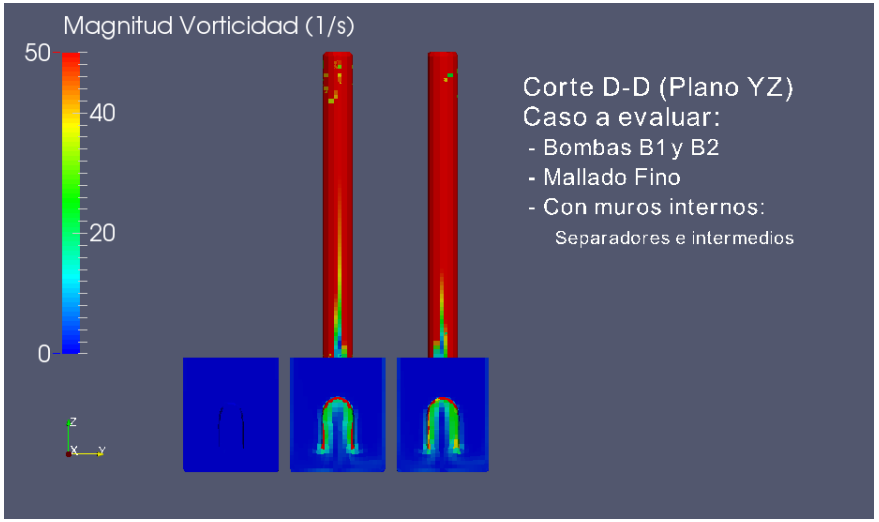

Figura N°11.94 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala

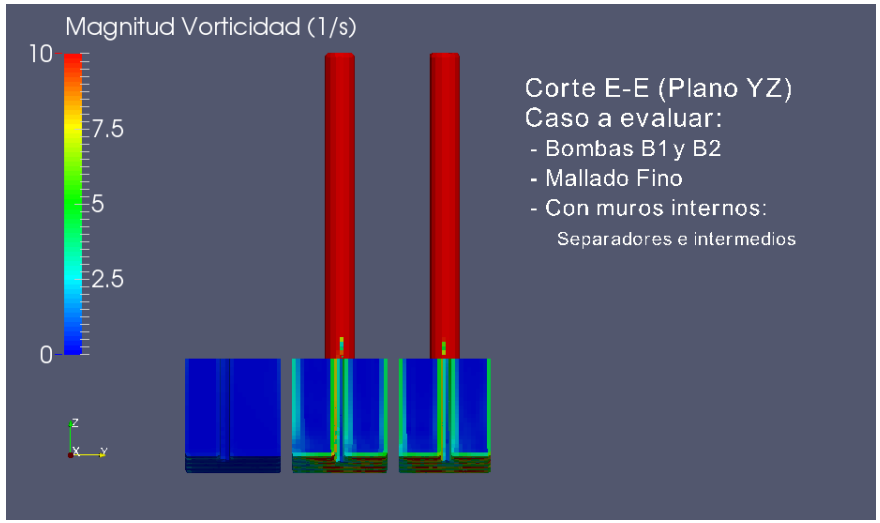

Figura N°11.95 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala

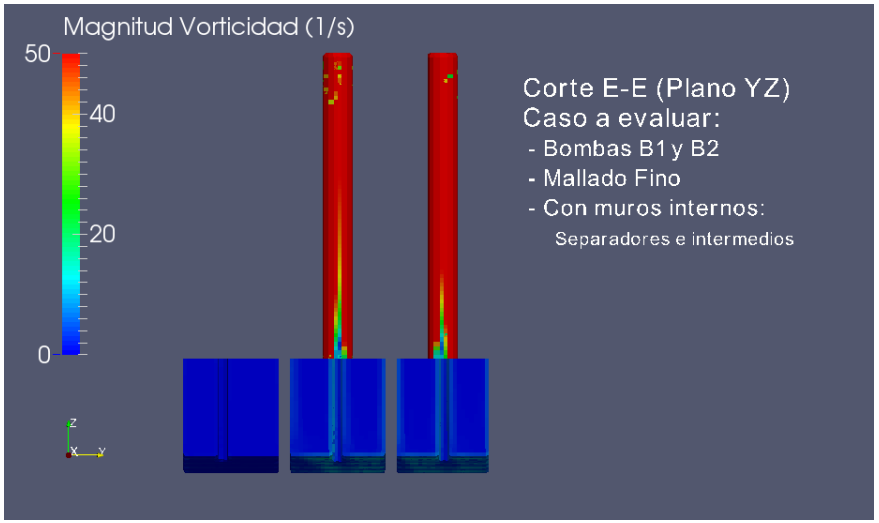

Figura N°11.96 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala

11.4.2.1.2 Sólo muros separadores

Figura N°11.97 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A

Figura N°11.98 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A

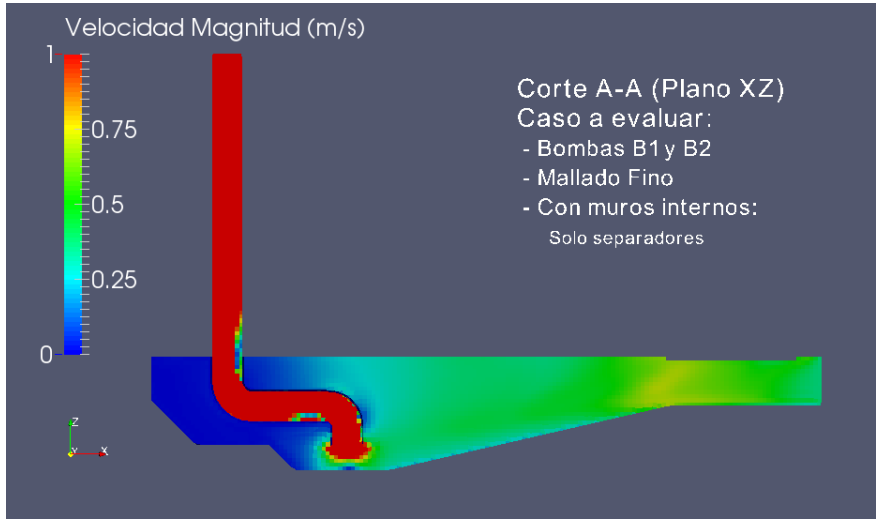

Figura N°11.99 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala

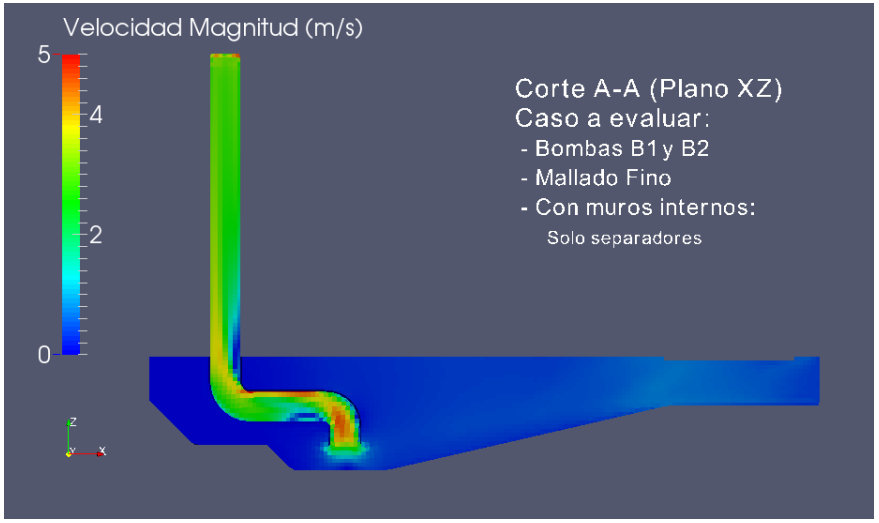

Figura N°11.100 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala

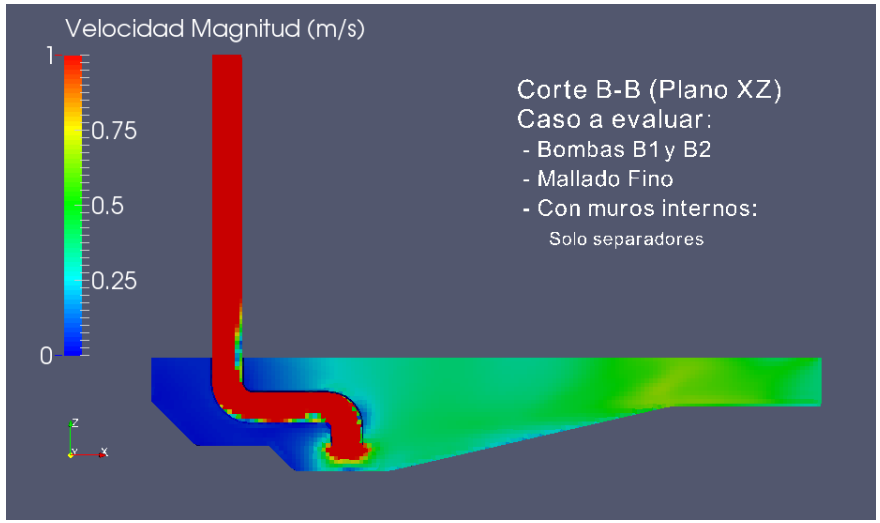

Figura N°11.101 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala

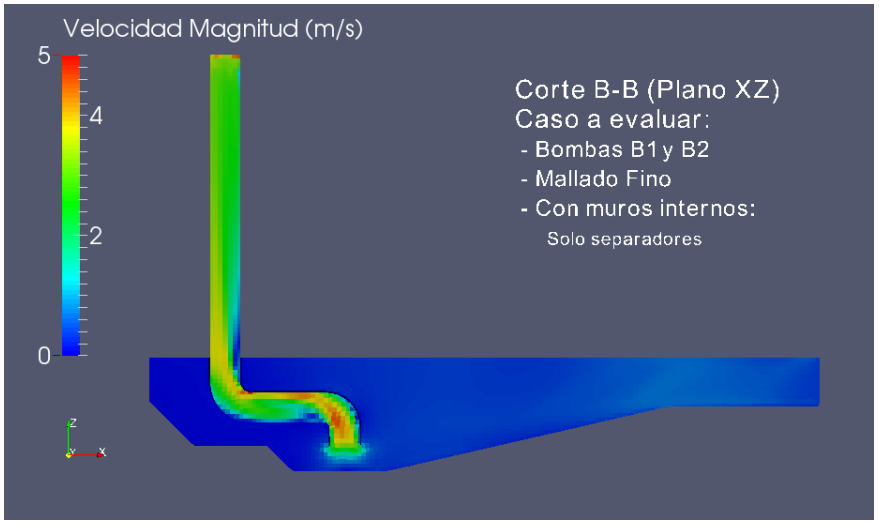

Figura N°11.102 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala

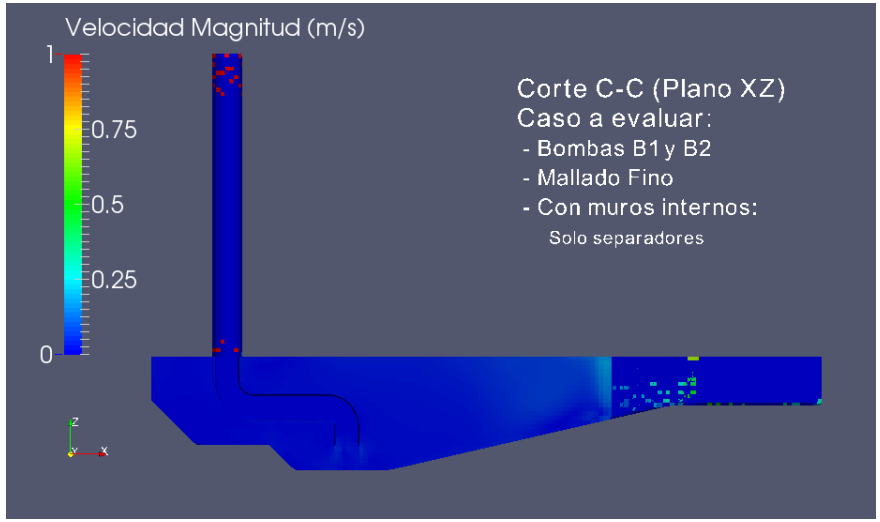

Figura N°11.103 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala

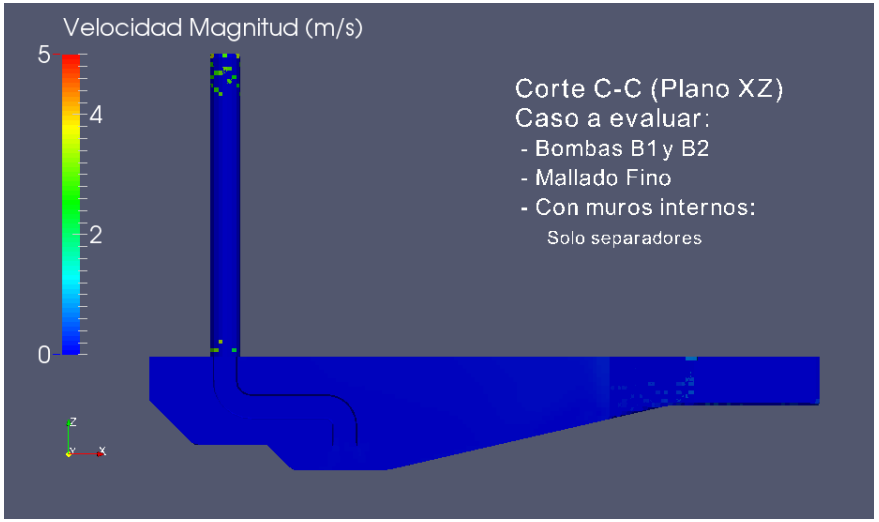

Figura N°11.104 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala

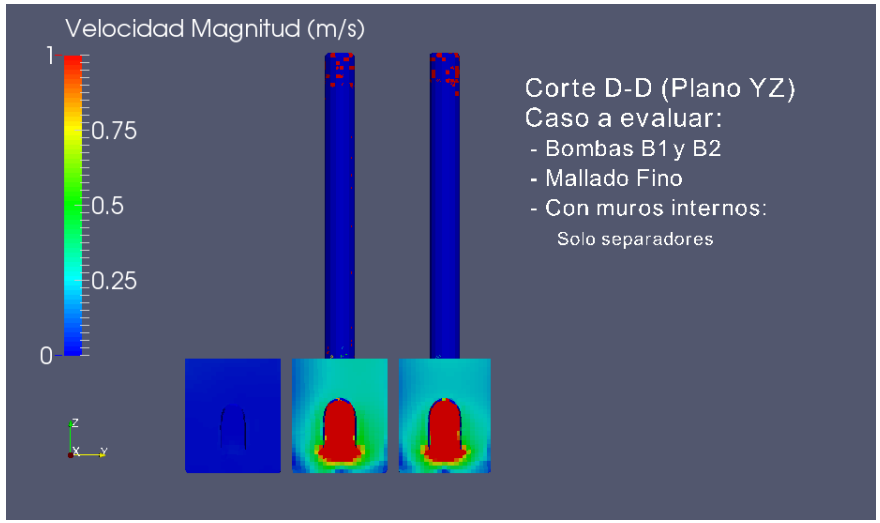

Figura N°11.105 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala

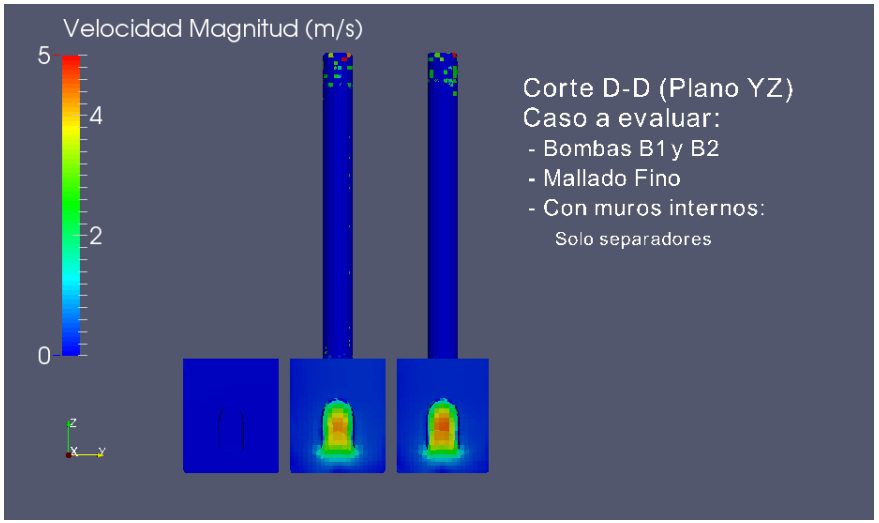

Figura N°11.106 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala

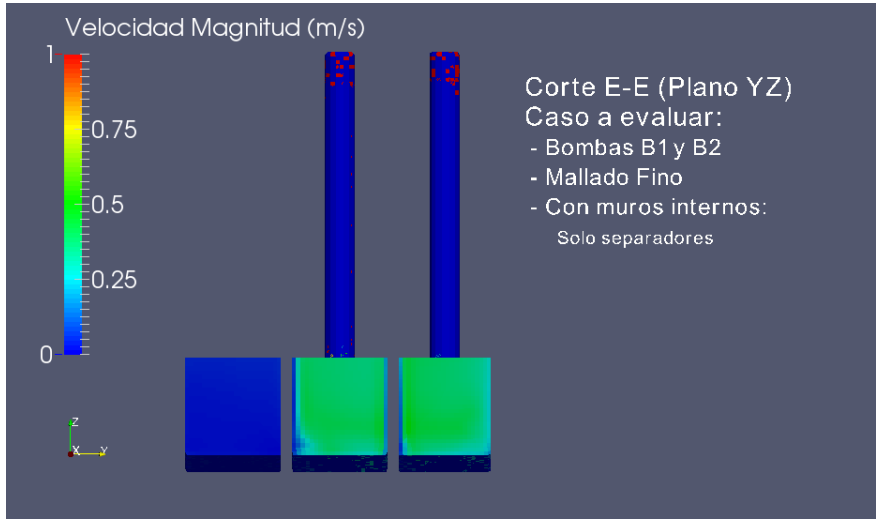

Figura N°11.107 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala

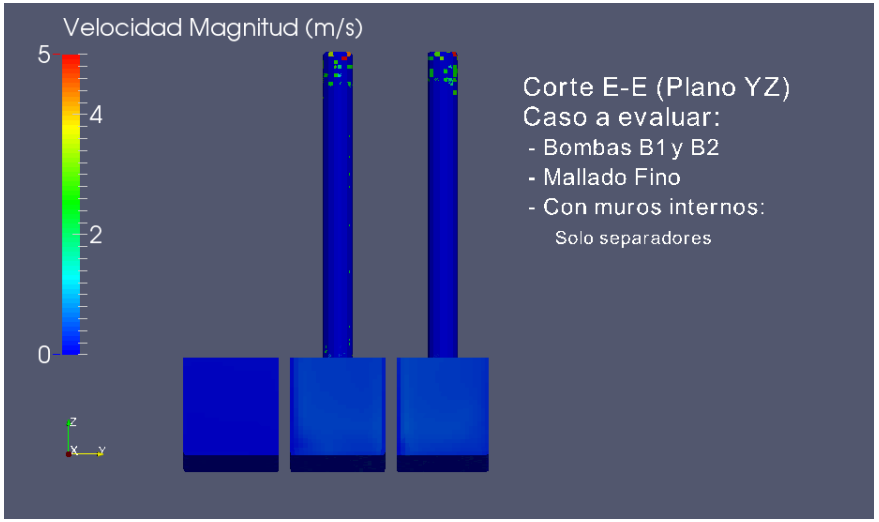

Figura N°11.108 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala

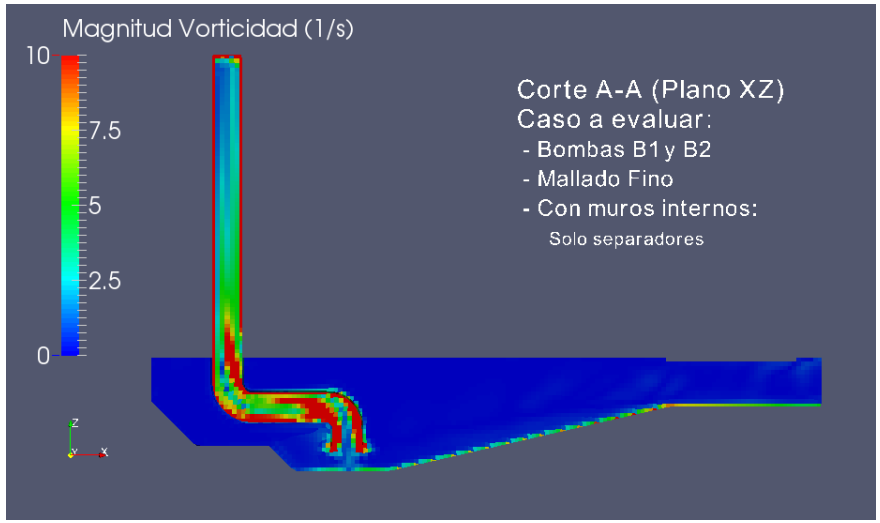

Figura N°11.109 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala

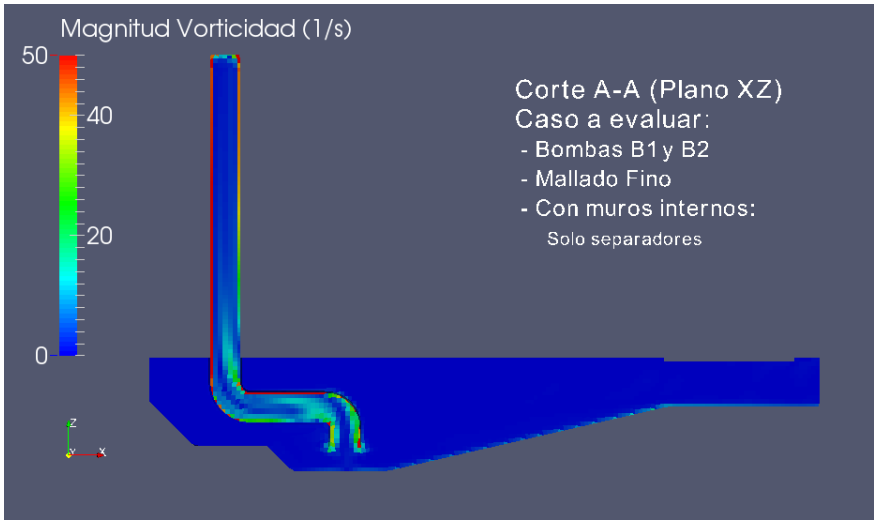

Figura N°11.110 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala

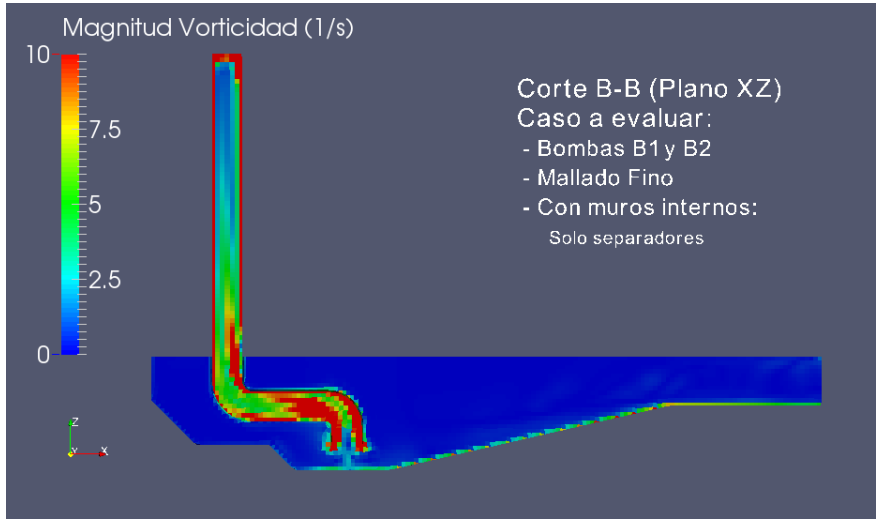

Figura N°11.111 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala

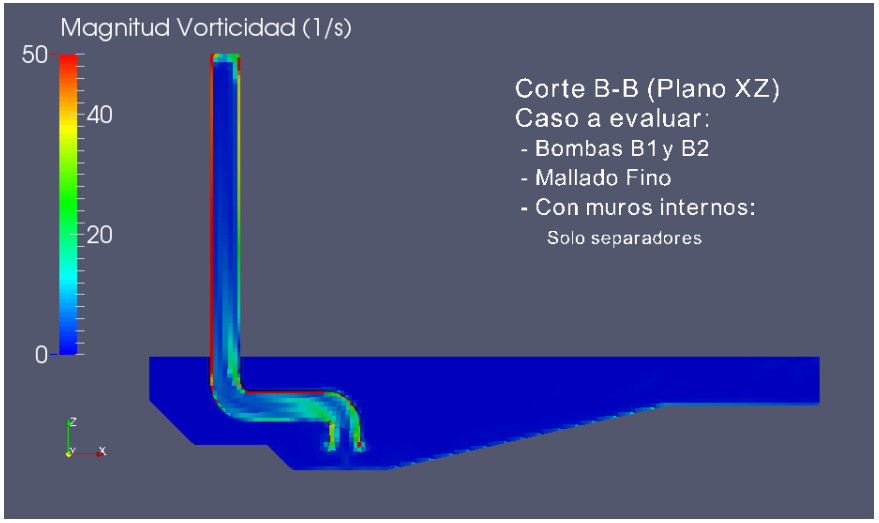

Figura N°11.112 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala

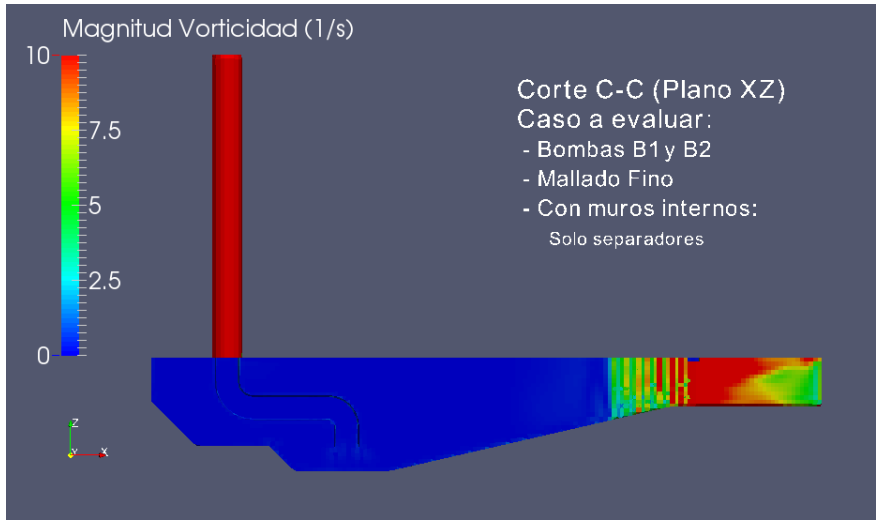

Figura N°11.113 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala

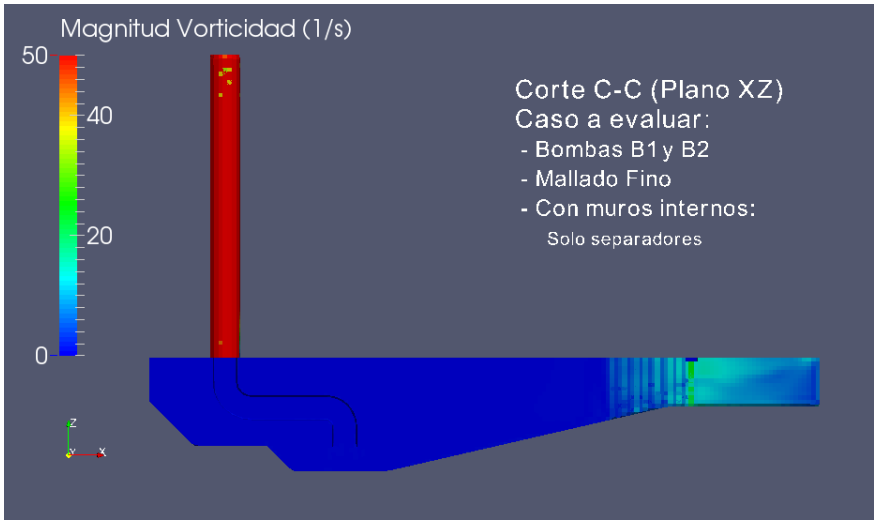

Figura N°11.114 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala

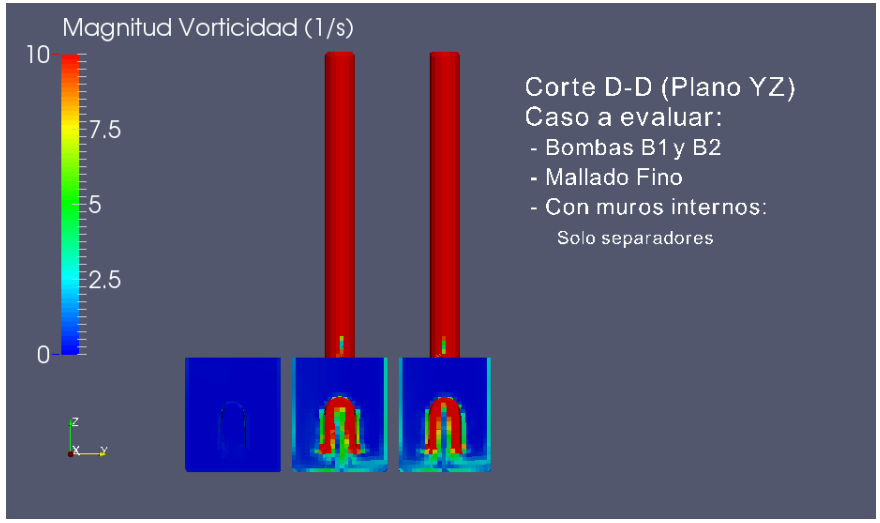

Figura N°11.115 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala

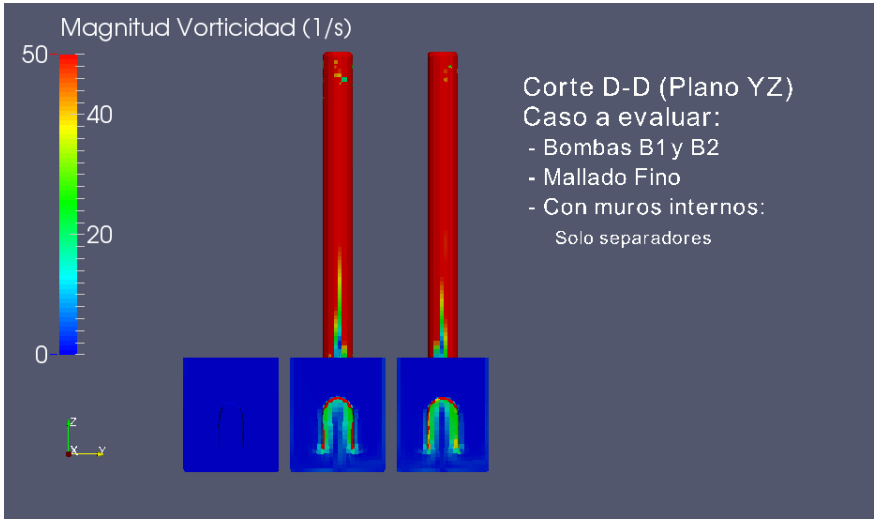

Figura N°11.116 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala

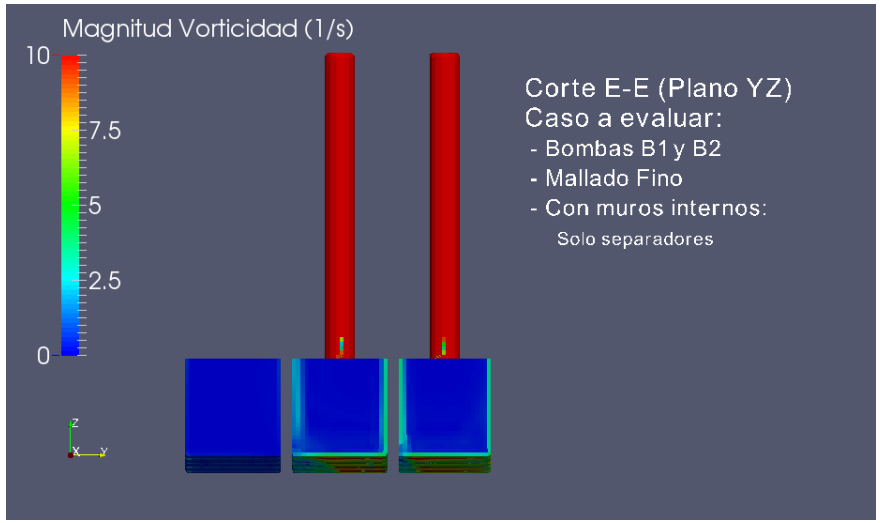

Figura N°11.117 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala

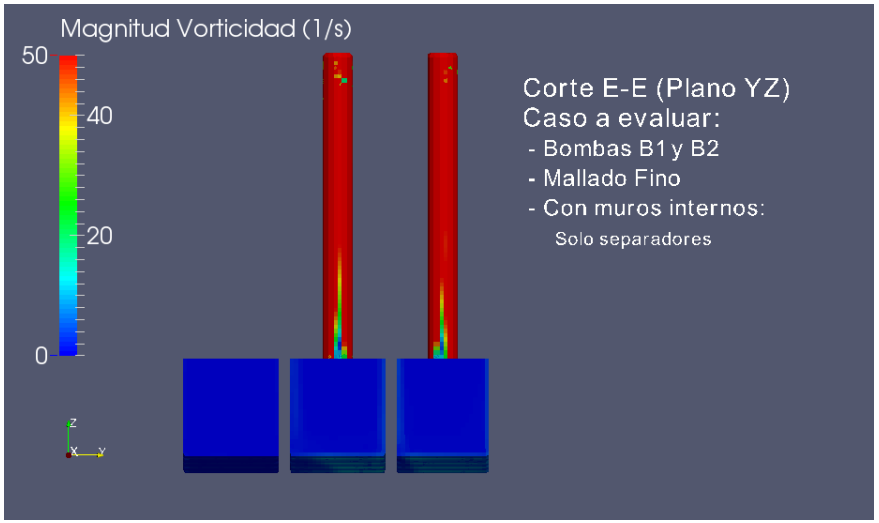

Figura N°11.118 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala

11.4.2.1.3 Sin muros separadores ni intermedios

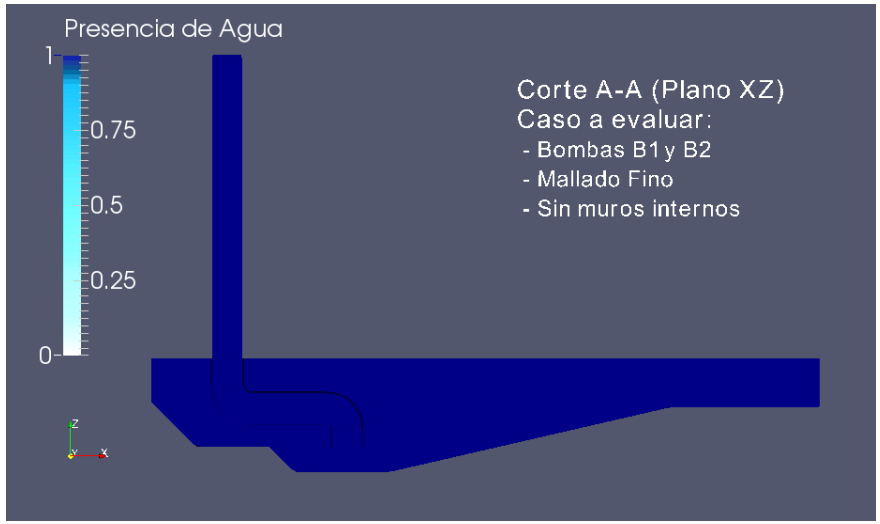

Figura N°11.119 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A

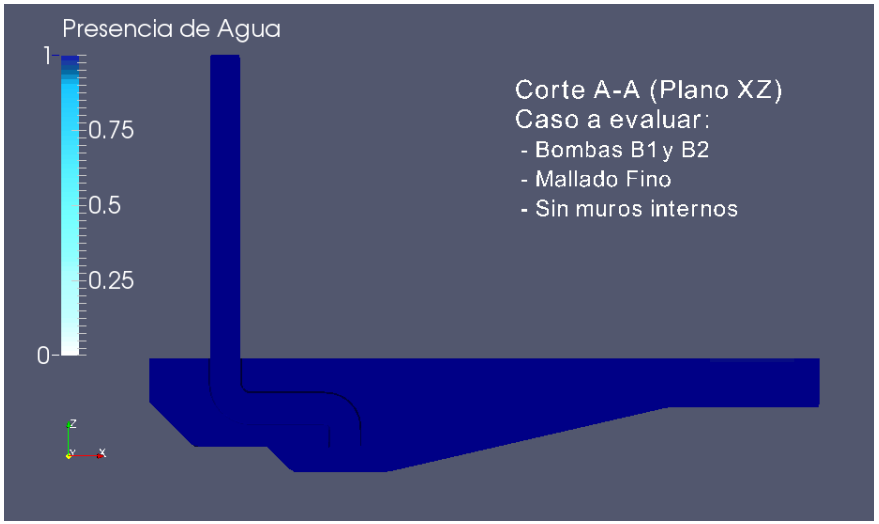

Figura N°11.120 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A

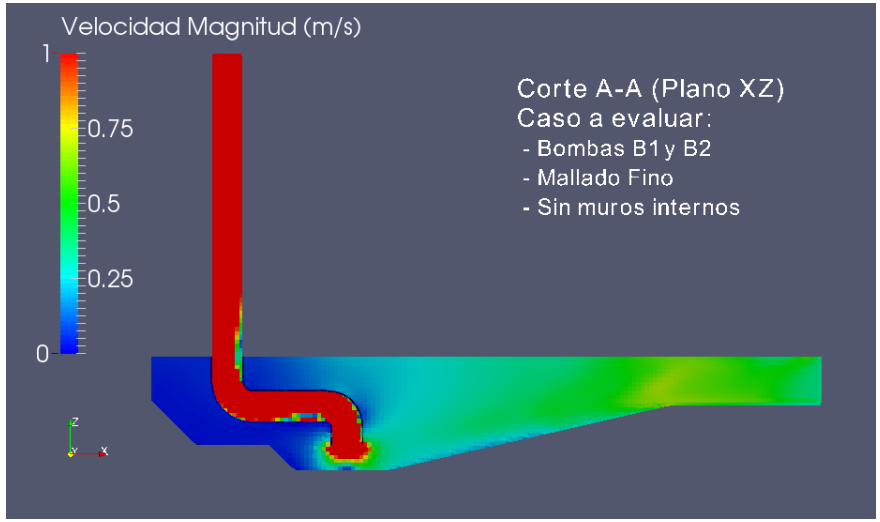

Figura N°11.121 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala

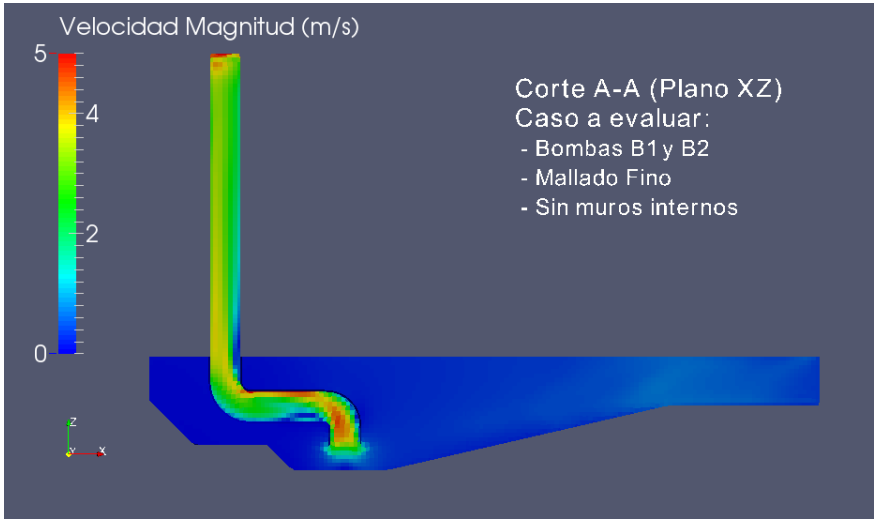

Figura N°11.122 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala

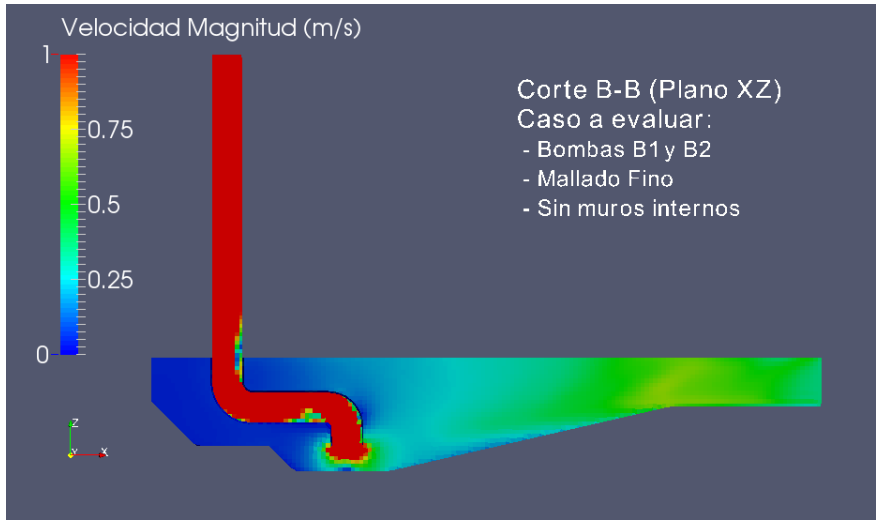

Figura N°11.123 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala

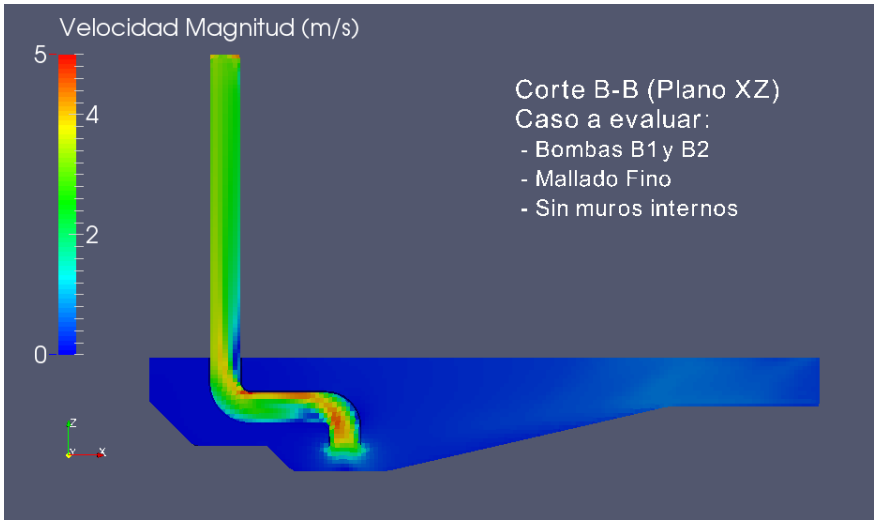

Figura N°11.124 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala

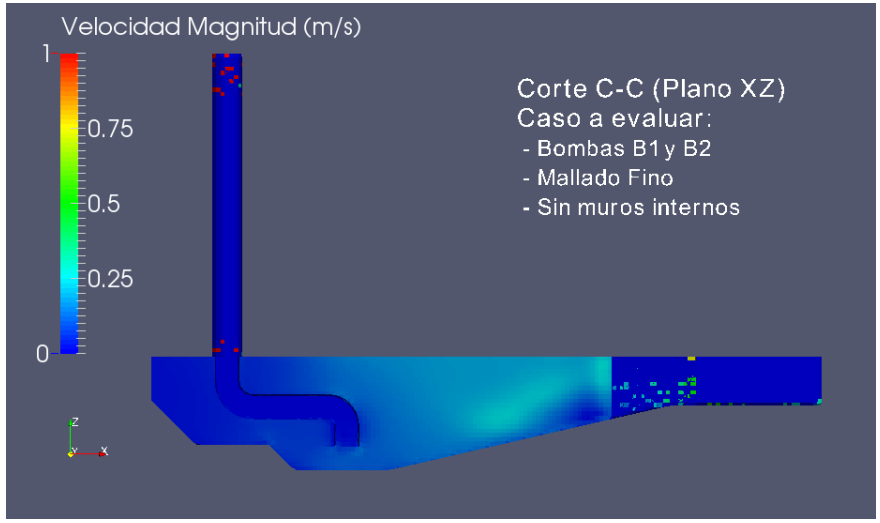

Figura N°11.125 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala

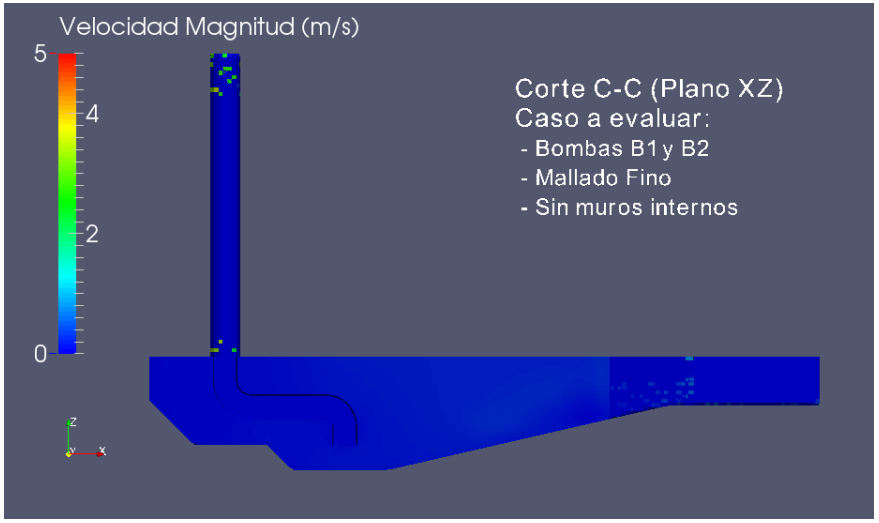

Figura N°11.126 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala

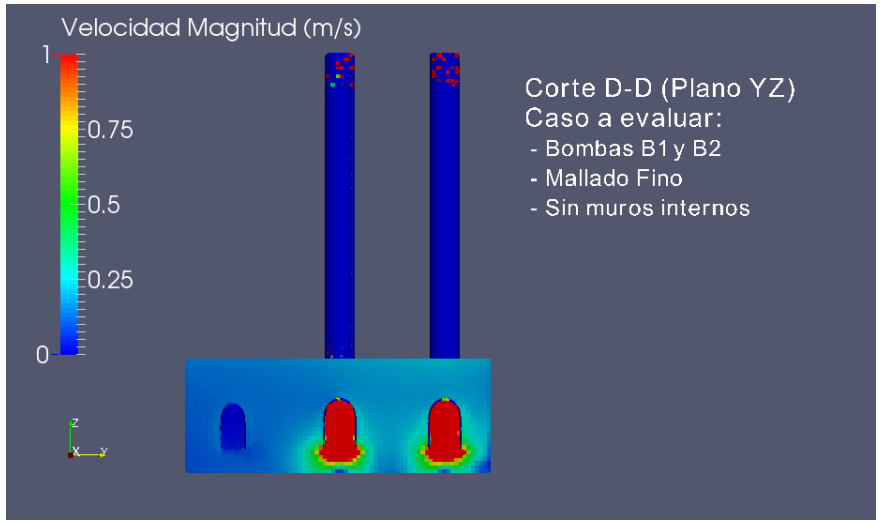

Figura N°11.127 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala

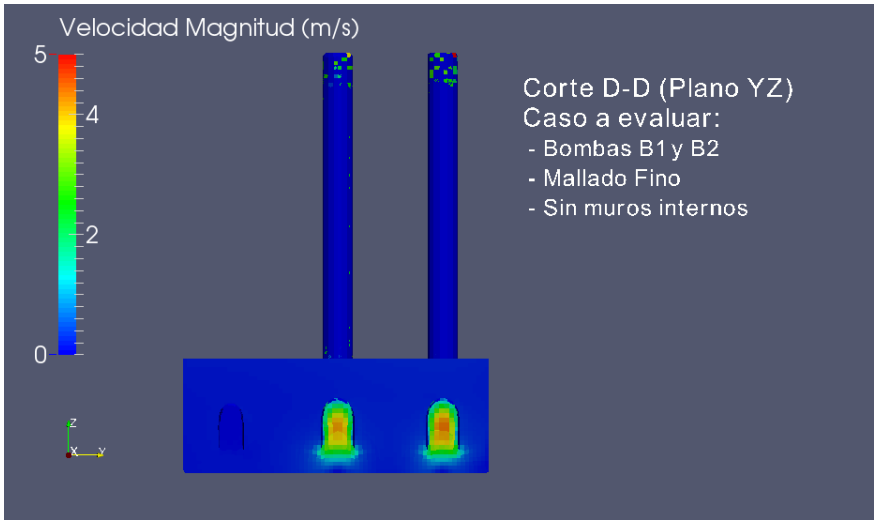

Figura N°11.128 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala

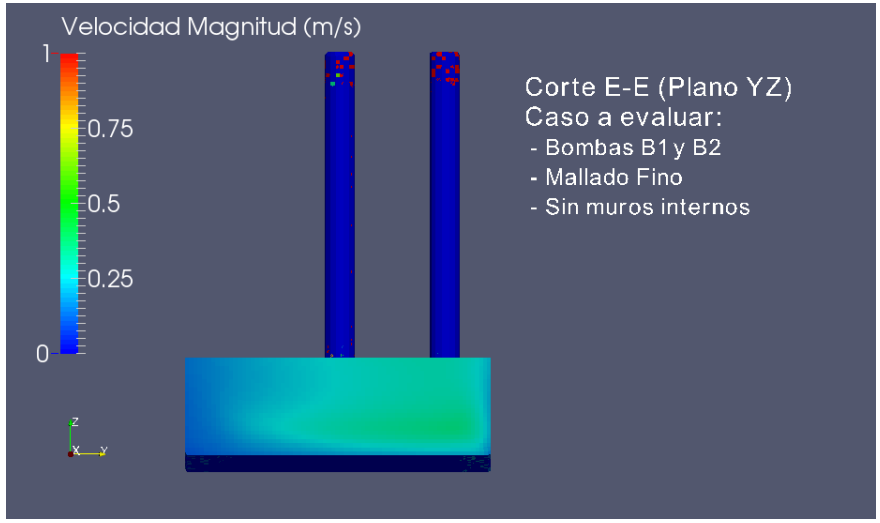

Figura N°11.129 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala

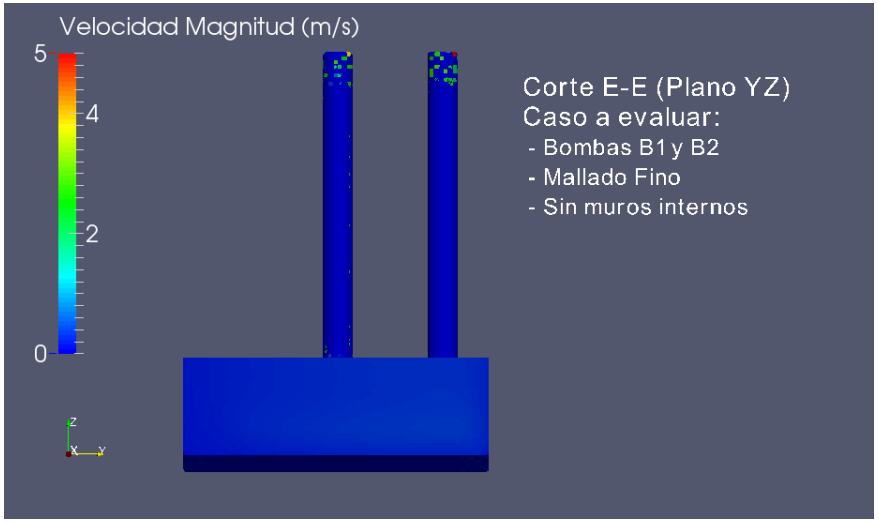

Figura N°11.130 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala

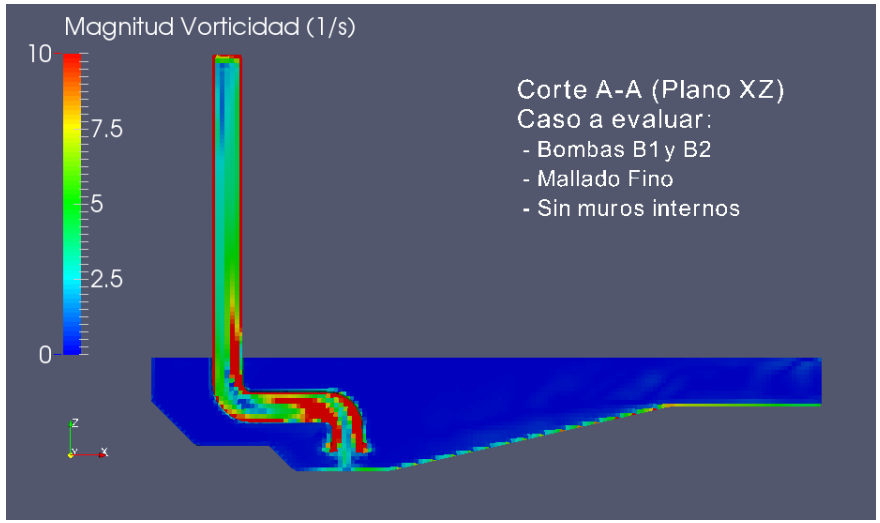

Figura N°11.131 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala

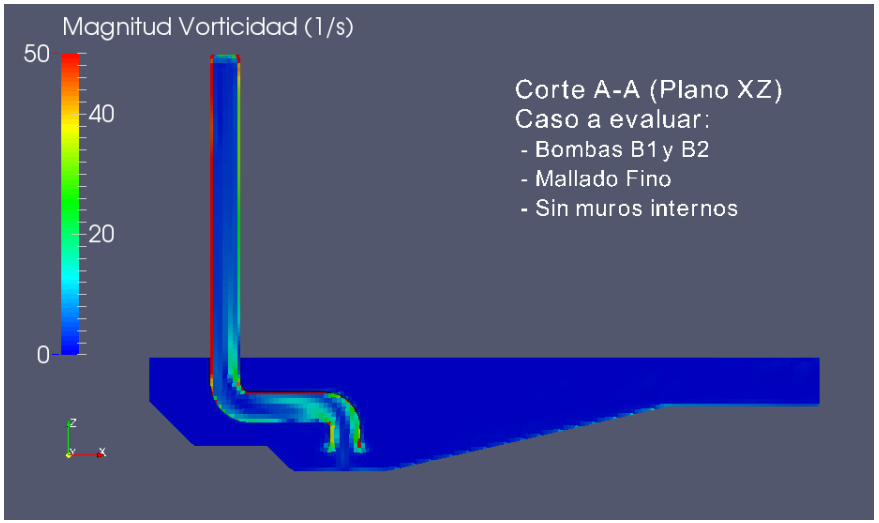

Figura N°11.132 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala

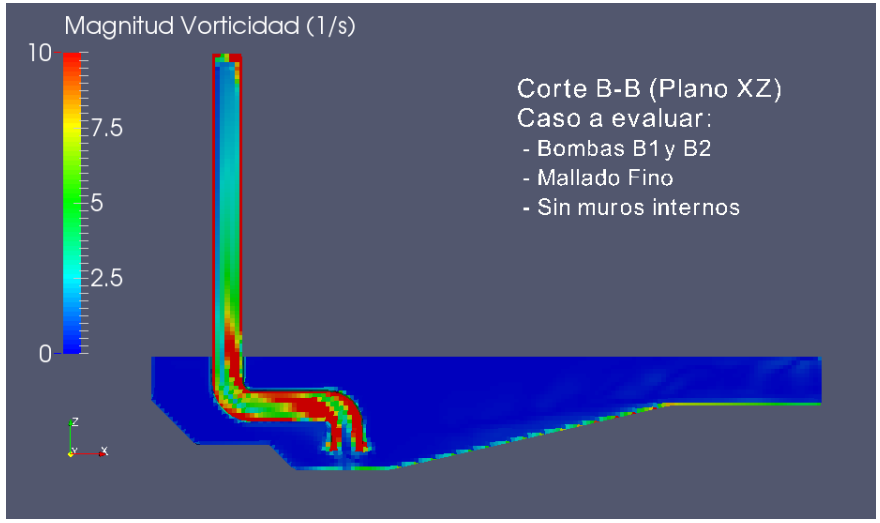

Figura N°11.133 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala

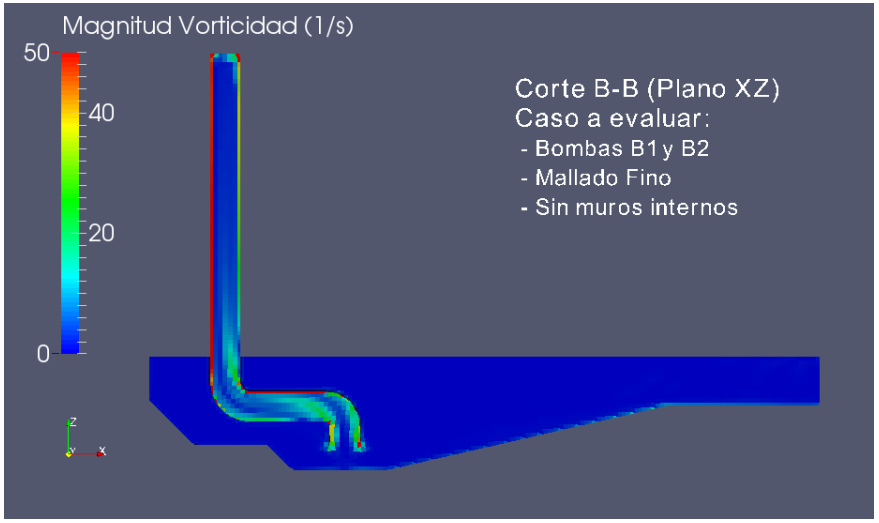

Figura N°11.134 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala

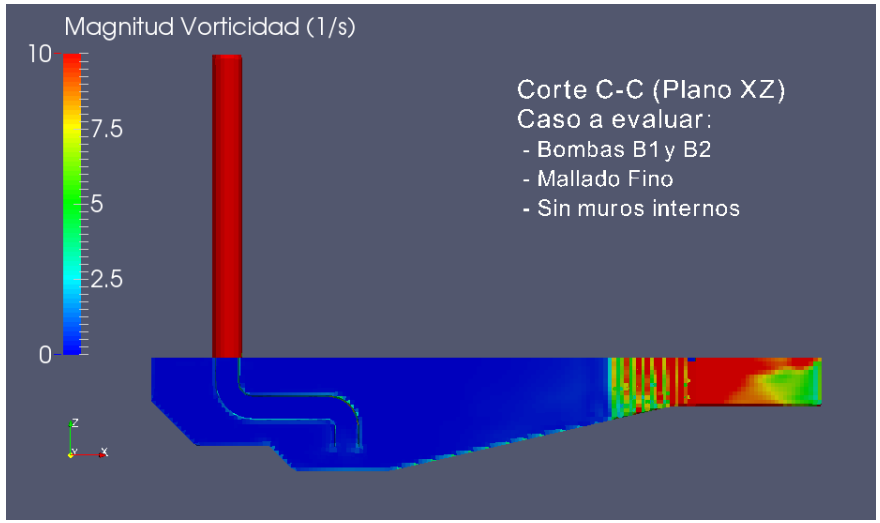

Figura N°11.135 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala

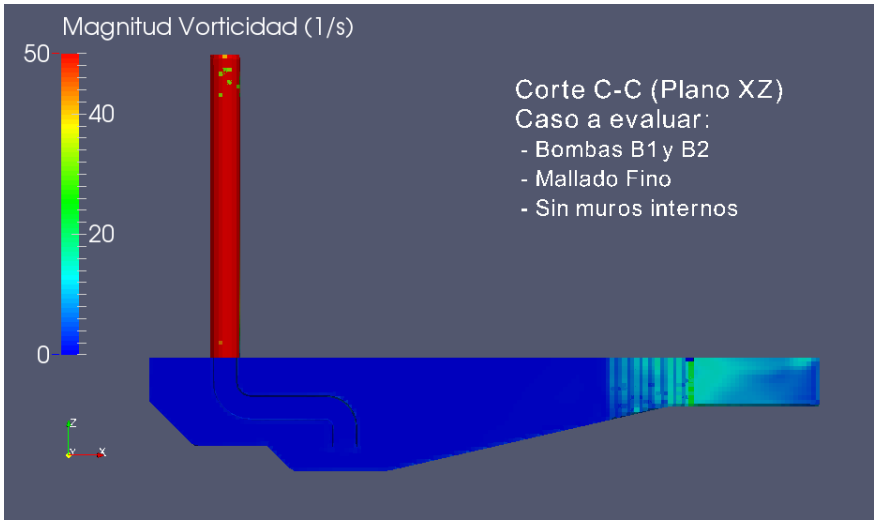

Figura N°11.136 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala

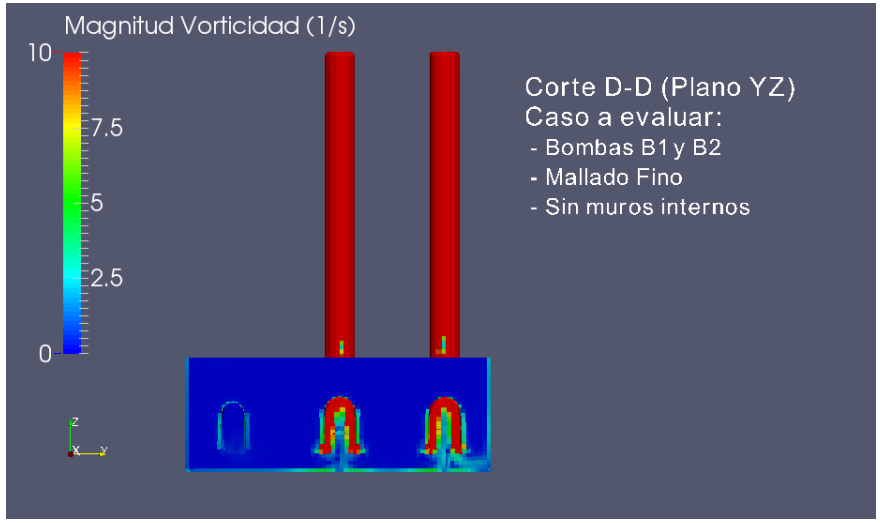

Figura N°11.137 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala

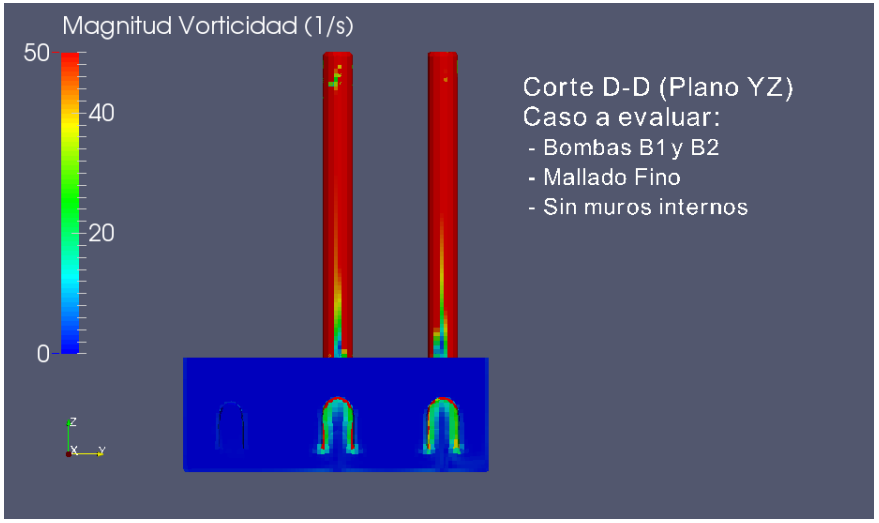

Figura N°11.138 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala

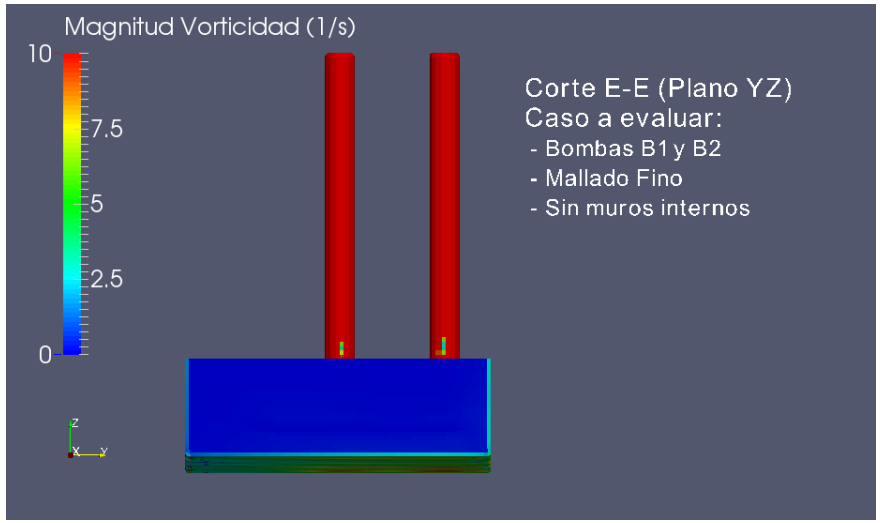

Figura N°11.139 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala

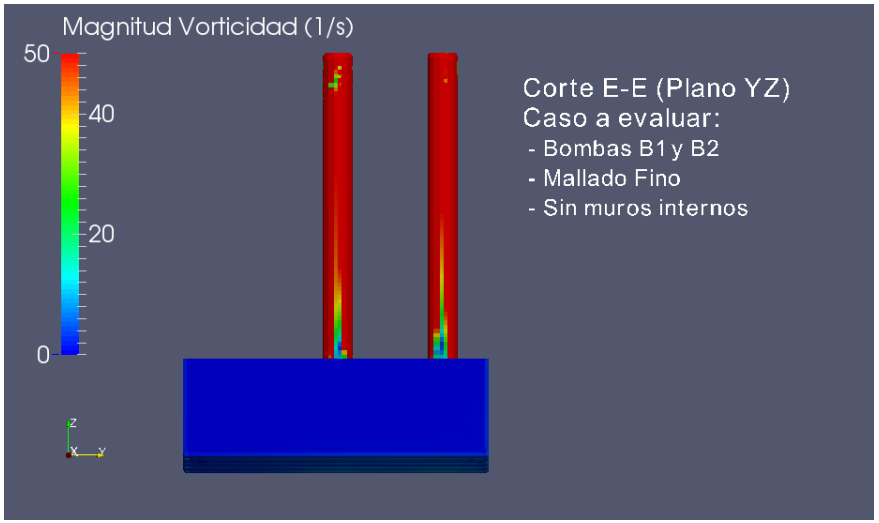

Figura N°11.140 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala

11.4.2.2 Operación de bombas 1 y 6

11.4.2.2.1 Muros separadores e intermedios

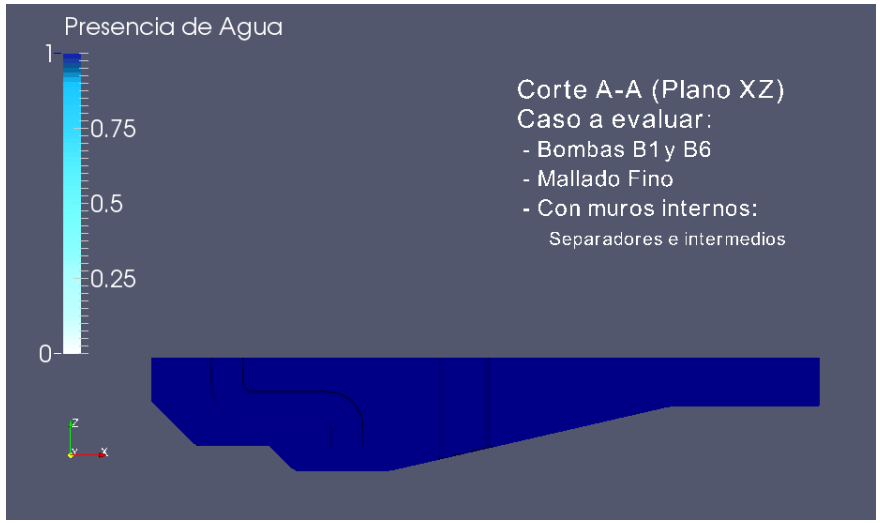

Figura N°11.141 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A

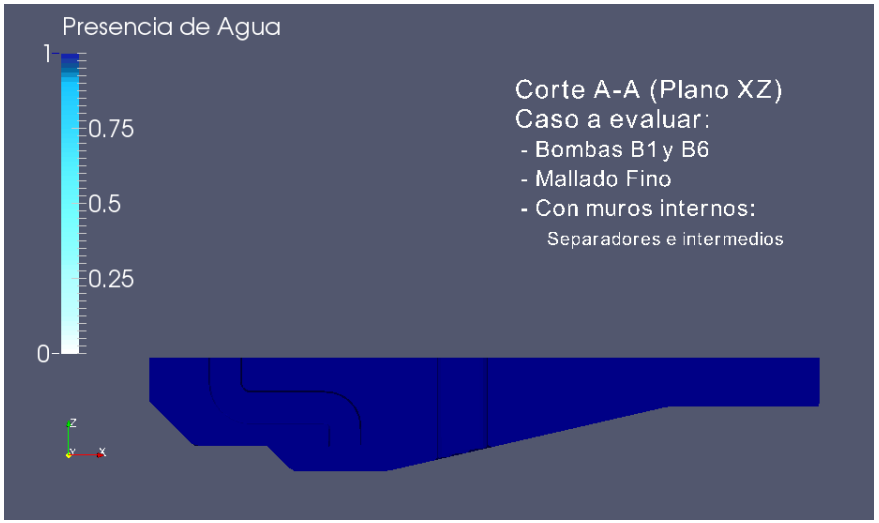

Figura N°11.142 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A

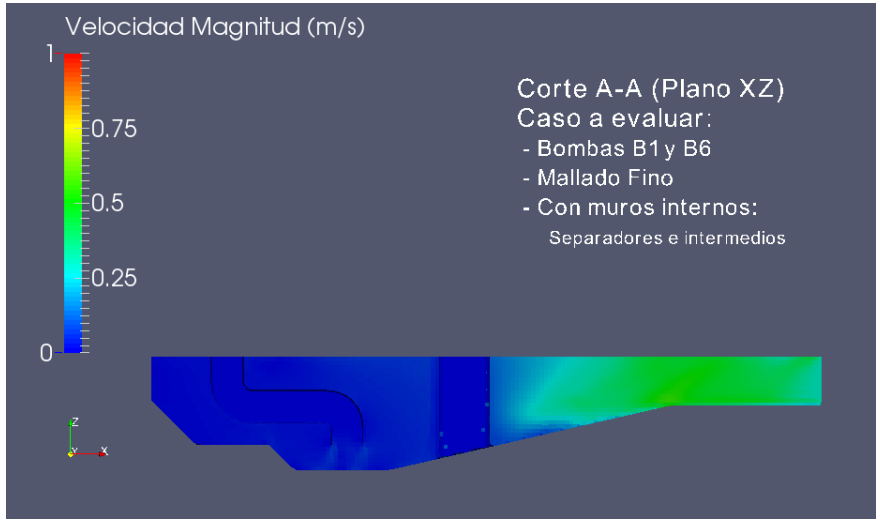

Figura N°11.143 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala

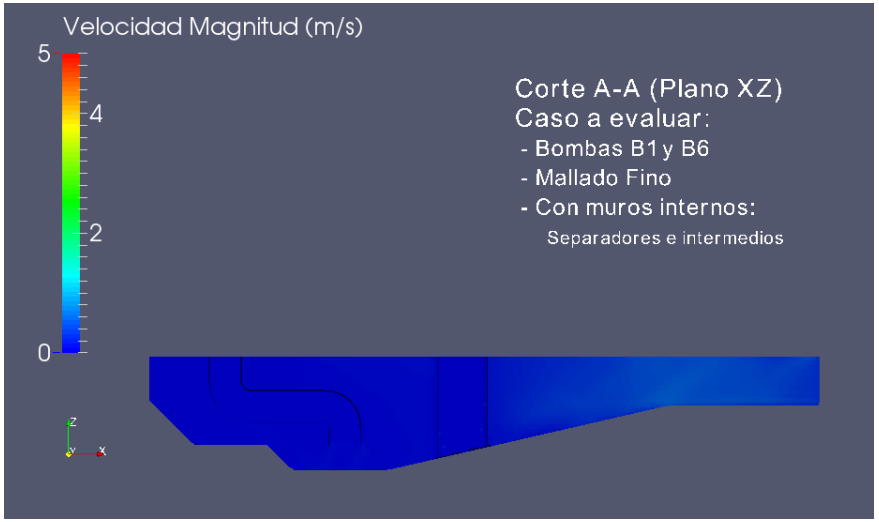

Figura N°11.144 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala

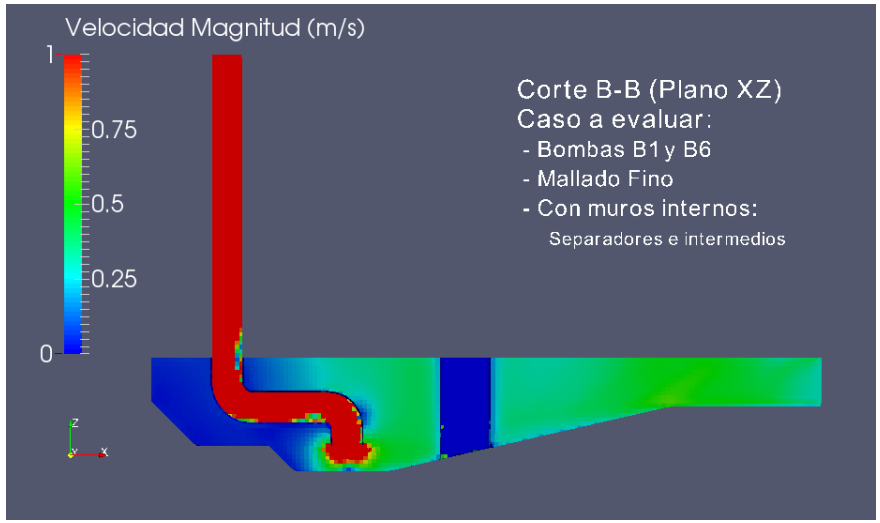

Figura N°11.145 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala

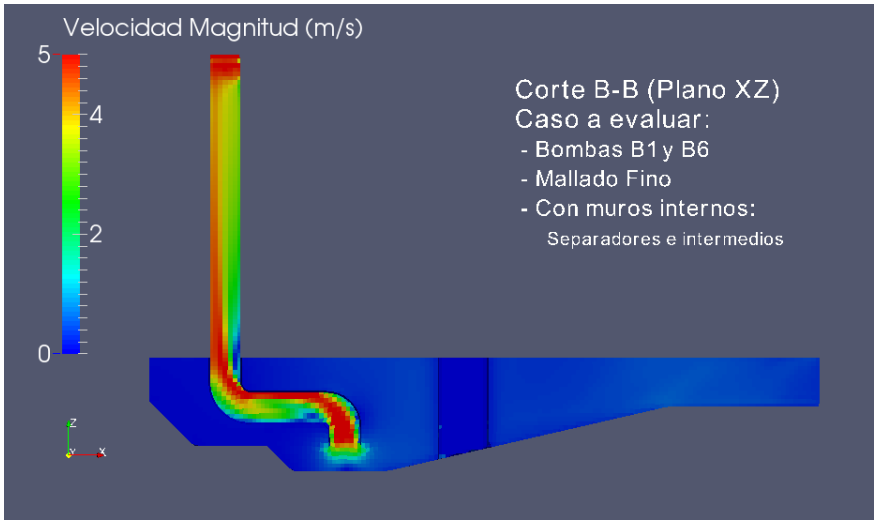

Figura N°11.146 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala

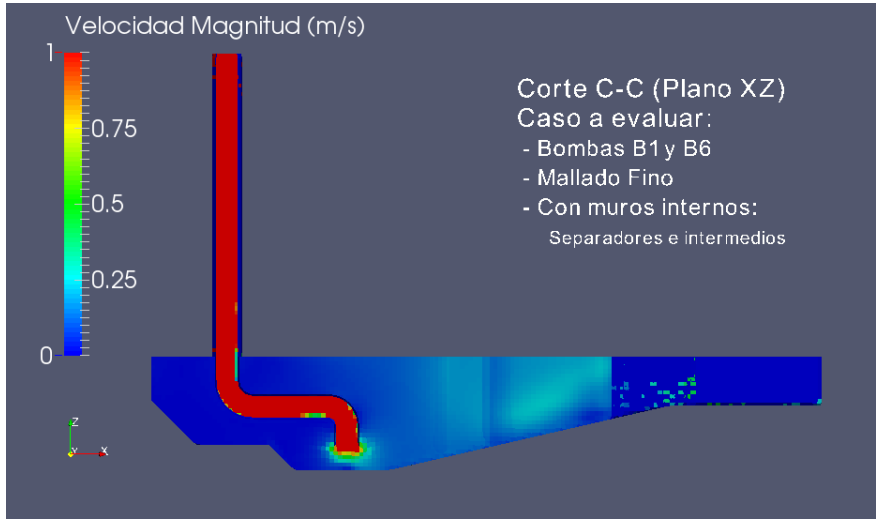

Figura N°11.147 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala

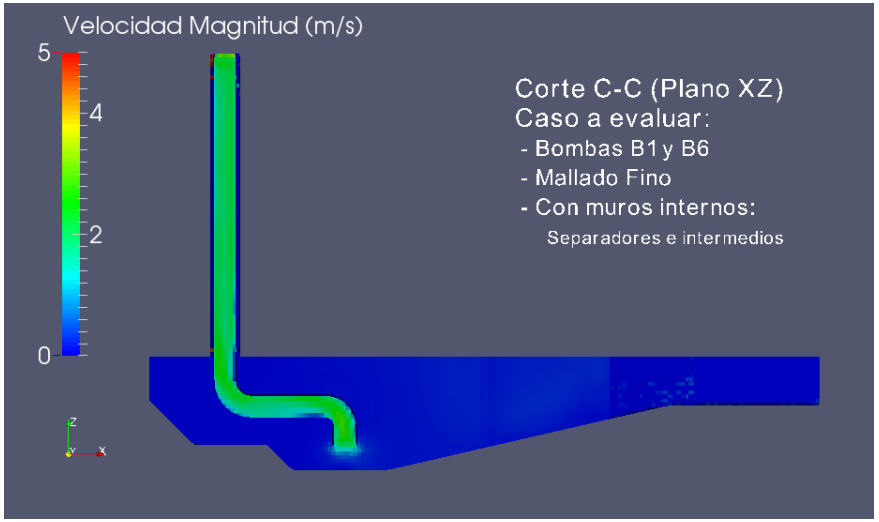

Figura N°11.148 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala

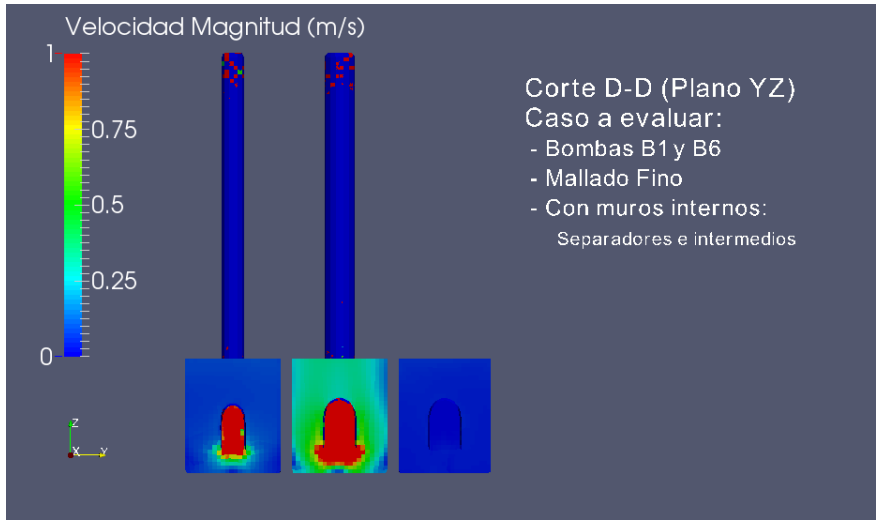

Figura N°11.149 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala

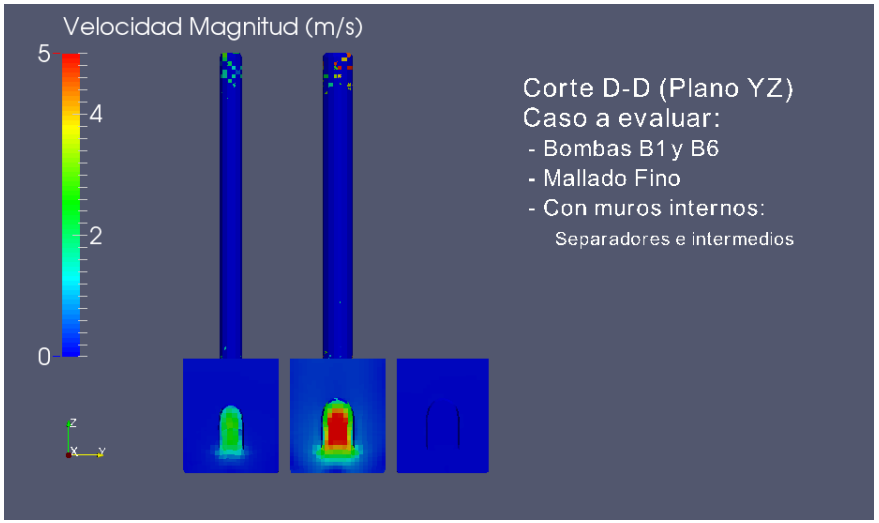

Figura N°11.150 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala

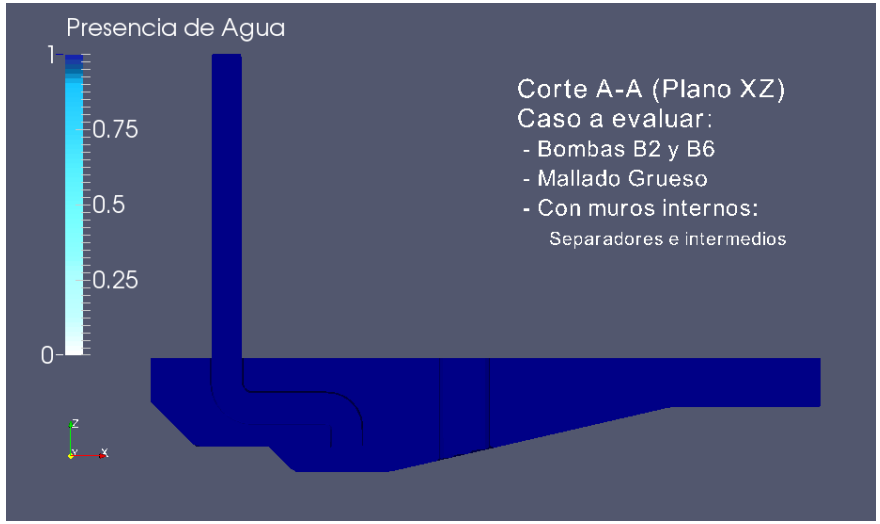

Figura N°11.151 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala

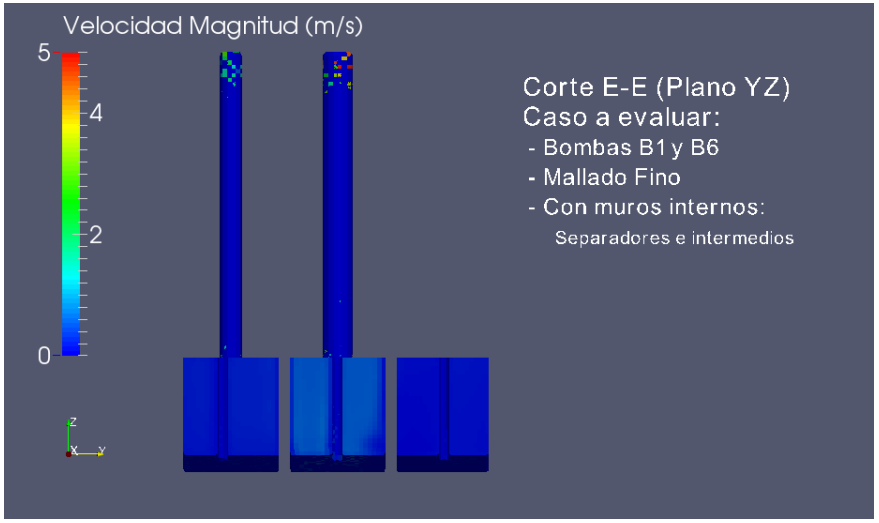

Figura N°11.152 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala

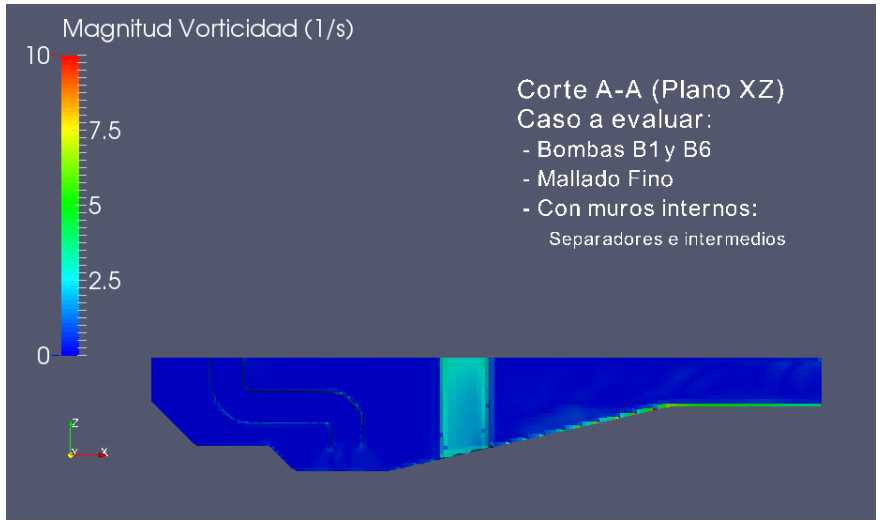

Figura N°11.153 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala

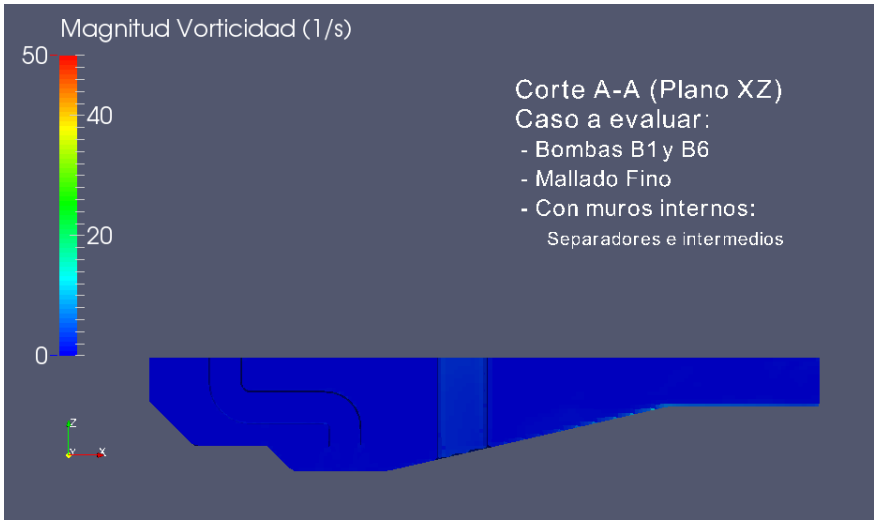

Figura N°11.154 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala

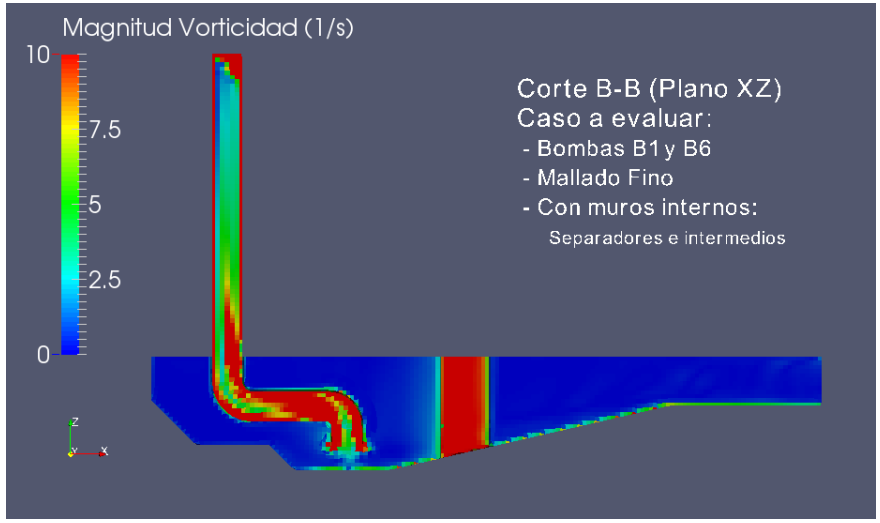

Figura N°11.155 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala

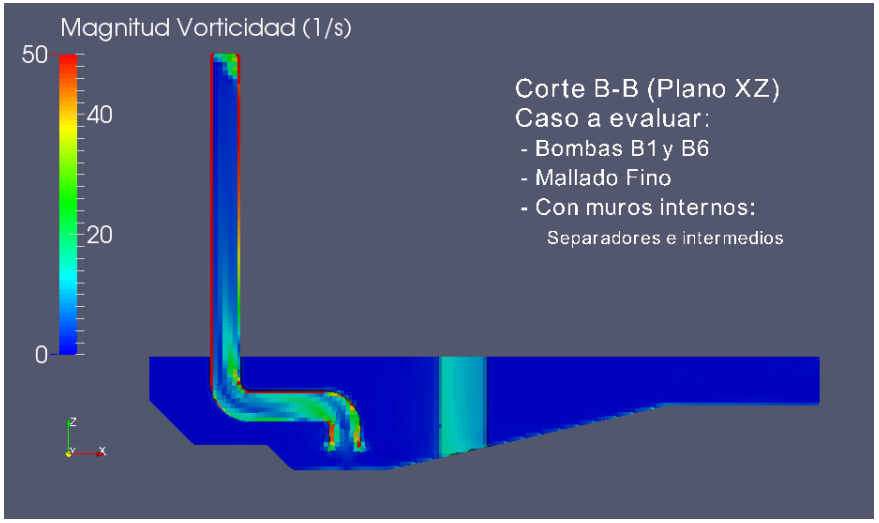

Figura N°11.156 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala

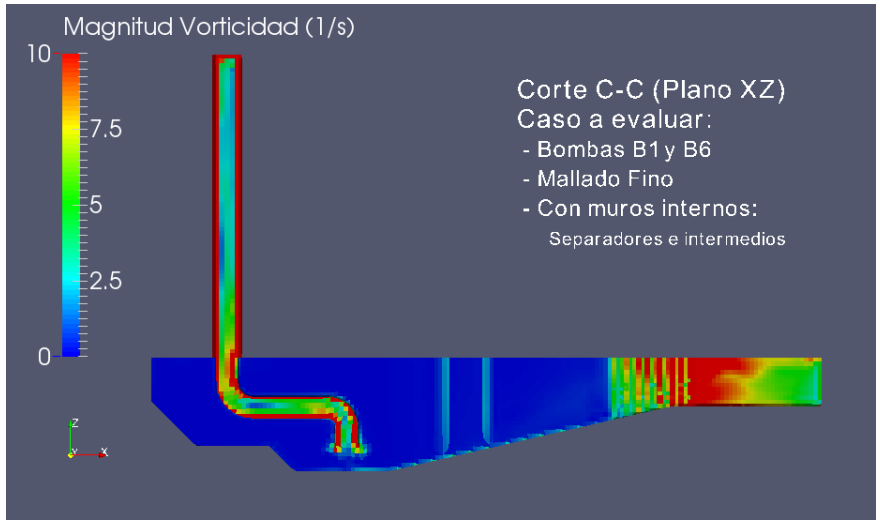

Figura N°11.157 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala

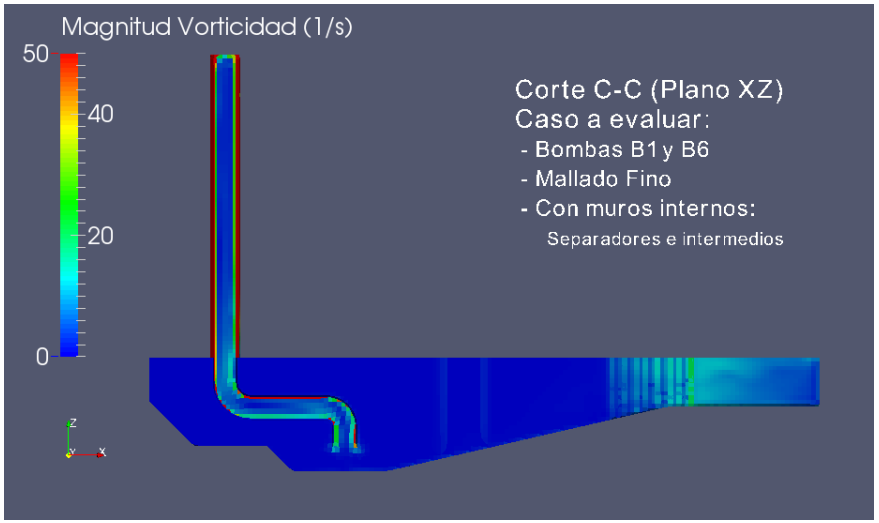

Figura N°11.158 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala

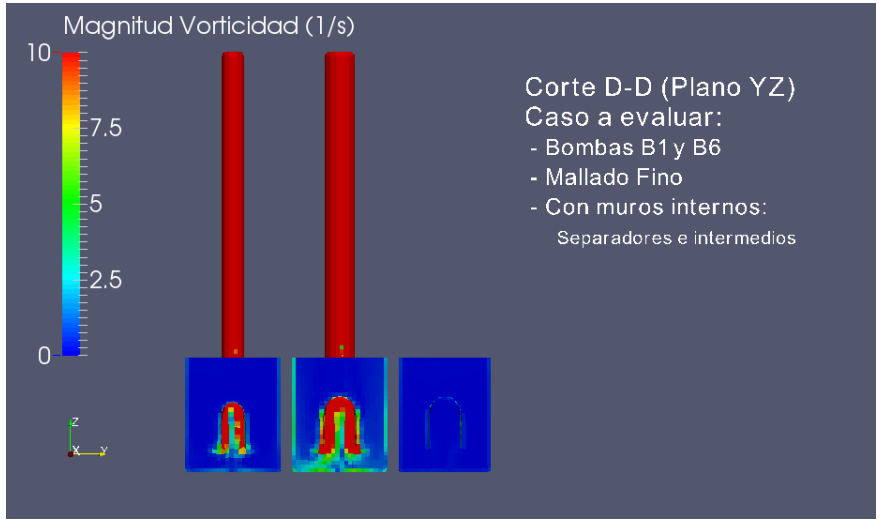

Figura N°11.159 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala

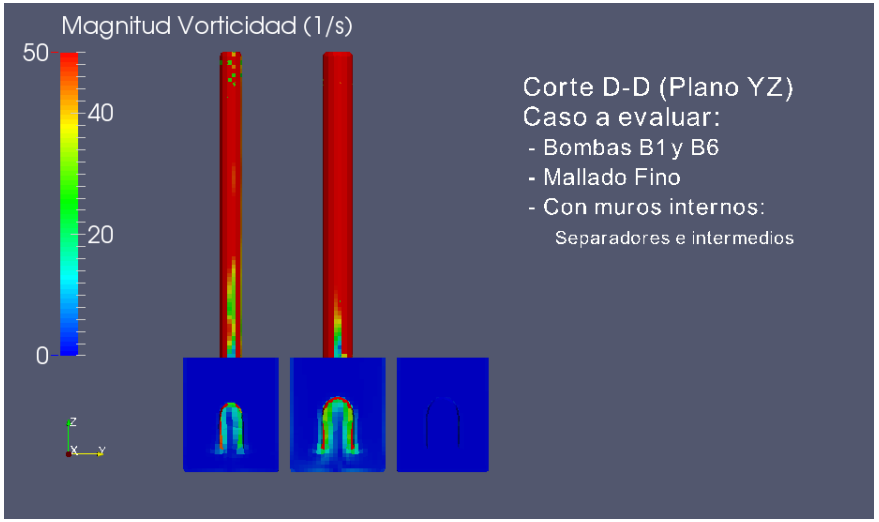

Figura N°11.160 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala

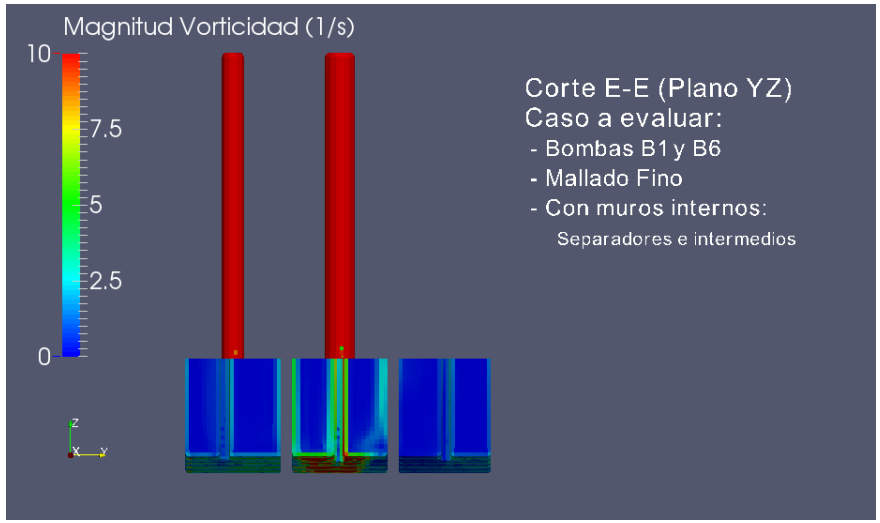

Figura N°11.161 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala

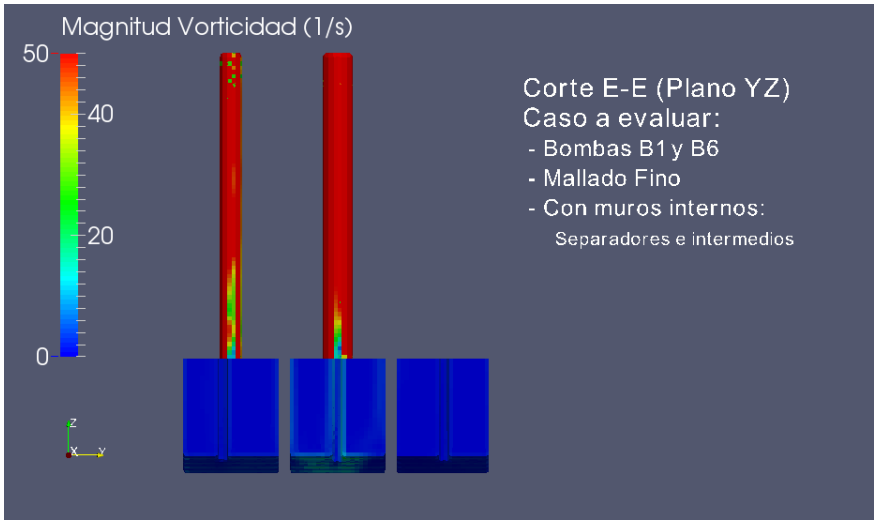

Figura N°11.162 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala

11.4.2.3 Operación de bombas 2 y 6

11.4.2.3.1 Muros separadores e intermedios

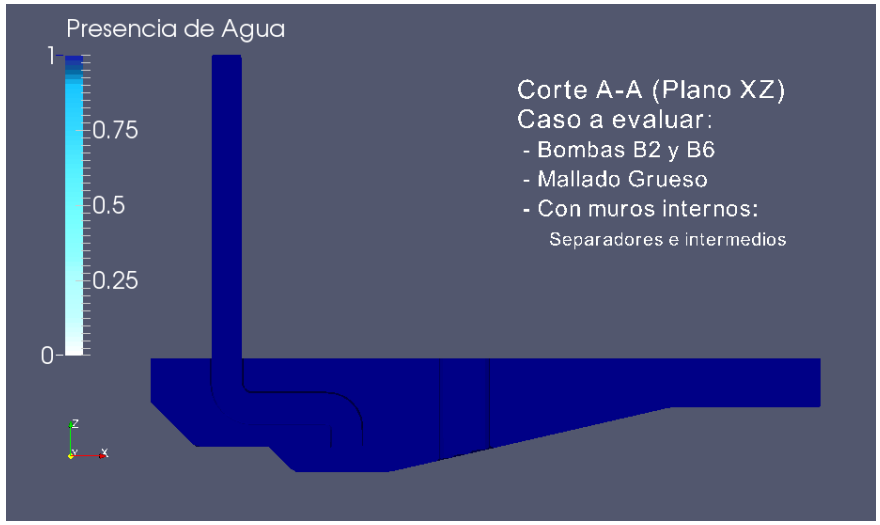

Figura N°11.163 – Ingreso de aire – Tiempo inicial – Corte A-A

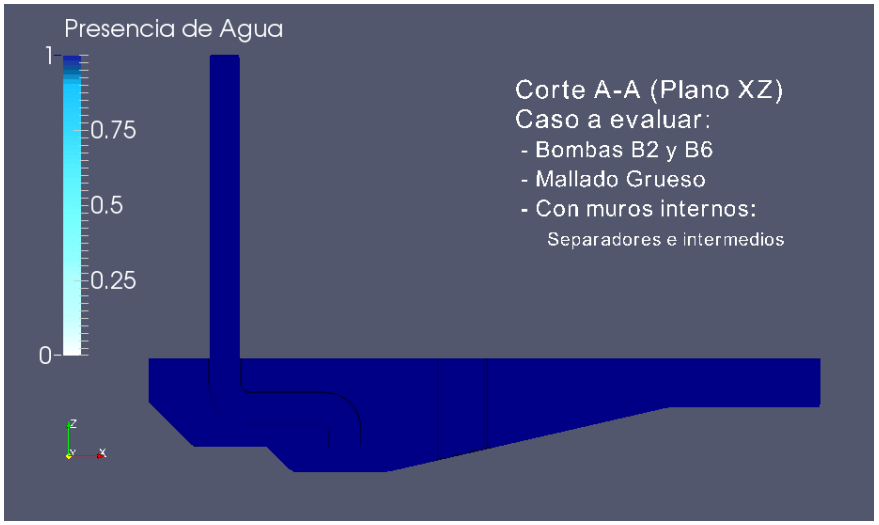

Figura N°11.164 – Ingreso de aire – Tiempo final – Corte A-A

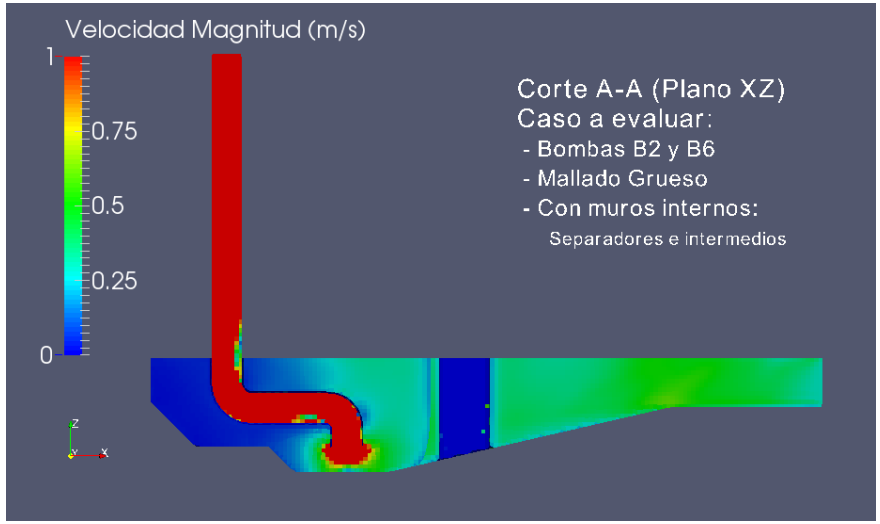

Figura N°11.165 – Velocidad – Corte A-A – Pequeña Escala

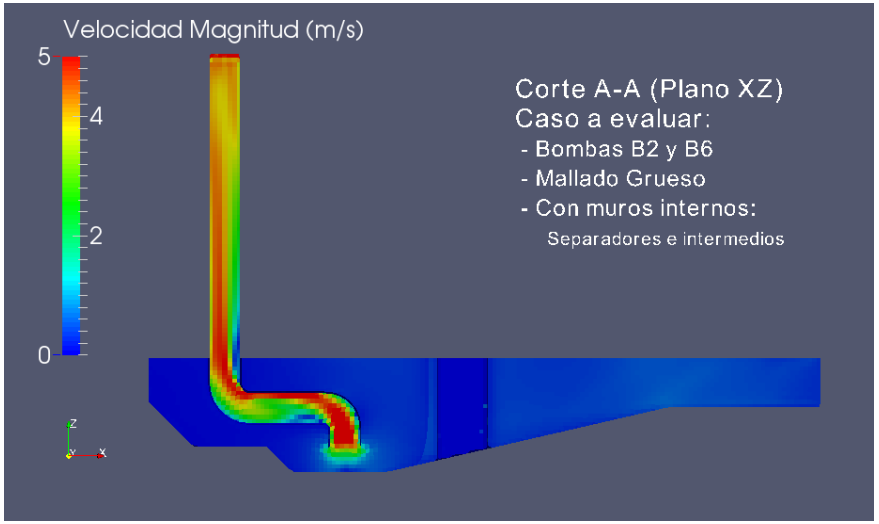

Figura N°11.166 – Velocidad – Corte A-A – Mediana Escala

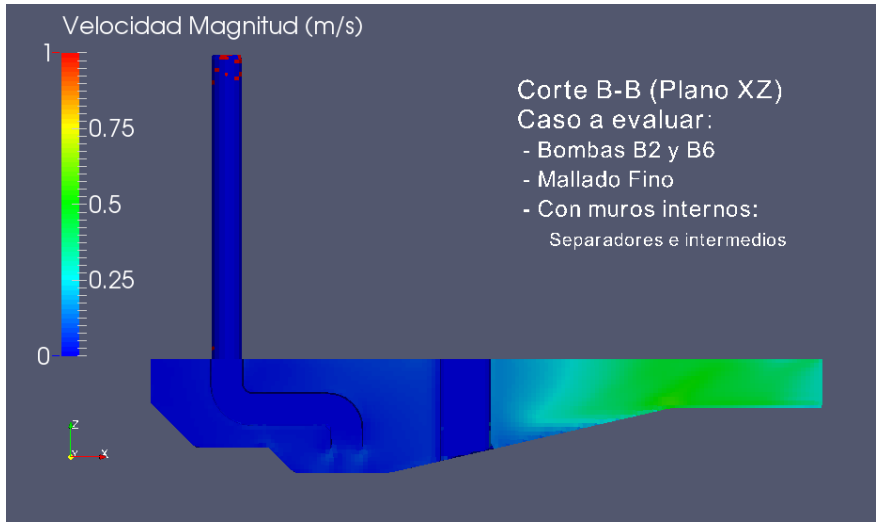

Figura N°11.167 – Velocidad – Corte B-B – Pequeña Escala

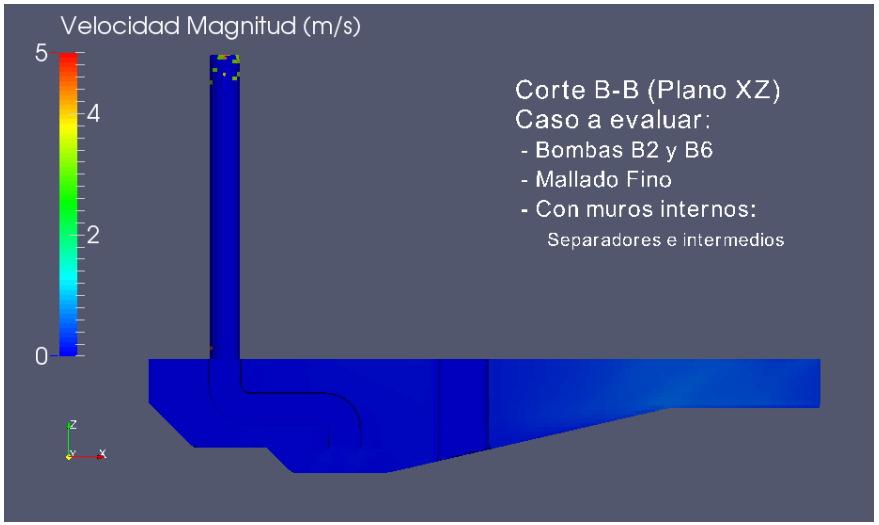

Figura N°11.168 – Velocidad – Corte B-B – Mediana Escala

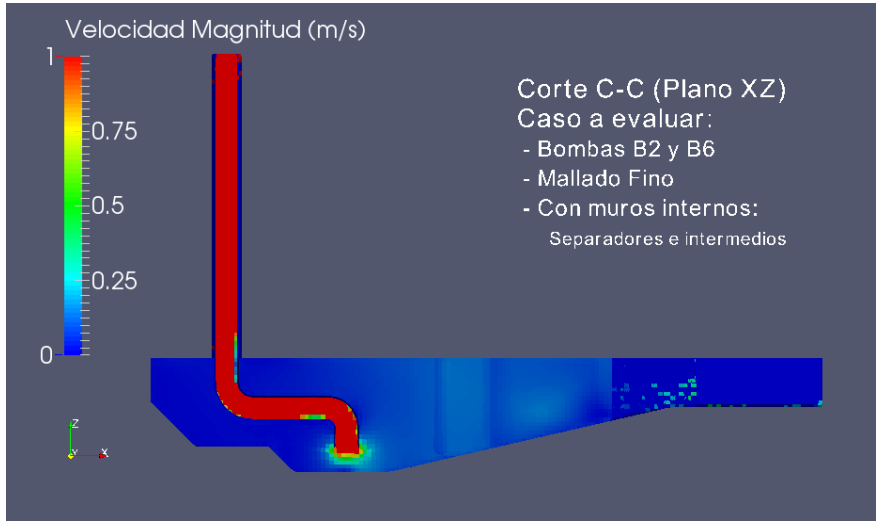

Figura N°11.169 – Velocidad – Corte C-C – Pequeña Escala

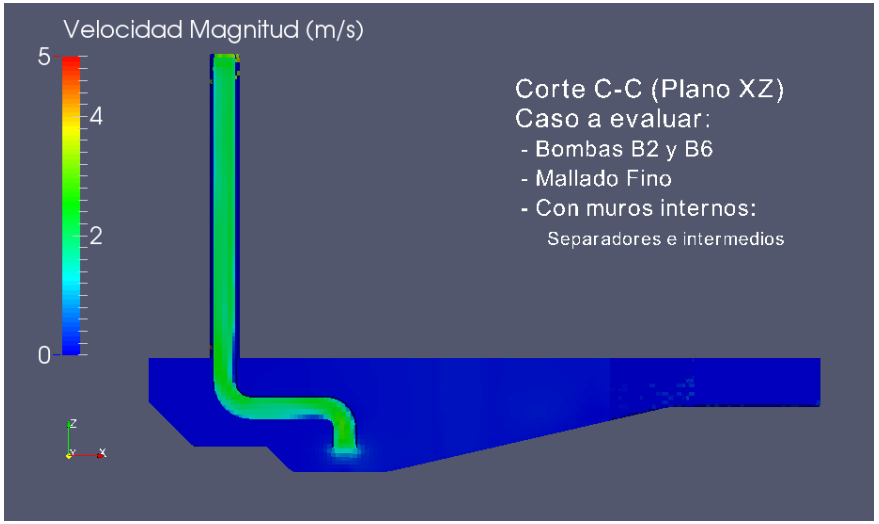

Figura N°11.170 – Velocidad – Corte C-C – Mediana Escala

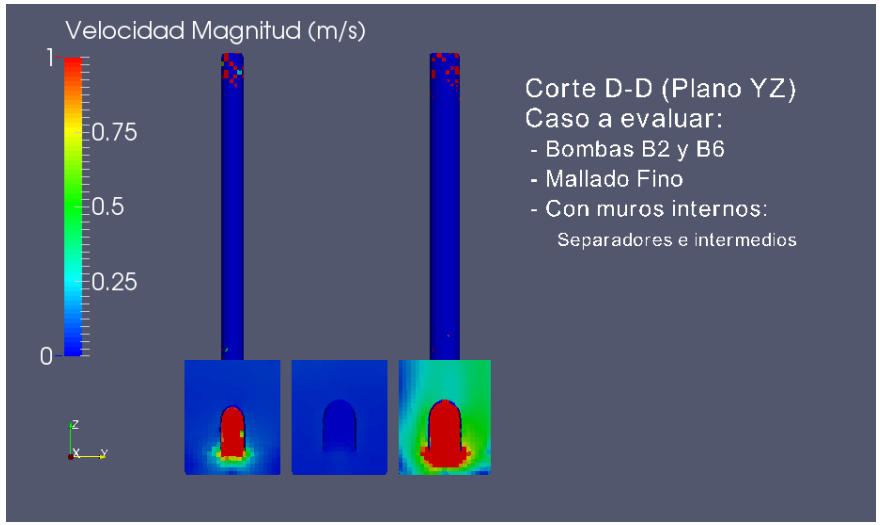

Figura N°11.171 – Velocidad – Corte D-D – Pequeña Escala

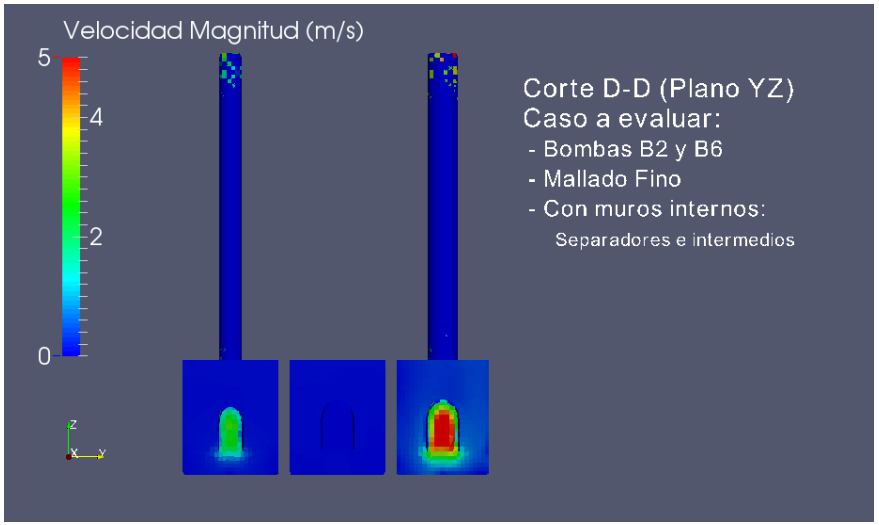

Figura N°11.172 – Velocidad – Corte D-D – Mediana Escala

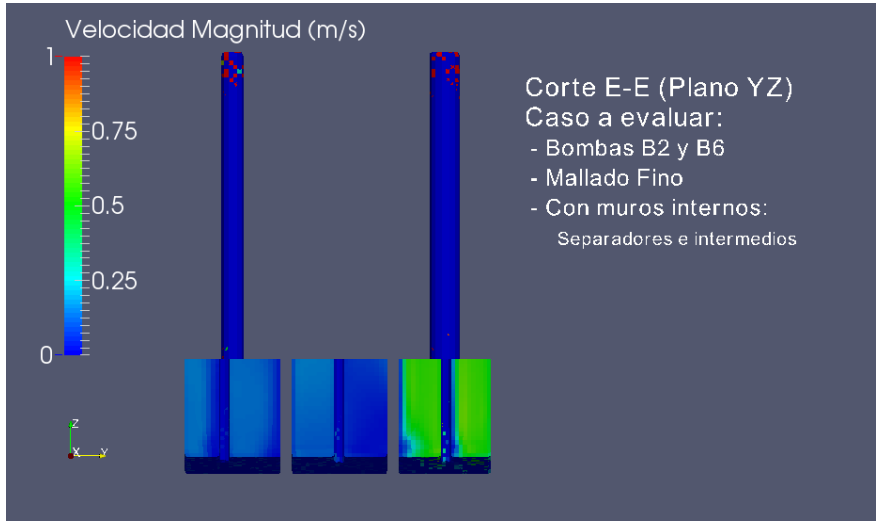

Figura N°11.173 – Velocidad – Corte E-E – Pequeña Escala

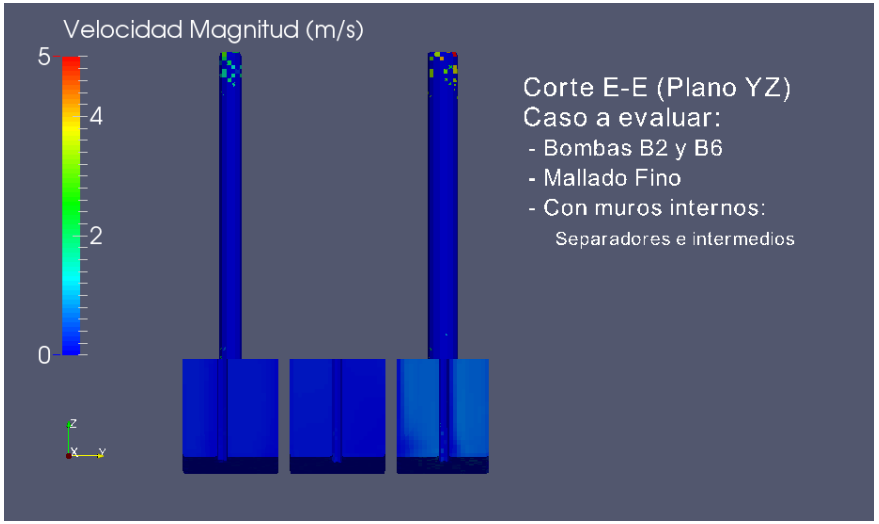

Figura N°11.174 – Velocidad – Corte E-E – Mediana Escala

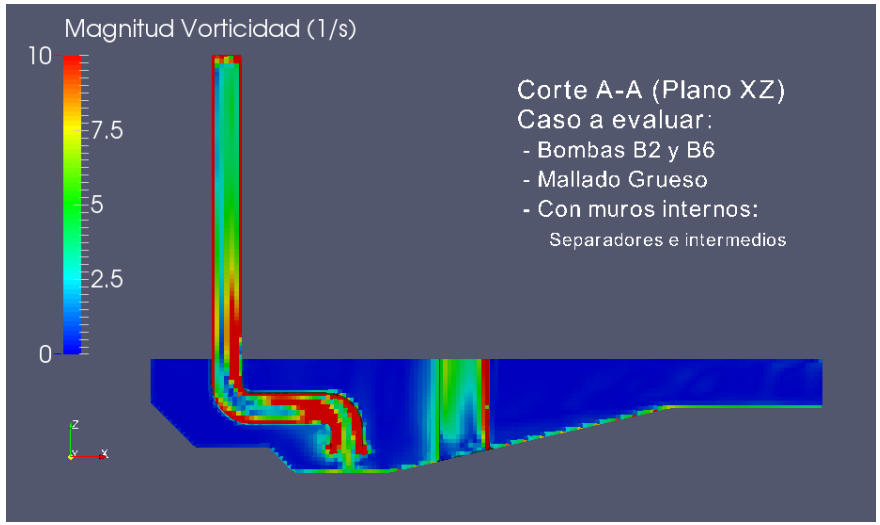

Figura N°11.175 – Vorticidad – Corte A-A – Pequeña Escala

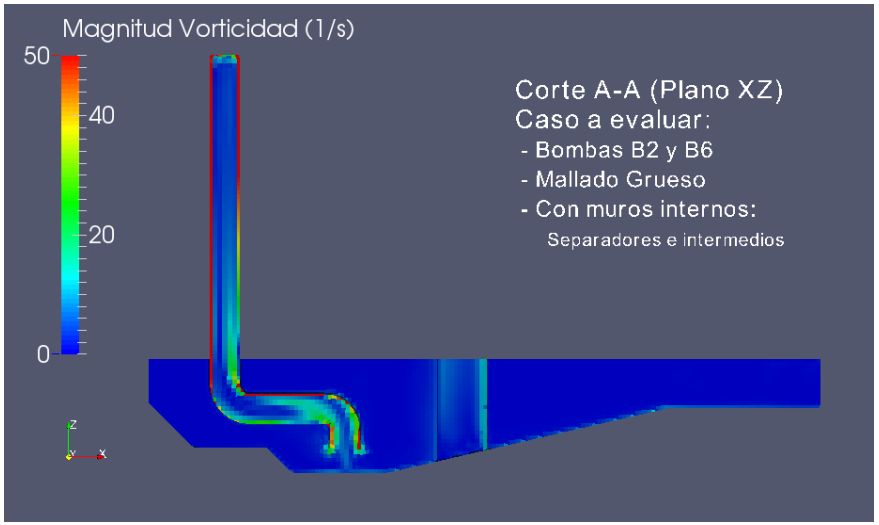

Figura N°11.176 – Vorticidad – Corte A-A – Mediana Escala

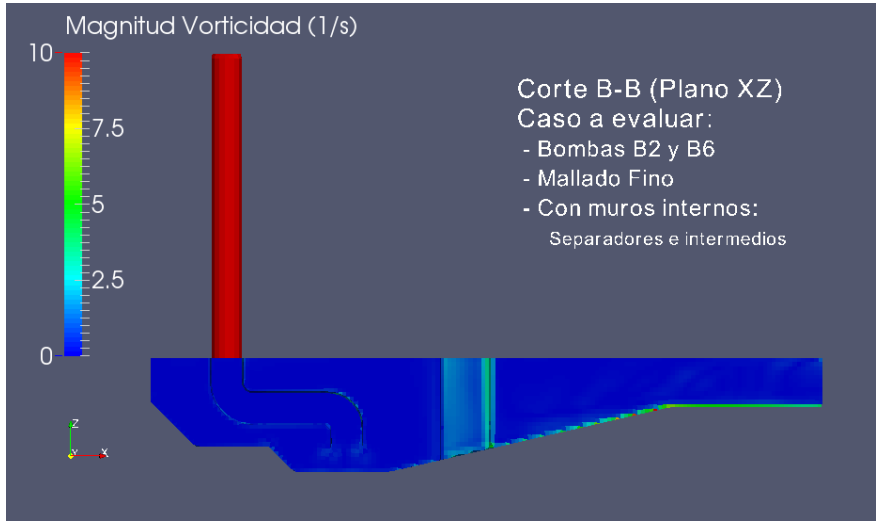

Figura N°11.177 – Vorticidad – Corte B-B – Pequeña Escala

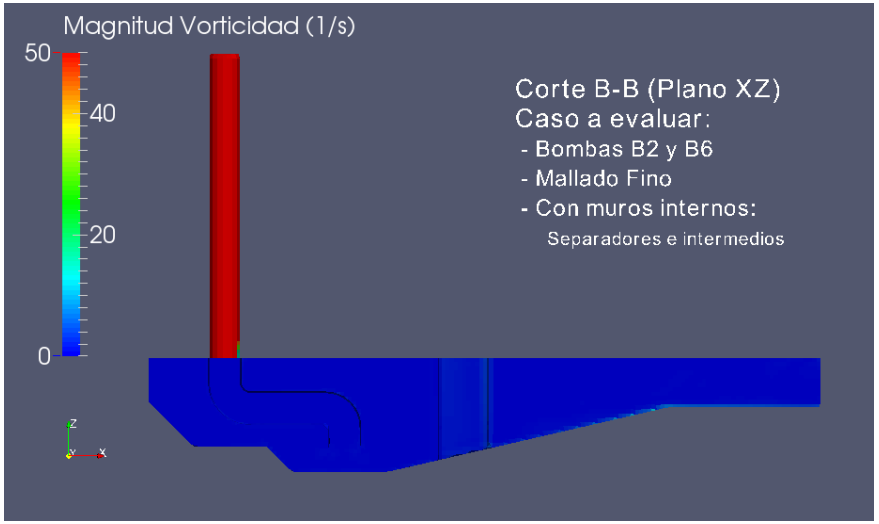

Figura N°11.178 – Vorticidad – Corte B-B – Mediana Escala

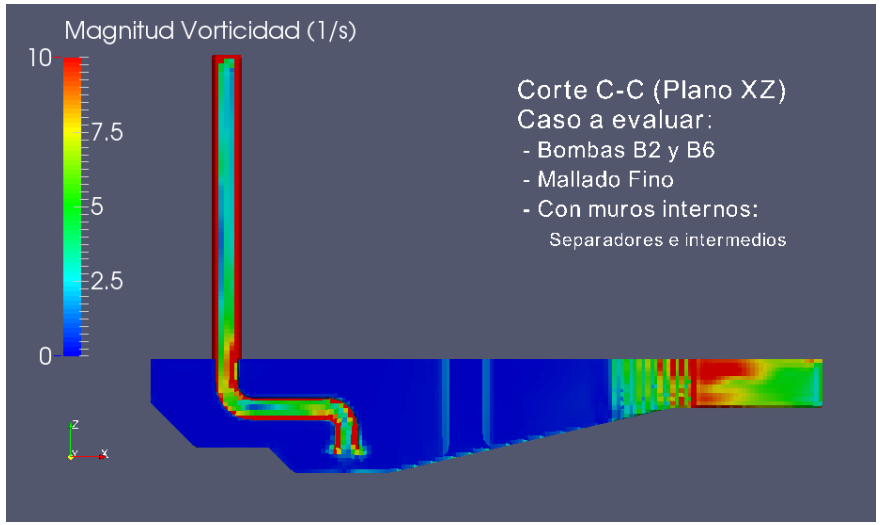

Figura N°11.179 – Vorticidad – Corte C-C – Pequeña Escala

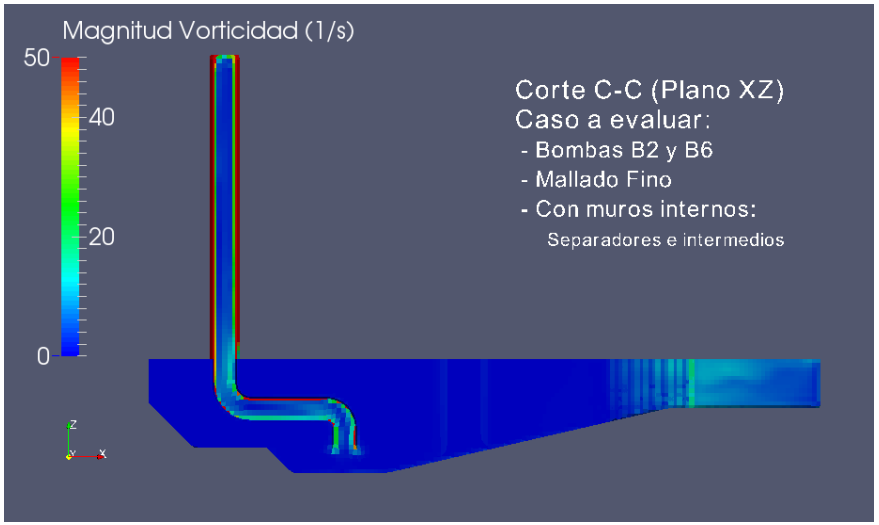

Figura N°11.180 – Vorticidad – Corte C-C – Mediana Escala

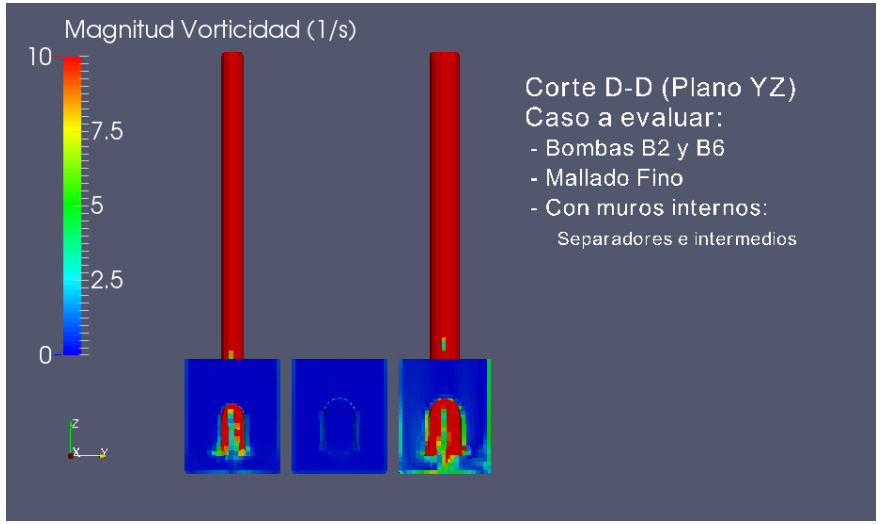

Figura N°11.181 – Vorticidad – Corte D-D – Pequeña Escala

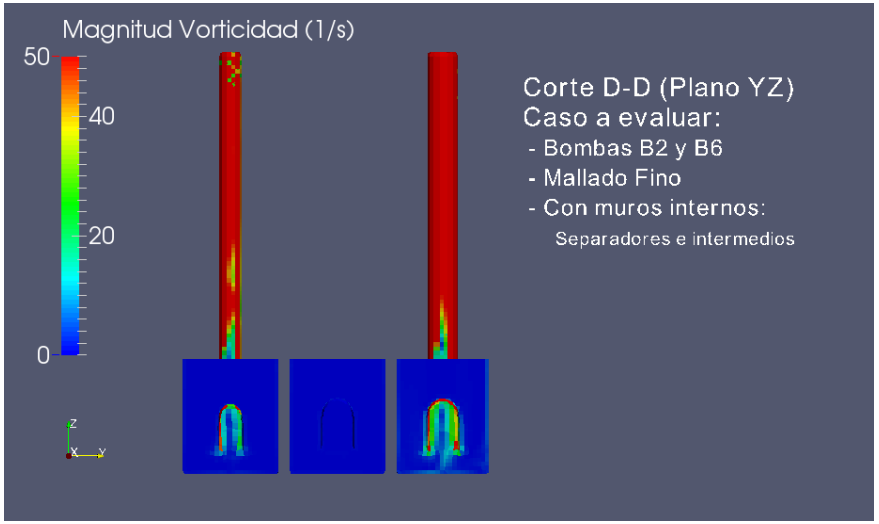

Figura N°11.182 – Vorticidad – Corte D-D – Mediana Escala

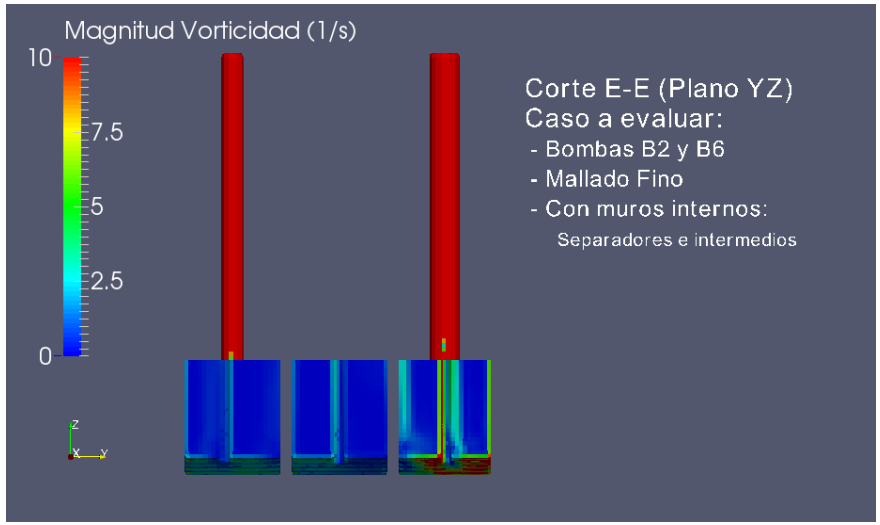

Figura N°11.183 – Vorticidad – Corte E-E – Pequeña Escala

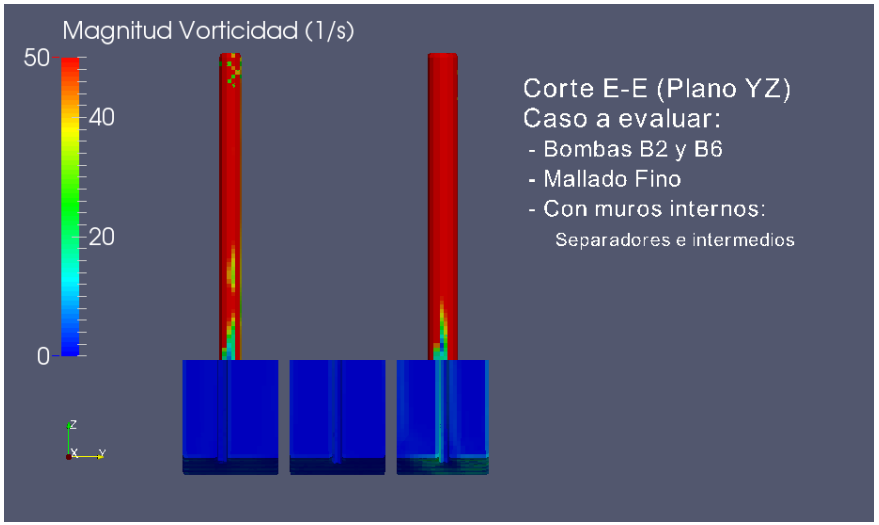

Figura N°11.184 – Vorticidad – Corte E-E – Mediana Escala