



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

SIMULACIÓN (CFD) DEL AIRE INYECTADO POR UN DIFUSOR EN UN
TANQUE DE AIREACIÓN

AUTORA

Verónica Alexandra Mena Flores

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

SIMULACIÓN (CFD) DEL AIRE INYECTADO POR UN DIFUSOR EN UN
TANQUE DE AIREACIÓN

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y
Remediación.

Profesor guía

M.Sc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autora

Verónica Alexandra Mena Flores

Año

2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Simulación (CFD) del aire inyectado por un difusor en un tanque de aireación, a través de reuniones periódicas con la estudiante Verónica Alexandra Mena Flores, en el semestre 2018-2, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Santiago Daniel Piedra Burgos
Master of Science in Hydro Science and Engineering
C.I. 1715384150

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Simulación (CFD) del aire inyectado por un difusor en un tanque de aireación, de la estudiante Verónica Alexandra Mena Flores, en el semestre 2018-2, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Marco Vinicio Briceño León
Master en Energías Renovables
C.I. 1715967319

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Verónica Alexandra Mena Flores

C.I. 1753054038

AGRADECIMIENTO

A mi familia por su apoyo constante.

A mi docente guía Santiago Piedra y a mi docente corrector Marco Briceño por compartir sus conocimientos y por su motivación durante este proceso.

A mis compañeros, especialmente a Mishell Donoso, Karol Verdesoto y Paola Gavilanes por su apoyo incondicional y a mi grupo de trabajo, a Alejandro González, Pavlova Sigcha, Andrés Argüello e Indira Black, por hacer de cada día excepcional.

DEDICATORIA

A mi familia

RESÚMEN

Los sistemas de aireación son aplicados en un sin número de procesos industriales en donde determinan la eficiencia del mismo. En la actualidad, el estudio de la dinámica de los fluidos (CFD) proporciona las capacidades para simular la hidrodinámica de diferentes procesos y evidenciar el comportamiento de los fluidos en ellos.

En el presente trabajo, se realiza una simulación numérica de una columna de agua o "Bubblecolumn" utilizando el solver twoPhaseEulerFoam del software de libre acceso OpenFOAM, con un modelo turbulento denominado LES – Large Eddy Simulation que permite la interacción de dos fluidos (agua y aire) en un régimen Euler-Euler.

Se definió 2 tipos de difusores de ingreso de aire con una variación en la distribución y tamaño de los orificios (20 orificios con diámetro de 2mm y 4 mm) y 3 alturas de columna de agua (0.8m, 1.6m y 2.4m) dando un total de 6 unidades de simulación para los cuales se estableció una velocidad de ingreso de aire de 0.1 m/s. La geometría descrita previamente se realizó en el programa SALOME.

Por último, se realizó el post-procesamiento de datos con el programa ParaView a partir del cual se obtuvo una simulación de un promedio de 2 segundos con carpetas cada 0.05 segundos. A partir de la simulación se obtuvo gráficas del comportamiento de los fluidos en el tanque de aireación y se definió la presencia de 5 regímenes en el 50% de las unidades de simulación (Homogéneo Mono-disperso, Pseudo-homogeneo, de transición, heterogéneo y slug. Mientras que en el otro 50% se observó solo 3 regímenes (Homogéneo Mono-Disperso, Pseudo-homogéneo y de transición).

ABSTRACT

The aeration systems are applied in a number of industrial processes where they determine the efficiency of the same. Currently, the study of computational fluid dynamics (CFD) provides the capabilities to simulate the hydrodynamics of different processes and evidence the behavior of fluids in them.

In the present work, a numerical simulation of a Bubblecolumn is performed using the solver twoPhaseEulerFoam of OpenFOAM open access software, with a turbulent model called LES - Large Eddy Simulation that allows the interaction of two fluids (water and air) in a Euler-Euler regime.

Two types of air inlet diffusers were defined with a variation in the distribution and size of the orifices (20 holes with diameter of 2 mm and 4 mm) and 3 water column heights (0.8 m, 1.6 m and 2.4 m) giving a total of 6 simulation units for which an air intake speed of 0.1 m / s was established. The geometry previously described was performed in the SALOME software.

Finally, the post-processing of data was carried out with ParaView, from which a simulation of an average of 2 seconds with folders every 0.05 seconds was obtained. From the simulation, graphs of the behavior of the fluids in the aeration tank were obtained and the presence of 5 regimes was defined in 50% of the simulation units (Mono-dispersed homogeneous flow, Pseudo-homogeneous flow, the transition flow, heterogeneous flow and slug flow), while in the other 50% only 3 regimes were observed (Mono-Dispersed Homogeneous flow, Pseudo-homogeneous flow and the transition flow).

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Marco referencial..... | 2 |
| 1.3. Objetivos | 3 |
| 1.3.1. Objetivo General: | 3 |
| 1.3.2. Objetivos específicos:..... | 3 |
| 1.4. Alcance | 4 |
| 1.5. Justificación | 4 |
| 1.6. Nomenclatura..... | 5 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1. Tratamiento de aguas residuales | 7 |
| 2.2. Métodos de aireación | 7 |
| 2.2.1. Sistemas de aire difuso | 8 |
| 2.3. Computational Fluid Dynamics (CFDs)..... | 8 |
| 2.4. Columna de agua – Bubble Column..... | 9 |
| 2.5. OpenFOAM..... | 11 |
| 2.5.1. Carpetas..... | 11 |
| 2.5.2. Utilidades estándar..... | 13 |
| 2.5.3. Unidades y dimensiones | 13 |
| 2.5.4. Control del tiempo de simulación | 14 |
| 2.5.5. Registro de datos | 15 |
| 2.5.6. polyMesh..... | 15 |
| 2.5.7. Forma de las celdas -Mallado: | 16 |
| 2.5.8. Tipos de parches..... | 17 |
| 2.6. Two-Phase Euler Foam – Solver..... | 18 |
| 2.6.1. Modelo Numérico | 18 |
| 2.6.2. Algoritmo de solución | 20 |
| 2.7. Modelo de turbulencia – LES | 21 |
| 2.8. ParaView..... | 23 |
| 2.8.1. Diseño | 23 |

| | |
|--|----|
| 3. METODOLOGÍA..... | 24 |
| 3.1. Pre-Procesamiento..... | 24 |
| 3.1.1. Geometría..... | 24 |
| 3.1.2. Generación del Mallado..... | 27 |
| 3.2. SOLVER – TwoPhaseEulerFoam..... | 28 |
| 3.2.1. Condiciones de borde..... | 28 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 37 |
| 4.1. Correlación entre columnas de agua..... | 52 |
| 4.1.1. U.air – Velocidad de ingreso de aire..... | 52 |
| 4.1.2. Presión..... | 55 |
| 4.1.3. Temperatura..... | 57 |
| 4.1.4. Alpha.air / Alpha.water..... | 58 |
| 4.1.5. Gráficos relación $\varepsilon/U.air$ | 61 |
| 4.2. Errores durante la simulación..... | 63 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 66 |
| REFERENCIAS..... | 69 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Durante los últimos años, se ha desarrollado diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales, desde la implementación de clarificadores hasta filtros biológicos y experimentación e implementación de plantas de lodos activados (Ferziger & Peric, 2002). Durante la mayor parte del siglo XX el diseño de los tanques y conductos se dio a partir de cálculos hidráulicos simples cuyo objetivo era simplemente la movilización y el tratamiento de los efluentes en un ámbito general (Findikakis, 2016). Con el pasar del tiempo se necesitó de la optimización de estos procesos que estaban directamente ligados con el perfeccionamiento de las estructuras hidráulicas para el tratamiento de aguas residuales. Para esto se recurrió al desarrollo del campo de modelamiento matemático con el fin de conocer más profundamente las condiciones del flujo en cada proceso unitario de tratamiento que daría como resultado la mejora en el tratamiento de efluentes (Zhang, Liu, Tejada-Matinez, & Zhang, 2016). En respuesta al rápido crecimiento poblacional se requiere, no solo de la construcción de nuevas estructuras o expansión de las existentes, sino también del funcionamiento óptimo de las mismas, así como el uso de diseños más eficientes (Bertrand, Schaguene, Mazadou, & Sauvaget, 2016).

Con el aumento de la tecnología, se ha dado el crecimiento exponencial de modelos sofisticados para la aplicación de Dinámicas de Fluidos Computacional (CFD) para el diseño de diferentes partes y procesos de una planta de tratamiento de aguas residuales (Fonseca & Marques, 2016). La amplia gama de aplicaciones de CFD se ve determinada por las ventajas que se obtiene de esta herramienta. Se ha aplicado exitosamente en el ámbito aeroespacial en el modelamiento del aire a través de una turbina, donde pruebas experimentales requieren de una gran inversión y representan un riesgo alto para las personas (Sayma, 2009). De igual forma, se ha aplicado en el sector automotriz para mejorar aerodinámicamente un diseño, permitir el uso eficiente de combustible

en un motor y optimizar las condiciones de operación. Adicionalmente se ha considerado su aplicación en Biomedicina para determinar el flujo de la sangre y otros fluidos como la anestesia o alguna medicina (Zuo, 2005). En el ámbito ambiental se ha dado, principalmente, la aplicación de CFDs en el diseño de tanques de decantación primaria en donde se ha estudiado zonas muertas y la optimización en el diseño del mismo, también se utilizó en la evaluación de alternativas en la ubicación de una tubería de ingreso de lodos recirculados para producir una carga uniforme y finalmente, se ha estudiado el diseño de la entrada de un tanque de sedimentación para lograr un flujo uniforme lo que determina la reducción de concentración de sólidos en el efluente y un mejor rendimiento del sistema (Lynggaard-Jensen, 2016). Los modelos de simulación ofrecen oportunidades para integrar la mecánica de fluidos a fin de comprender el sistema, mejorar el diseño, identificar soluciones eficientes y optimizar las operaciones. Dando como resultado la evaluación de diferentes parámetros operativos como costos y uso de recursos (agua, químicos y energía) (Fonseca & Marques, 2016).

1.2. Marco referencial

El 95% de agua residual generada en el Ecuador es descargada sin ningún tipo de tratamiento a los cuerpos hídricos (INEC, 2015). Esto representa no solo un riesgo ambiental, sino también a la salud humana. El 5% restante se distribuye en 421 plantas de tratamiento posicionadas por todo el país, teniendo la mitad de ellas en la región sierra. El problema radica en que solo el 3% de las plantas de tratamiento cumplen con un nivel de eficiencia entre el 80%-100% lo que establece un grave escenario en donde, prácticamente, no se trata ningún efluente de agua residual (INEC, 2015); (Peltier, y otros, 2016). La falta de efectividad en los sistemas de tratamiento puede deberse a varios factores como: El diseño deficiente de las PTAR, debido a que muchas veces se usan normativas que ya no tienen vigencia y que deberían ser anuladas o a la falta de experiencia de quienes las diseñan (Fonseca & Marques, 2016); (Findikakis,

2016)). Otro factor a considerar es la ausencia de información en el país, que ha dado paso al diseño de los denominados “Sistemas Estáticos” de tratamiento de aguas residuales (Saunders & Visser, 2015). Estos sistemas son plantas de tratamiento que constan de los mismos procesos unitarios, sin tomar en cuenta las características del agua residual dando como resultado la baja eficiencia del sistema (Metcalf & Eddy, 2014). Finalmente, El factor principal que incide en la efectividad de los sistemas de tratamiento es la falta de un método de validación del buen funcionamiento de una PTAR. Normalmente solo se puede dar certeza del funcionamiento de una PTAR después de su construcción y puesta en marcha, por lo que, si la planta no funciona, ya se habrá malgastado recursos tanto económicos como temporales (Henze, Van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2008). Por otro lado, una simulación representa una herramienta útil para comprobar el funcionamiento de una PTAR antes de su implantación (Findikakis, 2016).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General:

Simular el comportamiento de los fluidos en un tanque de aireación

1.3.2. Objetivos específicos:

- Establecer las condiciones de borde del sistema
- Identificar el modelo “SOLVER” óptimo para una simulación multi – física
- Describir las variables de operación del sistema de aireación

1.4. Alcance

Modelar la interacción entre el aire inyectado en un tanque de aireación y el agua presente en el mismo. En un inicio se plantea la descripción de las condiciones del sistema que afectaran el comportamiento de cada fluido, considerando el modelo Euler-Euler de régimen turbulento. Posteriormente se realizará una simulación en un software con la capacidad de interpretar los datos de un flujo "multi-fase".

1.5. Justificación

El estudio de fluidos en cualquier campo se puede realizar por tres métodos: análisis teórico, experimentación o simulación. El análisis teórico no permite una visualización real del problema por lo que no se puede establecer una solución objetiva del mismo. Por otro lado, las diferencias entre la experimentación y la simulación se describen considerando parámetros económicos y temporales (Asiagbe, Fairweather, Njobuenwu, & Colombo, 2017). La simulación representa bajos costos, menos recursos, mayor seguridad y puede ser realizada cuantas veces sea necesario, a diferencia de un experimento físico, donde se requiere de una alta inversión económica, puede ser peligrosa dependiendo del objetivo y su repetitividad se ve determinada por la disponibilidad de recursos y tiempo. Finalmente, el esfuerzo computacional y analítico para una simulación es relativamente pequeño en comparación con el esfuerzo para un experimento físico (Ferziger & Peric, 2002). De acuerdo a los antecedentes, aunque el campo de estudio de CFDs en el ámbito ambiental está creciendo en dirección al diseño de plantas de tratamiento, no hay proyectos direccionados a sistemas de aireación como lo son los difusores (Findikakis, 2016).

La inyección de oxígeno a través de burbujas determinará la eficiencia de los tratamientos biológicos (Alviz Meza & Cueto Ferreira, 2012). El tamaño, cantidad y disposición de las burbujas aumentan su área de contacto permitiendo una

mayor disponibilidad de oxígeno, sin embargo, aunque se han planteado diferentes tipos de difusores cuya eficiencia varia, esto se ha dispuesto en base a experimentos físicos que no garantizan una correcta homogeneización del oxígeno en el tanque y cuyo estudio es indispensable para optimizar su funcionamiento (Alviz Meza & Cueto Ferreira, 2012).

El uso de CFD reducirá la cantidad de recursos a utilizar causando menos impacto al ambiente, pero proporcionando mejores resultados que la experimentación física (Ferziger & Peric, 2002). En definitiva, la simulación computacional del difusor permitirá determinar si se da una correcta distribución de las burbujas de oxígeno en el tanque para evitar la formación de “zonas muertas” que disminuyan la eficiencia del sistema de aireación, permitiendo optimizar una amplia gama de procesos unitarios que dependan de este proceso.

1.6. Nomenclatura

Tabla 1.

Nomenclatura utilizada.

| Símbolo | Parámetro | Unidad |
|------------|---|--------|
| u | Componente de la velocidad en x | m/s |
| v | Componente de la velocidad en y | m/s |
| w | Componente de la velocidad en z | m/s |
| μ | viscosidad | Kg/ms |
| p | presión | Pa |
| T | temperatura | °C, °k |
| C_p | Calor específico a presión constante | J/kg°k |
| α_g | Fracción de volumen de la fase gaseosa (aire) | - |
| α_l | Fracción de volumen de la fase líquida (agua) | - |
| H_a | Altura de agua | m |
| u_l | Velocidad de la fase líquida | m/s |
| u_g | Velocidad de la fase gaseosa | m/s |

| | | |
|-------------------------|--|--------------------------------|
| t | tiempo | s |
| ρ_l | Densidad de la fase líquida (agua) | Kg/m ³ |
| ρ_g | Densidad de la fase gaseosa (aire) | Kg/m ³ |
| τ | Tensor de energía-impulso (stress tensor) | Pa |
| k_{lg} | Mezcla de energía cinética turbulenta | m ² /s ² |
| k | Energía cinética turbulenta | m ² /s ² |
| ϵ_g | Retención de gas fraccional | - |
| ϵ_l | Retención fraccional de liquido | - |
| $\overline{\epsilon}_g$ | Retención fraccional de gas media | - |
| r | Distancia radial desde el centro | m |
| R | Radio de la columna de agua | m |
| η | Distancia radial | - |
| Re_g | Número de Reynolds para la fase gaseosa | - |
| FR_g | Número de Froude para la fase gaseosa | - |
| Mo_l | Número de Mortin para la fase líquida | - |
| V_g | Velocidad superficial de la fase gaseosa | m/s |
| D | Diámetro de la columna de agua | m |
| g | gravedad | m/s ² |
| μ_l | Viscosidad de la fase líquida | Kg/ms |
| σ_l | Tensión superficial del liquido | N/m |
| I | Intensidad de turbulencia | - |
| l | Diámetro de la columna (para geometría cilíndrica) | m |
| C_u | Parámetro que relaciona k y ϵ | - |
| ϵ | Tasa de dispersión de energía turbulenta (épsilon) | m ² /s ³ |
| ∇ | Nabla | - |
| K | Constante de ϵ | - |

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tratamiento de aguas residuales

Generalmente, una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) consta de las siguientes fases (EPA, 1978): pre-tratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario. En el pre-tratamiento (cribas o rejillas) se elimina cuerpos grandes que pueden dañar al sistema, el tratamiento primario se enfoca en la reducción de sólidos, que no son retenidos por el pre-tratamiento, mediante decantación, filtración o coagulación (DEC, 2015).

Por otro lado, en el tratamiento secundario, se da la disminución o remoción de materia orgánica mediante tratamientos biológicos (lodos activados, aireación extendida, lagunas facultativas, etc.), los mismos que, en su mayoría funcionan en base a los mismos principios de operación, pero que poseen diferentes restricciones en base a las cuales se dan las reacciones biológicas (Ekama & Wentzel, 2008). La necesidad, tolerancia y sensibilidad al oxígeno depende de los microorganismos que se utilice en el tratamiento. Normalmente, los procesos de aireación en este tipo de tratamiento son muy costosos, y mientras se intenta mantener una concentración baja de OD, también se pretende evitar concentraciones muy pobres; por lo que la cantidad, ingreso y distribución del oxígeno en el tratamiento, determinará la efectividad y rentabilidad del sistema (Wilén, Markiewicz, & Nilsson, 2010)

2.2. Métodos de aireación

La aireación se puede dar de dos formas: Aireación mecánica y difusa. (Atia, Fahmy, Ahmed, & Dorrah, 2017).

2.2.1. Sistemas de aire difuso

En estos sistemas se proporciona aire, por medio de un difusor, desde la base de la columna de agua hacia arriba en forma de burbujas de aire. Es así que, el tamaño de orificio del difusor determinará el tamaño de burbujas del mismo (Alkalidi, AlBa'ba'a, & Amano, 2016). Estos sistemas usan una baja presión y alto volumen de entrada. Hay varios tipos de difusores, entre los cuales se encuentra el difusor tipo domo, poroso de cerámica, de plástico, etc.

Normalmente, los difusores con burbujas de aire más finas son más eficientes que los difusores de burbuja gruesa, debido a que se incrementa el área superficial de la burbuja (Alviz Meza & Cueto Ferreira, 2012).

2.3. Computational Fluid Dynamics (CFDs)

Los CFDs se presentan como el análisis de sistemas que involucran la interacción de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados por medio de simulación basada en computadora. Debido a su complejidad, CFD requiere un “hardware” de alto rendimiento, y por lo tanto ha tenido su resurgimiento en las últimas dos décadas (Versteeg & Malalasekera, 1995). Los algoritmos numéricos se utilizan para modelar una geometría determinada en base a análisis numérico, y normalmente los diferentes códigos contienen tres elementos principales (McClure, Dolton, Barton, Fletcher, & Kavanagh, 2017):

- Pre-procesador: Se trata del ingreso de información e implica actividades como la definición de la geometría, la generación del mallado (grilla de celdas), la definición de las propiedades del fluido y la especificación de las condiciones de contorno (Saleh, Mohammed, Al-Jubory, & Barghi, 2018).
- SOLVER: Es el sistema o la técnica de solución numérica que permite la integración de las ecuaciones gobernantes, discretización (conversión de ecuaciones integrales en ecuaciones algebraicas) y resolución de ecuaciones algebraicas (Fletcher, McClure, Kavanagh, & Barton, 2017). En

el presente estudio se utiliza un solver multi-fásico denominado “twoPhaseEulerFoam” que se describirá a continuación.

- Post-procesador: Es el paso final para la obtención de resultados que puedan ser analizados como gráficos, diagramas vectoriales y animación para visualización dinámica de resultados (Saleh, Mohammed, Al-Jubory, & Barghi, 2018).

El comportamiento de los fluidos se rige por tres principios fundamentales: conservación de masa, conservación de energía (1ª ley de termodinámica) y la segunda ley de Newton (Rzehak, Ziegenhein, Kriebitzsch, Krepper, & Lucas, 2017).

Mediante el uso de estos principios se pueden derivar las ecuaciones de Navier-Stokes que se describen como un conjunto diferencial parcial de ecuaciones que describen el comportamiento del fluido (Sayma, 2009).

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \quad (\text{Ecuación 1})$$

Inercia
Gradiente de presión
Viscosidad
Fuerza fluido

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial y} + u \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} + u \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z$$

Ecuaciones de Navier – Stokes (Sayma, 2009)

2.4. Columna de agua – Bubble Column

La interacción entre el aire inyectado y el agua presente en el medio se manifiesta como varios regímenes de flujo (Besagni G. , Inzoli, De Guido, & Pellegrini, 2016). Dependiendo del cambio en la geometría y propiedades de cada flujo, los regímenes varían, dando como resultado 6 regímenes: De flujo homogéneo mono-disperso (1), de flujo pseudo homogéneo (2), de flujo de

transición (3), de flujo heterogéneo (4), de flujo “slug” (5) Y de flujo anular (6) (Zahradnik, y otros, 1997).

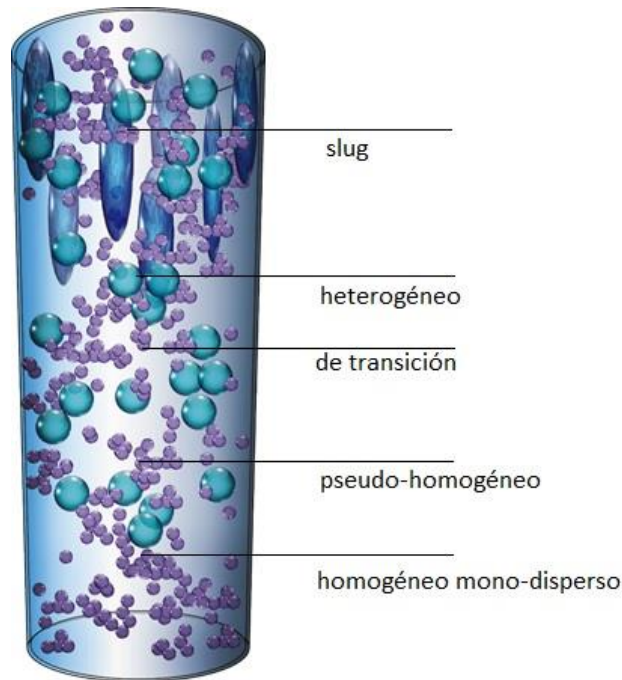


Figura 1. Regímenes de flujo en una columna de agua.

Adaptado de (Besagni, Inzoli, & Ziegenhein, 2018).

El primer régimen se observa por una distribución homogénea del tamaño de la burbuja y la “fuerza de levantamiento” o “lift force” que provoca la migración de las burbujas de menor tamaño hacia los muros de la columna de agua. Este tipo de variación está directamente ligada a la velocidad de ingreso de la fase gaseosa (IAEA, 2015). Si la velocidad de ingreso provoca la formación de burbujas de mayor tamaño, se evidencia un régimen pseudo homogéneo, si esto es causado por un difusor con orificios de mayor tamaño, la fase mono-dispersa (1) no tendrá mayor duración. Durante la fase pseudo homogénea se puede dar la formación de burbujas por “coalescencia inducida”. La fase de transición se distingue por la aparición de “grupos de burbujas”. Por otro lado, al incrementar la velocidad del aire, aparece el régimen heterogéneo, el mismo que está asociado con grandes tasas de coalescencia y rotura de burbujas, así como gran tamaño de estas. En este régimen, la fase líquida se mueve continuamente de arriba hacia abajo y viceversa debido a que la velocidad de la fase gaseosa no

es lo suficientemente alta como para mantener un nivel de agua constante (Ziegenhein, Rzehak, & Lucas, 2015).

El régimen de flujo “slug” se puede identificar por la formación de burbujas alargadas de gran diámetro alrededor de las cuales se encuentran burbujas de menor diámetro. Finalmente, a velocidades demasiado altas, se da un flujo anular, por lo que no se lo encuentra muy frecuentemente en procesos industriales (Besagni G. , Inzoli, De Guido, & Pellegrini, The dual effect of viscosity on bubble column hydrodynamics, 2017).

2.5. OpenFOAM

Para la presente simulación se utilizó el software OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation), es de libre acceso y pertenece a la biblioteca C++ (contiene algoritmos, iteradores, funciones objeto, etc) que crea ejecutables conocidos como aplicaciones (Greenshields, 2017).

El usuario tiene acceso a un largo compendio de aplicaciones que pueden ser modificadas de acuerdo a la simulación propuesta y cuyo único impedimento es el conocimiento de C++.

Cada aplicación se divide en dos categorías: SOLVERs y utilidades. Un solver esta designado para resolver problemas computacionales específicos y las utilidades son usadas para el pre y post procesamiento en donde se ve involucrada la manipulación de datos (Engen, 2016).

2.5.1. Carpetas

Del directorio principal se despliegan 3 carpetas denominadas “0”, constant y system, las mismas en donde se encuentran los archivos donde se configura las condiciones de la simulación (figura 1).

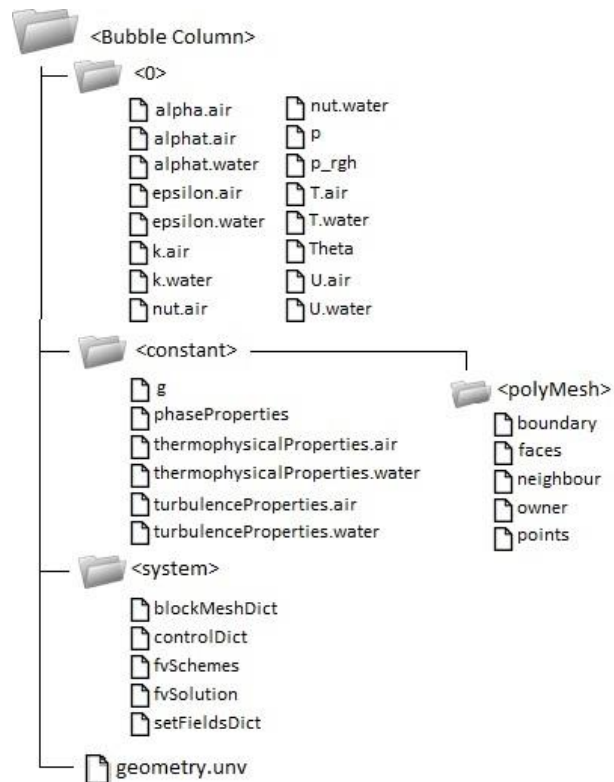


Figura 2. Estructura General OpenFOAM.

Adaptado de (Greenshields, 2017).

En el presente proyecto se puede observar un archivo adicional en formato *.unv que representa la geometría del tanque previamente realizada en SALOME.

El directorio “o” contiene todos los parámetros a partir de los cuales se realizará la simulación (condiciones de borde) (Greenshields, 2017).

En el directorio “constant” se especifica las propiedades del fluido, parámetros que determinan el comportamiento del fluido, a partir de lo cual se realizará la simulación. Adicionalmente aquí se encuentra una subcarpeta denominada “polyMesh” que se genera a partir de la geometría ingresada y donde se describe el mallado (Greenshields, 2017).

Por último, en el directorio “system” se describe parámetros como: el tiempo que durará la simulación (controlDict), esquemas de discretización para la solución del solver (fvSchemes) y las ecuaciones y algoritmos de control del solver (fvSolutions) (Greenshields, 2017).

2.5.2. Utilidades estándar

A continuación, se establece algunos comandos utilizados para la simulación (CFD Direct, 2016):

- SetFields; Establece valores en un conjunto seleccionado de celdas o patches.
- blockMesh; Generador del mallado.
- checkMesh; Validación del mallado.
- ideasUnvToFoam; Convertidor de mallado de archivo *unv a openFoam.
- Touch; Genera un archivo compatible con paraview en donde se registra toda la información de la simulación.

2.5.3. Unidades y dimensiones

En cada archivo se encuentra un formato I/O que delimita 7 valores escalares como se observa a continuación (CFD Direct, 2016):

[0 0 0 0 0 0 0]

Tabla 2.

Unidades base utilizadas en OpenFOAM.

| Nº | Propiedad | SI |
|----|---------------------|-------------------|
| 1 | Masa | Kilogramo (kg) |
| 2 | Longitud | Metro (m) |
| 3 | Tiempo | Segundo (s) |
| 4 | Temperatura | Grados Kelvin (K) |
| 5 | Cantidad | Moles (mol) |
| 6 | Corriente | Amperios (A) |
| 7 | Intensidad Luminosa | Candela (cd) |

Tabla 3.

Ejemplo de determinación de unidades.

| Formato I/O | Unidad SI |
|-------------------|-----------|
| [0 1 – 1 0 0 0 0] | m/s |

2.5.4. Control del tiempo de simulación

Tabla 4.

Apartados del archivo "controlDict" para controlar el tiempo de simulación.

Adaptado de (Greenshields, 2017).

| | | |
|-----------|------------|---|
| | FirstTime | Primer cuadro de tiempo |
| startFrom | startTime | Tiempo especificado para iniciar la simulación |
| | latestTime | Último cuadro de tiempo creado |
| | endTime | Especifica el tiempo en el que termina la simulación |
| StopAt | writeNow | Para la simulación y genera una carpeta para registrar los datos |
| | noWriteNow | Para la simulación y no registra datos |
| | nextWrite | Para la simulación al finalizar el siguiente cuadro de tiempo que se registre, programado en writeControl |
| endTime | | Termina la simulación si se especifica "stopAt" "endTime" |
| deltaT | | Paso de cada cuadro de tiempo |

2.5.5. Registro de datos

Tabla 5.

Programación del tiempo de registro de datos.

Adaptado de (Greenshields, 2017).

| | | |
|----------------|-------------------|--|
| | timerStep | Intervalo de cuadro de tiempo |
| | runTime | Tiempo en segundos de simulación |
| writeControl | adjustableRunTime | Registra datos cada “writeInterval” cada segundo de simulación haciendo que coincida con cada cuadro de tiempo |
| WriteInterval | purgeWrite | Permite la eliminación de directorios de registro generados, una vez que se generó uno nuevo |
| writePrecision | | Se utiliza en conjunto con “writeFormat” |
| adjustTimeStep | | Permite ajustar el tiempo de la simulación acorde con maxCo |
| MaxCo | | Número Máximo de Courant (0.5) |

2.5.6. polyMesh

Contiene archivos de borde (CFD Direct, 2016):

- Points: lista de vectores donde el primer vector representa el vértice 0.
- Faces: Lista de caras o paredes generada a partir de los puntos.
- Owner: Se relaciona con las caras establecidas previamente, de tal forma que la primera entrada es la cara 0.
- Neighbour: lista de etiquetas de celdas cercanas.
- Boundary: Lista de parches donde se establece la entrada de cada uno de ellos.

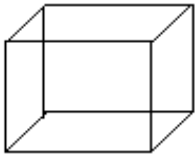
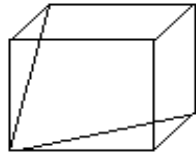
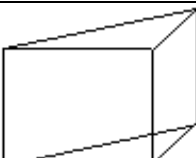
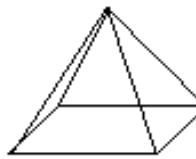
2.5.7. Forma de las celdas -Mallado:

Los límites de una geometría influyen directamente en la parte integral de la solución de las ecuaciones a través de las conexiones inter—fronterizas. Un problema a considerar es que generalmente un límite se divide en un conjunto de parches, muchos de los cuales no necesariamente están conectados (Greenshields, 2017) (Xue, Al-Dahhan, Dudukovic, & Mudde, 2008).

Tabla 6.

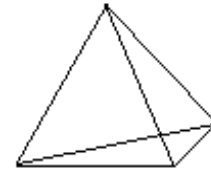
Formas de celdas.

Adaptado de (Greenshields, 2017).

| Tipo de Celda | Código/Keyword | Forma |
|---------------|----------------|---|
| Hexahedron | Hex |  |
| Wedge | Wedge |  |
| Prism | Prism |  |
| Pyramid | Pyr |  |

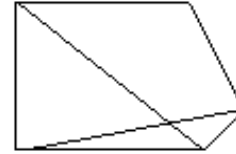
Tetrahedron

Tet



Tet-wedge

tetwedge



2.5.8. Tipos de parches

A continuación, se detalla una lista de los parches utilizados en la simulación (CFD Direct, 2016):

- Patch: Tipo genérico que no contiene ninguna información en específico. Se utiliza normalmente en los “inlet” y “outlet”.
- Wall: cumple la función de pared en el modelo de turbulencia.
- Empty: Utilizado cuando el plano en 3era dimensión no requiere ninguna solución.

2.5.8.1. Tipo de entrada

- FixedValue: permite especificar un valor específico a una variable.
- FixedGradient: gradiente normal de una variable “x” con respecto al tiempo.
- zeroGradient: establece que la gradiente de una variable es igual a cero.
- calculated: el campo del parche de una variable “x” se calcula a partir de otros campos de parches.

2.6. Two-Phase Euler Foam – Solver

TwoPhaseEulerFoam es un solver de flujo multifásico, donde una fase es dispersa, por ejemplo, el caso del presente estudio donde ingresa aire en el agua. Este solver fue desarrollado a partir de una versión anterior denominada “bubbleFoam” (Rusche, 2002).

Debido a recientes cambios el solver utiliza propiedades termo-físicas, para lo cual pide el ingreso de temperatura como condición de borde para las dos fases (Rzehak, Ziegenhein, Kriebitzsch, Krepper, & Lucas, 2017).

El comportamiento de cada fase se puede especificar en el archivo “thermophysicalProperties (figura 2). Aquí se resuelve la ecuación de energía para ambas fases para lo cual dispone de varios modelos de turbulencia como LES, modelo que utiliza el solver en la simulación (Engen, 2016). Cambiar el comportamiento del solver es un tema que no se abordará en el presente estudio,

2.6.1. Modelo Numérico

Las ecuaciones son resueltas usando un algoritmo denominado “PIMPLE” para el acoplamiento de la presión y velocidad del sistema (Marquez, 2013).

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l u_l) = 0 \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l u_l) + \nabla \cdot (\alpha_l u_l u_l) = \frac{1}{\rho_l} \nabla \cdot (\alpha_l \tau_l) - \frac{\alpha_l}{\rho_l} \nabla p - \frac{1}{\rho_l} \nabla p_l + \alpha_l g + \frac{K_{lg}}{\rho_l} (u_g - u_l) \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g u_g) = 0 \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g u_g) + \nabla \cdot (\alpha_g u_l u_l) = \frac{1}{\rho_g} \nabla \cdot (\alpha_g \tau_g) - \frac{\alpha_g}{\rho_g} \nabla p + \alpha_g g + \frac{K_{lg}}{\rho_g} (u_l - u_g) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t}$ Establece la variación de la cantidad de agua en función del tiempo.

∇ Es un operador diferencial vectorial donde se establecen las direcciones de los ejes coordenados (x, y y z).

$\frac{K_{lg}}{\rho_1}$ Mezcla de energía turbulenta entre el agua y el aire, en función de la densidad del agua.

Uno de los principales problemas con las ecuaciones planteadas, es que se llegará a la dificultad de tener la fracción de volumen en todos los términos, teniendo una ecuación nula cuando no se presenta una de las fases. Esto se ve solucionado con la aplicación del limitador MULES (Passalacqua & Fox, 2011).

Para definir otras condiciones del fluido como la retención de gas, número de Reynolds, etc., el solver utiliza las siguientes ecuaciones (Vitankar & Joshi, 2002):

$$\epsilon_g = \frac{m+2}{m} (\epsilon_g - \epsilon_l) (1 - \eta^m) + \epsilon_l \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde η es la distancia radial adimensional y m es el parámetro de inclinación (Luo & Svendsen, 1991).

$$\eta = \frac{r}{R} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$m = 2.188 \times 10^3 \text{Re}_g^{-0.598} \text{Fr}_g^{0.146} \text{Mo}_1^{-0.004} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

$$\text{Re}_g = DV_g(\rho_1 - \rho_g)/\mu_l \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$\text{Fr}_g = V_g^2/gD \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$\text{Mo}_1 = g\mu_l^4/(\rho_1 - \rho_g)\sigma_1^3 \quad (\text{Ecuación 11})$$

De igual forma, k se calcula a partir de la siguiente ecuación (Luo & Svendsen, 1991):

$$k = \frac{3}{2} (uI)^2 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde $u = u_g * \alpha_g + u_l * \alpha_l$, debido a que $u_l = 0$, entonces $u = u_g * \alpha_g$.

I Es la intensidad de turbulencia (5%) (Braga, Lirtico, Askari, Lemieux, & Proulx, 2018).

En el caso de la tasa turbulenta de disipación de energía, se calcula con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{l} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde $C_\mu = 0.09$, es el parámetro que relaciona k con ε , y $l = 0.07l_c$, donde l_c , en columnas cilíndricas, es igual al diámetro de la misma.

2.6.2. Algoritmo de solución

PIMPLE es un algoritmo que usa intenta acoplar el campo de presión durante la simulación. De esta forma, permite la implementación de un factor de relación para reforzar la convergencia de las iteraciones a fin de mejorar el acoplamiento entre las ecuaciones de masa y de momento (Ferziger & Peric, 2002). A continuación se detalla la secuencia del algoritmo a partir de las ecuaciones que se detallan en el punto 6.6.1 (Venier, Marquez, Ramajo, & Nigro, 2014).

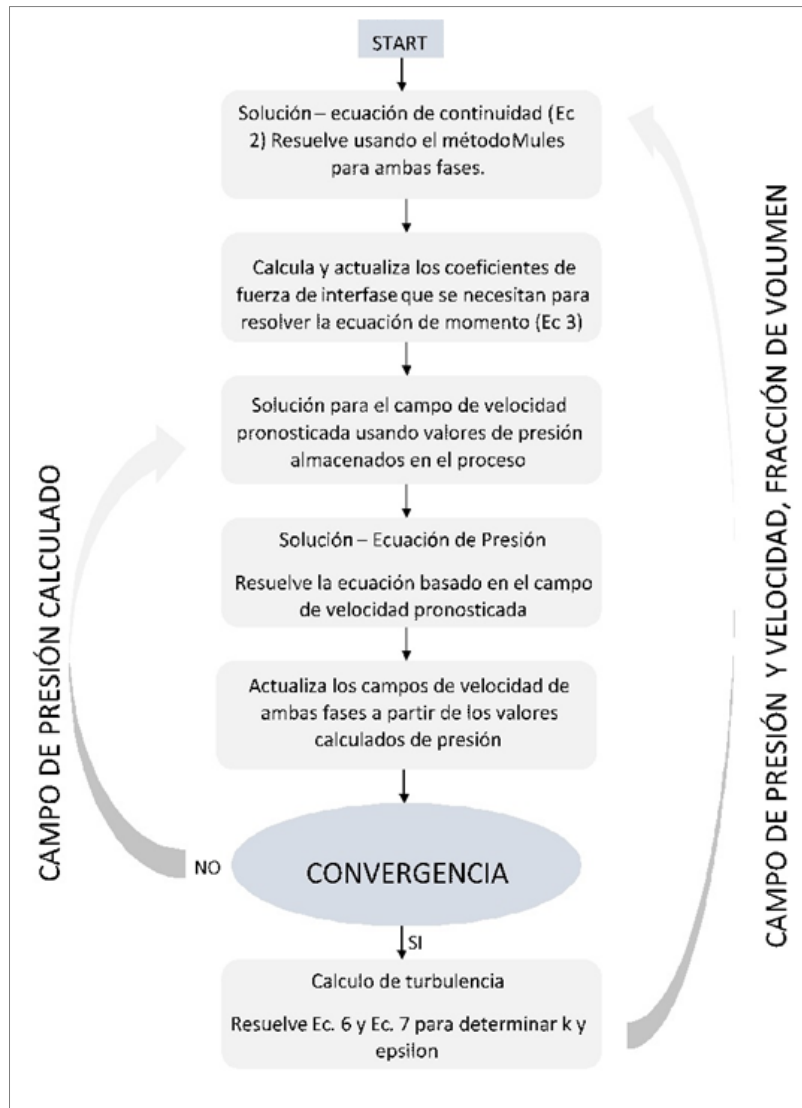


Figura 3. Algoritmo PIMPLE para resolver el solver twoPhaseEulerFoam.

Adaptado de (Greenshields, 2017).

2.7. Modelo de turbulencia – LES

En este tipo de simulación se presenta una fase líquida continua y una fase gaseosa dispersa. La distribución local de la fase dispersa (aire), como la coalescencia y ruptura de burbujas, dependerá de la influencia de la turbulencia de la fase líquida (Balachander & Eaton, 2010).

En el caso de una columna de agua, las características del flujo dependen de la geometría de la columna y las condiciones del entorno. En flujos burbujeantes impulsados por la gravedad se puede identificar un comportamiento transitorio distinto que el que se observa a través de la circulación a gran escala, según (Mudde, Froen, & Van der Akker, 1997). Es así que, se puede suponer la influencia de procesos transitorios, que un modelo Reynolds-Averaged Navier – Stokes (RANS) no puede capturar, a diferencia de un modelo LES (Juliá, Hernandez, Chiva, & Vela, 2007).

Se procedió a optar por el enfoque de Large Eddy Simulation (LES), capaz de producir mejores resultados debido a la menor cantidad de tiempo que demora la simulación (Fröhlich, Rodi, Dewan, & Fontes, 2002). Este modelo, se puede especificar en el archivo “turbulenceProperties” de la carpeta “constant” (figura 1). Esto está modelado por el esquema de subgrid.scale (SGS) propuesto por Smagorinsky.

Los parámetros de turbulencia solo se pueden reproducir con este enfoque en el caso de una velocidad de entrada debe ser lo suficiente para permitir un régimen turbulento, por lo que (Deen, Hjertager, & Solberg, 2000) establece que un rango adecuado sería de 0.05m/s a 0.2m/s. Puesto que una velocidad menor a 0.05 se puede definir como homogénea (Guédon, Besagni, & Inzoli, 2017). Esto se puede certificar en base a varios estudios descritos a continuación:

Tabla 7.

Resumen de investigaciones en flujo turbulento (bubble column).

Adaptado de (Braga, Lirtico, Askari, Lemieux, & Proulx, 2018)

| Autor | Ingreso de aire (m/s) |
|---|-----------------------|
| (Pfleger, Gomes, Gilbert, & Wagner, 1999) | 0.0013 |
| (Buwa & Ranade, 2005) | 0.0016-0.12 |
| (Upadhyay, Roy, & Pant, 2012) | 0.0013 |
| (Upadhyay, Pant, & Roy, 2013) | 0.0013-0.008 |

| | |
|---|-------------|
| (Becker, De Bie, & Sweeney, Dynamic flow behaviour in bubble columns, 2003) | 0.0015-0.01 |
|---|-------------|

2.8. ParaView

Es un software de libre acceso para visualizar imágenes de 2 o 3 dimensiones. Permite la conexión con un amplio rango de plataformas y programas y soporta la visualización y renderizado de grandes grupos de datos (Moreland, 2014).

2.8.1. Diseño

El programa está diseñado como una interfaz en capas. La base es el “kit” de herramientas para visualización que permite representaciones de datos y algoritmos (Qiang, Ryne, Habib, & Decyk, 2000).

Cuenta con varios filtros para la visualización de un objeto:

- Contours: usa datos escalares o vectoriales.
- Glyphs: Permite observar los campos vectoriales con diferentes formas (flechas, cono, esferas, etc).
- Cutting: Puede extraer una región al colocar un plano de corte arbitrario según la necesidad del usuario.
- Streamlines-. Genera puntos, líneas, tubos que pueden ser procesados por varios filtros.

3. METODOLOGÍA

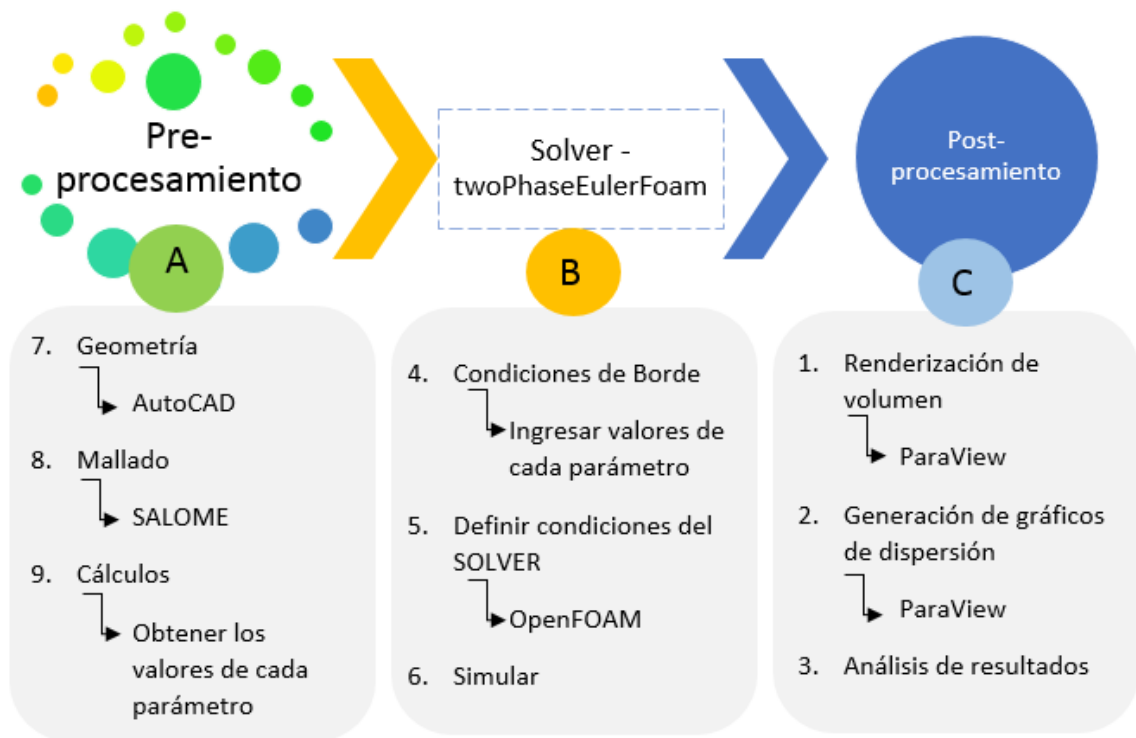


Figura 4 - Esquema de las etapas desarrolladas en la metodología.

3.1. Pre-Procesamiento

3.1.1. Geometría

En un inicio se define una geometría a partir del modelo de (Rondal, 2018), estableciéndose dos tipos de ingreso de aire (inlet), en base a la distribución de orificios en cada placa de difusor utilizada por (Rondal, 2018), la misma que fue adaptada previamente de (Kemoun, y otros, 2013).

Posteriormente se ingresa la geometría en AutoCAD, con las siguientes especificaciones:

Tabla 8.

Geometría definida para la simulación.

| Inlet 1 | | Inlet 2 | |
|-------------------------|-----|-------------------------|-----|
| Número orificios | 20 | Número orificios | 20 |
| Área inlet (%) | 0.5 | Área inlet (%) | 2.2 |
| Diámetro orificios (mm) | 2 | Diámetro orificios (mm) | 4 |
| Diámetro columna (mm) | 120 | Diámetro columna (mm) | 120 |
| Altura columna (m) | 3 | Altura Columna (m) | 3 |

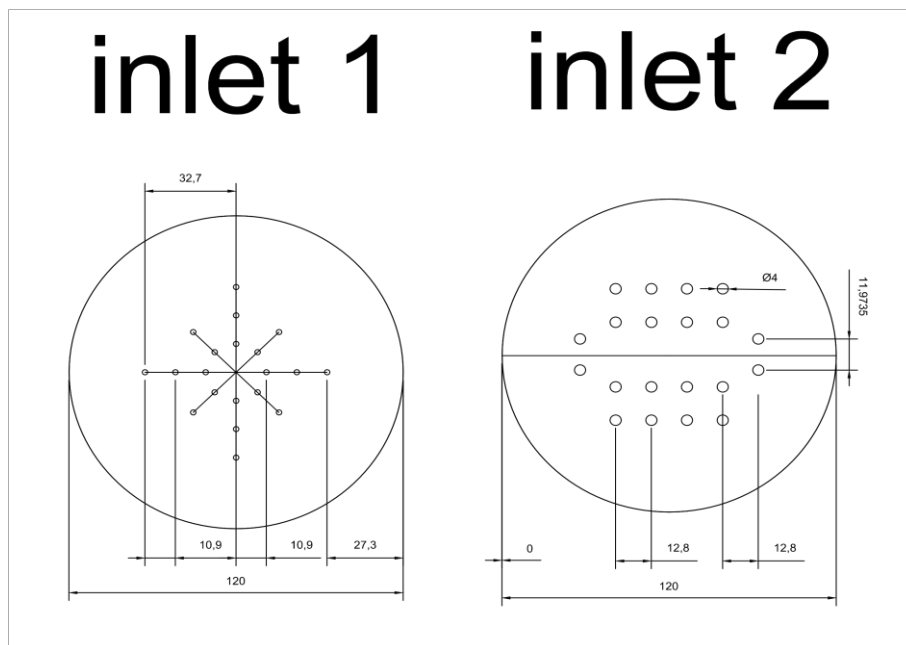


Figura 5. Distribución de los orificios y medidas en mm.

De igual forma, se define 3 alturas de agua para analizar:

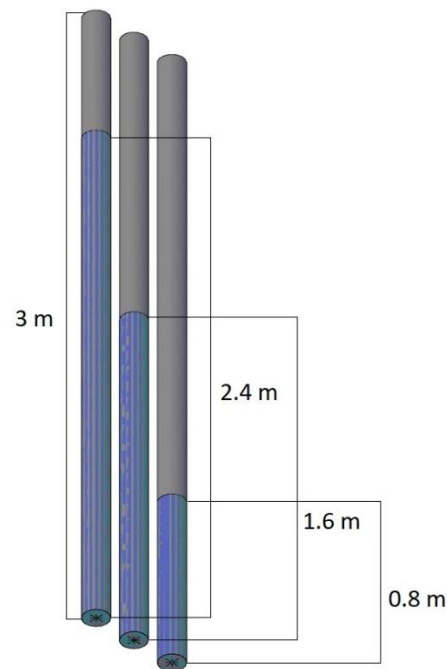


Figura 6. Esquema de la altura de agua utilizada para cada caso.

De esta forma, se obtiene 6 unidades de simulación en donde las variables son: la altura de agua y el diseño de la geometría de ingreso de aire (inlet1 e inlet 2).

Tabla 9.

Unidades de simulación.

| Inlet 1 | | | Inlet 2 | | |
|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| A1 | B1 | C1 | A2 | B2 | C2 |
| 0.8 m | 1.6 m | 2.4 m | 0.8 m | 1.6 m | 2.4 m |

A partir de los diagramas base, se procedió a ingresar los vértices y medidas en el archivo "blockMesh" de OpenFoam. Sin embargo, debido a la complejidad de los difusores planteados, se optó por utilizar el software SALOME para generar una geometría y mallado aptos para ingresar en el programa, asegurando su funcionamiento.

3.1.2. Generación del Mallado

Una vez realizada la geometría de la columna de agua en SALOME, se generó un mallado fino para cada geometría (figuras 6 y 7).

Tabla 10.

Parámetros del mallado en el software SALOME.

| | Inlet 1 | Inlet 2 |
|---------------|----------------|----------------|
| Número celdas | 28211 | 38475 |
| Forma celdas | tetrahedral | tetrahedral |
| Mínimo | 0.002 | 0.002 |
| máximo | 0.05 | 0.05 |

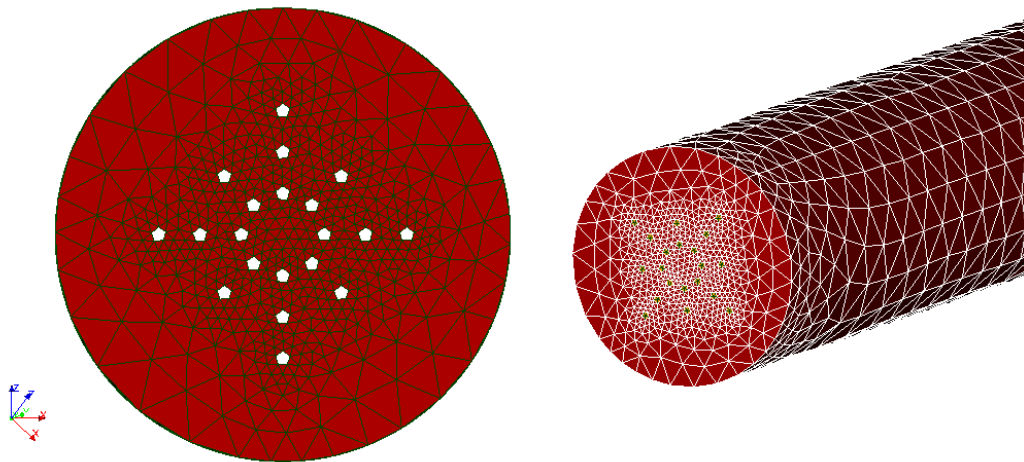


Figura 7 - Mallado de la geometría del inlet 1 – SALOME.

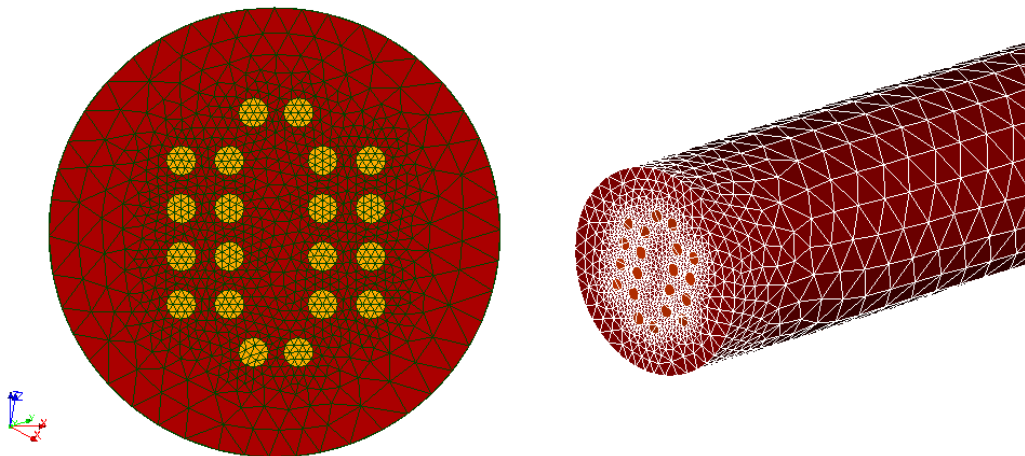


Figura 8. Mallado de la geometría del inlet 2 – SALOME.

3.2. SOLVER – TwoPhaseEulerFoam

3.2.1. Condiciones de borde

Tabla 11.

Condiciones de borde usadas en OpenFoam.

| Condición | Inlet | Outlet | walls |
|--------------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|
| Fracción de gas (alpha.air) | fixedValue | inletOutlet | zeroGradient |
| Velocidad de gas (U.air) | fixedValue | pressureInletOutletVelocity | fixedValue |
| Velocidad de líquido (U.water) | fixedValue | pressureInletOutletVelocity | fixedValue |
| Presión (p) | fixedFluxPressure | fixedValue | fixedFluxPressure |

Donde, zeroGradient hace referencia a que la gradiente normal de una variable es cero. fixedFluxPressure se establece como una condición donde la gradiente de la presión es cero, pero fuerzas como la gravedad y la tensión están presentes. La condición "inletOutlet" se deriva del cambio entre zeroGradient, cuando el flujo va hacia afuera, y fixedValue cuando el fluid va hacia adentro de la geometría. Para un flujo de ingreso, el valor de "inlet" se especifica como "inletValue". Por último, "pressureInletOutletVelocity" se define para establecer como zeroGradient a todos los componentes, excepto cuando hay el ingreso del flujo. En ese caso se establece una condición de fixedValue.

3.2.1.1. Inlet

De acuerdo con la geometría planteada se ingresaron los siguientes valores como condiciones del sistema.

$$T_{ad} = \frac{T_{amb}}{n} \left[\left(\frac{P_{abs}}{P_{atm}} \right)^{0.283} - 1 \right] \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$T_g = T_{amb} + T_{ad} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{H_2O} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Tabla 12.

Condiciones de borde para la simulación.

| Parámetros de ingreso a la simulación | | |
|--|-------|-----------|
| Velocidad aire (u_g) (m/s) (ver tabla 6) | 0.1 | 0.1 |
| Velocidad agua (u_l) (m/s) | 0 | 0 |
| Temperatura salida aire (°C) | 51,4 | 324.15 °K |
| Presión abs (psi) | 14.78 | 101 kPa |
| Presión atmosférica (psi) | 11.75 | 81 kPa |
| P=rgh (psi) | 3.03 | 20 kPa |

Los parámetros de temperatura y presión se calcularon en base a las ecuaciones 9 y 10 obtenidas de (Hanotu, Bandulasena, & Zimmerman, 2017).

De igual forma se calculó el valor de k y ε en función de la velocidad del aire ($u_g = 0.1$) utilizando las ecuaciones 7 y 8, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 13.

Calculo de k y ε a partir de la velocidad de ingreso de aire. Condiciones de borde.

| H_a (m) | α_l | k | ε |
|-----------|------------|-----------|---------------|
| 0.8 | 0.26 | 2.53 e-6 | 7.83 e-8 |
| 1.6 | 0.53 | 1.053 e-5 | 6.65 e-7 |
| 2.4 | 0.8 | 2.4 e-5 | 2.29 e-6 |

3.2.1.2. Walls

En los muros de la geometría, se ingresó las condiciones de borde como “zeroGradient” para la fracción de retención de aire y se tomó por cero, al igual que para la velocidad de entrada del agua y el aire. Para la presión se estableció la condición “fixedFluxboundary”. Finalmente, para “k” se definió como “zeroGradient”. Esto se debe a que se establece un valor de cero al igual que las otras condiciones, puesto que es una condición de frontera en la pared. Para el cálculo de épsilon, el software utiliza la siguiente ecuación (Bhusare, Dhiman, Kalaga, Roy, & Joshi, 2017):

$$\varepsilon = \frac{C_{\mu}^{3/4} k^{3/2}}{Kx} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde K es una constante igual a 0.41, mientras que x es la distancia desde la pared hasta el primer nodo.

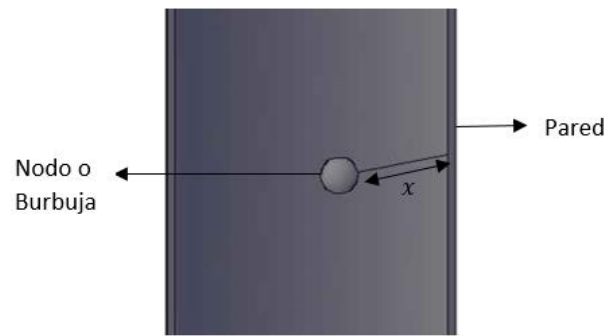


Figura 9. Gráfica con respecto al parámetro ϵ .

3.2.1.3. controlDict

Tabla 14.

Configuración del archivo "controlDict" - Tiempo de simulación.

| | | | |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------|
| application | twoPhaseEulerFoam | writeFormat | Ascii |
| startFrom | startTime | writePrecision | 4 |
| StartTime | 0 | writeCompression | Uncompressed |
| stopAt | endTime | timeFormat | General |
| endTime | 2 | timePrecision | 6 |
| deltaT | 0.001 | runTimeModifiable | Yes |
| writeControl | runTime | adjustTimeStep | No |
| writeInterval | 0.05 | maxCo | 0.5 |
| purgeWrite | 0 | maxDeltaT | 1 |

3.2.1.4. fvSchemes

Aquí se establece el método de discretización del solver. Los esquemas aplicados se muestran en la siguiente tabla (Venier, Marquez, Ramajo, & Nigro, 2014).

Tabla 15.

Esquemas de discretización seleccionados en "fvSchemes".

Adaptado de (Greenshields, 2017).

| Grupo | twoPhaseEulerFoam | |
|----------------------|----------------------|--------------------------|
| ddtSchemes | Euler | |
| gradSchemes | Gauss Linear | |
| divSchemes | Div(phi,alpha.air) | Gauss vanLeer |
| | Div(phir,alpha.air) | Gauss vanLeer |
| | Div(alphaRhoPhi,U) | Gauss limitedLinearV 1 |
| | Div(Phi,U) | Gauss limitedLinearV 1 |
| | Div(alphaRhoPhi,h e) | Gauss limitedLinear 1 |
| | Div(alphaRhoPhi,K) | Gauss limitedLinear 1 |
| | Div(alphaRhoPhi,p) | Gauss limitedLinear 1 |
| | Div(alphaRhoPhi,k) | Gauss limitedLinear 1 |
| laplacianSchemes | default | Gauss linear uncorrected |
| interpolationSchemes | default | linear |
| snGradSchemes | default | uncorrected |

Los esquemas detallados anteriormente fueron descritos por (Liu, 2014) como los esquemas más utilizados debido a la disminución del tiempo de simulación. Los esquemas TVD (total variation diminishing) utilizados fueron: "vanLeer", para la discretización de la convección del volumen, y "limited LinearV" para la convección de la velocidad (Liu, 2014).

En "**ddtSchemes**" se define la primera derivada y el esquema de discretización de cada termino (ver tabla 15). Un solver, normalmente, está configurado como transitorio o estático. Si se desea especificar el esquema para un segundo término como "d2dt2Schemes" solo es posible en el esquema "Euler". Para el apartado de "ddtSchemes" se puede escoger entre los siguientes esquemas (Greenshields, 2017):

Tabla 16.

Opciones de configuración para *ddtSchemes*.

Adaptado de (Greenshields, 2017).

| Esquema | Descripción |
|---------------|---|
| steadyState | Establece el tiempo de la derivada en cero |
| Euler | Transitorio. Borderizado |
| Backward | Transitorio, potencialmente no borderizado |
| crankNicolson | Requiere de un coeficiente Ψ . Donde, si $\Psi=1$, entonces es CrankNicolson, si $\Psi=0$, es Euler. Generalmente se usa $\Psi=0.9$ para estabilizar el esquema. |
| localEuler | Pseudo-transitorio para acelerar la solución a estático. |

En “**gradSchemes**” contiene términos de una gradiente. Normalmente se utiliza la entrada “Gauss” para especificar el volumen estándar de discretización de la integración gaussiana que requiere la interpolación de valores desde el centro de las celdas, al centro de las caras. El esquema de interpolación se define como “linear” que significa una interpolación linear como su nombre lo indica (Greenshields, 2017).

En algunos casos, cuando el mallado es muy simple, la discretización de la gradiente se sobrescribe para mejorar la estabilidad del sistema.

En el caso de “**divSchemes**” contiene términos de divergencia. Normalmente se identifica la forma “div (phi)” donde phi denota el flujo de velocidad en las caras de las celdas con densidad constante (Greenshields, 2017).

En el apartado de “**Laplacian Schemes**” se tiene el término ∇ que corresponde a la variación de una variable en los 3 ejes coordenados. La única opción para este apartado es el esquema “Gauss” de discretización que utiliza un coeficiente de difusión para la interpolación linera de los datos (Greenshields, 2017).

En el caso de “**interpolationSchemes**”, contiene valores de interpolación desde el centro de la celda al centro de la cara. Primeramente se usa en la interpolación de la velocidad en el centro de cada cara (Greenshields, 2017).

Por último, en “**snGradSchemes**” se establece una gradiente normal. Es decir, establece la evaluación de una gradiente en la cara de una celda substrayendo el calor del centro de la celda. Normalmente se tiene las siguientes opciones para este esquema: corrected, limited corrected 0.33, limited corrected 0.5, orthogonal y uncorrected. Una entrada ortogonal requiere un mallado regular alineado con las coordenadas del sistema cartesiano, que normalmente no ocurre, por otro lado, el esquema “corrected” se utiliza como una corrección al componente ortogonal donde se incrementa el ángulo entre los lados del mallado. Es así que, normalmente se utiliza los valores 0.33 y 0.5 que ofrecen una gran estabilidad. Por último, el esquema “uncorrected” se recomienda para mallados que no son ortogonales (Greenshields, 2017).

3.2.1.5. fvSolution

A continuación, se explican los solvers utilizados en el directorio “fvSolutions”. Se debe especificar los controles para la solución del algoritmo los métodos de solución, tolerancia, etc. (CFD Direct, 2016).

Tabla 17.

Solvers seleccionados en el directorio “fvSolutions”

| Parámetro | twoPhaseEulerFoam | |
|------------|-------------------|------|
| Alpha.air | nAlphaCorr | 1 |
| | nAlphaSubCycles | 2 |
| P_rgh | Solver | GAMG |
| | Smoother | DIC |
| | tolerance | 1e-8 |
| | relTolo | 0 |
| P_rghFinal | relTol | 0 |

| | | |
|---------------------------|-----------|----------------|
| U | Solver | Smoothsolver |
| | smoother | symGaussSeidel |
| | tolerance | 1e-5 |
| | relTol | 0 |
| | minIter | 1 |
| e | Solver | Smoothsolver |
| | smoother | symGaussSeidel |
| | tolerance | 1e-8 |
| | relTol | 0 |
| | minIter | 1 |
| k ϵ θ | Solver | Smoothsolver |
| | smoother | symGaussSeidel |
| | tolerance | 1e-7 |
| | relTol | 0 |
| | minIter | 1 |

Donde “**Solver**” especifica cada parámetro que se usa para cada ecuación de discretización de forma lineal. Esto se refiere al método de solución de la matriz de cada solver, el mismo que se selecciona de las siguientes opciones (Greenshields, 2017):

- PCG/PBiCGStab: Gradiente conjugada establecida para ambas matrices: simétricas y asimétricas.
- PCG/PBiCG: Gradiente conjugada preconditionada con PCG para matrices simétricas y PBiCG para matrices asimétricas.
- smoothSolver: utiliza el “smoother” que se detalla más adelante.
- GAMG: multimallado generalizado.
- Diagonal: solver diagonal para sistemas asimétricos.

En el caso de que el solver se especifique como “**smoothsolver**”, se necesita escoger el smooth a utilizar del siguiente listado (Greenshields, 2017):

- GaussSeidel: método iterativo para resolver ecuaciones lineales.

- symGaussSeidel: Gauss-Seidel Simetrico.
- DIC/DILU: Diagonal incompleto – Cholesky (simétrico), incompleto LU (asimétrico)
- DICGaussSediel: diagonal incompleto Cholesky.

Tabla 18.

Configuración del algoritmo de solución en el directorio "fvSolution".

| PIMPLE | |
|-------------------------|---|
| nOuterCorrectors | 3 |
| nCorrectors | 1 |
| nNonOrthogonalCorrectos | 0 |

El solver twoPhaseEulerFoam utiliza solucionadores suaves con el "symGaussSeidel", este es el solucionador más utilizado y uno de los más confiables. Para las ecuaciones de presión se utiliza un solucionador de cuadrícula geométrica-algebraica generalizada (GAMG) con un pre-acondicionador de Cholesky incompleto diagonal (DIC) (CFD Direct, 2016).

En el algoritmo PIMPLE se utiliza nCorrectors para definir el número de veces que el algoritmo resuelve la ecuación de presión y momento, y nOuterCorrectors para habilitar la solución de las ecuaciones del sistema en un registro de tiempo (Greenshields, 2017).

3.2.1.6. Número Courant

Cuando se realiza la simulación, es importante asegurar que se alcance la convergencia de la solución. Para esto se monitorea el error residual mediante el número de Courant (Marchisio, Vigil, & Fox, 2003).

El número Courant se define como:

$$Co = \frac{\Delta t \cdot |U|}{\Delta x} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Δt Es la longitud del paso de tiempo, U es la velocidad del flujo y Δx es la longitud de la celda. Esto representa la fracción de celda que, por el flujo, puede avanzar durante el paso del tiempo. Esto indicará si el paso del tiempo que se utiliza es lo suficientemente pequeño para una buena discretización. El número Courant debe ser menor a 1, cuanto más bajo sea el número, mejor será la discretización y aumentara el tiempo de simulación (Hjertager, 2009). En este estudio se utilizó $\max Co=0.5$.

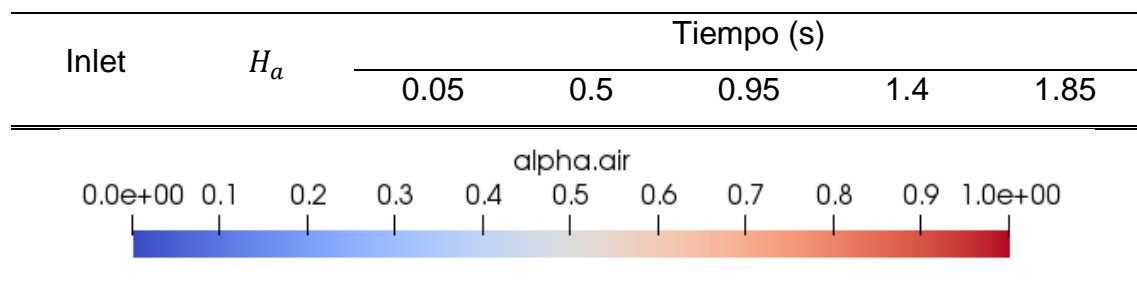
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tiempo de simulación fue de 2 segundos, incluyendo el registro de datos cada 0.05 segundos. Es así que, los resultados se presentaran cada 0.45 segundos para una mejor visualización.

En un inicio se plantea la formulación de resultados de toda la columna de agua en base a dos parámetros: α_{air} y U_{air} (velocidad del aire), a partir de los cuales se establecerá los regímenes en base a los cuales analizar el resto de las variables. De esta forma, se obtiene lo siguiente:

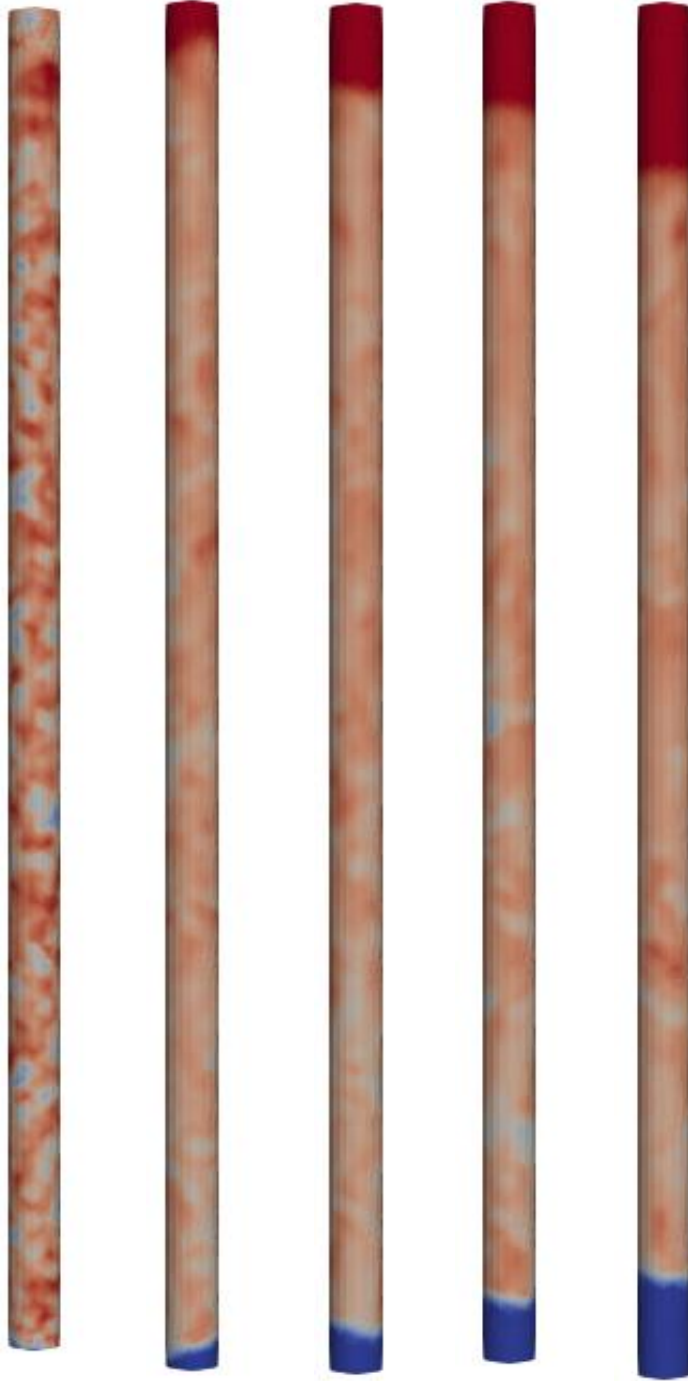
Tabla 19.

Resultados α_{air} o distribución de aire en la columna de agua.

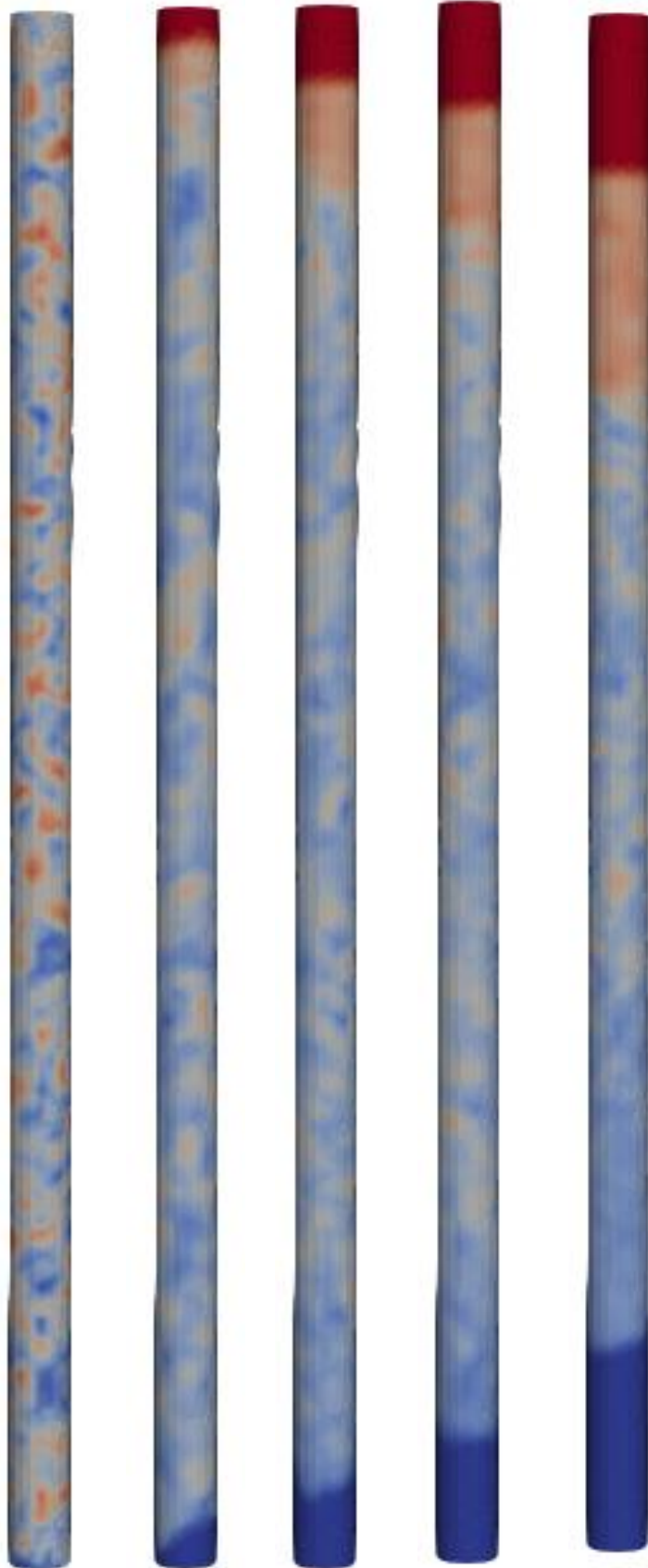


1

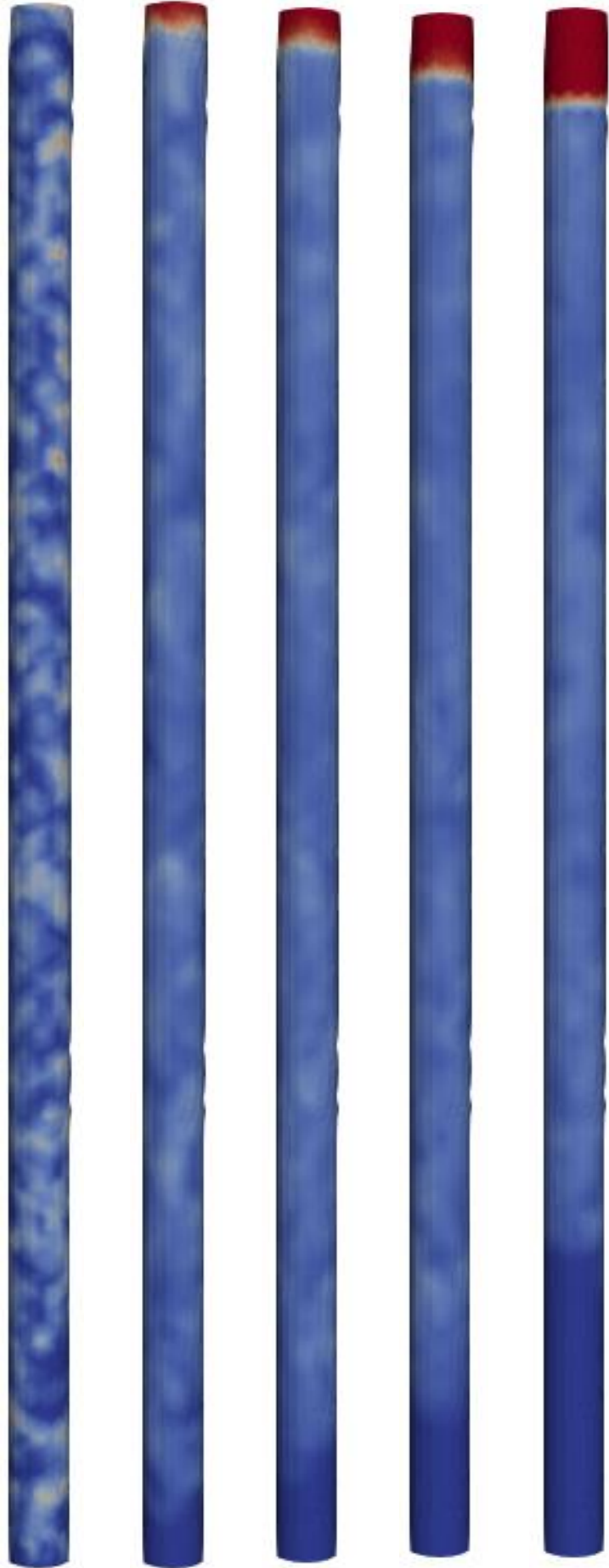
A1



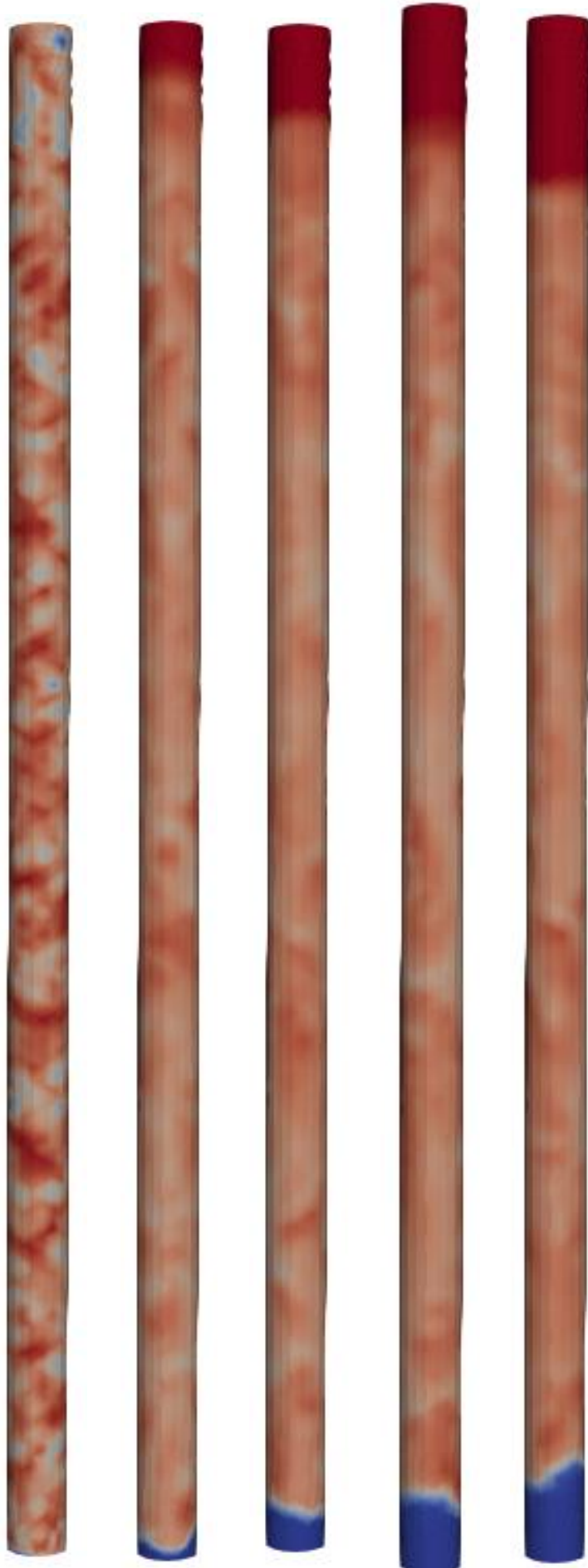
B1



C1



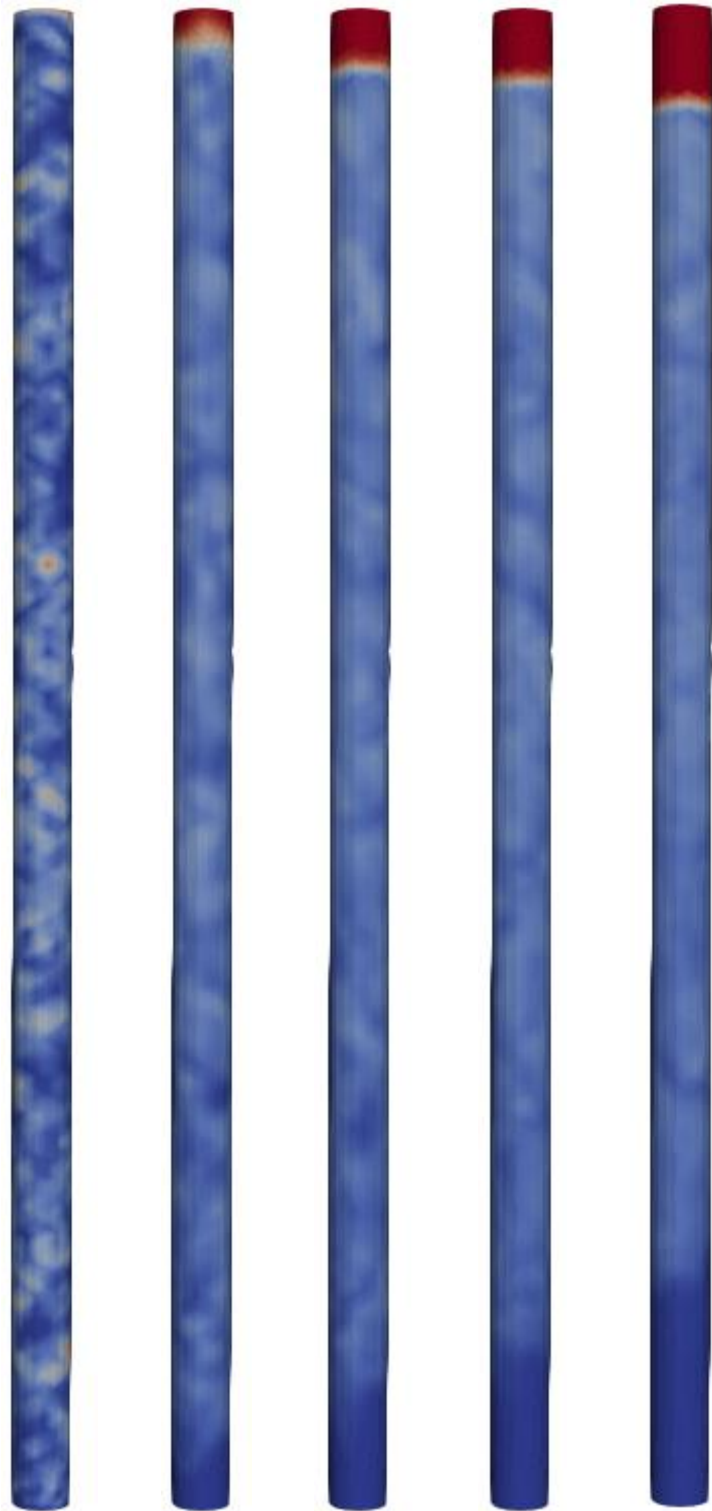
2 A2



B2



C2




El parámetro Alpha.air , nos indica la distribución del aire que se inyecta en la columna de agua. El color rojo, al que se le atribuye un valor de 1, quiere decir que solo hay aire, mientras que el color azul, al que se le atribuye un valor de 0,

señala la ausencia de este y, por el contrario, sugiere que el resto es agua (Alpha.water). En este caso, mientras la columna de agua es más alta, se observa que el color azul predomina, señalando que hay menos cantidad de aire debido a la falta de espacio para el ingreso del mismo. Según (Dudley, 1995) y (Zizka, Sulc, & Ditzl, 2017), se corrobora lo antes manifestado, pues señalan que Alpha.air es inversamente proporcional a Alpha.water y está directamente relacionado con la velocidad del aire de ingreso.

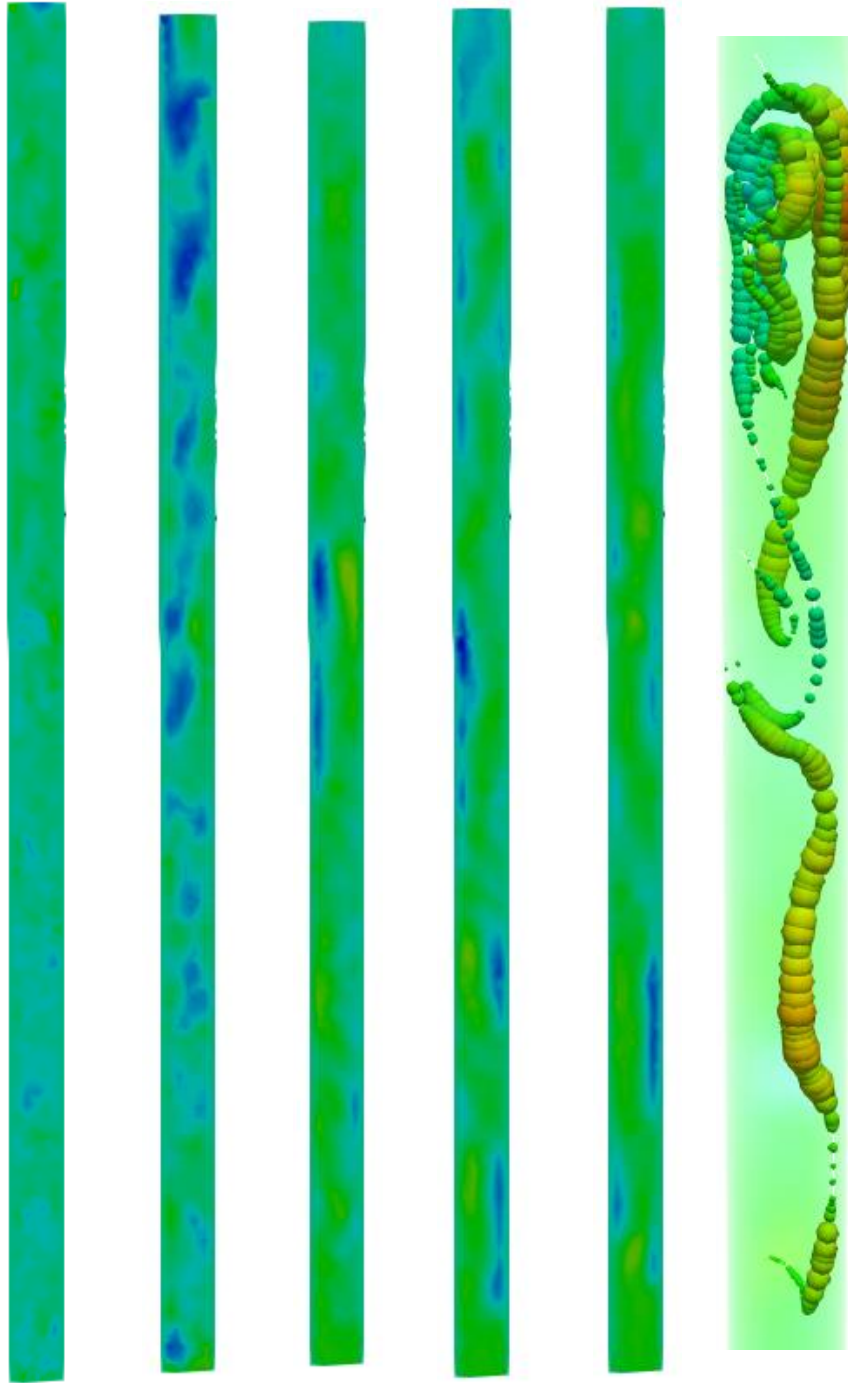
Tabla 20.

Resultados de velocidad del aire de ingreso (U_{air}) en la columna de agua.

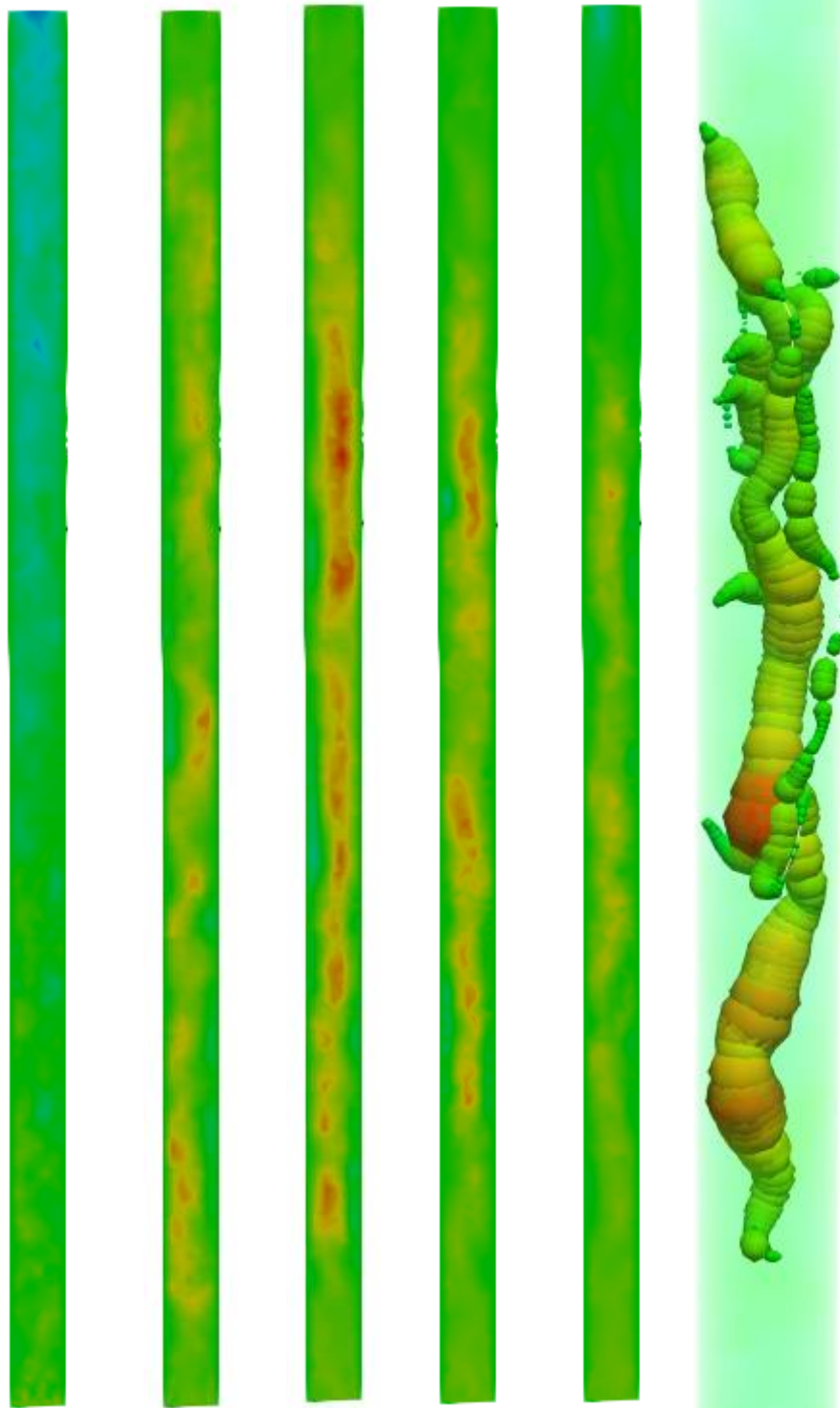
| inlet | H_a | Tiempo (s) | | | | | | | | |
|-------|-------|------------|------|------|-----|------|-----|-----|---|---------|
| | | 0.05 | 0.5 | 0.95 | 1.4 | 1.85 | 2 | | | |
| | | U.air Y | | | | | | | | |
| | | -5.2e-01 | -0.2 | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.3e+00 |



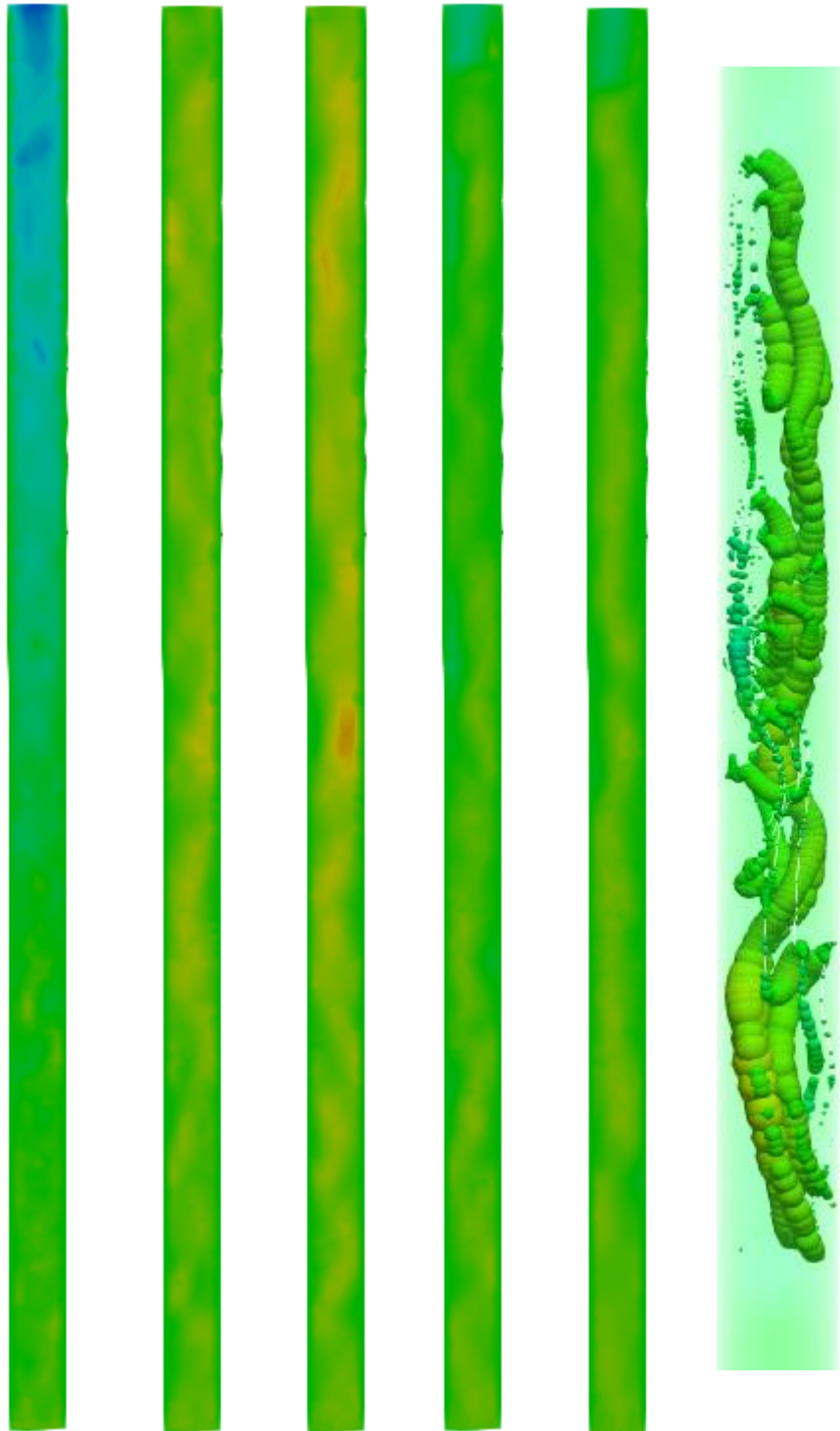
1 A1



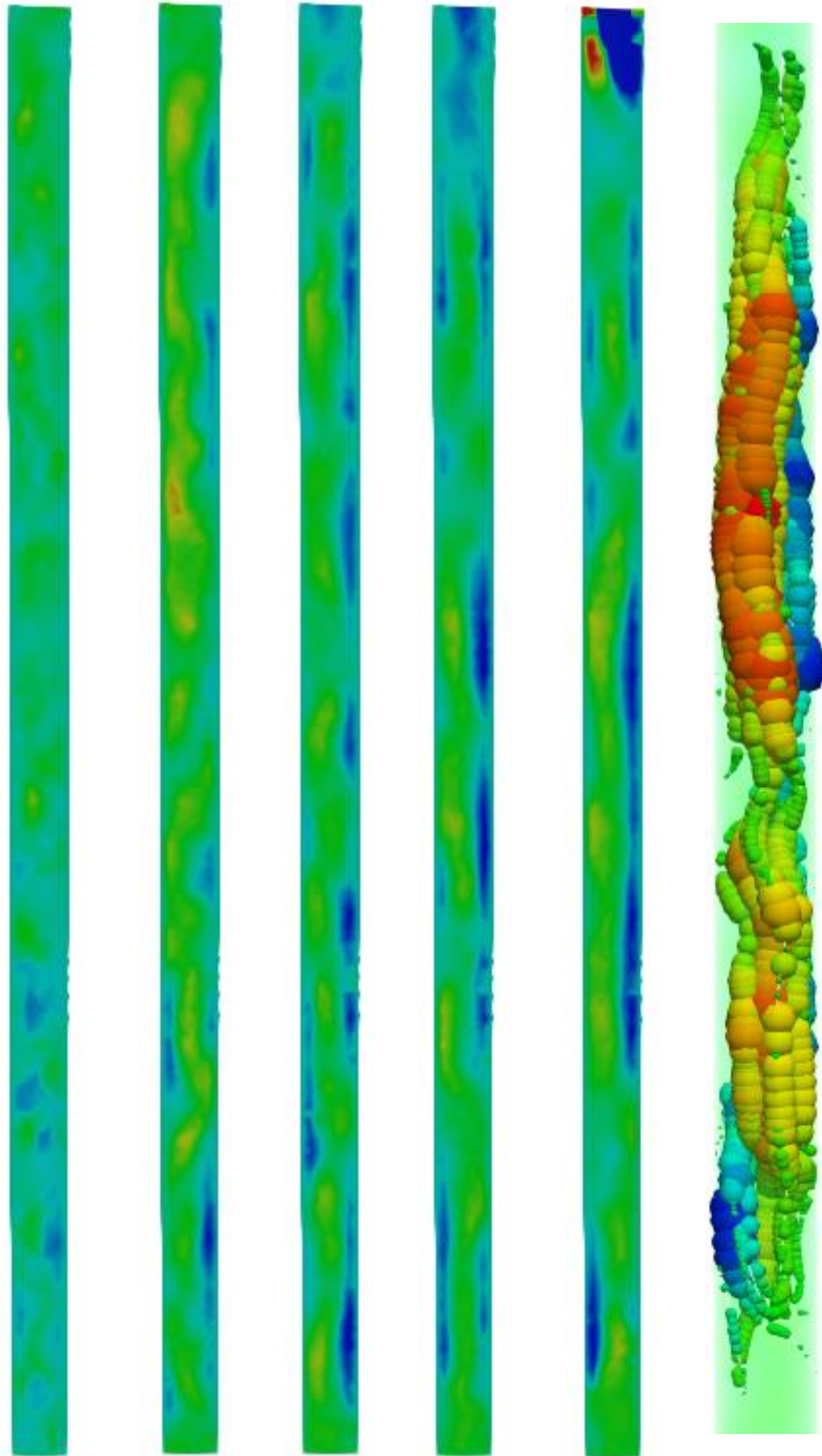
B1



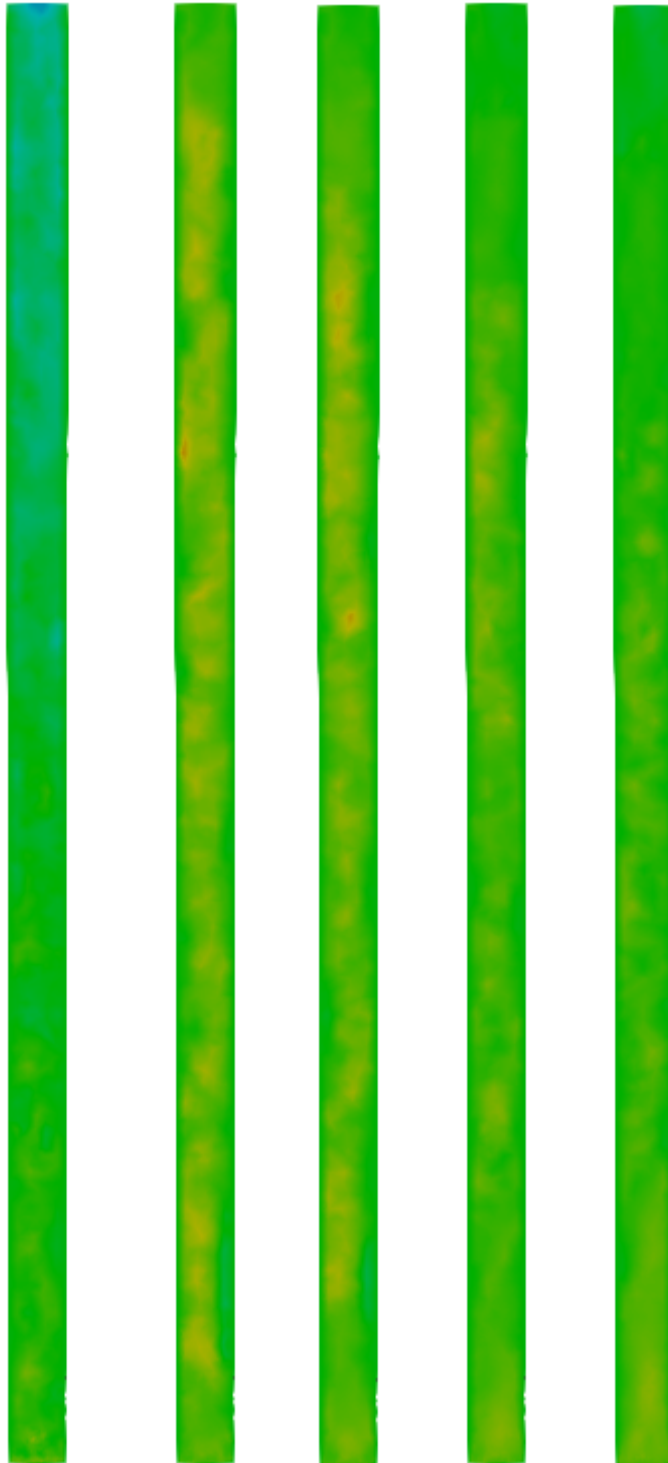
C1



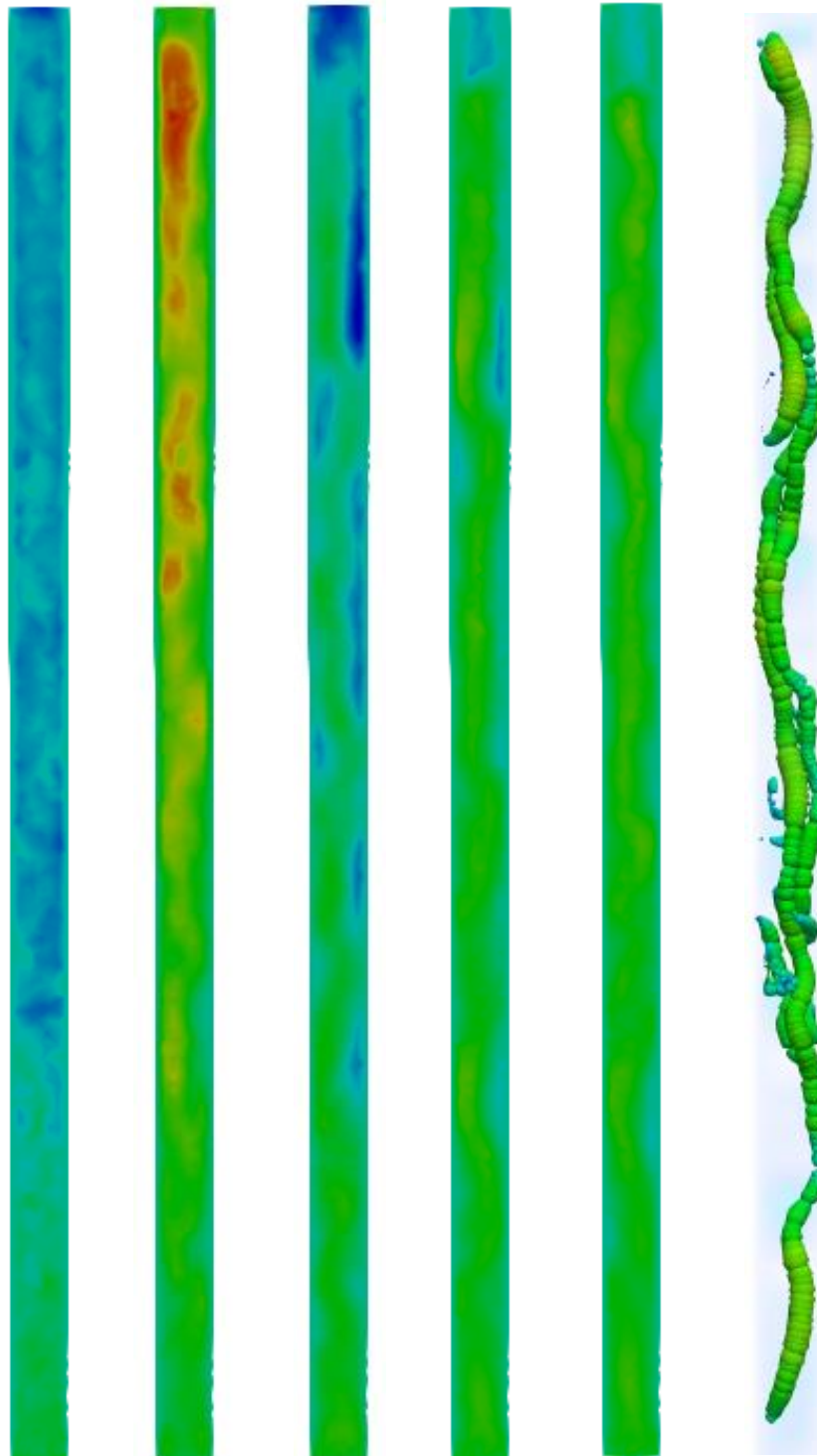
2 A2



B2



C2



De acuerdo con las anteriores gráficas (tabla 16) podemos observar que en el “inlet 1” las velocidades oscilan entre 0.1 m/s y 0.6 m/s. En la columna con $H_a=0.8\text{m}$ se puede observar velocidades negativas generadas por el incremento

del movimiento de oscilación del flujo, lo que influye como factor clave en el incremento del tiempo de residencia de la burbuja en la columna de agua (Oliveira, Fitch, & Ni, 2003).

En el primer "inlet" no se evidencia cambios abruptos en el régimen de velocidad de aire. Sin embargo, al analizar el "inlet 2", se encuentra que las velocidades negativas son más visibles, por ejemplo, en la columna de agua de $H_a=2.4m$ se observa cambios repentinos obteniendo velocidades de hasta 1.3 m/s.

De acuerdo con (Balasubramaniam, Ramé, Kizito, & Kassemi, 2006) se plantean determinadas velocidades promedio de los regímenes descritos en el punto (6.4) (anular $u_g \geq 7.5m/s$, slug $0.25 m/s < u_g < 0.35m/s$, heterogéneo $0.17 m/s < u_g < 0.25m/s$, de transición $0.13 m/s < u_g < 0.2m/s$, pseudo-homogéneo $0.1 m/s < u_g < 0.15m/s$ y homogéneo Mono-disperso $u_g \leq 0.1m/s$) que de acuerdo con la tabla 16 podemos establecer regímenes para cada una de las columnas de agua:

Tabla 21.

Regímenes identificados para cada unidad de simulación.

| Regímenes | Columna de Agua | | | | | |
|-------------------------|---|----|----|----|----|----|
| | A1 | B1 | C1 | A2 | B2 | C2 |
| Homogéneo Mono-disperso | X | X | X | X | X | X |
| Pseudo-homogéneo | X | X | X | X | X | X |
| De transición | X | X | X | X | X | X |
| Heterogéneo | | X | | X | | X |
| Slug | | X | | X | | X |
| Anular | Solo aplica a velocidades mayores a 7.5 m/s | | | | | |

4.1. Correlación entre columnas de agua

4.1.1. U.air – Velocidad de ingreso de aire

4.1.1.1. $Ha=0.8$

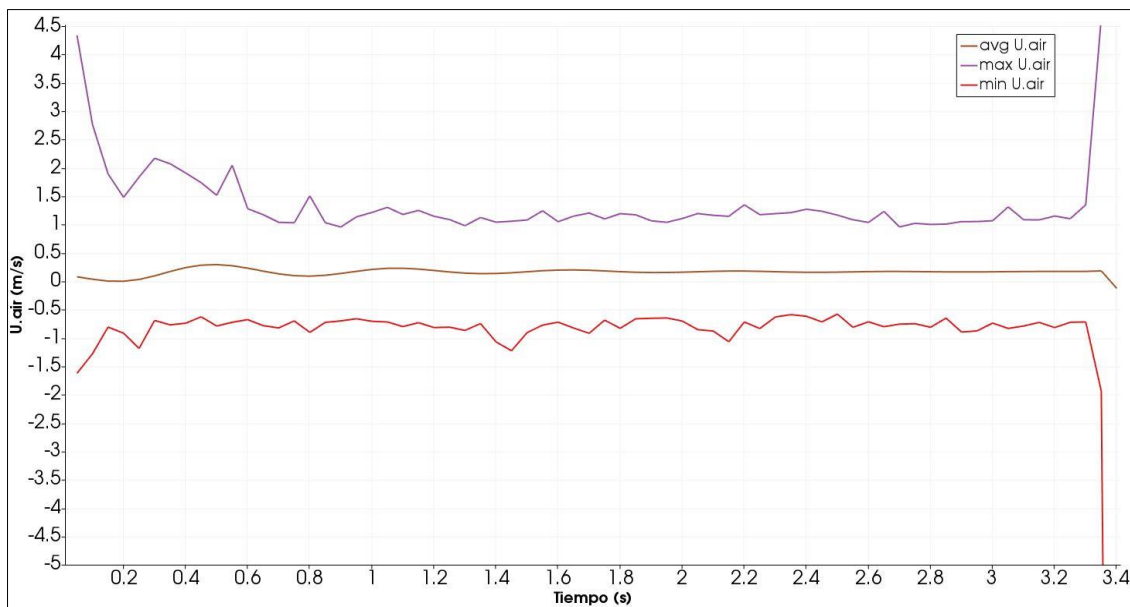


Figura 10. Variación de la velocidad del aire durante la simulación. Inlet 1 $Ha=0.8$.

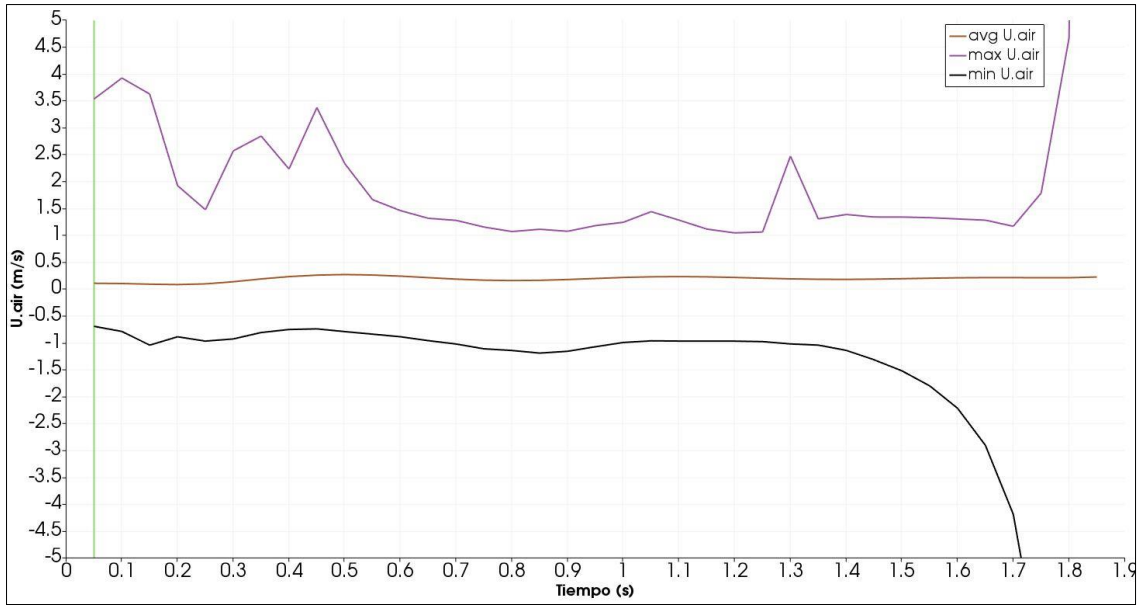


Figura 11. Variación de la velocidad del aire durante la simulación. Inlet 2 $H_a=0.8$.

4.1.1.2.

4.1.1.3. $H_a=1.6$

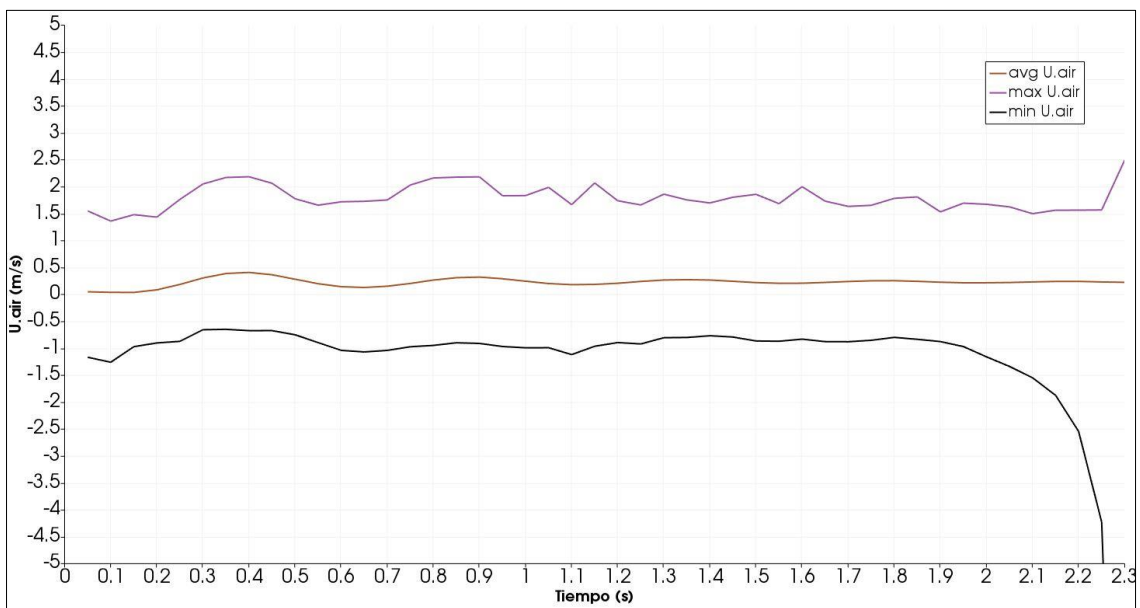


Figura 12. Variación de la velocidad del aire durante la simulación. Inlet 1 $H_a=1.6$.

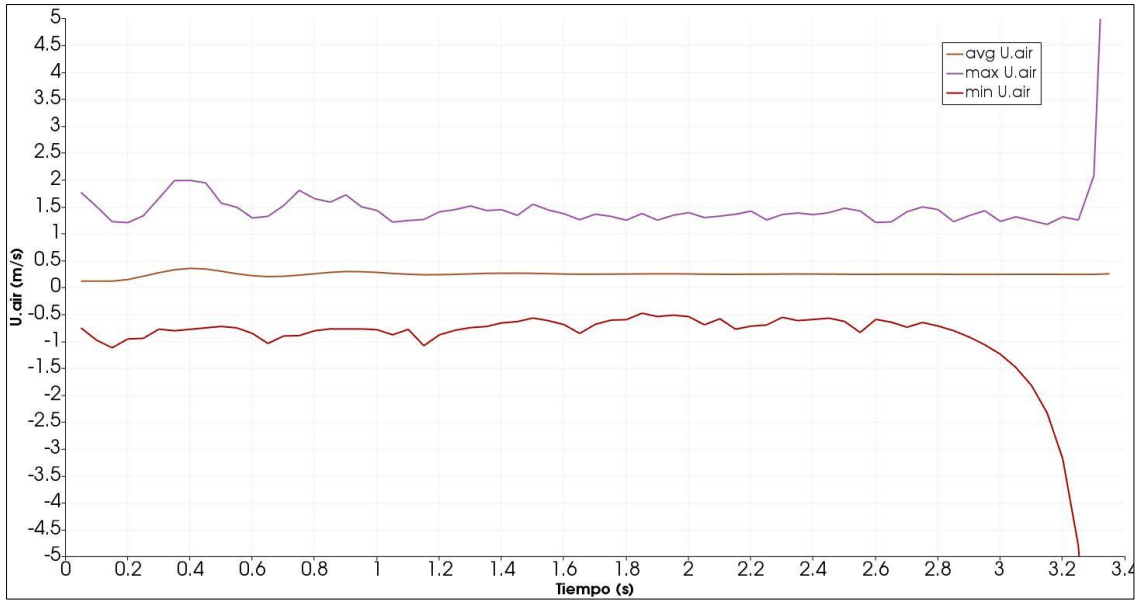


Figura 13. Variación de la velocidad del aire durante la simulación. Inlet 2 $Ha=1.6$.

4.1.1.4. $Ha=2.4$

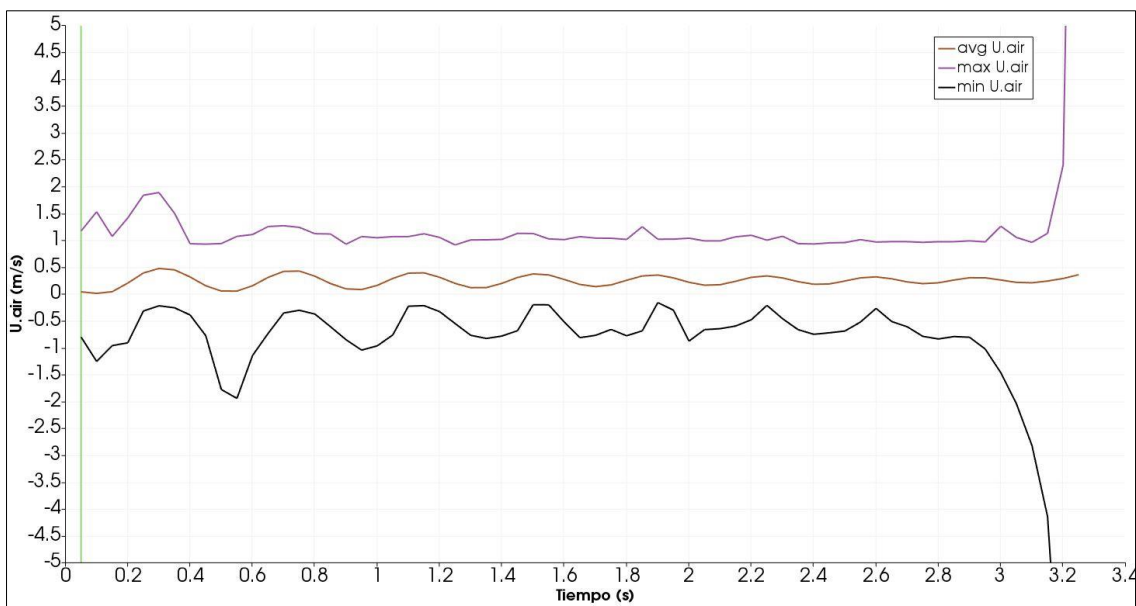


Figura 14. Variación de la velocidad del aire durante la simulación. Inlet 1 $Ha=2.4$.

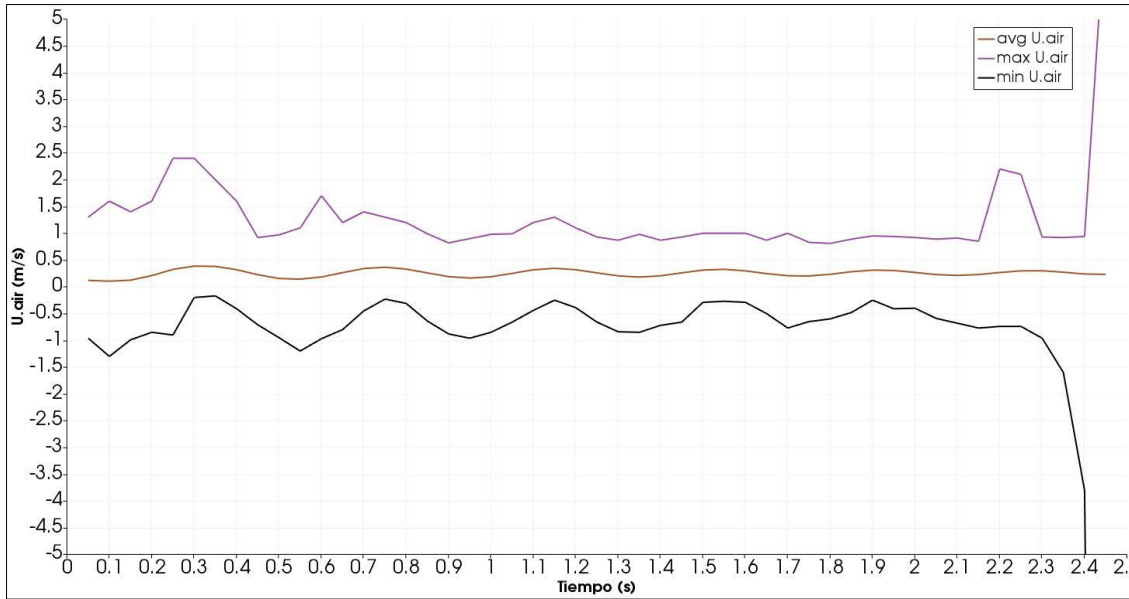


Figura 15. Variación de la velocidad del aire durante la simulación. Inlet 2 $Ha=2.4$.

4.1.2. Presión

4.1.2.1. $H_a=0.8$

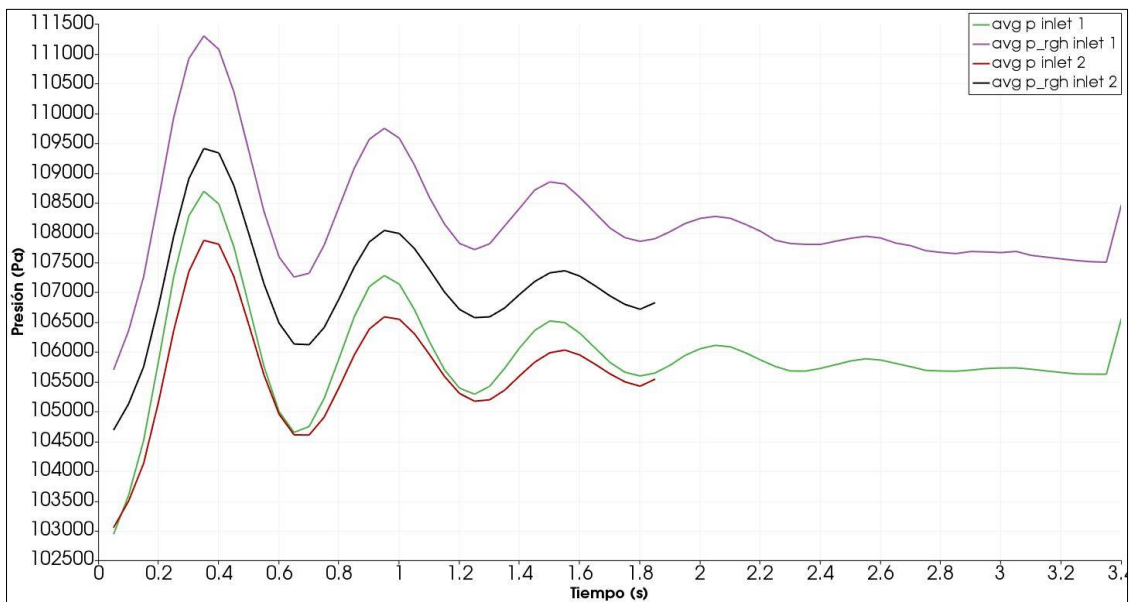


Figura 16. Variación de la presión durante la simulación. Inlet 1 y 2. $Ha=0.8$.

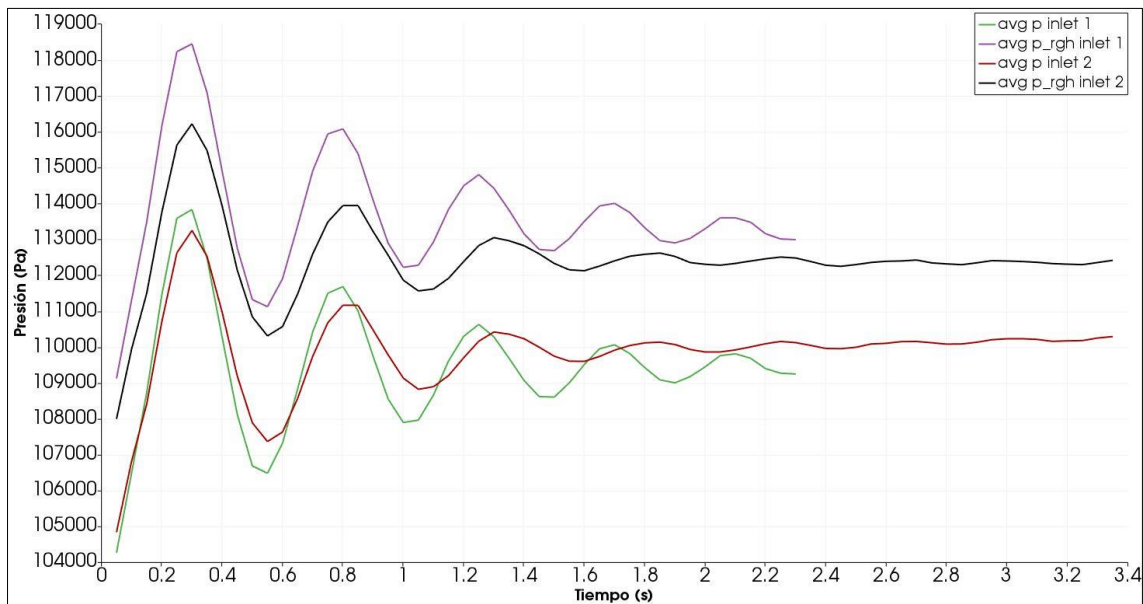
4.1.2.2. $H_a=1.6$ 

Figura 17. Variación de la presión durante la simulación. Inlet 1 y 2. $H_a=1.6$.

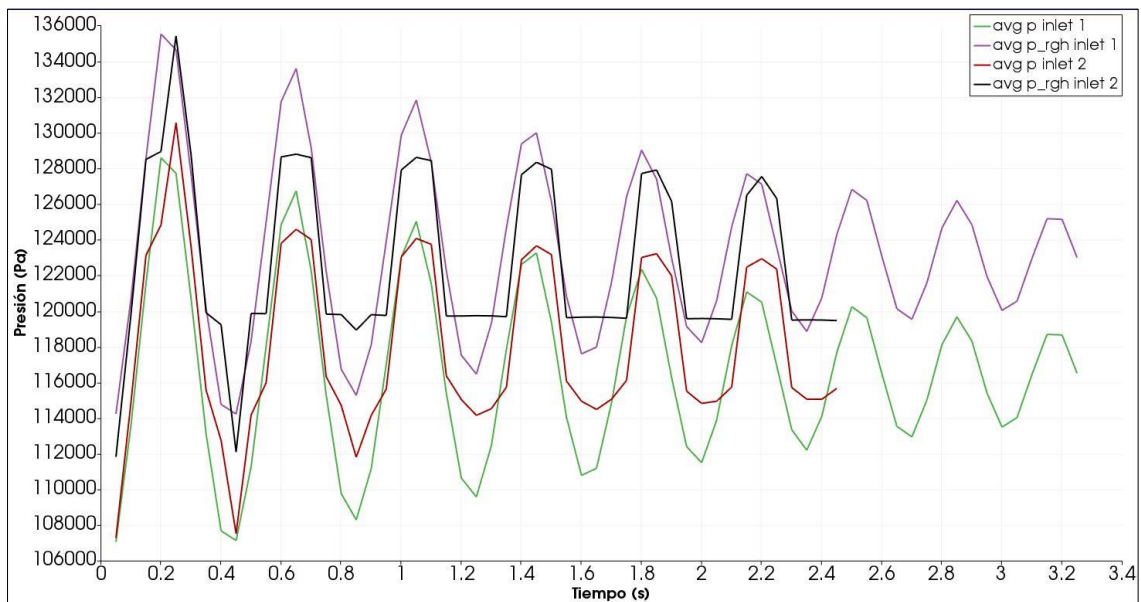
4.1.2.3. $H_a=2.4$ 

Figura 18. Variación de la presión durante la simulación. Inlet 1 y 2. $H_a=2.4$.

4.1.3. Temperatura

4.1.3.1. $Ha=0.8$

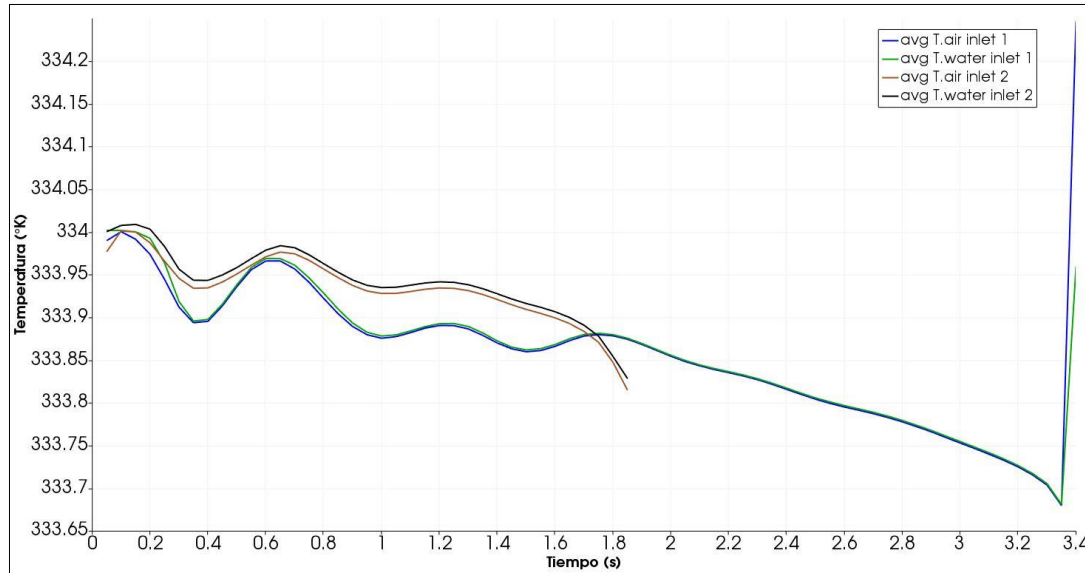


Figura 19. Variación de la temperatura durante la simulación. Inlet 1 y 2. $Ha=0.8$.

4.1.3.2. $Ha=1.6$

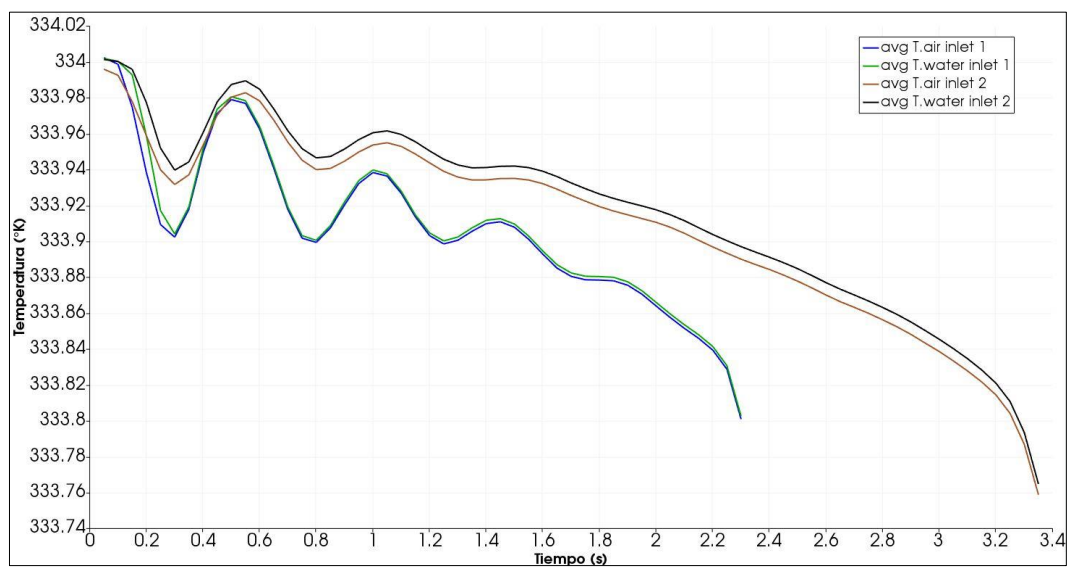


Figura 20. Variación de la temperatura durante la simulación. Inlet 1 y 2. $Ha=1.6$.

4.1.3.3. $H_a=2.4$

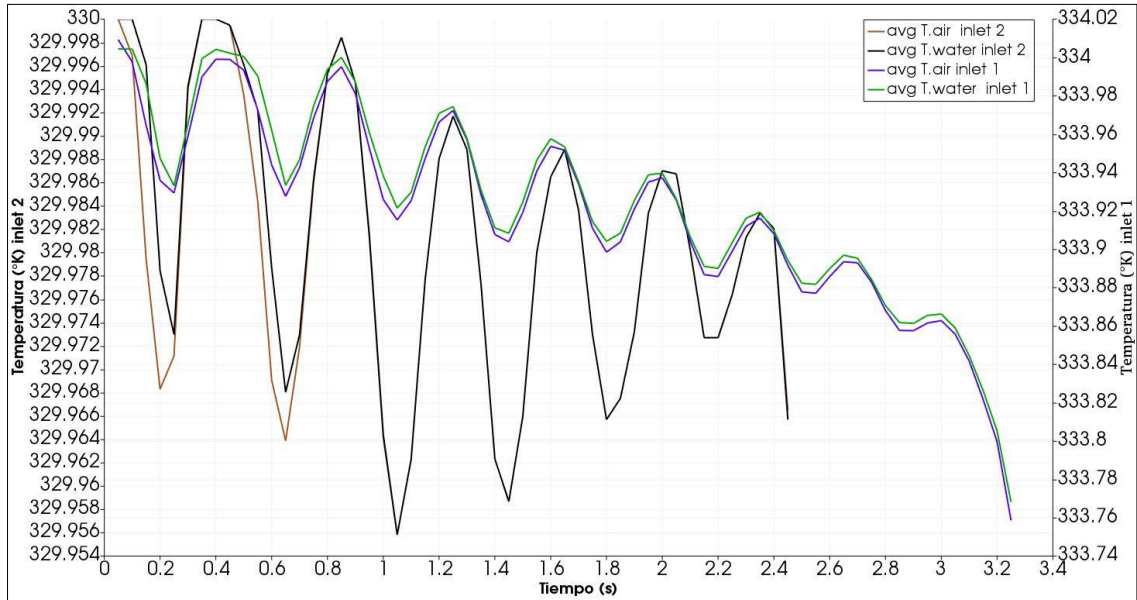


Figura 21. Variación de la temperatura durante la simulación. Inlet 1 y 2. $H_a=2.4$.

4.1.4. Alpha.air / Alpha.water

4.1.4.1. $H_a=0.8$

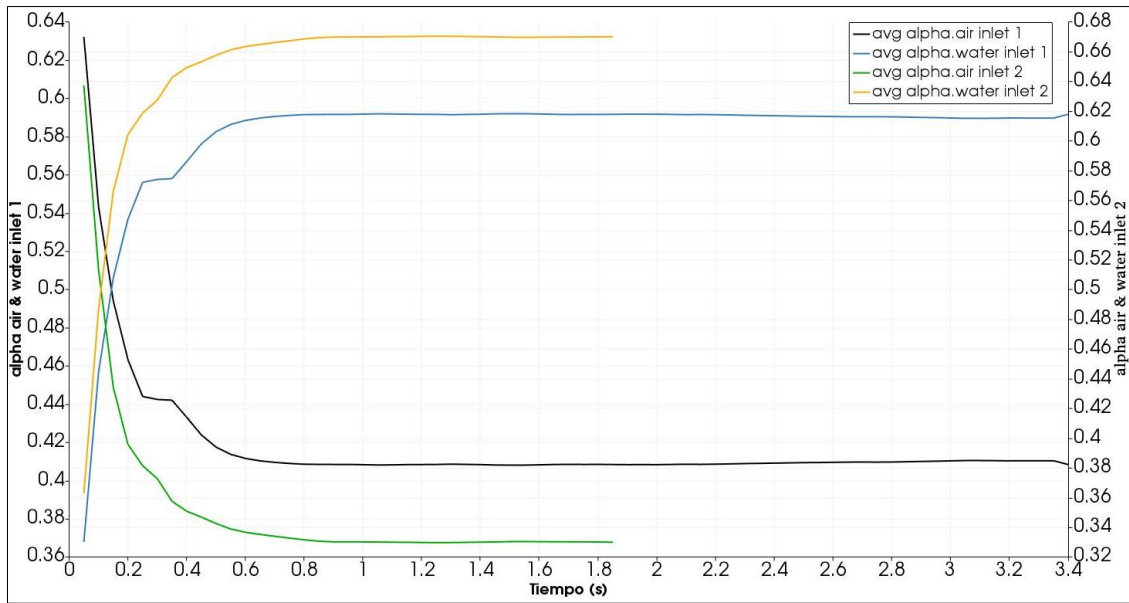


Figura 22. Variación del nivel de agua y aire durante la simulación. Inlet 1 y 2
Ha=0.8.

4.1.4.2. $H_a=1.6$

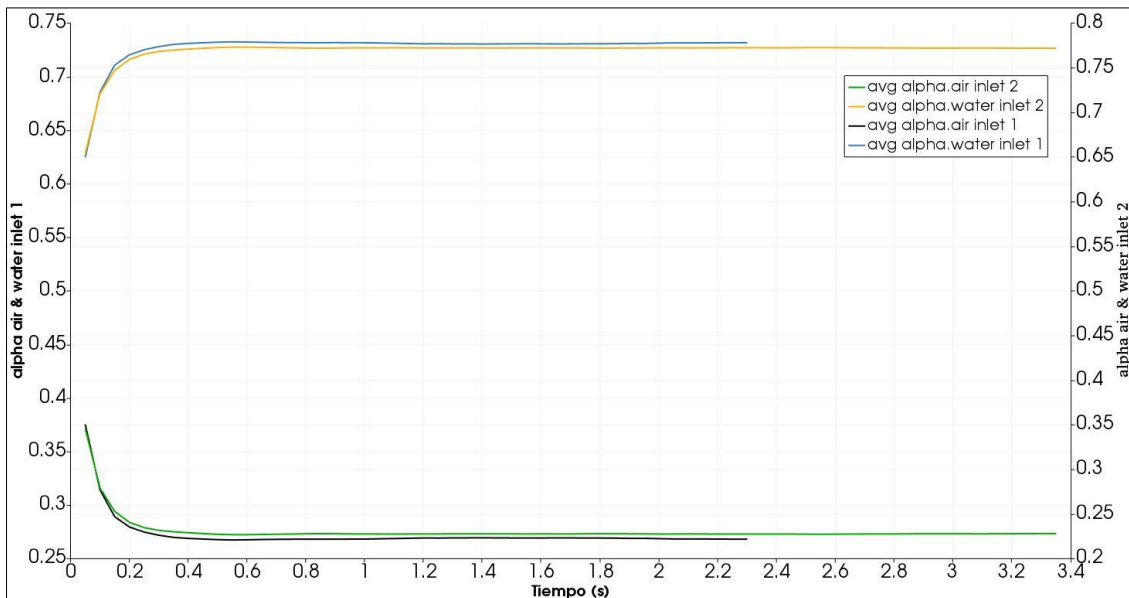


Figura 23. Variación del nivel de agua y aire durante la simulación. Inlet 1 y 2
Ha=1.6.

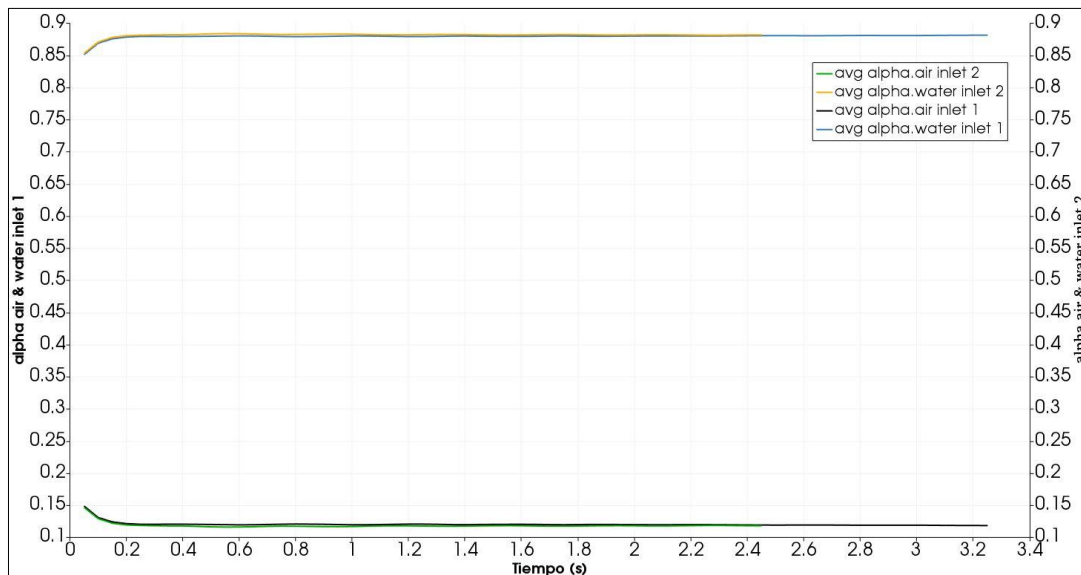
4.1.4.3. $H_a=2.4$ 

Figura 24. Variación del nivel de agua y aire durante la simulación. Inlet 1 y 2 $H_a=2.4$.

En general, en todas las unidades de simulación, se puede observar la relación inversamente proporcional entre el parámetro “Alpha.air” y “Alpha.water” (Zizka, Sulc, & Ditl, 2017). Dicha relación tiene un patrón entre las unidades de simulación con la misma columna de agua (Figura 19 - 21), puesto que, al simbolizar la cantidad de agua y aire en el medio, van a ser iguales entre columnas con la misma altura de agua, independientemente de la variación de la geometría de ingreso (inlet) (Besagni G. , Inzoli, De Guido, & Pellegrini, 2017).

Se puede observar una relación directa entre la velocidad, la temperatura y la presión de cada columna de agua. Esto se corrobora de acuerdo a (Rollbusch, y otros, 2015) y (Krishna, Drehe, & Urseanu, 2000) donde señala que a altas temperaturas y presiones, la variable gobernante es la temperatura y define el comportamiento de los demás parámetros.

La temperatura influye directamente en el proceso de aireación, puesto que, mientras más alta es la temperatura, hay menor solubilidad de oxígeno y menor tasa de transferencia del mismo (Vogelaar, Klapwijk, Van Lier, & Rulkens, 2000).

Es así que, en las columnas de agua más pequeñas ($Ha=0.8$ m), se observa un incremento abrupto de este parámetro por lo que no es óptimo. De igual forma, en la columna de agua media ($Ha=1.6$ m), en el Inlet 2 se establece una disminución de temperatura menos agresiva al igual que en la columna de agua más alta ($Ha=2.4$ m), estableciéndose estos dos tratamientos como los mas eficientes.

Con el aumento de la velocidad se genera regímenes heterogéneos y aumenta la coalescencia de burbujas, así como el movimiento oscilatorio del flujo dando lecturas erróneas (Besagni, Inzoli, & Ziegenhein, 2018). El cambio de las propiedades del gas puede causar cambios en la distribución del tamaño de burbujas y otros parámetros. Estos cambios se pueden observar en términos de densidad del gas. Es así que un aumento de la densidad del gas, resulta en incremento de presión. De acuerdo a (Wilkinson, Spek, & van Dierendonck, 1992), cuando el diámetro de la columna es mayor que 0.15 m, aumenta la densidad y la retención del gas.

(Ishyama, Isokawa, Sawai, & Kojima, 2001) Reporta un efecto negativo en la presión y retención de aire en presiones mayores a 800kPa, dando como resultado un régimen heterogéneo, por lo que recomienda valores de entre 100kPa y 400kPa, rango en el cual se encuentran las presiones obtenidas en la simulación.

El comportamiento dinámico del flujo se considera predecible en columnas rectangulares con un ingreso único (con manguera), a diferencia de una columna cilíndrica con difusores, donde el comportamiento es caótico e impredecible (Becker, De Bie, & Sweeney, 2003)

4.1.5. Gráficos relación ε/U . air

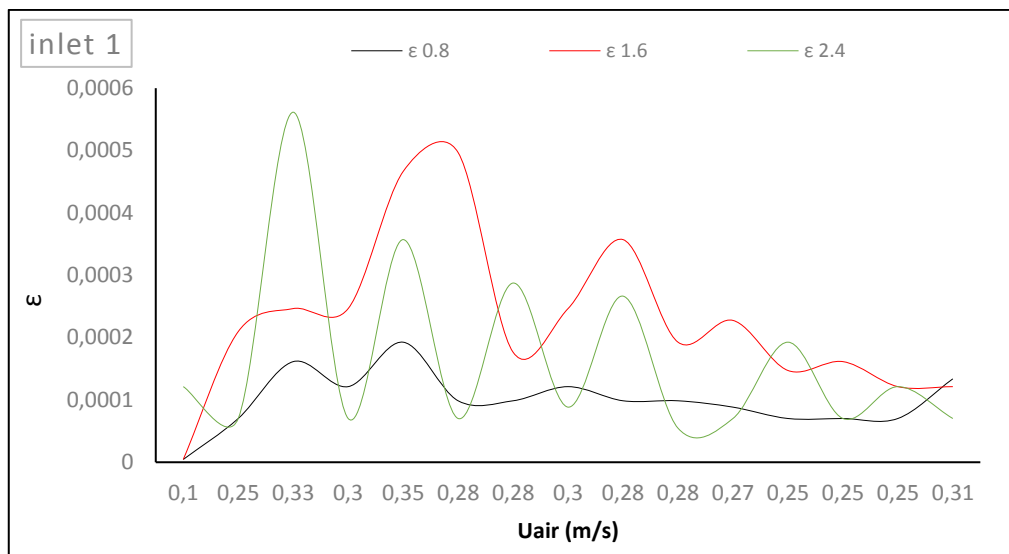


Figura 25. Representación de ϵ del inlet 1, con diferentes columnas de agua, en función de la velocidad.

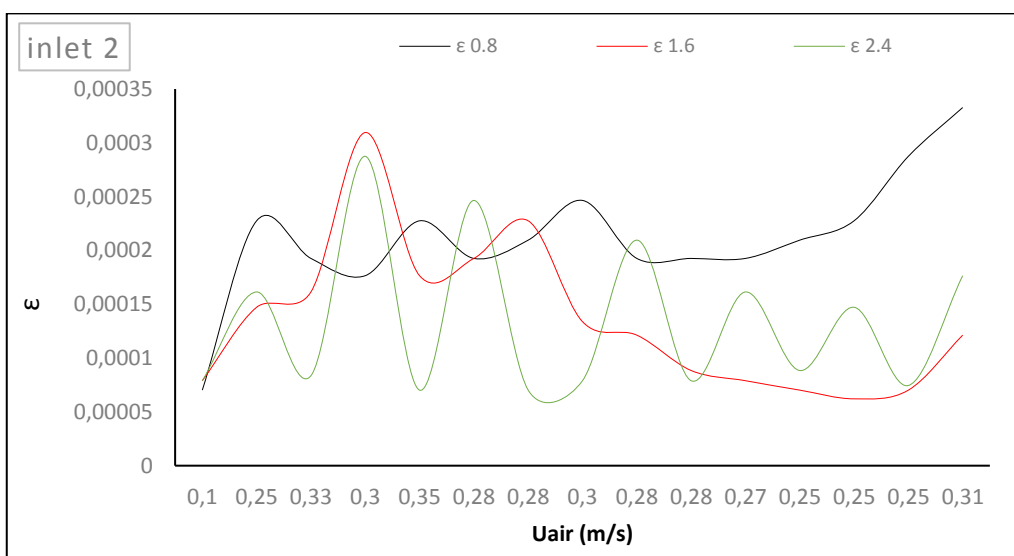


Figura 26. Representación de ϵ del inlet 2, con diferentes columnas de agua, en función de la velocidad.

En las figuras 22 y 23 se observa el valor de ϵ en función de la velocidad de ingreso del aire. El parámetro ϵ se define como la energía de disipación de la fase gaseosa en con el volumen total del sistema (Mohagheghian, Still, Elbing, & Ghajar, 2018).

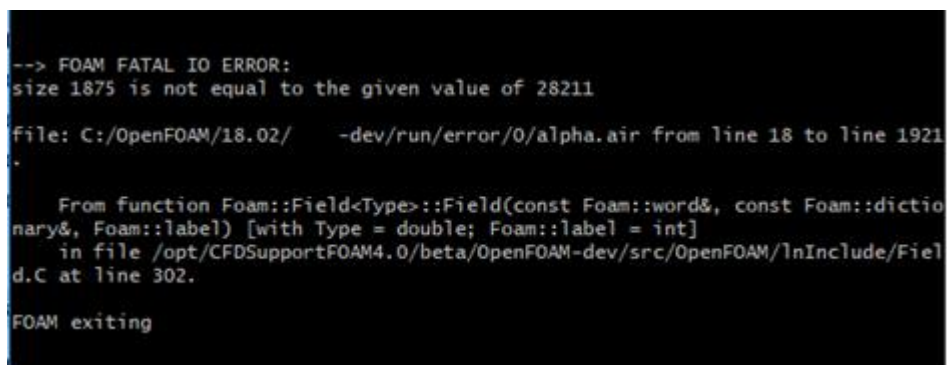
Se puede observar un comportamiento similar entre las columnas con la misma altura de agua. En la primera columna se observa un incremento, relativamente más lineal, que en las columnas de agua más altas. En la columna de 1.6 m de altura se observa un decrecimiento con el aumento de la velocidad y en la columna de 2.4 metros se evidencia una fluctuación muy marcada.

Con el aumento de la columna de agua se puede distinguir un comportamiento cada vez más irregular. Esto se debe a que este parámetro está directamente relacionado con la velocidad por lo que su comportamiento es similar (Waghmare, Knopf, & Rice, 2007). El comportamiento de la velocidad esta descrito anteriormente.

4.2. Errores durante la simulación

Los errores descritos a continuación se dieron durante la realización del presente proyecto y fueron solucionados mediante investigación.

1. Una vez aplicado el comando “checkMesh”, se obtiene un mensaje confirmando que el mallado este correcto, pero al aplicar el solver “twoPhaseEulerFoam” aparece el siguiente mensaje:



```
--> FOAM FATAL IO ERROR:
size 1875 is not equal to the given value of 28211

file: C:/OpenFOAM/18.02/-dev/run/error/0/alpha.air from line 18 to line 1921

From function Foam::Field<Type>::Field(const Foam::word&, const Foam::dictionary&, Foam::label) [with Type = double; Foam::label = int]
in file /opt/CFDSupportFOAM4.0/beta/OpenFOAM-dev/src/OpenFOAM/lnInclude/Field.C at line 302.

FOAM exiting
```

Figura 27. Error: value is not equal to the given value.

O en su defecto puede aparecer este mensaje:

```

--> FOAM FATAL IO ERROR:
Expected a ')' or a '}' while reading List, found on line 408 the label 0

file: C:/OpenFOAM/18.02/-dev/run/inletuw3m/inletcuadrado/inletcuadhC1P/0/alpha.air at line 408.

From function char Foam::Istream::readEndList(const char*)
in file db/Iostreams/Iostreams/Istream.C at line 155.

FOAM exiting

```

Figura 28. Error: Expected a ')' while reading list.

Este error corresponde al mismo problema. En el caso de esta simulación se ingresa una geometría a partir de un programa externo y sin utilizar el archivo “blockMesh”. Debido a esto, tanto el archivo “setFieldsDict” (que controla la altura de agua queda sin) como “blockMesh”, dejaron de utilizarse para la simulación por lo que en el archivo “alpha.air” los números descritos en el error no concuerdan. Es decir, una vez generado un mallado externo mediante el comando “ideasUnvToFoam.exe”, este genera un número de celdas que no se actualiza en el archivo “alpha.air”. En este caso se debe intercambiar el número 1875 por el valor 28211. Sin embargo, bajo ese número hay una cantidad igual de “0” y “1” que representan en nivel de agua. Si bien es cierto que antes esto debía configurarse con el archivo “setFieldsDict”, se debe recurrir a colocar los números manualmente, teniendo en cuenta que el “0” es agua y el “1” es aire (al contrario de lo que se establece en (Greenshields, 2017)). Una vez cambiado tanto el valor inicial como la cantidad de “0” y “1”, se podrá aplicar el solver.

2. Previo a la utilización del software SALOME se intentó ingresar la geometría mediante el archivo “blockMesh”, la misma que no se pudo determinar debido a que la geometría se subdividía en muchos cuadrantes. A partir de esto se generó el siguiente error:

```

--> FOAM FATAL ERROR:
Trying to specify a boundary face 4(1 5 4 0) on the face on cell 0 which is either an internal face or already belongs to some other patch. This is face 0 of patch 1 named outlet.

From function void Foam::polyMesh::setTopology(const cellShapeList&, const faceListList&, const wordList&, Foam::labelList&, Foam::labelList&, Foam::label&, Foam::label&, Foam::cellList&)
in file meshes/polyMesh/polyMeshFromShapeMesh.C at line 324.

FOAM aborting

```

Figura 29. Error: blockMesh boundary face.

El problema de este error radica en la incorrecta numeración de un parche y debe ser identificado para poder corregirlo.

- Uno de los errores más simples y comunes es cuando no se define correctamente un parche o “patch”. En este caso, el error es muy simple, y se describe claramente en el siguiente mensaje:

```

-> FOAM FATAL ERROR:
Invalid wall function specification
Patch type for patch walls must be wall
Current patch type is patch

From function virtual void Foam::nutWallFunctionFvPatchScalarField::checkType()
in file derivedFvPatchFields/wallFunctions/nutWallFunctions/nutWallFunctionFvPatchScalarField.C at line 45.

FOAM aborting

```

Figura 30. Error: patch type must be wall.

El único problema es que no estaba definido correctamente el patch “Wall” por lo que el solver no podía identificarlo. Para esto se ingresa a la carpeta que indica el mensaje de error, en este caso, al directorio “polyMesh” en el archivo “boundary” donde se cambia “patch” por “Wall”.

Otro error muy común que no se dio durante la simulación, pero se pudo observar en otras investigaciones es que no se establezcan los mismos “patches” de la

geometría en los archivos donde se ingresan las condiciones de borde. En ese caso, se debe ingresar a cada archivo y colocar el nombre de los “patches” que se ingresó en la geometría.

Tabla 22.

Solución al error: patch type must be wall.

| Geometry | | U inlet file | | |
|------------|--------------|--------------|--------------|-------|
| Patch name | Frontandback | Patch name | Walls | Error |
| Type | Wall | Type | Wall | |
| Patch name | Frontandback | Patch name | frontandback | Ok |
| Type | Wall | Type | Wall | |

En la mayoría de las ocasiones es más fácil cambiar el nombre del patch en un archivo de condiciones de borde, que cambiar la geometría.

5. CONCLUSIONES

Se estableció dos geometrías diferentes cuya variación fue la distribución y tamaño de los orificios de entrada de aire. Para esto se utilizó un programa alternativo denominado SALOME que cuenta con una interfaz más amigable para el diseño del tanque de aireación, puesto que debido a la complejidad de la geometría el programa OpenFoam arrojaba errores en el ingreso de bloques. Las condiciones de borde se establecieron a partir de parámetros básicos como presión, temperatura y velocidad, al igual que con el uso de ecuaciones descritas previamente.

El solver óptimo utilizado para la simulación fue “twoPhaseEulerFoam” en el que se considera la interacción de dos tipos de fluidos (agua y aire). Dentro de este solver se tiene diferentes modelos de turbulencia, a partir de los cuales, se estableció el modelo “LES” o large Eddy simulation que permite la obtención de datos más certeros en menos tiempo de simulación. Cabe recalcar que el tiempo

de simulación fue de un máximo de 3 segundos puesto que, pasado ese tiempo, se obtenía una temperatura negativa que impedía la continuidad del solver.

En general, de acuerdo a la tabla 19, mediante un análisis visual y en consideración con las figuras 10 -15, podemos establecer que para el “inlet 2” la unidad de simulación más estable fue con una $H_a=1.6$ m (figura 13), hablando de velocidad de ingreso de aire, y para el “inlet 1”, la unidad con un comportamiento menos turbulento, fue a una $H_a=2.4$ m (figura 14). Esto se debe a que se observa menor inclinación hacia los valores mínimos y el rango entre los máximos y mínimos no sobrepasa las 2 unidades, a diferencia del resto de donde el rango se extiende hasta 6 unidades. Es así, que para la primera unidad de simulación C1 (Inlet 1, $H_a= 2.4$ m) se establece un rango de velocidad de -0.7 m/s a 1.2 m/s y para la unidad de simulación B2 (Inlet 2, $H_a= 1.6$ m) un rango de velocidad de -0.7 m/s a 1.7 m/s.

Se establecieron 3 regímenes presentes en las unidades de simulación definidas como el mejor tratamiento: de transición $0.13 \text{ m/s} < u_g < 0.2 \text{ m/s}$, pseudo-homogéneo $0.1 \text{ m/s} < u_g < 0.15 \text{ m/s}$ y homogéneo Mono-disperso $u_g \leq 0.1 \text{ m/s}$. Es así que estos regímenes se establecen como los más óptimos para procesos de aireación.

El aumento de la temperatura disminuye la solubilidad de oxígeno, así como la tasa de transferencia del mismo, lo que se evidencia en la formación de grupos de burbujas (Tabla 19 – minuto 2).

El comportamiento del flujo en una columna cilíndrica con diámetros de orificios más reducidos, es más impredecible.

De acuerdo a los gráficos obtenidos, los patrones de oscilación irregulares son proporcionales en los parámetros de presión, velocidad y temperatura, es decir, que el comportamiento de cada parámetro depende de los demás y su variación determina el comportamiento de los fluidos.

El aumento abrupto de cualquier parámetro causa regímenes heterogéneos y aumenta la coalescencia de burbujas, así como la formación de grupos que

evitan una correcta dispersión del aire en el tanque disminuyendo la efectividad del sistema.

REFERENCIAS

- Alviz Meza, A., & Cueto Ferreira, D. C. (2012). Diseño de un sistema de aireación para una planta de lodos activados en Zofranca Mamonal. Universidad de Cartagena.
- Balachander, S., & Eaton, J. K. (2010). *Turbulent dispersed multiphase flow. Annual Review of Fluid Mechanics, 42.*
- Balasubramaniam, R., Ramé, E., Kizito, J., & Kassemi, M. (2006). *Two Phase Flow Modeling: Summary of Flow regimes and pressure drop correlations in reduced and partial gravity. NASA - National Aeronautics and Space Administration.*
- Becker, S., De Bie, H., & Sweeney, J. (2003). *Dynamic flow behaviour in bubble columns. Chemical Engineering Science, 54.*
- Bertrand, O., Schaguene, J., Mazadou, B., & Sauvaget, P. (2016). *New trends in modeling applied to wastewater treatment and potable water. Hydrolink. Hydraulics of wastewater treatment, (2).*
- Besagni, G., Inzoli, F., & Ziegenhein, T. (2018). *Two-Phase Bubble Columns: A Comprehensive Review. Chemical Engineering, 13(2).*
- Besagni, G., Inzoli, F., De Guido, G., & Pellegrini, L. A. (2016). *Experimental investigation on the influence of ethanol on bubble column hydrodynamics. Chemical Engineering Research and Design, 1112.*
- Besagni, G., Inzoli, F., De Guido, G., & Pellegrini, L. A. (2017). *The dual effect of viscosity on bubble column hydrodynamics. Chemical Engineering Science, 158.*
- Besagni, G., Inzoli, F., De Guido, G., & Pellegrini, L. A. (2017). *The effect of liquid phase properties on bubble column fluid dynamics: Gas holdup, flow regime transition, bubble size distributions and shapes, interfacial areas and foaming phenomena. Chemical Engineering Science, 170.*
- Bhusare, V. H., Dhiman, M. K., Kalaga, D. V., Roy, S., & Joshi, J. B. (2017). *CFD simulations of a bubble column with and without internals by using OpenFOAM. Chemical Engineering Journal, 317.*
- CFD Direct, A. (2016). *OpenFOAM User Guide - Solution and algorithm control. CFD Direct.*
- DEC. (2015). *Design Standards for Wastewater treatment Works in the Lake George Basin. Department of Environmental Conservation.* Recuperado el 25 de Abril de 2018 de www.dec.ny.gov

- Deen, N. G., Hjertager, B. H., & Solberg, T. (2000). *Comparison of PIV and LDA measurement methods applied to the gas-liquid flow in a bubble column. 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.*
- Ekama, G. A., & Wentzel, M. C. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling And Design - Organic Material Removal.* IWA.
- Elsevier B.V. (1995). *Mass transfer in bubble columns: A comparison of correlations. Water Research, 29(4).* Recuperado el 12 de Abril de 2018 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135494002534>
- Elsevier B.V. (2007). *Hydrodynamic characterization of needle Sparger rectangular bubble column: homogeneous flow, static bubble plume and oscillating bubble plume. Chemical Engineering Science, 62.* Recuperado el 15 de Mayo de 2018 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250907005945>
- Elsevier B.V. (2017). *Large eddy simulation of microbubble transport in a turbulent horizontal channel flow. International Journal of Multiphase Flow, 94.* Recuperado el 26 de Mayo de 2018 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932216305390>
- Engen, T. (2016). *CFD analysis of gas-particle flow in a scaled circulating fluidized bed. University of Stavanger.*
- EPA. (1978). *Wastewater Treatment Design Guidelines for Operability, Flexibility and Maintainability. United States Environmental Protection.* Recuperado el 25 de Abril de 2018 de <https://nepis.epa.gov/>
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics* (3th ed.). Berlin: Springer.
- Findikakis, A. N. (2016). *The contribution of advanced simulation tools to the hydraulic design of water and wastewater treatment facilities. Hydraulics of Wastewater Treatment, (2).*
- Fletcher, D. F., McClure, D. D., Kavanagh, J. M., & Barton, G. W. (2017). *CFD simulation of industrial bubble columns: Numerical challenges and model validation successes. Applied Mathematical Modelling, 44.*
- Fonseca, P., & Marques, N. (2016). *CFD in wastewater treatment plants. Hydraulics of Wastewater Treatment, (2).*
- Greenshields, C. J. (2017). *OpenFOAM User Guide version 5.0. The OpenFOAM Foundation.*

- Guédon, G. R., Besagni, G., & Inzoli, F. (2017). *Prediction of gas-liquid flow in an annular gap bubble column using a bi-dispersed Eulerian model. Chemical Engineering Science*, 161.
- Hanotu, J. O., Bandulasena, H., & Zimmerman, W. B. (2017). *Aerator design for microbubble generation. Chemical Engineering Research and Design*, 123.
- Henze, M., Van Loosdrecht, M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment Principles, Modelling and Design*. Londres: IWA Publishing.
- Hjertager, B. (2009). *Lecture notes on OpenFOAM* (1st ed.). Norway: Stavanger.
- IAEA, International Atomic Energy Agency (2015). *A strategy for the qualification of multi-fluid approaches for nuclear reactor safety. Nuclear Engineering and Design*. Recuperado el 15 de Marzo de 2018 de https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:48005613
- INEC. (2015). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Agua y Alcantarillado*. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Ishyama, H., Isokawa, Y., Sawai, J., & Kojima, H. (2001). *Hydrodynamics in a small size pressurized bubble column. Chemical Engineering Science*, 56.
- Kemoun, A., Rados, N., F, L., Al-Dahhan, M. H., Dudukovic, M. P., Mills, P. L., . . . Lerou, J. J. (2013). *Gas holdup in a trayed cold-flow bubble column. Chemical Engineering Science*, 56(3).
- Krishna, R., Drehe, A. J., & Urseanu, M. I. (2000). *Influence of alcohol addition on gas hold-up in bubble columns: development of a scale up model. International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27.
- Liu, Y. (2014). *Two-Fluid Modeling of Gas-Solid and Gas-Liquid Flows: Solver Development and Application. Technische Universität München*.
- Luo, H., & Svendsen, H. F. (1991). *Turbulent circulation in bubble columns from eddy viscosity distributions of single-phase pipe flow. The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 69(6).
- Lynggaard-Jensen, A. (2016). *Real time control of secondary clarifiers - enhancing hydraulic capacities during rain. Hydrolink. Hydraulics of wastewater treatment*, (2).
- Ma, T., Ziegenhein, T., Lucas, D., & Fröhlich, J. (2016). *Large eddy simulations of the gas-liquid flow in a rectangular bubble column. Nuclear Engineering and Design*, 299.

- Marchisio, D., Vigil, R., & Fox, R. (2003). *Quadrature method of moments for aggregation-breakage processes. Interface Sci., 258.*
- Marquez, D. S. (2013). *An extended mixture model for the simultaneous treatment of short and long scale interfaces.* Universidad Nacional del Litoral.
- McClure, D. D., Dolton, T. P., Barton, G. W., Fletcher, D. F., & Kavanagh, J. M. (2017). *Hydrodynamics and mixing in airlift contactors: Experimental work and CFD modelling. Chemical Engineering Research and Design, 127.*
- Metcalf, & Eddy. (2014). *AECOM - Wastewater Engineering - Treatment and Resource Recovery (5th ed.)*. New York: McGrawHill Education.
- Mohagheghian, S., Still, A., Elbing, B., & Ghajar, A. (2018). *Study of Bubble Size, Void Fraction, and Mass Transport in a Bubble Column under High Amplitude Vibration. Chemical engineering, 2(16).*
- Moreland, K. (2014). *The ParaView Tutorial, Versión 5.4.1. Sandia National Laboratories.*
- Mudde, R. F., Froen, J. S., & Van der Akker, H. E. (1997). *Liquid velocity field in a bubble column. LDA experiments. Chemical Engineering Science, 52.*
- Oliveira, M., Fitch, A., & Ni, X.-w. (2003). *A study of velocity and residence time of single bubbles in a gassed oscillatory baffled column: effect of oscillation amplitude. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 78.*
- Passalacqua, A., & Fox, R. (2011). *Implementation of an iterative solution procedure for multi-fluid gas-particle flow models on unstructured grids. Powder Technology, 213.*
- Peltier, L. J., Knight, K. J., Rosendall, B., Pal, S., Rizhakov, A., Smirnov, A., & Iek, C. (2016). *Computer simulation of liquid-solids slurries for wastewater treatment. Hydrolink. Hydraulics of wastewater treatment, (2).*
- Pfleger, D., Gomes, S., Gilbert, N., & Wagner, H. G. (1999). *Hydrodynamic simulations of laboratory scale bubble columns fundamental studies of the Eulerian-Eulerian modeling approach. Chemical Engineering Science, 54.*
- Qiang, J., Ryne, R., Habib, S., & Decyk, V. (2000). *An object-oriented parallel particle in cell code for beam dynamics simulation in linear accelerators. Journal of Computational Physics, 163(434).*

- ResearchGate. (2017). *Mathematical Modeling and Neural Network Control for Dissolved Oxygen of Aquaculture Pond Aeration System*. *The Journal on Electronics and Electrical Engineering*, 4(2). Recuperado el 28 de Mayo de 2018 de https://www.researchgate.net/publication/267783870_Mathematical_Modeling_and_Neural_Network_Control_for_Dissolved_Oxygen_of_Aquaculture_Pond_Aeration_System
- ResearchGate. (2018). *Hydrodynamics of Bubble Columns: Turbulence and Population Balance Model*. *Chemical Engineering*, 2(1). Recuperado el 05 de Junio de 2018 de https://www.researchgate.net/publication/323875318_Hydrodynamic_s_of_Bubble_Columns_Turbulence_and_Population_Balance_Model
- Rollbusch, P., Bothe, M., Becker, M., Ludwig, M., Grunewald, M., Schluter, M., & Franke, R. (2015). *Bubble columns operated under industrially relevant conditions-current understanding od design parameters*. *Chemical Engineering Science*, 126.
- Rondal, J. (2018). Elaboración de un modelo de difusro de aire para tratamiento de aguas. UDLA.
- Rusche, H. (2002). *Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fraction*. Imperial college of Science.
- Rzehak, R., Ziegenhein, T., Kriebitzsch, S., Krepper, E., & Lucas, D. (2017). *Unified modeling of bubbly flows in pipes, bubble columns, and airlift columns*. *Chemical Engineering Science*, 157.
- Saleh, S. N., Mohammed, A. A., Al-Jubory, F. K., & Barghi, S. (2018). *CFD assesment of uniform bubly flow in a bubble column*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 161.
- Saunders, M., & Visser, B. (2015). *Bottom Aeration. Protecting Our Water Resource*.
- Sayma, A. (2009). *Computational fluid dynamics*. Londres: Ventus Publishing ApS.
- Springer Nature Switzerland AG. (2002). *Large Eddy Simulation of flow around the free end of a circular cylinder*. *Numerical Flow Simulation III, Notes on Numerical Fluid Mechanics*, 82. Recuperado el 28 de Abril de 2018 de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-45693-3_12
- Taylor & Francis Group. (2005). *Characterization of gas-liquid flows in rectangular bubble columns using conductivity probes*. *Chemical Engineering Science*, 192. Recuperado el 05 de Junio de 2018 de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/009864490522704>

- Taylor & Francis Group. (2016). *Wave generation in subsurface aeration system: a new approach to enhance mixing in aeration tank in waste water treatment. Desalination and Water Treatment*, 57(56). Recuperado el 23 de Mayo de 2018 de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19443994.2016.1172263>
- Upadhyay, R., Pant, H., & Roy, S. (2013). *Liquid flow patterns in rectangular air-water bubble column investigated with radioactive particle tracking. Chemical Engineer Science*, 96.
- Upadhyay, R., Roy, S., & Pant, H. (2012). *Benchmarking radioactive particle tracking (RPT) with Laser Doppler Anemometry (LDA). International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 10.
- Venier, C., Marquez, S., Ramajo, D., & Nigro, N. (2014). *Development of a conservative numerical solver for gas-particles multi-fluid systems using kinetic theory of granular flow. Mecánica Computacional*, 33(7).
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Inglaterra: British Library .
- Vitankar, V. S., & Joshi, J. B. (2002). *A comprehensive one-dimensional model for prediction of flow pattern in bubble columns. Chemical Engineering Research and Design*, 80(5).
- Vogelaar, C. T., Klapwijk, A., Van Lier, J. B., & Rulkens, W. H. (2000). *Temperature effects on the oxygen transfer rate between 20 and 55°C. Water Research*, 3(34).
- Waghmare, Y. G., Knopf, F. C., & Rice, R. G. (2007). *The Bjerknes Effect: Explaining Pulsed-flow Behavior in Bubble Columns. AIChE journal*, 53(7).
- Wilén, B. M., Markiewicz, A., & Nilsson, A. (2010). *Variation in dissolved oxygen concentration and its effect on the activated sludge properties studied at a full scale wastewater treatment plant. In the proceedings of IWA World Water Congress & Exhibition*.
- Wilkinson, P. M., Spek, A. P., & van Dierendonck, L. L. (1992). *Design Parameters Estimation for Scale Up of High Pressure Bubble Columns. AIChE Journal*, 38.
- Xue, J., Al-Dahhan, M., Dudukovic, M., & Mudde, R. F. (2008). *Bubble velocity size and interfacial area measurements in a bubble column by four-point optical probe. AIChE Journal*, 54(2).
- Zahradnik, J., Fialova, M., Ruzicka, M., Drahos, J., Kastanek, F., & Thomas, N. H. (1997). *Duality of the gas-liquid flow regimes in bubble column reactors. Chemical Engineering Science*, 52.

- Zhang, J., Liu, X., Tejada-Matinez, A., & Zhang, Q. (2016). *Computational Fluid Dynamics: A promising Tool for Analysis and Design of Water and Waste-water treatment*. *Hydrolink. Hydraulics of Wastewater Treatment*, (2).
- Ziegenhein, T., Rzehak, R., & Lucas, D. (2015). *Transient simulation for large scale flow in bubble columns*. *Chemical Engineering Science*, 122.
- Zizka, M., Sulc, R., & Ditzl, P. (2017). *Heat transfer between Gas and Liquid in a Bubble Column*. *Chemical Engineering Transactions*, 57.
- Zuo, W. (2005). *Introduction of Computational Fluid Dynamics*. St. Petersburg: FAU Erlangen-Nürnberg.

