

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“APLICACIÓN DE UN MODELO DE DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL PARA DISEÑAR TANQUES DE
FLOCULACIÓN VERTICAL DE TRATAMIENTO DE AGUA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

JORGE VICTOR JIMENEZ MOTTA

ASESORA

MSc. MARISA ROSANA SILVA DÁVILA

LIMA – PERÚ

2023

© 2023, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Jimenez Motta, Jorge Victor

jorge.jimenez.m@uni.pe

967714751

DEDICATORIA

A mi familia y amistades, en especial a mis padres, Rubén y Luz, por todo el cariño y apoyo incondicional que me han brindado hasta el día de hoy.

Gracias a todos.

AGRADECIMIENTOS

En muestra de mi gratitud quiero expresar mis más sinceros agradecimientos:

A mis compañeros y profesores de la facultad que han contribuido en mi formación y desarrollo profesional.

Un especial agradecimiento a mi asesora MSc. Marisa Rosana Silva Dávila por sus recomendaciones y conocimientos impartidos a lo largo de la elaboración y revisión de la presente tesis.

Y a la empresa Flow Science por brindarme una licencia gratuita de investigación del programa FLOW-3D.

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
PRÓLOGO	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	12
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 GENERALIDADES.....	15
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	17
1.3.1 Objetivo General	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	17
CAPÍTULO II. MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL	21
2.1 MARCO TEÓRICO.....	21
2.1.1 Plantas de tratamiento de agua potable	21
2.1.2 Proceso de tratamiento por coagulación química y floculación.....	23
2.1.3 Fundamentos de la dinámica de fluidos computacional (CFD)	25
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	28
2.2.1 Tanques de floculación.....	28
2.2.2 Gradiente de velocidad.....	30
2.2.3 Tipos de flujos en un reactor	34
2.2.4 Características del flujo en un reactor	35
2.2.5 Ensayo de trazadores.....	37
2.2.6 Índices de eficiencia hidráulicos	40
2.2.7 Modelo numérico FLOW-3D.....	41
CAPÍTULO III. DISEÑO DE LOS TANQUES DE FLOCULACIÓN VERTICAL SEGÚN NORMA OS.020.....	54
3.1 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO.....	54
3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LOS FLOCULADORES DE FLUJO VERTICAL.....	55
CAPÍTULO IV. VALIDACIÓN DEL MODELO CFD FLOW-3D.....	66
4.1 GEOMETRÍA Y CONDICIONES DE FRONTERA	66
4.2 ELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA.....	67

4.3	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE MALLA	71
CAPÍTULO V. SIMULACIÓN NUMÉRICA.....		74
5.1	CONSIDERACIONES GENERALES.....	74
5.2	CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA, GENERACIÓN DE LA MALLA Y DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA	75
5.3	OPCIONES NUMÉRICAS	78
5.4	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS VARIABLES HIDRODINÁMICAS .	79
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		83
6.1	GRADIENTE DE VELOCIDAD PROMEDIO	83
6.2	ÍNDICE DE MORRILL (IM)	89
6.3	ÍNDICE θ_{10}	94
6.4	EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UNA UNIDAD DE FLOCULACIÓN	99
CONCLUSIONES.....		102
RECOMENDACIONES.....		104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		105
ANEXOS.....		111

RESUMEN

El proceso de floculación es una de las etapas más importantes dentro de los procesos que intervienen en una planta de tratamiento de agua potable. Un diseño inadecuado del sistema de floculación no solo impactará de forma negativa sobre la eficiencia de la unidad, sino además sobre la eficiencia de las unidades de tratamiento siguientes, lo cual comprometerá la calidad final del agua tratada. En este contexto, el presente trabajo de investigación se enfocó en estudiar a profundidad el comportamiento hidrodinámico de los floculadores hidráulicos de pantallas de flujo vertical con el propósito de mejorar su diseño. Esto se consiguió mediante la aplicación del programa de dinámica de fluidos computacional FLOW-3D.

En la etapa inicial de este estudio se realizó el dimensionamiento de 256 unidades de floculación vertical, aplicando la norma OS.020 del Reglamento Nacional de Edificaciones y las pautas de diseño del CEPIS, las cuales se obtuvieron al considerar diferentes escenarios de gradientes de velocidad de diseño (30 s^{-1} - 90 s^{-1}), tiempos de retención (3 min - 9 min), alturas de agua (3 m - 6 m) y longitudes de tanque (4,5 m - 9 m).

En la etapa siguiente, se desarrolló el proceso de simulación del grupo de unidades anteriormente diseñadas aplicando el modelo de dinámica de fluidos computacional FLOW-3D. Para ello, inicialmente se realizó la validación del modelo utilizando datos numéricos de velocidad (validados experimentalmente) extraídos de un estudio similar. Seguidamente, se determinaron los valores de gradiente de velocidad e índices de eficiencia hidráulica (Morrill y θ_{10}) para cada unidad de floculación vertical. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron resumidos en múltiples gráficos en donde se analizó como la modificación de los parámetros de diseño influye sobre la eficiencia de las unidades, encontrando mejoras del orden del 40 %.

Finalmente, se propusieron algunas expresiones en función de los parámetros de diseño, obtenidas mediante regresiones lineales múltiples, para la determinación del gradiente de velocidad promedio y de los índices de eficiencia hidráulicos. Estos resultados serán de ayuda para una mejor selección de los parámetros de diseño, con el fin de orientar a los diseñadores hacia diseños futuros de unidades de floculación vertical mucho más eficientes.

ABSTRACT

The flocculation process is one of the most important stages within the processes involved in a drinking water treatment plant. An inadequate design of the flocculation system will not only have a negative impact on the efficiency of the unit, but also on the efficiency of the following treatment units, which will compromise the final quality of the treated water. In this context, the present research work focused on studying in depth the hydrodynamic behavior of the hydraulic flocculators of vertical flow screens with the purpose of improving their design. This was achieved by applying the FLOW-3D computational fluid dynamics program.

In the initial stage of this study, the dimensioning of 256 vertical flocculation units was carried out, applying the OS.020 standard of the National Building Regulations and the CEPIS design guidelines, which were obtained by considering different scenarios of velocity gradients of design (30 s^{-1} - 90 s^{-1}), retention times (3 min - 9 min), water heights (3 m - 6 m), and tank lengths (4,5 m - 9 m).

In the next stage, the simulation process of the group of previously designed units was developed using the FLOW-3D computational fluid dynamics model. For this, the validation of the model was initially carried out using numerical speed data (experimentally validated) extracted from a similar study. Next, the velocity gradient values and hydraulic efficiency indices (Morrill and θ_{10}) were determined for each vertical flocculation unit. Subsequently, the results obtained were summarized in multiple graphs where it was analyzed how the modification of the design parameters influences the efficiency of the units, finding improvements of the order of 40 %.

Finally, some expressions were proposed based on the design parameters, obtained through multiple linear regressions, for the determination of the average velocity gradient and the hydraulic efficiency indices. These results will be helpful for a better selection of design parameters, in order to guide designers towards future designs of much more efficient vertical flocculation units.

PRÓLOGO

En la actualidad, el creciente interés por el tema ambiental y de salud pública ha motivado el surgimiento de nuevas normas y estándares internacionales de calidad, que implican una evaluación de los procesos existentes de potabilización del agua y una mayor exigencia ambiental a los nuevos proyectos.

Una mejor comprensión de los procesos que ocurren dentro de los floculadores, con el apoyo de la dinámica de fluidos computacional (CFD), representa un gran avance ya que además de brindar información sobre su funcionamiento permite también la adopción de nuevos procedimientos de diseño que mejorarán la eficiencia y reducirán los costos de operación del sistema.

La metodología convencional de diseño de las unidades de floculación se basa en diferentes supuestos como son la uniformidad de los valores de velocidad y gradiente de velocidad, así como también la presencia ideal de flujo pistón en el interior de todo el tanque. Condiciones ideales que claramente difieren del comportamiento hidrodinámico real de los floculadores.

Por varios años el diseño de estas unidades se ha venido realizando aplicando el concepto de gradiente de velocidad y pérdida de carga total. Sin embargo, para un mismo gradiente de velocidad y tiempo de retención pueden existir diversas alternativas de diseño con diferentes dimensiones; no obstante, se desconocen sus eficiencias. Con la aplicación de la dinámica de fluidos computacional es posible estudiar con mayor detalle el comportamiento hidrodinámico de las unidades de floculación y evaluar así sus eficiencias con el fin de elegir las dimensiones de los tanques con las cuales se conseguirá un mejor desempeño.

MSc. Marisa Rosana Silva Dávila
Departamento Académico de
Hidráulica e Hidrología
Asesora

LISTA DE TABLAS

Tabla Nº	Título	Página Nº
1	Rango de valores de gradiente de velocidad promedio para floculadores recomendados en la literatura.	33
2	Rangos de los índices de eficiencia hidráulica comúnmente sugeridos en la literatura.	41
3	Resumen de la selección de parámetros considerados para el diseño de los tanques de floculación vertical.	54
4	Proceso de dimensionamiento de un tanque de floculación de pantallas de flujo vertical.	59
5	Resumen de resultados de la etapa de diseño de los tanques de floculación vertical.	60
6	Tamaños de malla evaluados en las simulaciones.	71
7	Parámetros utilizados en el proceso de simulación.	74
8	Resultados de la regresión lineal múltiple obtenidos con el programa Excel para G.	87
9	Resultados de la regresión lineal múltiple obtenidos con programa Excel para IM.	92
10	Resultados de la regresión lineal múltiple obtenidos con el programa Excel para θ_{10} .	97
11	Diseños seleccionados para el proceso de evaluación.	100

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
Nº		Nº
1	Esquema general de una planta de tratamiento de agua (CEPIS, 2002).	21
2	Esquema de las barreras múltiples presentes en una planta de tratamiento de agua para la protección contra microorganismos patógenos (CEPIS, 2005b).	22
3	Coagulación por adsorción, izquierda, y coagulación de barrido o arrastre de partículas, derecha (CEPIS, 2004a).	24
4	Equipo de prueba de jarras (CEPIS, 2004a).	25
5	Interrelación entre las tres etapas principales de un modelo CFD (Jiyuan, Guan y Chaoqun, 2013).	26
6	Clasificación de las unidades de floculación (CEPIS, 2004a).	29
7	Floculadores hidráulicos de pantallas de flujo horizontal y vertical (Arboleda, 2000).	29
8	Variación espacial del gradiente de velocidad en un floculador de pantallas de flujo horizontal (Haarhoff y Van der Walt, 2001).	33
9	Influencia del tiempo de retención sobre la eficiencia de la floculación. Resultados obtenidos de una prueba de jarras de la Planta La Atarjea (CEPIS, 2005a).	37
10	Curvas distintivas de concentración del trazador a la salida de las unidades de tratamiento para diferentes tipos de flujo (CEPIS, 2005a).	38
11	Curva DTR para un estudio de trazador con dosificación instantánea (Wilson, 2011).	39
12	Curva DTR para un estudio de trazador con dosificación continua (Wilson, 2011).	39
13	Disposición de la malla y convenciones de etiquetado, izquierda. Ubicación de las variables en una celda de malla, derecha (Flow Science, 2017).	42
14	Descripción gráfica del método FAVOR, VF corresponde a la fracción de volumen y AF es la fracción de área (Flow	43

	Science, 2017).	
15	Representación gráfica del método VOF, donde F es la fracción de volumen del fluido (Flow Science, 2017).	45
16	Esquema de un floculador de pantallas de flujo vertical.	55
17	Esquema de la cámara de contacto de flujo vertical utilizada para la validación del modelo FLOW-3D (Kim et al., 2010).	67
18	Condiciones de frontera utilizadas para la validación del modelo FLOW-3D.	67
19	Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para una elevación de $y/H = 0.27$.	68
20	Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para una elevación de $y/H = 0.5$.	68
21	Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para una elevación de $y/H = 0.72$.	69
22	Distribución de la magnitud de velocidad dentro de la cámara de contacto para el plano ubicado a la mitad del ancho de la estructura (Kim et al., 2010).	69
23	Distribución de la magnitud de velocidad en la cámara de contacto obtenida con el modelo de turbulencia RNG $k-\epsilon$.	70
24	Distribución de la magnitud de velocidad en la cámara de contacto obtenida con el modelo de turbulencia $k-\epsilon$.	70
25	Distribución de la magnitud de velocidad en la cámara de contacto obtenida con el modelo de turbulencia LES.	70
26	Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para diferentes tamaños de malla ($y/H = 0.27$).	72
27	Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para diferentes tamaños de malla ($y/H = 0.5$).	72
28	Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para diferentes tamaños de malla ($y/H = 0.72$).	72

29	Geometría en 3D (izquierda) y elevación (derecha) del tanque de floculación vertical ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).	75
30	Representación gráfica de la influencia de la pérdida de carga total (h_f) sobre la altura de agua del tanque.	77
31	Mallado (izquierda) y condiciones de frontera (derecha) de la unidad de floculación siendo $Q =$ volume flow rate, $P =$ pressure, $W =$ wall y $S =$ symmetry ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).	78
32	Magnitud de velocidad (izquierda) y vectores de velocidad (derecha) de la unidad de floculación ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).	79
33	Variación espacial de la energía cinética turbulenta (k), izquierda; y disipación de energía turbulenta (ϵ), derecha ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).	80
34	Variación espacial del gradiente de velocidad local (G_{Local}), izquierda; y microescala turbulenta (η), derecha ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).	80
35	Curvas de distribución del tiempo de residencia para diferentes alturas de agua ($G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$ y $L = 6 \text{ m}$).	81
36	Concentración del trazador a través del tiempo a lo largo del tanque de floculación ($G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 6 \text{ m}$, $H = 3 \text{ m}$ y $b = 1.66 \text{ m}$).	82
37	Relación entre el gradiente de velocidad promedio ($G_{\text{FLOW-3D}}$) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, 70 s^{-1} , 50 s^{-1} , 30 s^{-1} y $T = 3 \text{ min}$).	83
38	Relación entre el gradiente de velocidad promedio ($G_{\text{FLOW-3D}}$) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, 70 s^{-1} , 50 s^{-1} , 30 s^{-1} y $T = 5 \text{ min}$).	84
39	Relación entre el gradiente de velocidad promedio ($G_{\text{FLOW-3D}}$) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, 70 s^{-1} , 50 s^{-1} , 30 s^{-1} y $T = 7 \text{ min}$).	84
40	Relación entre el gradiente de velocidad promedio ($G_{\text{FLOW-3D}}$) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$).	85

	1, 70 s ⁻¹ , 50 s ⁻¹ , 30 s ⁻¹ y T = 9 min).	
41	Comparación entre distribuciones de gradiente de velocidad local (G_{Local}) para $G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$, T = 5 min, H = 3 m, L = 4.5 m (izquierda) y 9 m (derecha).	85
42	Relación entre $G_{FLOW-3D}$ y altura de agua para diferentes tiempos de retención y longitudes, L = 4.5 m (izquierda), L = 9 m (derecha) y $G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$.	86
43	Comparación entre los valores $G_{ESTIMADO}$ obtenidos con el modelo de regresión y los valores de G calculados con el FLOW-3D ($G_{FLOW-3D}$).	88
44	Relación entre el índice de Morrill (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$, 70 s ⁻¹ , 50 s ⁻¹ , 30 s ⁻¹ y T = 3 min).	89
45	Relación entre el índice de Morrill (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$, 70 s ⁻¹ , 50 s ⁻¹ , 30 s ⁻¹ y T = 5 min).	90
46	Relación entre el índice de Morrill (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$, 70 s ⁻¹ , 50 s ⁻¹ , 30 s ⁻¹ y T = 7 min).	90
47	Relación entre el índice de Morrill (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$, 70 s ⁻¹ , 50 s ⁻¹ , 30 s ⁻¹ y T = 9 min).	91
48	Comparación entre magnitudes de velocidad (FLOW-3D) para $G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$, T = 5 min, H = 3m, L = 4.5 m (izquierda) y 9 m (derecha).	91
49	Relación entre índice de Morrill (FLOW-3D) y altura de agua para diferentes tiempos de retención y longitudes, L = 4.5 m (izquierda), L = 9 m (derecha) y $G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$.	92
50	Comparación entre los valores estimados de IM obtenidos con el modelo de regresión y los valores de IM calculados con el FLOW-3D.	94
51	Relación entre el índice θ_{10} (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$, 70 s ⁻¹ , 50 s ⁻¹ , 30 s ⁻¹ y T = 3 min).	95
52	Relación entre el índice θ_{10} (FLOW-3D) y la altura de agua	95

	para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 5 \text{ min}$).	
53	Relación entre el índice θ_{10} (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 7 \text{ min}$).	96
54	Relación entre el índice θ_{10} (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 9 \text{ min}$).	96
55	Relación entre índice θ_{10} (FLOW-3D) y altura de agua para diferentes tiempos de retención y longitudes, $L = 4.5 \text{ m}$ (izquierda), $L = 9 \text{ m}$ (derecha) y $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$.	97
56	Comparación entre los valores estimados de θ_{10} obtenidos con el modelo de regresión y los valores de θ_{10} calculados con el FLOW-3D.	99
57	Cambio de turbiedad residual para diferentes valores de gradiente de velocidad promedio obtenidos en una prueba de jarras (CEPIS, 2004a).	100

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

a	: Espaciamiento entre pantallas
A_F	: Fracción de área
b	: Ancho del tanque
b_{x,y,z}	: Pérdida de flujo en un medio poroso en la dirección x, y y z
c	: Velocidad del sonido
C	: Concentración del trazador en el tiempo
C₀	: Concentración inicial del trazador
dA	: Área de la superficie de la fuente en la celda
dQ	: Masa de fluido por unidad de tiempo
Diff_ε	: Difusión de disipación de energía cinética turbulenta
Diff_{kT}	: Difusión de energía cinética turbulenta
e	: Espesor de las pantallas
f	: Coeficiente de Darcy Weisbach
F	: Fracción de volumen del fluido
F_{x,y,z}	: Aceleración viscosa en la dirección x, y y z
g	: Aceleración de la gravedad
G	: Gradiente de velocidad promedio
G_{CV}	: Gradiente de velocidad promedio en el canal vertical
G_{DISEÑO}	: Gradiente de velocidad promedio de diseño
G_{FINAL}	: Gradiente de velocidad promedio final
G_{FLOW-3D}	: Gradiente de velocidad promedio calculado con el FLOW-3D
G_{Local}	: Gradiente de velocidad local
G_P	: Gradiente de velocidad absoluta en un punto
G_T	: Término de producción de flotabilidad
G_{x,y,z}	: Componentes de la aceleración del cuerpo en la dirección x, y y z
hf	: Pérdida de carga total
h₁	: Pérdida de carga continua en los canales
h₂	: Pérdida de carga en las vueltas
H	: Altura de agua o profundidad del tanque
IM	: Índice de Morrill (t_{90}/t_{10})
I	: Extensión total de los canales en el tanque
L	: Longitud del tanque
m	: Número de compartimientos en el tanque
n	: Coeficiente de rugosidad de Manning

\bar{n}	: Vector normal exterior a la superficie
P	: Potencia disipada por el movimiento del fluido
P_2	: Altura del paso
P_T	: Término de producción de energía cinética turbulenta
q	: Caudal unitario
Q	: Caudal
R_{DIF}	: Término difusión turbulenta
R_H	: Radio hidráulico del canal
R_{SOR}	: Término de fuente de masa
S_c	: Número turbulento de Schmidt
t	: Tiempo
t_{10}	: Tiempo requerido para que pase el 10 % de la concentración del trazador inyectado a la salida del tanque
t_{90}	: Tiempo requerido para que pase el 90 % de la concentración del trazador inyectado a la salida del tanque
T	: Tiempo de retención (V/Q)
T°	: Temperatura del agua
u	: Componente de la velocidad en la dirección x
u'	: Componente de la velocidad asociada con las fluctuaciones caóticas turbulentas en la dirección x
U_w	: Velocidad del componente fuente
U_s	: Velocidad del fluido en la superficie de la fuente
v	: Componente de la velocidad en la dirección y
v'	: Componente de la velocidad asociada con las fluctuaciones caóticas turbulentas en la dirección y
V	: Magnitud de la velocidad
V_F	: Fracción de volumen
V_1	: Velocidad en los canales verticales
V_2	: Velocidad en los pasos
\forall	: Volumen útil del tanque
w	: Componente de la velocidad en la dirección z
w'	: Componente de la velocidad asociada con las fluctuaciones caóticas turbulentas en la dirección z
γ	: Peso específico del agua

- δ : Coeficiente de conversión entre presión de estancamiento y presión estática
- ε : Tasa de disipación de energía turbulenta local
- $\bar{\varepsilon}$: Tasa promedio de disipación de energía por unidad de masa
- ε_T : Tasa de disipación de energía cinética turbulenta
- η : Microescala de longitud de Kolmogorov
- θ_{10} : Tiempo adimensional requerido para que pase el 10 % de la concentración del trazador inyectado a la salida del tanque (t_{10}/T)
- k_T : Energía cinética turbulenta
- μ : Viscosidad dinámica del fluido
- ν : Viscosidad cinemática del agua (μ/ρ)
- ν_T : Viscosidad cinemática turbulenta
- ξ : Coeficiente de conversión entre sistemas de coordenadas
- ρ : Densidad del agua
- ρ_Q : Densidad del fluido en la fuente
- u_k : Coeficiente de difusión de energía cinética turbulenta
- Φ : Potencia disipada por unidad de volumen
- CEPIS** : Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
- CFD** : Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)
- DTR** : Distribución del tiempo de residencia
- USEPA** : United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
- FAVOR** : Fractional Area Volume Obstacle Representation
- GMRES** : Generalized Minimal Residual
- LES** : Large Eddy Simulation
- MVCS** : Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento
- OMS** : Organización Mundial de la Salud
- OPS** : Organización Panamericana de la Salud
- RNG** : Renormalization Group
- SOR** : Successive Over Relaxation
- STL** : Stereolithography
- UNT** : Unidad nefelométrica de turbidez
- VOF** : Volume of Fluid

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Las técnicas de tratamiento de agua han sido ampliamente estudiadas en las últimas décadas, contribuyendo significativamente a la ejecución de proyectos más racionales y a la mejora de las unidades existentes, lo que ha aumentado la eficiencia del proceso de tratamiento.

La eficiencia de las plantas de tratamiento de agua se rige por varios factores, entre ellos se destacan las características del agua cruda, la idoneidad del coagulante, el control de los procesos de coagulación - floculación y la calidad de la operación y mantenimiento del sistema. El objetivo de producir agua de buena calidad debe lograrse al menor costo posible, ya sea en la construcción y mantenimiento de las unidades o en el uso de productos químicos.

Entre los procesos de una planta de tratamiento de agua potable, la floculación es de gran importancia ya que de esta etapa de tratamiento depende la eficiencia de las unidades posteriores como la sedimentación y filtración (Argaman y Kaufman, 1970). La elección del tipo de floculador depende en gran medida de la disponibilidad financiera, hecho que convierte a los floculadores hidráulicos en el tipo más común en países en desarrollo (McConnachie, 1993). Este tipo de floculadores aprovechan la energía del flujo de agua para favorecer la interacción entre partículas, lo que provoca su aglomeración bajo condiciones adecuadas de gradiente de velocidad (McConnachie y Liu, 2000).

El campo de aplicación de la dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) en el área del tratamiento de agua es muy extenso (tanques de almacenamiento, plantas de tratamiento, redes de distribución, etc.). El tratamiento eficiente del agua consta de un conjunto complejo de procesos unitarios los cuales ocurren en diferentes entornos hidrodinámicos. Gran parte de las investigaciones se han enfocado en la mejora de los procesos químicos como la coagulación, pero todavía sigue habiendo un gran interés por entender a detalle las interrelaciones que existen entre los procesos químicos y biológicos con el ambiente hidrodinámico en donde se desarrollan.

Los modelos CFD proporcionan datos importantes para diseñar, mejorar y modificar diferentes etapas de tratamiento. Asimismo, entre otros beneficios se

tiene la disminución de los tiempos y costos necesarios para realizar nuevos diseños, la capacidad de analizar el comportamiento de los sistemas por encima de su capacidad de diseño, y la posibilidad de examinar detalladamente grandes sistemas a escala real de diseño lo cual sería muy complicado y costoso de realizar (Bridgeman, Jefferson y Parsons, 2009).

Actualmente, gracias al desarrollo de los métodos numéricos y al gran avance de las computadoras, la dinámica de fluidos computacional se está volviendo una herramienta bastante eficiente para el estudio de fenómenos en donde se encuentren presentes diferentes tipos de fluidos y; por ende, en un excelente instrumento de diseño y análisis.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la actualidad, los floculadores continúan siendo diseñados sobre la base de la pérdida de carga total y gradiente de velocidad promedio planteado por Camp y Stein (1943). El gradiente de velocidad es un parámetro comúnmente empleado para cuantificar el grado de mezcla en diferentes aplicaciones de ingeniería, este parámetro se define generalmente como ingreso total de energía al reactor por volumen total. En el interior de una unidad de floculación la distribución del gradiente de velocidad evidentemente no es uniforme; por consiguiente, no es suficiente utilizar un valor promedio para realizar el diseño apropiado de estos tanques (Bridgeman et al., 2009).

Definitivamente, la selección adecuada de las dimensiones es fundamental para el buen funcionamiento de un tanque de floculación (Bouyer, Coufort, Liné y Do-Quang, 2005); por ello, un diseño ineficaz (que ocasione por ejemplo elevados niveles de turbulencia) proporcionará un efluente de menor calidad a las unidades de tratamiento de agua localizadas aguas abajo, esto podría ocasionar la disminución de la calidad final del agua tratada y provocar un aumento significativo de los costos de operación y mantenimiento no solo de la unidad de floculación, sino también de todo el sistema de tratamiento (OMS, 2011).

En la tecnología moderna de tratamiento de agua, la floculación sigue siendo un componente esencial del conjunto general de procesos de tratamiento y como lo indican Samaras, Zouboulis, Karapantsios y Kostoglou (2010) la necesidad de un diseño exitoso de los procesos de floculación es más importante hoy que en el pasado, ya que los requisitos para la eliminación de partículas y calidad de agua

tratada se han vuelto cada vez más estrictos. Con el uso de modelos de dinámica de fluidos computacional, como es el caso del programa FLOW-3D, se puede realizar el refinamiento de los diseños elaborados de forma simplificada en base a la metodología del gradiente de velocidad promedio, obteniéndose de esta manera un diseño final más robusto, confiable y eficiente de los tanques de floculación.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 Objetivo General

Aplicar el modelo numérico de dinámica de fluidos computacional FLOW-3D en el diseño de los tanques de floculación de flujo vertical de tratamiento de agua para obtener un incremento de la eficiencia del proceso de floculación respecto al logrado con el diseño convencional, basado en la pérdida de carga total y gradiente de velocidad promedio y; por consiguiente, reducir los costos de operación y mantenimiento del sistema además de mejorar la calidad del agua tratada.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar los diferentes tanques de floculación de flujo vertical, obtenidos a partir de la modificación de los parámetros de diseño, según el Reglamento Nacional de Edificaciones (Norma OS.020) y las recomendaciones del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- Validar el modelo numérico FLOW-3D.
- Simular los diferentes diseños de los tanques de floculación en régimen permanente con el modelo numérico FLOW-3D.
- Proponer expresiones, en base a los parámetros de diseño y resultados obtenidos, para determinar el gradiente de velocidad promedio y evaluar la eficiencia hidráulica de las unidades de floculación de flujo vertical.

1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

A continuación se presentan diversas investigaciones relacionadas con el modelamiento numérico aplicando dinámica de fluidos computacional de tanques de tratamiento de agua.

Haarhoff y Van der Walt (2001) investigaron a fondo las relaciones que existen entre diferentes parámetros de diseño (dimensiones de pantalla, altura media de agua, números de pantallas, etc.) que están presentes en el diseño de un tanque de floculación, mediante el modelo comercial CFD FLO++ (desarrollado por la compañía SoftFlo) con el fin de encontrar sus valores óptimos. En este estudio el modelo CFD se utilizó para optimizar sistemáticamente las relaciones críticas para el diseño de floculadores horizontales.

Bridgeman et al. (2009) realizaron una revisión crítica de los enfoques para modelar los procesos hidrodinámicos, físicos y químicos interrelacionados en la floculación del agua utilizando CFD. Asimismo, indican que el modelado CFD se ha utilizado de manera eficaz para demostrar las limitaciones del método de gradiente de velocidad promedio utilizado para clasificar floculadores.

Asimismo, Bridgeman, Jefferson y Parsons (2010) utilizaron el programa comercial Ansys Fluent (desarrollado por Ansys Inc.) para modelar el campo de flujo dentro de los floculadores tanto a escala de laboratorio como a escala real. Este estudio consideró una serie de estrategias de modelado y técnicas de simulación que incluyen, entre otras cosas flujo permanente, no permanente y modelos de turbulencia de dos ecuaciones. Este trabajo demuestra claramente los beneficios que se pueden obtener del uso de la dinámica de fluidos computacional en tanques de floculación.

Por su parte, Kim, Kim y Stoesser (2010) llevaron a cabo el análisis numérico tridimensional del flujo y de las características de transporte de trazadores en dos modelos físicos representativos de tanques de contacto multicámara verticales de ozono, con diferentes anchos de cámara, utilizando el modelo de turbulencia Large Eddy Simulation (LES). Los autores encontraron que dentro de estas unidades se desarrollaban vórtices secundarios y zonas de recirculación. Asimismo, los resultados de la simulación sugieren que la hidrodinámica de los tanques de contacto de ozono se puede mejorar reduciendo el ancho de la cámara. Los autores concluyen que el modelamiento numérico es una herramienta poderosa para el diagnóstico del flujo de reactores existentes, reacondicionamiento de tanques, así como para el diseño de nuevas unidades.

Samaras et al. (2010) realizaron la simulación, con el programa comercial Ansys CFX también desarrollado por la compañía Ansys Inc., de uno de los tanques de

floculación mecánicas de la planta de tratamiento de agua de la ciudad de Tesalónica (Grecia). Según los autores la herramienta computacional se puede utilizar para el diseño y optimización de las características geométricas del tanque (como el tipo de impulsor y posición del flujo de entrada) y operativas (caudal de recirculación, frecuencia de rotación del impulsor y cantidad de floculante).

Por otra parte, Xu (2010) realizó un estudio que se enfocó en la comprensión de la hidráulica interna de los tanques de desinfección con deflectores (para pequeños sistemas de agua potable) aplicando también el programa comercial CFD Ansys Fluent. Se realizaron simulaciones bidimensionales de alta resolución para cuantificar la eficiencia de un tanque a escala de laboratorio en función del número de deflectores. Los resultados obtenidos del campo de velocidades mostraron una buena concordancia con los datos experimentales.

Del mismo modo, Wilson (2011) desarrolló un estudio sobre la evaluación de las características del flujo y transporte escalar de pequeños sistemas de desinfección a través de la dinámica de fluidos computacional, de igual forma utilizando el programa comercial Ansys Fluent. En la investigación se desarrolló un estudio de caso en un sistema de tanque con deflectores. Los experimentos físicos proporcionaron la validación del modelo CFD y brindaron una visión más completa sobre la eficiencia hidráulica.

Por su parte, Ohm, Cae, Zhang y Joo (2020) realizaron un estudio comparativo entre dos plantas de tratamiento de agua potable, una de ellas con unidad de mezcla rápida mecánica y la otra con mezclador hidráulico esto con el objetivo de reemplazar los mezcladores mecánicos debido a que estas unidades poseen ciertas desventajas, como son los altos costos de operación. En esta investigación se aplicó nuevamente el programa comercial CFD Ansys Fluent para obtener los factores de diseño del mezclador hidráulico, a partir de los resultados del modelado CFD se determinó que para el caso de la unidad de mezcla hidráulica una mejor distribución de velocidad de entrada y una turbulencia más elevada mejoraban con éxito la eficiencia de la mezcla entre coagulantes y contaminantes. Asimismo, se observó que a medida que se incrementaba la velocidad de entrada aumentaba también la pérdida de carga, lo cual provocaba un aumento tanto en el consumo de energía como en los costos

de mantenimiento. Finalmente, con el modelamiento CFD se determinó la velocidad de ingreso óptima a la unidad de mezcla hidráulica.

De acuerdo a lo indicado anteriormente, la aplicación de la dinámica de fluidos computacional ha demostrado las limitaciones del método convencional de gradiente de velocidad promedio propuesto por Camp y Stein (1943) y pérdida de carga total para el diseño de floculadores, el cual se basa en una serie de supuestos como son la uniformidad de los valores de velocidad, disipación de energía y gradiente de velocidad dentro de toda la unidad. Por otra parte, las investigaciones realizadas utilizando modelamiento CFD mayormente se han orientado en la mejora del diseño de tanques de floculación del tipo mecánicos, hidráulicos de flujo horizontal, tanques de desinfección (o contacto) con deflectores y unidades de mezclado, pero aún existe un vacío en cuanto a estudios enfocados en la mejora del diseño de floculadores hidráulicos de pantallas de flujo vertical y como la modificación de sus parámetros geométricos influyen sobre la eficiencia de estas unidades.

CAPÍTULO II. MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Plantas de tratamiento de agua potable

Según CEPIS (2004a) una planta de tratamiento de agua potable viene a ser una cadena de procesos unitarios, elegidos de forma conveniente con el objetivo de eliminar enteramente los contaminantes microbiológicos que se encuentran presentes en el agua cruda y de forma parcial los contaminantes físicos y químicos, hasta alcanzar determinados estándares de calidad de agua.

Una planta de tratamiento de agua generalmente está conformada por las etapas de coagulación, decantación, filtración y desinfección (ver Figura N° 1). La etapa de coagulación se lleva a cabo en dos fases. La primera fase denominada mezcla rápida, la cual se caracteriza por la fuerte agitación del agua para obtener una dispersión instantánea del coagulante en toda la masa de agua; la segunda fase conocida como floculación que se caracteriza por la agitación lenta del agua con el fin de promover la acumulación y desarrollo de los flóculos.

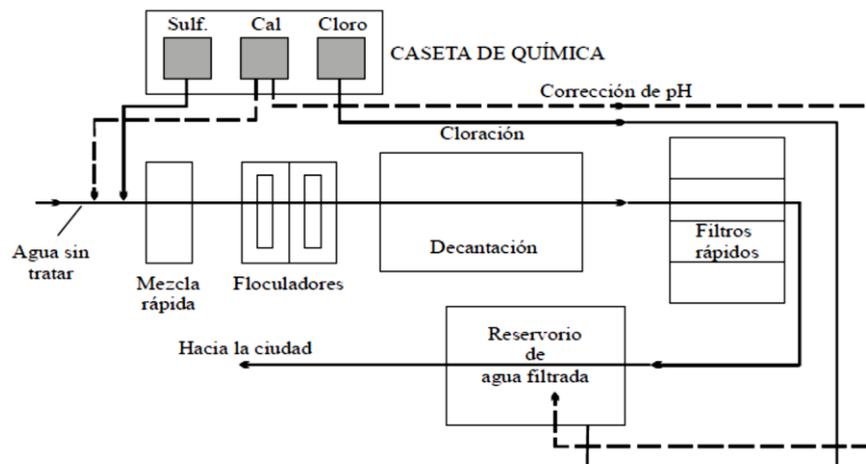


Figura N° 1 Esquema general de una planta de tratamiento de agua (CEPIS, 2002).

El proceso de coagulación tiene como fin incrementar la eficiencia de eliminación de las partículas coloidales en la etapa posterior de decantación. La etapa siguiente denominada filtración tiene como objetivo principal disminuir la turbidez del agua y mejorar su calidad.

En la Figura N° 2 se muestra la función de los procesos como múltiples barreras para optimizar la protección contra los microorganismos patógenos en las

plantas de tratamiento de agua y las metas de producción asociadas. A pesar de las variaciones de la calidad de la fuente, las plantas deben producir de manera consistente agua tratada de alta calidad.

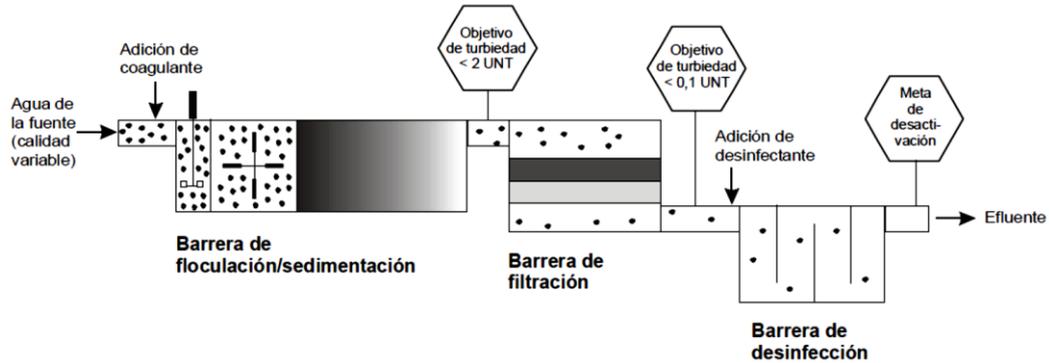


Figura N° 2 Esquema de las barreras múltiples presentes en una planta de tratamiento de agua para la protección contra microorganismos patógenos (CEPIS, 2005b).

Conforme con los trabajos realizados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), la etapa de filtración debe alcanzar un efluente con una turbidez ≤ 0.10 UNT (unidad nefelométrica de turbidez) de esta manera se garantiza un agua sin la presencia de huevos de parásitos (Giardia, Cryptosporidium, etc.). Para poder alcanzar la eficiencia de remoción mencionada anteriormente en la etapa de filtración, es imperativo que en los decantadores se produzca un efluente con una turbidez máxima de 2 UNT.

Asimismo, la coagulación química es el paso más importante para determinar la eficiencia de eliminación de la turbiedad durante los procesos de coagulación, floculación y clarificación. También afecta directamente a la eficiencia de eliminación de partículas en las unidades de filtración en medio granular y afecta indirectamente a la eficiencia de la desinfección. Cualquier avería o funcionamiento ineficiente de las unidades de floculación podría incrementar la carga microbiológica que ingresa al sistema de distribución del agua de consumo humano (OMS, 2011).

Las plantas de tratamiento de agua se pueden clasificar, conforme con la tecnología utilizada, en plantas convencionales clásicas, plantas convencionales de alta tasa de tecnología apropiada o tecnología CEPIS/OPS y plantas de tecnología importada o de patente (CEPIS, 2004a).

2.1.1.1 *Sistemas convencionales de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS*

De acuerdo con CEPIS (2004a) en la década de 1970 se comenzó a desarrollar este tipo de tecnología, y a raíz de las últimas investigaciones llevadas a cabo en países desarrollados se ha ido mejorando en el transcurso del tiempo. Las unidades denominadas de alta tasa solo requieren alrededor del 30 % del área que demanda un sistema clásico convencional con la misma capacidad de diseño. La importante disminución del área es a causa de la utilización de floculadores verticales los cuales ocupan menos área que los horizontales esto debido a sus mayores profundidades. Asimismo, las unidades de decantación que se utilizan en este tipo de sistemas presentan placas inclinadas, de esta forma el área de decantación real total viene a ser la suma de las proyecciones horizontales de todas las placas. Los filtros rápidos se diseñan en baterías de filtros con el propósito de que trabajen con una altura variable y por el principio de tasa declinante. Según esto los filtros trabajan con velocidades decrecientes entre cada lavado y se encuentran desfasados entre sí. De esta manera todos en conjunto llegan a cubrir la capacidad total del sistema y el caudal de operación se mantiene inalterable.

2.1.2 Proceso de tratamiento por coagulación química y floculación

Según OMS (2011) el tratamiento basado en la coagulación química es el método más común para el tratamiento de aguas superficiales y es adecuada para la eliminación de partículas que contienen microorganismos, ciertos metales pesados y sustancias químicas orgánicas de baja solubilidad, como ciertos plaguicidas organoclorados.

Los coagulantes químicos, usualmente sales de aluminio o hierro, se dosifican al agua cruda en condiciones controladas para formar un floculante sólido de hidróxido de metal. Las dosis típicas para los coagulantes son 2 a 5 mg/l en el caso del aluminio o 4 a 10 mg/l en el caso del hierro. El floculo precipitado remueve los contaminantes suspendidos y disueltos mediante mecanismos de adsorción de las especies hidrolíticas por el coloide (ver Figura N° 3), esto causa la neutralización de la carga. Del mismo modo, la remoción de contaminantes se puede realizar por coagulación de barrido, en este caso interactúan el coloide suspendido y el hidróxido del coagulante (ver Figura N° 3).

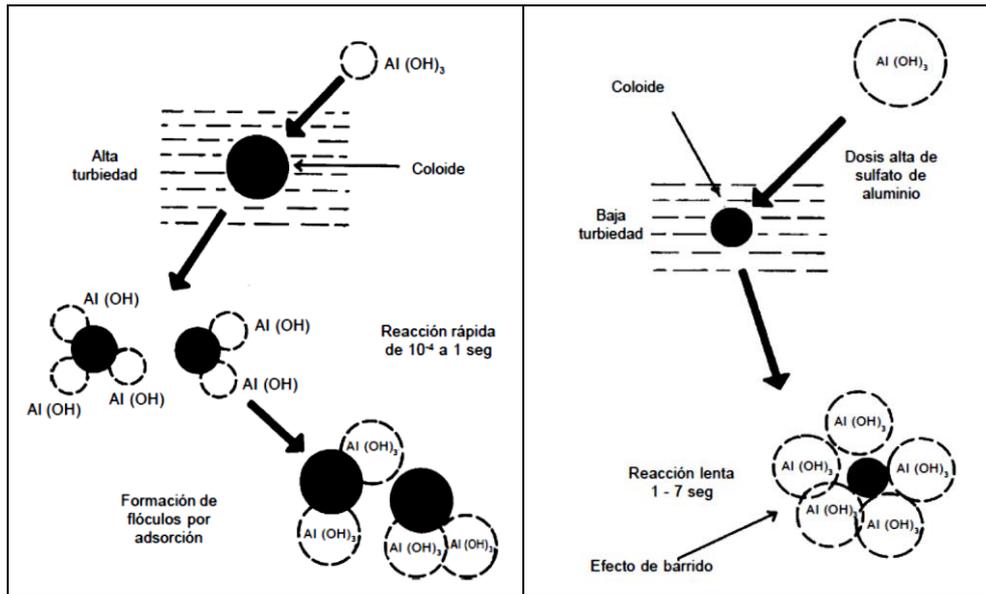


Figura N° 3 Coagulación por adsorción, izquierda, y coagulación de barrido o arrastre de partículas, derecha (CEPIS, 2004a).

La eficiencia del proceso de coagulación depende de la calidad del agua cruda, del coagulante o de los ayudantes de la coagulación que se utilicen, así como de factores operativos, como las condiciones de la mezcla, la dosis del coagulante y el pH. El floculo se remueve del agua tratada mediante procesos posteriores de separación sólido-líquido, como la sedimentación, la flotación o la filtración rápida por gravedad o presión.

Para Stumm y O'Melia (1968) el funcionamiento eficaz del proceso de coagulación depende principalmente de la selección de la dosis óptima de coagulante y del valor del pH. Esta dosis requerida y el pH se pueden determinar mediante pruebas de coagulación en unidades a pequeña escala, que se denominan "pruebas de jarra" (ver Figura N° 4). Se emplean diferentes dosis incrementales del coagulante en las muestras de agua cruda que se agitan y se dejan sedimentar. La dosis óptima es aquella que logra la eliminación adecuada de color y turbiedad; el pH óptimo se puede seleccionar de manera similar. Estas pruebas se tienen que realizar con la debida frecuencia para verificar el ritmo de los cambios en la calidad del agua cruda y, por lo tanto, en la demanda del coagulante.

El floculo puede removerse por sedimentación para reducir la carga de sólidos en los posteriores filtros rápidos por gravedad. La sedimentación se realiza con mayor frecuencia en clarificadores de flujo horizontal/vertical o en mantos de

flóculos. El agua tratada por cualquiera de estos procesos pasa a los filtros rápidos por gravedad, donde se remueven los sólidos restantes. El agua filtrada puede pasar a una etapa posterior de tratamiento, como la oxidación adicional y filtración (para la eliminación de manganeso), ozonización o adsorción con carbón activado granular (para la remoción de plaguicidas y otros compuestos orgánicos traza), previo a la desinfección final antes de que el agua tratada ingrese al sistema de suministro.

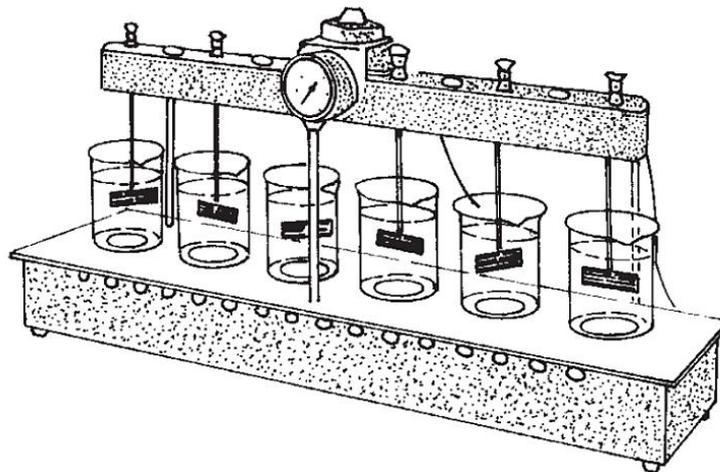


Figura N° 4 Equipo de prueba de jarras (CEPIS, 2004a).

2.1.3 Fundamentos de la dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics) se puede definir como una rama de la mecánica de fluidos la cual proporciona un medio de simulación mediante el uso de métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar de forma detallada cualquier sistema relacionado al movimiento de los fluidos.

Los programas CFD emplean técnicas numéricas para resolver las ecuaciones que gobiernan el flujo (ecuaciones de continuidad, conservación de la cantidad de movimiento y energía). Una solución numérica de estas ecuaciones consiste en aproximar los diferentes términos con expresiones algebraicas. Las ecuaciones resultantes se resuelven para producir una solución aproximada para el problema original (Flow Science, 2017). Para la solución de estas ecuaciones se requiere realizar principalmente dos discretizaciones, una espacial y una temporal, donde la calidad de la solución depende de dicha discretización (Torres y Grau, 2007).

Según Versteeg y Malalasekera (1995) la metodología de solución a través de un análisis CFD está constituida por tres etapas principales (ver Figura N° 5).

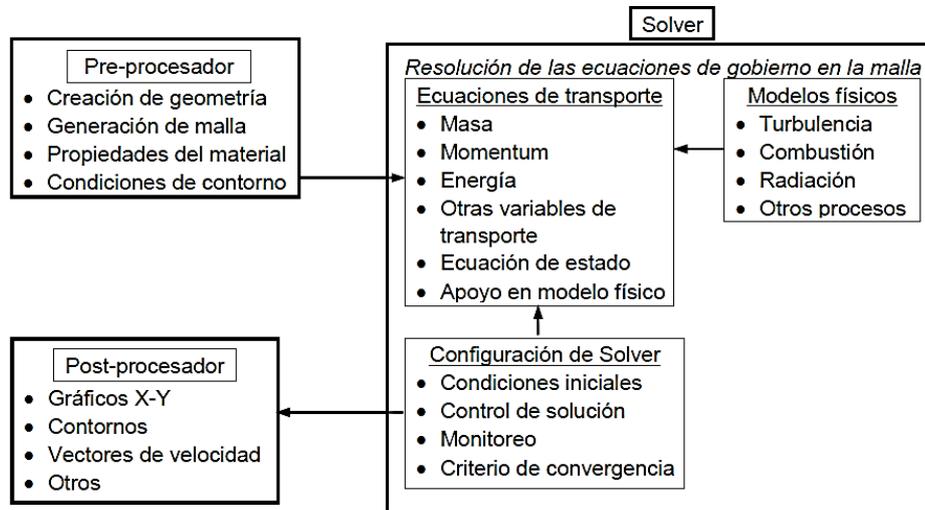


Figura N° 5 Interrelación entre las tres etapas principales de un modelo CFD (Jiyuan, Guan y Chaoqun, 2013).

Asimismo, es recomendable calibrar y/o validar el modelo numérico con un modelo físico, debido a que la discretización utilizada puede ocasionar importantes diferencias entre el resultado final obtenido y las observaciones experimentales (Torres y Grau, 2007).

2.1.3.1 Preprocesamiento

El primer paso corresponde al preprocesamiento que consiste en la introducción del problema de flujo en la interfaz del programa CFD y la respectiva transformación de la información, de tal manera que el solucionador (solver) pueda resolver el problema. En esta etapa se realiza el planteamiento de la descripción físico-matemática del problema a resolver y se establece un modelo aproximado del fenómeno real estudiado. Las principales actividades en la etapa de preprocesamiento son las siguientes:

- Definición de la geometría de la región de interés para el flujo (dominio computacional).
- Generación de la malla de cálculo (división del dominio computacional en subdominios).
- Elección de los fenómenos físicos a modelar y las propiedades de los fluidos.
- Definición de las condiciones de contorno en el dominio computacional.

2.1.3.2 Solucionador (solver)

La segunda etapa consiste en realizar una discretización espacial y temporal del dominio de solución, lo cual añade nuevas aproximaciones al proceso de resolución numérica.

En general los modelos CFD poseen tres técnicas diferentes para obtener las soluciones numéricas: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos. En términos generales los métodos numéricos, que son la base del proceso de resolución, realizan los siguientes pasos: uso de funciones simples para aproximar los valores de variables de flujo desconocidas, discretización por sustitución de las aproximaciones realizadas en las ecuaciones fundamentales del flujo y solución de las ecuaciones algebraicas.

a. Método de diferencias finitas

Este método utiliza la aproximación por diferencias finitas de la derivada en las ecuaciones diferenciales parciales (Smith, 1985). La derivación de las fórmulas en el método de diferencias finitas generalmente comienza con la expansión de la solución en series de Taylor. La precisión y el orden del método de diferencias finitas dependen de cuántos términos se conservan en la serie de Taylor.

b. Método de elementos finitos

Este método es popular en la mecánica de sólidos y el análisis estructural (Zienkiewicz y Taylor, 1989). Sin embargo, también se usa comúnmente en otros problemas de física, incluida la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes. En este método la solución de una variable de campo es buscada en los nodos que definen la forma de cada elemento. La solución en puntos no nodales, que son el interior de los elementos, se obtiene mediante funciones de interpolación (forma).

c. Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos discretiza la ecuación que rige en cada volumen de control (Versteeg y Malalasekera, 1995). La ecuación gobernante se integra primero sobre el volumen. Los términos de divergencia en la integral del volumen se convierten en integrales de superficie usando el teorema de Gauss. El valor de la solución en los centros de las celdas y los flujos a través de las superficies

compartidas entre dos celdas adyacentes necesitan ser evaluadas mediante interpolación y otras técnicas. Este método es ampliamente utilizado en CFD debido a su garantía de conservación de la masa y facilidad de implementación en mallas no estructuradas.

2.1.3.3 Postprocesamiento

Finalmente, para el análisis de resultados es importante y necesario efectuar una representación gráfica de los resultados, ya que la cantidad de información obtenida en el proceso de simulación puede ser bastante extensa. Con el uso creciente de modelos CFD en ingeniería se han desarrollado rutinas gráficas complejas que permiten al usuario una visualización versátil de los resultados.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Tanques de floculación

Para que se produzca el proceso de floculación el agua debe ser agitada por acción de los floculadores utilizando energía hidráulica o mecánica (Arboleda, 1973). Los floculadores favorecen la agrupación de las partículas desestabilizadas eléctricamente para formar otras de mayor tamaño, mediante condiciones óptimas de velocidad y tiempo, las cuales pueden ser removidas posteriormente por decantación, flotación y filtración.

Según CEPIS (2004a) los floculadores comúnmente se clasifican en mecánicos e hidráulicos en función del tipo de energía de agitación de la masa de agua. Los floculadores se pueden clasificar de forma más extensa si se tiene como base la manera como se agrupan las partículas. De acuerdo a esto los floculadores se clasifican en floculadores de contacto de sólidos y floculadores de potencia o de disipación de energía (ver Figura N° 6).

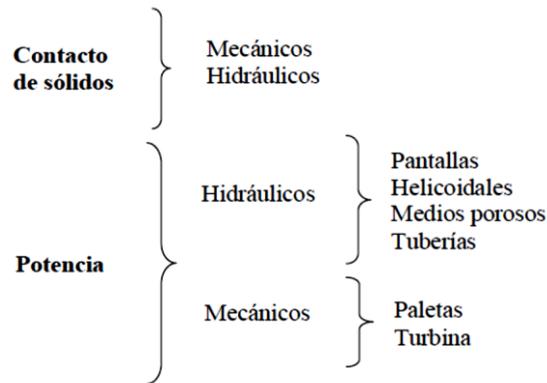


Figura N° 6 Clasificación de las unidades de floculación (CEPIS, 2004a).

2.2.1.1 Floculadores hidráulicos de pantallas

Los floculadores hidráulicos aprovechan la energía hidráulica que se genera debido a la pérdida de carga. Dentro del grupo de floculadores hidráulicos los de pantallas son los más utilizados, estos pueden ser de flujo horizontal o de flujo vertical. En el primero, el flujo circula con un movimiento de vaivén alrededor de las pantallas haciendo un giro de 180 grados en sus extremos, y en el segundo, la corriente asciende y desciende repetitivamente, bordeando las pantallas en condiciones similares (ver Figura N° 7). En ambos casos se produce una pérdida de carga total que es la suma de dos tipos. El primer tipo, de menor valor, debido a la fricción existente dentro el canal; y el segundo tipo, de mayor valor, generado por las variaciones de dirección (CEPIS, 2004a).

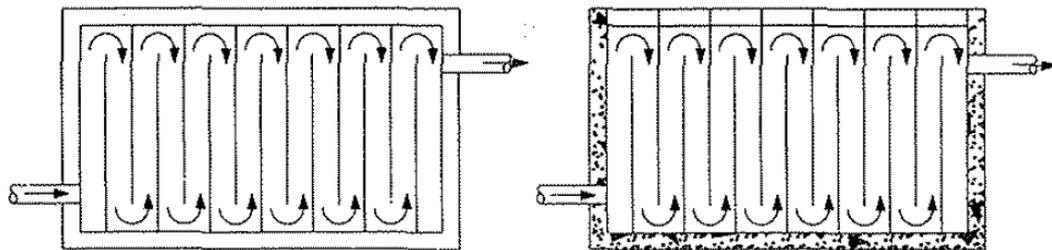


Figura N° 7 Floculadores hidráulicos de pantallas de flujo horizontal y vertical (Arboleda, 2000).

Los floculadores de pantallas de flujo horizontal son aconsejables para pequeñas plantas de tratamiento con bajos caudales de diseño (menores a 50 l/s), en cambio los floculadores verticales se diseñan para caudales mayores. Las unidades verticales son mucho más profundas, generalmente tienen cuatro metros o más de profundidad, debido a esto ocupan una menor área.

Los floculadores con deflectores o pantallas son los más eficientes y económicos de todos los floculadores (CEPIS, 2004a). El costo de operación es bastante bajo ya que no se necesita energía eléctrica para su funcionamiento.

2.2.2 Gradiente de velocidad

El gradiente de velocidad, de un fluido newtoniano incompresible, es un parámetro importante utilizado para evaluar el patrón de flujo en las unidades de mezcla, este parámetro se encuentra relacionado con la cantidad de energía suministrada al sistema y representa la intensidad de agitación dentro de la unidad. Fue desarrollado por Camp y Stein (1943) considerando la distorsión angular de un elemento de volumen de agua debido a las tensiones superficiales tangenciales que actúan sobre dicho elemento, matemáticamente se define con la Ecuación 1:

$$\Phi = \mu * G_P^2 = \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad 1$$

En donde:

Φ : Potencia disipada por unidad de volumen.

μ : Viscosidad dinámica del fluido (N.s/m²).

G_P : Gradiente de velocidad absoluto en un punto (s⁻¹).

u , v y w : Componentes de la velocidad en las direcciones x , y y z , respectivamente (m/s).

Los gradientes de velocidad en el interior de la unidad de mezcla varían considerablemente en magnitud, pero bajo condiciones estacionarias existe un gradiente de velocidad promedio correspondiente al valor promedio de Φ en el tanque. Para este caso, al reordenar la Ecuación 1 el gradiente de velocidad promedio (G) se puede expresar con la Ecuación 2:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu * V}} \quad 2$$

En donde:

P : Potencia disipada por el movimiento del fluido (W).

μ : Viscosidad dinámica del fluido (N.s/m²).

V : Volumen de la unidad (m^3).

Asimismo, la potencia disipada por el agua que fluye a través de un floculador (P) en donde se encuentra involucrada la pérdida de carga, puede expresarse con la Ecuación 3.

$$P = \rho * g * Q * h \quad 3$$

En donde:

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3).

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Q : Caudal (m^3/s).

h : Pérdida de carga total (m).

Finalmente, combinando la Ecuación 2 y Ecuación 3 se obtiene la ecuación de gradiente de velocidad promedio utilizada para dimensionar las unidades de floculación (Ecuación 4).

$$G = \sqrt{\frac{\rho * g * h}{\mu * T}} \quad 4$$

En donde:

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3).

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

h : Pérdida de carga total (m).

μ : Viscosidad dinámica del fluido ($N.s/m^2$).

T : Tiempo de retención = V/Q (s).

Según Haarhoff y Van der Walt (2001) la interpretación física del valor de G también puede ser formulada como la raíz cuadrada de la tasa promedio de disipación de energía por unidad de masa (Ecuación 5). Por lo tanto, la Ecuación 2 también puede escribirse de la siguiente manera.

$$G = \sqrt{\rho * \frac{\bar{\epsilon}}{\mu}} \quad 5$$

En donde:

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3).

$\bar{\epsilon}$: Tasa promedio de disipación de energía por unidad de masa (m^2/s^3).

μ : Viscosidad dinámica del fluido ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$).

Asimismo, con la ayuda de los programas CFD es posible calcular el valor local del gradiente de velocidad (G_{Local}) en cualquier lugar del tanque como se indica en la Ecuación 6 (Bridgeman et al., 2010 y Haarhoff y Van der Walt, 2001). Donde la tasa de disipación de energía turbulenta local (ϵ) se calcula utilizando un modelo de turbulencia apropiado.

$$G_{\text{Local}} = \sqrt{\rho * \frac{\epsilon}{\mu}} \quad 6$$

En donde:

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3).

ϵ : Tasa de disipación de energía turbulenta local (m^2/s^3).

μ : Viscosidad dinámica del fluido ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$).

A medida que el gradiente de velocidad aumenta, la velocidad de aglomeración de las partículas también se incrementa, esto provoca que los flóculos aumenten de tamaño y que las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico se intensifiquen. Las partículas floculentas aumentarán de tamaño hasta un límite máximo, superado este límite las fuerzas de cizallamiento se incrementan y los flóculos son fragmentados en partículas más pequeñas (CEPIS, 2004a). En la Tabla N° 1 se muestra los rangos, encontrados en diferentes investigaciones, de los valores del gradiente de velocidad promedio recomendados para el proceso de floculación.

La descripción del proceso de floculación a través de un gradiente de velocidad global no explica la distribución del esfuerzo cortante dentro de la unidad (Craig et al., 2002). Los gradientes de velocidad en el interior de un tanque de floculación varían considerablemente en magnitud, siendo mayores en los contornos sólidos del equipo utilizado para introducir el movimiento de mezcla. De acuerdo con la Ecuación 2 es posible obtener el valor promedio para el gradiente de velocidad de un tanque; sin embargo, en la práctica se observa que este valor varía considerablemente dentro de la unidad esto debido al patrón de flujo impuesto por los cambios de dirección.

Tabla N° 1 Rango de valores de gradiente de velocidad promedio para floculadores recomendados en la literatura.

Publicaciones	Rango de valores de G (s ⁻¹)
Fair y Geyer, 1954	10 - 100
Camp, 1955	20 - 74
Monk y Willis, 1987	15 - 80
McConnachie y Liu, 2000	10 - 100
CEPIS, 2004a	10 - 100

Fuente: Elaboración propia.

Según Camp (1955) en los tanques con deflectores la mayor parte de la pérdida de carga se produce en cambios de dirección (en los extremos); por lo tanto, los gradientes de velocidad son mucho mayores en estas regiones. Haarhoff y Van der Walt (2001) presentaron cálculos de gradiente de velocidad (ver Figura N° 8), a partir de un modelo numérico calibrado, a lo largo de un floculador hidráulico de pantallas confirmando la afirmación anterior realizada por Camp (1955).

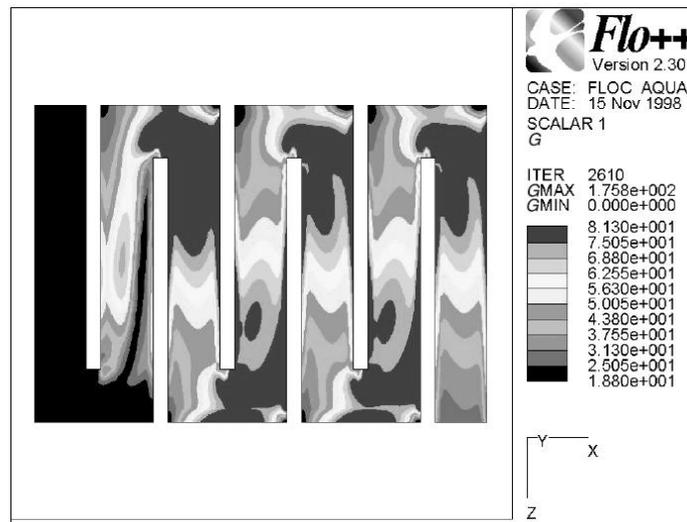


Figura N° 8 Variación espacial del gradiente de velocidad en un floculador de pantallas de flujo horizontal (Haarhoff y Van der Walt, 2001).

Adicionalmente, para tener una mejor comprensión del proceso de fragmentación de las partículas floculantes resulta útil calcular la microescala de longitud de Kolmogorov (η) la cual se puede estimar con la Ecuación 7:

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad 7$$

En donde:

ν : Viscosidad cinemática del agua = μ/ρ (m^2/s).

ϵ : Tasa de disipación de energía turbulenta local (m^2/s^3).

Según CEPIS (2004a) la fragmentación no sería significativa en las partículas floculantes menores que η , en este caso estaría provocada por remolinos en la zona de flujo laminar, aquí la disipación de energía es debido al efecto de la viscosidad. Por otra parte, las partículas floculantes mayores que η serían fragmentadas debido a la turbulencia consecuencia de la inercia.

2.2.3 Tipos de flujos en un reactor

Desde un enfoque hidráulico el flujo del agua, en las unidades de una planta de tratamiento, puede ser de dos tipos: intermitente o discontinuo y continuo.

2.2.3.1 Flujo intermitente

En las plantas de tratamiento el flujo del tipo discontinuo o intermitente es el menos usual, consiste en llenar la unidad con el fluido a tratar y posteriormente dejarlo un tiempo adecuado mientras se realiza el proceso de tratamiento correspondiente (con o sin mezcla), después se vacía el tanque para seguidamente iniciar nuevamente el ciclo. El flujo intermitente generalmente no es funcional; por ello, comúnmente los procesos dentro de una planta de tratamiento utilizan el flujo del tipo continuo, salvo en algunos casos en donde la etapa de tratamiento requiera intermitencia (CEPIS, 2005a).

2.2.3.2 Flujo continuo

Este tipo de flujo es el que generalmente se presenta en las plantas de tratamiento de agua. Según lo mencionado anteriormente, las unidades de tratamiento pueden ser de flujo de pistón, mezclado y real.

a. Flujo pistón

En términos simples, el flujo tipo pistón ocurre de manera similar a lo que se observa en un pistón; es decir, las partículas de fluido ingresan continuamente por uno de los extremos de la unidad, pasan a través del sistema y se descargan en la misma secuencia en que ingresaron por la salida, con una mínima dispersión longitudinal (todas las partículas tardan el mismo tiempo en atravesar

el reactor). Asimismo, no ocurre una mezcla entre el fluido presente en el tanque y el que ingresa al reactor (Siqueira, 1998).

De acuerdo con CEPIS (2005a) es complicado alcanzar un flujo con estas propiedades, esto debido a que el ambiente hidrodinámico dentro de la unidad (zonas muertas, zonas de recirculación, cortocircuitos hidráulicos, etc.) imposibilita que el flujo sea invariable. Es recomendable evadir estas situaciones, porque provocan una reducción en la eficiencia de la unidad.

b. Flujo mezclado

Una unidad con flujo mezclado es aquella en donde cualquier sustancia que ingresa al reactor se dispersa al instante dentro de él. A diferencia del reactor de flujo de pistón, en estos reactores existe una máxima dispersión longitudinal. Asimismo, este tipo de flujo se caracteriza porque la concentración de la sustancia a la salida del reactor es idéntica a la que está presente dentro de la unidad (Siqueira, 1998).

Según CEPIS (2005a) en la plantas de tratamiento es muy complicado conseguir un flujo con estas particularidades, esto solo se puede presentar bajo condiciones no reales. Un buen ejemplo de este tipo de flujo se puede observar en los retromezcladores.

c. Flujo no ideal

Los tipos de flujo anteriormente descritos son abstracciones matemáticas que difícilmente ocurren en la práctica, ya que presuponen condiciones ideales de mezcla o la ausencia de dispersión longitudinal. Así surgió lo que se denomina el flujo disperso, flujo real o flujo no ideal. Este flujo viene a ser un punto intermedio entre flujo pistón y flujo mezclado en donde existe la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, etc. Corresponde al comportamiento de la mayoría de los reactores reales que usualmente se encuentran en las plantas de tratamiento (Siqueira, 1998).

2.2.4 Características del flujo en un reactor

La mayoría de los reactores que operan en las plantas de tratamiento no poseen un comportamiento hidrodinámico ideal, pero se pueden considerar reactores de flujo de pistón ideal o de mezcla completa dentro de un rango de error aceptable.

De acuerdo a Siqueira (1998) las desviaciones entre el régimen de flujo real e ideal son causadas por varias características del flujo entre las que se pueden destacar las siguientes:

Cortocircuitos: son trayectorias preferenciales que toman las partículas que dan como resultado un tiempo de residencia en el reactor menor que el tiempo de retención teórico, lo que ocasiona una disminución de la eficiencia de las unidades de tratamiento.

Recirculaciones: son trayectorias rotacionales recorridas por las partículas de fluido dentro del reactor.

Zonas muertas: Son regiones en el interior del reactor en donde los tiempos de residencia de las partículas del fluido son relativamente mayores, en comparación con el valor del tiempo de retención teórico. Es decir, que existe un bajo intercambio con las regiones adyacentes.

Cabe indicar que el tiempo de retención teórico corresponde al tiempo de permanencia de las partículas de fluido en el interior del reactor, desde la entrada hasta la salida. Es definido como la relación entre el volumen útil del tanque y el caudal.

Los procesos que se efectúan en las plantas de tratamiento pueden ser muy rápidos o también muy lentos. Por ello se requieren tiempos de retención o tiempos de contacto cortos o largos para conseguir la transferencia o las reacciones requeridas (CEPIS, 2005a). El gran impacto que posee el periodo o tiempo de retención sobre la eficiencia de un floculador se puede observar en la Figura N° 9. Es esta figura se aprecia como una reducción del tiempo de retención (cortocircuito hidráulico) o incremento (zonas muertas) produce apreciables disminuciones en la eficiencia, fenómeno que es más importante cuanto mayor es el gradiente de velocidad utilizado.

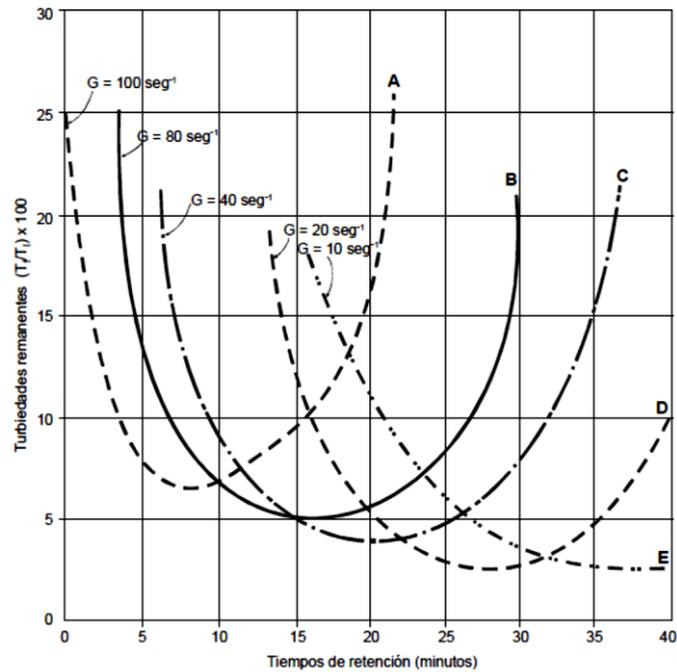


Figura N° 9 Influencia del tiempo de retención sobre la eficiencia de la floculación. Resultados obtenidos de una prueba de jarras de la Planta La Atarjea (CEPIS, 2005a).

2.2.5 Ensayo de trazadores

La visualización del funcionamiento hidráulico de una unidad de tratamiento se puede realizar utilizando una sustancia trazadora (colorantes, ácidos, sal o alguna sustancia radiactiva), el trazador se aplica al ingreso del reactor y a la par es monitoreado a la salida. La inyección de la sustancia trazadora puede efectuarse en forma continua o instantánea siendo esta última el método más usado en la evaluación de plantas (CEPIS, 2005a).

2.2.5.1 Dosificación instantánea

En este tipo de dosificación la concentración inicial (C_0) de la sustancia trazadora se mantiene constante en el corto tiempo de aplicación. En condiciones no ideales de funcionamiento (presencia de cortocircuitos, zonas muertas, corrientes de inercia, zonas de recirculación, etc.) cuando se grafica la concentración de la sustancia trazadora a la salida de la unidad versus el tiempo, se obtiene una gráfica en donde la concentración de la sustancia trazadora se incrementa a través del tiempo hasta obtener un valor máximo (ver Figura N° 10).

2.2.5.2 Dosificación continua

En la dosificación continua la concentración inicial del trazador (C_0) se mantiene invariable en el tiempo hasta alcanzar una concentración máxima en el efluente igual a C_0 (Figura N° 10).

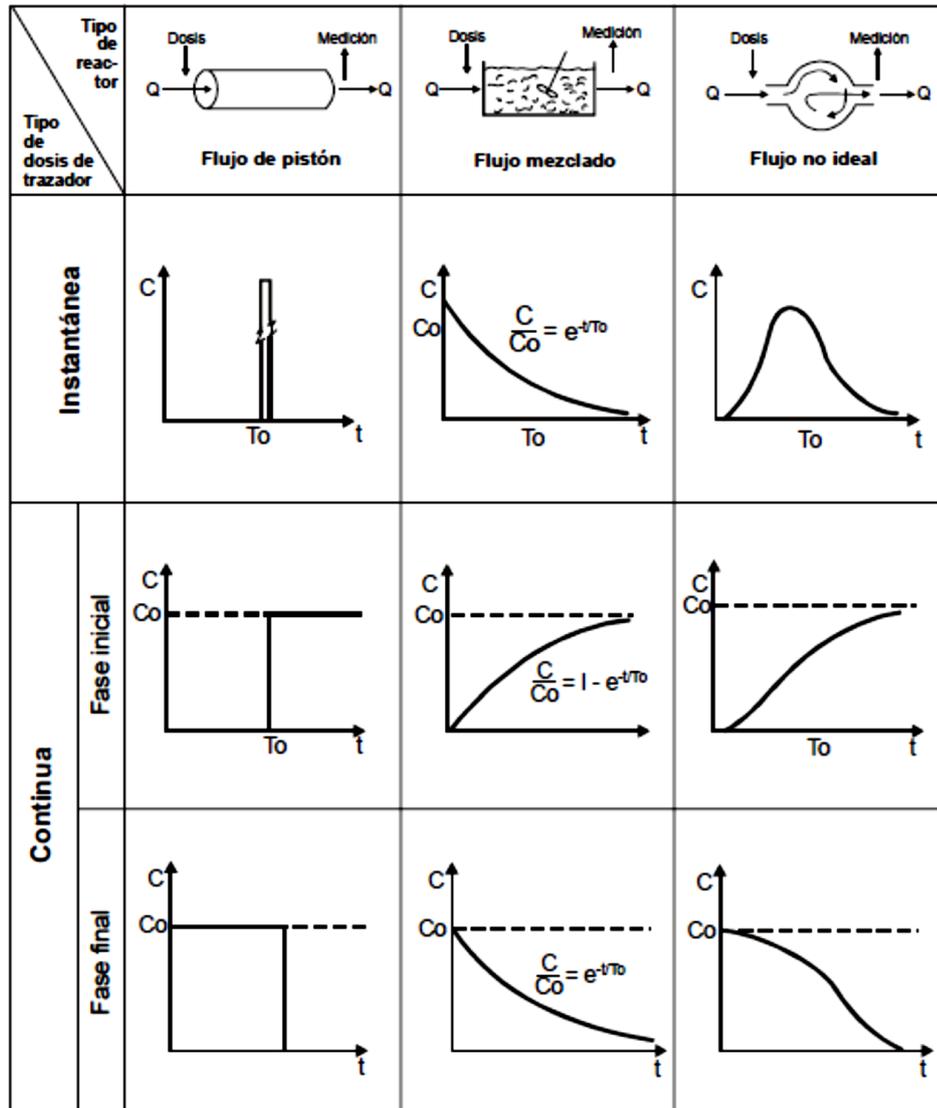


Figura N° 10 Curvas distintivas de concentración del trazador a la salida de las unidades de tratamiento para diferentes tipos de flujo (CEPIS, 2005a).

2.2.5.3 Curvas de distribución del tiempo de residencia (DTR)

Las curvas obtenidas de los estudios de trazadores son denominadas curvas de distribución del tiempo de residencia (DTR), estas curvas son una de las principales herramientas utilizadas para evaluar la eficiencia hidráulica de los sistemas de tratamiento.

La normalización o adimensionalización de la concentración del trazador con el valor de la concentración inicial (C_0), y el tiempo con el valor tiempo de retención teórico permiten comparar el comportamiento de diferentes sistemas. Si bien el método de entrada de pulsos es más fácil de realizar en la mayoría de las circunstancias, los resultados requieren un análisis más extenso para su interpretación (Teefy, 1996).

La Figura N° 11 y Figura N° 12 muestran las curvas DTR habituales para un estudio de trazadores con dosificación instantánea y continua, respectivamente, realizado en un sistema de tratamiento con concentraciones de trazador y tiempos normalizados. La forma de la curva proporciona información sobre la naturaleza del flujo en el sistema (Stamou, 2002). Por ejemplo, en la Figura N° 12 una curva más vertical representa condiciones más cercanas a un flujo pistón, dominado por la advección, y una curva más horizontal representa condiciones más alejadas del flujo pistón, donde dominan los procesos de difusión.

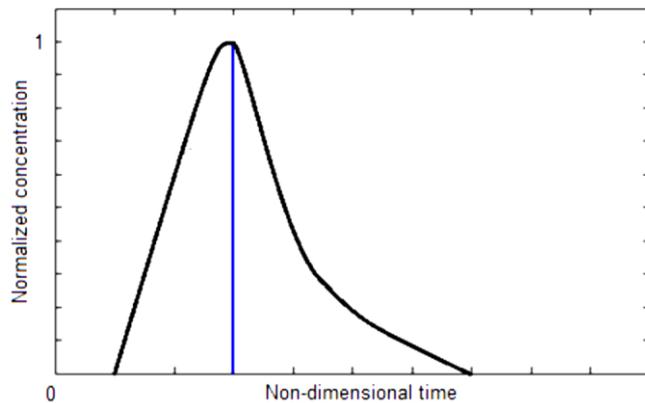


Figura N° 11 Curva DTR para un estudio de trazador con dosificación instantánea (Wilson, 2011).

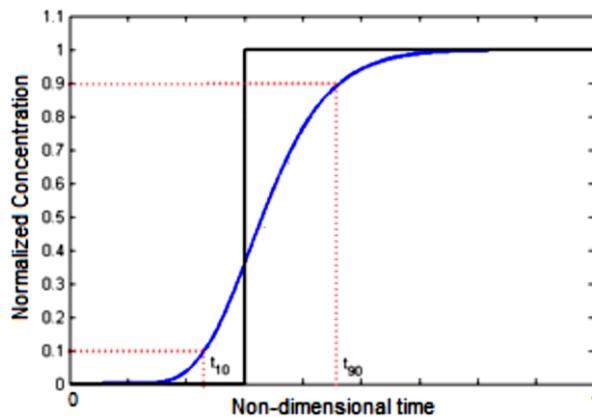


Figura N° 12 Curva DTR para un estudio de trazador con dosificación continua (Wilson, 2011).

2.2.6 Índices de eficiencia hidráulicos

Según Teixeira y Siqueira (2008) aunque el rendimiento de la unidad puede evaluarse directamente a partir de la comparación entre curvas DTR, la interpretación directa de estas funciones no siempre es sencilla. Por lo tanto, de estas funciones se suelen extraer algunos índices de eficiencia hidráulicos que se dividen en dos categorías: indicadores de cortocircuito e indicadores de mezcla. El fenómeno de cortocircuito está relacionado con la advección del fluido dentro de la unidad y describe el grado en el que el fluido sale del sistema antes del tiempo de retención teórico, mientras que el fenómeno de mezcla está relacionado con la dispersión aleatoria del fluido por todo el sistema, este término se refiere a la acción conjunta de la difusión turbulenta y otros efectos como son la presencia de zonas muertas y de recirculación.

Dentro del grupo de índices de cortocircuito el índice θ_{10} es uno de los pocos que cumple con todos los requisitos para ser un buen indicador de cortocircuito (Teixeira y Siqueira, 2008 y USEPA, 2003). Se encuentra directamente relacionado con la advección del fluido y también posee una pequeña variabilidad estadística. Asimismo, proporciona información sobre la cantidad de fluido que sale de la unidad por trayectorias preferenciales. El índice se encuentra definido por la Ecuación 8.

$$\theta_{10} = \frac{t_{10}}{T} \quad 8$$

En donde:

t_{10} : Tiempo requerido para que pase el 10 % de la concentración del trazador inyectado a la salida del tanque (ver Figura N° 12).

T: Tiempo de retención del tanque (Volumen/Caudal).

El valor de índice θ_{10} toma el valor de 1 bajo condiciones de flujo pistón y adquiere un valor cercano a 0 al aproximarse a las condiciones de mezcla completa.

Con respecto a los índices de mezcla, diversas investigaciones (Farjood, Melville, Shamseldin, Adams y Khan, 2015; Gualtieri, 2010; Teixeira y Siqueira, 2008 y Wilson y Venayagamoorthy, 2010) recomiendan el uso del índice de Morrill (IM) para la evaluación de unidades de tratamiento en donde se presenten

niveles de mezcla bajos, esto debido a su menor variabilidad estadística. Igualmente, este índice es el recomendado por CEPIS (2005a) para la evaluación de unidades de floculación y se determina mediante la Ecuación 9.

$$IM = \frac{t_{90}}{t_{10}} \quad 9$$

En donde:

t_{90} : Tiempo requerido para que pase el 90 % de la concentración del trazador inyectado a la salida del tanque (ver Figura N° 12).

t_{10} : Tiempo requerido para que pase el 10 % de la concentración del trazador inyectado a la salida del tanque (ver Figura N° 12).

Asimismo, en condiciones ideales de flujo pistón el valor del índice de Morrill es igual a 1, mientras que al acercarse a las condiciones de mezcla completa el índice de Morrill tiende a valores muy altos (alrededor de 30).

En la Tabla N° 2 se observa los rangos para los índices adimensionales de eficiencia hidráulica, recomendados por diferentes investigaciones, para las unidades de tratamiento (Angeloudis, Stoesser y Falconer, 2014; Demirel y Aral, 2016; Demirel y Aral, 2018; Gualtieri, 2010; USEPA, 2003 y Wei et al., 2019).

Tabla N° 2 Rangos de los índices de eficiencia hidráulica comúnmente sugeridos en la literatura.

Eficiencia	θ_{10}	IM
Pobre	< 0.3	> 3.5
Comprometida	0.3 - 0.5	2.5 - 3.5
Buena	0.5 - 0.7	1.5 - 2.5
Excelente	> 0.7	< 1.5

Fuente: Elaboración propia.

2.2.7 Modelo numérico FLOW-3D

El FLOW-3D es un programa CFD elaborado por la compañía Flow Science, empresa líder en el mercado. Utiliza diferentes técnicas numéricas diseñadas para dar solución a las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos (ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad). El programa cuenta con una gran variedad de opciones numéricas y físicas disponibles, esto facilita a los usuarios emplear este programa a una gran diversidad de fenómenos de flujo y

transferencia de calor. El modelo FLOW-3D se distingue especialmente por simular flujos en canales abiertos.

Según Flow Science (2017) la malla es el espacio numérico que sustituye el cuerpo físico original. La malla está compuesta de un número de componentes o celdas interconectados. Estas celdas subdividen el espacio físico en pequeños volúmenes con diferentes nodos asociados a cada volumen. Estos nodos se utilizan para guardar los valores de las todas las incógnitas, como por ejemplo velocidad y temperatura. El mallado computacional provee los medios para precisar los parámetros del flujo en zonas discretas, la definición de las condiciones de borde y, asimismo, para efectuar las aproximaciones numéricas de las ecuaciones de movimiento del fluido.

El FLOW-3D particiona el dominio del flujo en una malla de celdas estructuradas rectangulares, que son elementos prismáticos rectangulares (Ver Figura N° 13). Los parámetros del fluido son representados por una matriz de valores de puntos discretos. Debido a que las variables físicas existentes cambian de forma continua en el espacio, un mallado refinado proveerá una mejor aproximación del dominio físico que un mallado más grueso.

Asimismo, el mallado rectangular es más fácil de implementar y guardar gracias a su forma regular o naturaleza estructurada. En este modelo las celdas se enumeran de forma correlativa empleando tres índices diferentes: i en la dirección x , j en la dirección y y k en la dirección z . Así cada celda del mallado tridimensional se puede determinar por una dirección única (i, j, k), de forma idéntica a las coordenadas de un punto en el espacio (ver Figura N° 13).

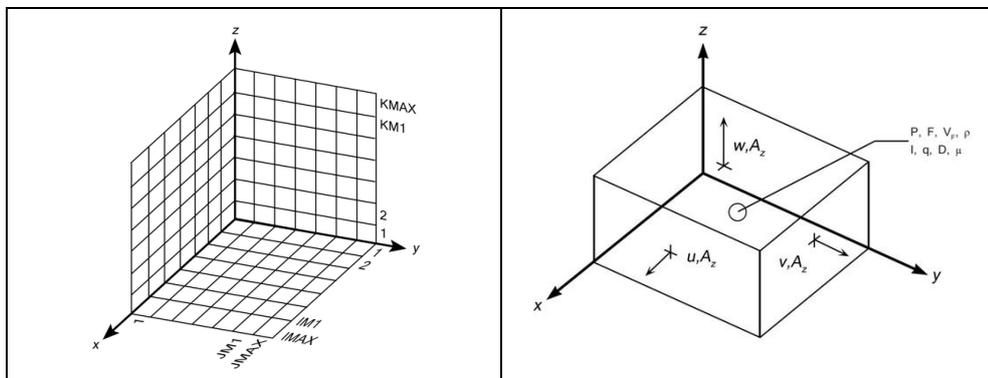


Figura N° 13 Disposición de la malla y convenciones de etiquetado, izquierda. Ubicación de las variables en una celda de malla, derecha (Flow Science, 2017).

Las mallas rectangulares o prismáticas rectangulares estructuradas poseen ciertas ventajas sobre las mallas no estructuradas por la facilidad de implementar los métodos numéricos, debido a la precisión y estabilidad de las soluciones numéricas. Los algoritmos numéricos clásicos (basados en diferencias finitas y métodos de volúmenes finitos) han sido elaborados principalmente en este tipo de mallado. El mallado rectangular es la base del enfoque numérico presente en este programa. El método de diferencias finitas se fundamenta en las propiedades de expansión de Taylor, y en la utilización natural de derivadas. Es uno de los métodos más antiguos que se ha utilizado para resolver ecuaciones diferenciales. Asimismo, el método de volumen finito proviene directamente de la forma integral de las leyes de conservación de movimiento y tiene de manera intrínseca las propiedades conservativas (Flow Science, 2017).

2.2.7.1 Sistemas de coordenadas utilizados en el FLOW-3D y método FAVOR

En el FLOW-3D las ecuaciones diferenciales son expresadas en coordenadas cartesianas (x, y, z). Cuando se emplean coordenadas cilíndricas (r, θ, z) la coordenada x representa la dirección radial, la coordenada y corresponde a la coordenada azimutal, θ , y la coordenada z es la coordenada axial. Si se utiliza el sistema de coordenadas cilíndricas se deben agregar términos adicionales a las ecuaciones cartesianas de movimiento. Estos términos se incluyen mediante el coeficiente ξ , tal que $\xi = 0$ corresponde al sistema de coordenadas cartesianas, mientras que $\xi = 1$ corresponde a la cilíndrica (ver Ecuación 10).

Por otra parte, en el modelo numérico FLOW-3D todo el conjunto de ecuaciones se expresan con funciones de porosidad de área y volumen. Esta representación es conocida como método Fractional Area/Volume Obstacle Representation (FAVOR) y fue propuesto por Hirt y Sicilian (1985), este método se utiliza para modelar regiones geométricas complejas (ver Figura N° 14).

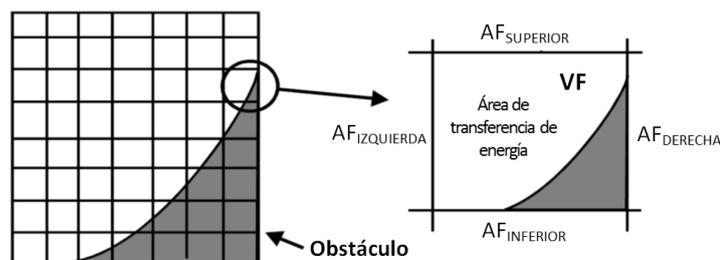


Figura N° 14 Descripción gráfica del método FAVOR, VF corresponde a la fracción de volumen y AF es la fracción de área (Flow Science, 2017).

Las regiones de volumen que presentan valores de porosidad igual a cero son empleadas para indicar obstáculos. Estas funciones de porosidad además traen consigo ciertas simplificaciones en el establecimiento de las condiciones de borde de superficie libre y de pared. Asimismo, en el modelo numérico FLOW-3D las fracciones de área y volumen generalmente no dependen del tiempo. A pesar de ello, dichas cantidades podrían cambiar con el tiempo cuando se activa el submodelo de obstáculos en movimiento.

2.2.7.2 Interfases y superficie libre (método VOF)

Al emplear el método Volume of Fluid (VOF) desarrollado por Hirt y Nichols (1981), el modelo numérico FLOW-3D posee la capacidad de rastrear y localizar la interfase entre diferentes tipos de fluidos. Modelar superficies libres muchas veces es un desafío en cualquier entorno computacional debido a las características de flujo como por ejemplo la densidad, velocidad y presión, ya que estas presentan una discontinuidad en la superficie.

Según Flow Science (2017) gran parte de los programas CFD buscan calcular el flujo en ambas regiones (agua y aire). Un tratamiento como este provoca un movimiento erróneo de la superficie ya que asume que esta se moviliza con una velocidad semejante a la velocidad media de la mezcla. Lo que sucede realmente es que los dos fluidos se mueven de forma independiente con excepción de una delgada capa límite viscosa. Además, otro error común es la aplicación de algún tipo de esquema de advección de orden superior para realizar el rastreo de la interfase, la cual es interpretada como un cambio brusco de densidad. Estos esquemas ocasionan zonas de transición suavizadas entre ambos fluidos (agua y aire), las cuales ocupan demasiados volúmenes de control del dominio computacional, en lugar de las fuertes interfases localizadas en un solo volumen.

El método VOF está conformado por tres componentes elementales: un esquema para localizar la superficie libre en donde se utiliza la función de fracción de volumen del fluido, un algoritmo para el rastreo de la superficie libre definido a través de una interfase fuerte, y un mecanismo de implementación de las condiciones de borde en la superficie. El valor de la fracción de volumen del fluido se especifica de forma análoga al valor de porosidad del mallado utilizado en el método FAVOR para la determinación de las celdas, estas puede ser:

vacía, llena o parcialmente llena con fluido. El modelo numérico diferencia la celda ocupada de aire similar a un espacio vacío de masa y se le designa como fracción de fluido el valor de 0. La celda totalmente llena por el fluido se le asigna el valor de 1. Asimismo, la celda parcialmente ocupada tiene un valor que varía entre 0 y 1 (ver Figura N° 15).

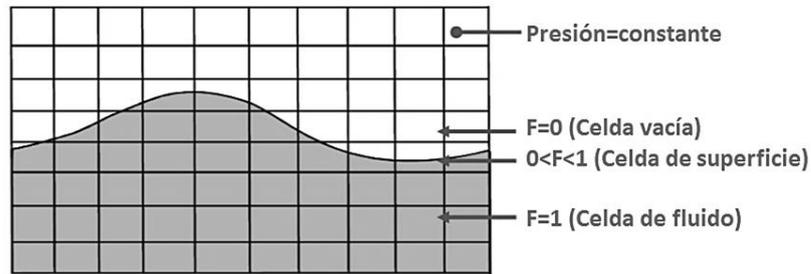


Figura N° 15 Representación gráfica del método VOF, donde F es la fracción de volumen del fluido (Flow Science, 2017).

2.2.7.3 Ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento

En el modelo numérico FLOW-3D la ecuación general de continuidad está dada por la Ecuación 10:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad 10$$

En donde V_F es el volumen fraccional abierto al flujo, ρ la densidad del fluido, R_{DIF} es un término difusión turbulenta y R_{SOR} una fuente de masa. Las componentes de la velocidad (u, v, w) se pueden representar en coordenadas (x, y, z) o (r, θ, z). A_x es la fracción de área abierta al flujo en la dirección x , A_y y A_z son fracciones de área análogas para el flujo en las direcciones y y z , respectivamente. Igualmente, el coeficiente R adquiere diferentes valores dependiendo de la selección del sistema de coordenadas. En caso de utilizarse coordenadas cilíndricas, entonces las derivadas pueden ser transformadas a derivadas azimutales con la Ecuación 11.

$$\frac{\partial}{\partial y} \rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad 11$$

La transformación de coordenadas se realiza mediante el empleo de la forma análoga mostrada en la Ecuación 12.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \rightarrow \frac{r_m}{r} \frac{\partial}{\partial y} \quad 12$$

Aquí $y = r_m \theta$ y r_m es un radio de referencia fijo. La forma equivalente propuesta en la ecuación anterior es especialmente ventajosa, porque para su empleo solamente se necesita el multiplicador $R = r_m/r$. Además, cuando se utilizan las coordenadas cartesianas, el valor de R se aproxima a la unidad y ξ se toma el valor de cero.

Por otra parte, el primer término del miembro derecho de la Ecuación 10 viene a ser un término de difusión turbulenta (ver Ecuación 13).

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_p A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_p A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_p A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_p A_x}{x} \quad 13$$

Donde el coeficiente v_p es igual a $S_c \mu / \rho$, μ es el coeficiente de difusión del momentum (en otras palabras, la viscosidad) y S_c es una constante adicionalmente conocida como el número turbulento de Schmidt. Esta forma de difusión de masa sólo se aplica para el proceso de mezcla turbulenta en aquellos fluidos que presentan una densidad variable. Por su parte, el parámetro R_{SOR} corresponde a un término de fuente de densidad.

Generalmente los problemas de flujo compresible necesitan que la ecuación total de transporte de densidad, que se muestra en la Ecuación 10, sea resuelta. En fluidos incompresibles, ρ es una constante y la ecuación se reduce a la condición de incompresibilidad (Ecuación 14).

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad 14$$

En aquellos problemas en donde la propagación de ondas de presión acústica es significativa, y el fluido se puede tratar como incompresible, la aproximación de la derivada temporal de la densidad se puede realizar mediante la Ecuación 15:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad 15$$

En donde p es la presión y c^2 es la velocidad del sonido elevada al cuadrado. La estimación anterior es permitida para el rango:

$$\left| \frac{\delta\rho}{\rho} \right| < 0.1$$

Con la aproximación anterior, la ecuación de continuidad modificada se convierte entonces en la Ecuación 16.

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad 16$$

Por otro lado, las ecuaciones de cantidad de movimiento para las componentes de la velocidad del fluido en las tres direcciones (u, v, w), se expresan con las ecuaciones de Navier - Stokes y algunos términos adicionales (ver Ecuación 17).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad 17 \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned}$$

En donde G_x , G_y y G_z son las componentes de la aceleración del cuerpo; f_x , f_y y f_z , las aceleraciones viscosas; b_x , b_y y b_z , las pérdidas de flujo entre medios porosos, y los términos finales simbolizan la inyección de masa de una fuente denotada por un componente geométrico.

Asimismo, $U_w = (u_w, v_w, w_w)$ es la velocidad del componente fuente, la cual por lo general es distinta de cero para una fuente de masa dentro del submodelo general de movimiento del objeto. El parámetro $U_s = (u_s, v_s, w_s)$ corresponde a la velocidad del fluido en la superficie de la fuente. La cual es estimada en cada volumen de control con la Ecuación 18:

$$U_s = \frac{dQ}{\rho_Q dA} \bar{n} \quad 18$$

En donde dQ representa el cambio de flujo de masa, el término ρ_Q es la densidad del fluido de la fuente, dA representa el área de la superficie de la fuente en la celda y \bar{n} la normal exterior a la superficie. El parámetro δ toma el valor de cero si en las ecuaciones anteriores la fuente es del tipo presión de estancamiento. En cambio si $\delta = 1$, la fuente corresponde a una presión estática.

Cuando se tiene una fuente de presión de estancamiento, se asume que el fluido posee una velocidad de cero cuando se incorpora al dominio. Entonces como

consecuencia, en el origen la presión debe incrementarse para que el fluido se mueva lejos de la fuente. Comúnmente, en los casos en que el momentum del fluido emergente se genera en el interior del componente de origen, las fuentes de presión de estancamiento son aplicadas, como en el caso de un motor de cohete. Para el caso de una fuente de presión estática la velocidad del fluido se estima a partir de la tasa de flujo de masa y el área superficial de la fuente. En este escenario no se necesita ninguna presión adicional para impulsar el fluido lejos de la fuente. Un caso práctico de este tipo de fuente es el fluido que brota de un conducto largo y recto, en este ejemplo el impulso del fluido se genera a gran distancia de donde se localiza el origen.

2.2.7.4 Modelos de turbulencia

Según lo indicado por Flow Science (2017) la turbulencia es el movimiento inestable y caótico de los fluidos que se genera cuando las fuerzas viscosas son débiles e insuficientes para estabilizarlos. Para elevados números de Reynolds las inestabilidades que se desarrollan dentro del flujo se manifiestan con la formación de remolinos de diferentes tamaños. En resumen, la turbulencia del fluido no puede ser despreciada en el modelado numérico. Lo correcto sería realizar la simulación con las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, de toda la gama de oscilaciones turbulentas. Sólo si la resolución del mallado fuese lo suficientemente fina se podrían capturar todos los detalles. Lo indicado anteriormente es complicado de realizar por las limitaciones de la capacidad de la memoria del ordenador y del tiempo de procesamiento o cálculo computacional. Por ende, se suele utilizar la modelización simplificada que explica los efectos de la turbulencia sobre las propiedades promediadas del flujo turbulento.

De acuerdo con Flow Science (2017) el modelo numérico FLOW-3D cuenta con seis modelos de turbulencia disponibles: el modelo de longitud de mezcla de Prandtl, el modelo de una sola ecuación, los modelos de dos ecuaciones $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$ y $k-\omega$, y un modelo de grandes vórtices (LES). A continuación, se describen los modelos de turbulencia que se utilizaron en esta investigación.

a. Modelos de turbulencia $k-\varepsilon$ y $k-\varepsilon$ /RNG

El modelo de transporte de turbulencia de una ecuación se encuentra definido por una ecuación de transporte de energía cinética específica (Ecuación 19) que

se encuentra relacionada con las oscilaciones de velocidad turbulenta en el flujo (energía cinética turbulenta, k_T).

$$k_T = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad 19$$

En donde u' , v' , w' son las componentes x , y , z de la velocidad del fluido relacionada con las oscilaciones caóticas turbulentas.

En la ecuación de transporte de k_T se incluyen la difusión y convección de la energía cinética turbulenta, la generación de energía cinética turbulenta a causa del cizallamiento y a los efectos de difusión y flotabilidad. Asimismo, la disipación a causa de las pérdidas viscosas en el interior de los remolinos turbulentos. Solo si el fluido posee una densidad variable se generará la producción de flotabilidad, en donde se consideran los efectos de las aceleraciones no inerciales y gravedad. La ecuación de transporte se muestra en la Ecuación 20.

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_{k_T} - \varepsilon_T \quad 20$$

Los términos V_F , A_x , A_y y A_z son funciones FAVOR, P_T es la producción de energía cinética turbulenta, G_T es la producción de flotabilidad, el término de difusión $Diff_{k_T}$ se define con la Ecuación 21:

$$Diff_{k_T} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_k A_y R \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_k A_x k_T}{x} \right\} \quad 21$$

Donde u_k es el coeficiente de difusión de k_T el cual se calcula en base al valor local de la viscosidad turbulenta. En el FLOW-3D el valor de RMTKE, inicialmente definido, es un multiplicador de viscosidad empleado para estimar el coeficiente de difusión turbulenta y posee un valor predeterminado de 1.

El denominado modelo k - ε propuesto por Harlow y Nakayama (1967) es un modelo complejo y bastante empleado, dicho modelo posee dos ecuaciones de transporte, la primera correspondiente a la energía cinética turbulenta k_T y la segunda correspondiente a su disipación ε_T . En el modelo de una ecuación la tasa de disipación de energía turbulenta ε_T está vinculada con la energía cinética turbulenta k_T por la Ecuación 22:

$$\varepsilon_T = CNU^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN} \quad 22$$

En el programa FLOW-3D CNU es un término que posee un valor por defecto igual a 0.09, k_T representa la energía cinética turbulenta y TLEN corresponde a la escala de longitud turbulenta. Según Rodi (1980) el modelo k- ε proporciona aproximaciones adecuadas para muchos tipos de flujos. En este caso una ecuación extra de transporte (Ecuación 23) se debe resolver para estimar la disipación turbulenta, ε_T :

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS1 \cdot \varepsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3 \cdot G_T) + Diff_e - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad 23$$

En el FLOW-3D los coeficientes CDIS1, CDIS2 y CDIS3 son parámetros adimensionales que poseen valores por defecto, correspondientemente, de 1.44, 1.92 y 0.20. De ser necesario estos parámetros pueden ser modificados por el usuario.

La difusión de la disipación, $Diff_e$, está definida por la Ecuación 24:

$$Diff_e = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\varepsilon A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\varepsilon A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\varepsilon A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_\varepsilon A_x \varepsilon_T}{x} \right\} \quad 24$$

La Ecuación 23 descrita anteriormente reemplaza a la Ecuación 22 en una gran parte del dominio del flujo, esto limita la obligación de definir un valor de TLEN a lo largo de todo el dominio.

El programa FLOW-3D tiene disponible también un modelo de turbulencia basado en las técnicas RNG, Renormalization - Group (Choudhury, 1993). De acuerdo a Yakhot y Orszag (1986) este procedimiento emplea técnicas estadísticas para la obtención de las ecuaciones promediadas de los valores de turbulencia (energía cinética turbulenta y disipación de energía turbulenta).

El modelo de turbulencia RNG k- ε emplea ecuaciones semejantes a las ecuaciones del modelo de turbulencia k- ε . No obstante, las constantes de la ecuación estimadas empíricamente en el modelo k- ε estándar se derivan explícitamente en el modelo de turbulencia RNG. Por lo general, el modelo RNG k- ε posee un rango de aplicación más extenso que el modelo k- ε estándar. Específicamente el modelo RNG k- ε se destaca por representar con gran precisión los flujos que presentan regiones con fuerte cizallamiento y flujos

turbulentos de baja intensidad. También, los parámetros CDIS1, RMTKE y CNU toman valores por defecto distintos a los empleados por el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$; estos son 1.39, 1.42 y 0.085, respectivamente. La estimación de CDIS2 se realiza con ayuda de los términos de energía cinética turbulenta (k_T) y producción turbulenta (P_T).

En el modelo numérico FLOW-3D, la viscosidad cinemática turbulenta (ν_T) es estimada a través de la Ecuación 25:

$$\nu_T = CNU \frac{k_T^2}{\varepsilon_T} \quad 25$$

Un desafío numérico particular para ambos modelos de dos ecuaciones, $k-\varepsilon$ y RNG $k-\varepsilon$, viene a ser la exigencia de restringir el valor de ε_T . Si no se limita este valor la Ecuación 23 podría estimar valores de ε_T que tienden a cero. A pesar que físicamente k_T debe aproximarse a cero, esto a veces no ocurre debido a razones numéricas y esto da como resultado valores mayores no físicos de ν_T en la Ecuación 25. Una forma para evitar este problema es limitar el valor de ε_T con la Ecuación 26 tal manera que no sea menor a:

$$\varepsilon_{T,min} = CNU^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN} \quad 26$$

Aquí TLEN representa la escala de longitud turbulenta máxima. La cual puede ser especificada por el usuario o limitada por el programa de manera automática.

El propósito fundamental de todo modelo de turbulencia es facilitar una manera para calcular la influencia de las variaciones turbulentas sobre los valores promedio del flujo. Dicha incidencia se formula comúnmente con términos extras de difusión en las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y transporte de energía. Dado que la turbulencia incrementa la difusión del momentum, en consecuencia incrementa eficientemente la viscosidad. En el programa FLOW-3D cuando el coeficiente de viscosidad dinámica se muestre en las ecuaciones, se entiende que es la suma de las viscosidades molecular y turbulenta (Ecuación 27).

$$\mu = \rho(\nu + \nu_T) \quad 27$$

La expresión anterior no se cumple al cien por ciento, pero es una correcta aproximación para niveles altos de turbulencia; en otras palabras, cuando el valor de la viscosidad molecular es mucho menor que la viscosidad turbulenta. Por lo que a bajos niveles de turbulencia no sería adecuado utilizar el modelo $k-\varepsilon$ si antes no se realizan algunas modificaciones.

Relaciones de escalas de tiempo (Ecuación 28) y longitud turbulentas (Ecuación 29) se pueden formar a partir de la energía cinética turbulenta y la disipación.

$$T_T = \frac{k_T}{\varepsilon_T} \quad 28$$

$$L_T = CNU^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{\varepsilon_T} \quad 29$$

En las ecuaciones anteriores ε_T y el término k_T/ε_T son reemplazados por la escala de tiempo turbulenta. En el programa FLOW-3D, como anteriormente se mencionó TLEN es un variable definida por el usuario la cual es una aproximación del valor de la escala de longitud turbulenta real para el modelo de una ecuación, también representa el límite máximo de escala de longitud para los modelos de dos ecuaciones. De igual manera, dicha escala de longitud turbulenta máxima se estima de manera automática tomando en consideración el espacio y el tiempo a lo largo de la simulación (Ecuación 30 y Ecuación 31).

$$\widetilde{T}_T = \max \left[T_T^{low}, \min \left(T_T^{up}, \frac{k_T}{\varepsilon_T} \right) \right] \quad 30$$

$$\widetilde{L}_T = \max \left[L_T^{low}, \min \left(L_T^{up}, CNU^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{\varepsilon_T} \right) \right] \quad 31$$

b. Modelo de turbulencia LES (Large Eddy Simulation)

Este modelo de turbulencia de grandes vórtices surgió de los esfuerzos para modelar la atmosfera. La idea básica en este modelo es estimar de manera práctica todas las características del flujo turbulento que pueden ser solucionadas por el mallado computacional, y estimar únicamente las estructuras que son muy pequeñas de resolver (Smagorinsky, 1963).

Según Flow Science (2017) al aplicar el modelo LES es necesario tener en cuenta que este modelo es fundamentalmente tridimensional y dependiente del

tiempo. También, en los límites del flujo de entrada se deben inicializar e incorporar las variaciones o fluctuaciones. A pesar que para aquello sea necesario un mayor esfuerzo computacional debido a la necesidad de un mallado fino, los resultados conseguidos con este modelo por lo general proporcionan más información que los modelos anteriormente mencionados, k-ε y RNG k-ε, basados en promedios de Reynolds. Como muestra de ello, cuando se aplican modelos LES para la estimación del flujo turbulento alrededor de grandes rascacielos, dentro de los resultados no sólo se obtienen esfuerzos del viento, sino además una estimación de la magnitud y la desviación estándar de las oscilaciones de las fuerzas relacionadas con el flujo turbulento.

En el modelo de turbulencia Large Eddy Simulation los efectos de la turbulencia, que son bastante pequeños para ser computados, se sustituyen por una viscosidad de remolino. Smagorinsky (1963) para realizar la estimación de la escala de longitud emplea una media geométrica de los tamaños de las celdas (Ecuación 32).

$$L = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3} \quad 32$$

Las escalas de las oscilaciones de velocidad son estimadas teniendo como base el esfuerzo cortante medio. Estas cantidades son acopladas en la viscosidad cinemática de remolino (Ecuación 33).

$$v_T = (cL)^2 \cdot \sqrt{2e_{ij}2e_{ij}} \quad 33$$

En la ecuación anterior c es una constante que varía entre de 0.1 a 0.2 y e_{ij} expresa los componentes del tensor de la tasa de deformación. En la ecuación anterior, la viscosidad cinemática de remolino es introducida a la viscosidad dinámica (empleada por el programa) de igual forma como se detalló en los modelos de transporte de turbulencia (Ecuación 27).

CAPÍTULO III. DISEÑO DE LOS TANQUES DE FLOCULACIÓN VERTICAL SEGÚN NORMA OS.020

3.1 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

El diseño de los tanques de floculación de flujo vertical, los cuales fueron posteriormente simulados con el programa FLOW-3D, se realizó de acuerdo a lo establecido por la Norma OS.020 del Reglamento Nacional de Edificaciones (MVCS, 2006) y a las recomendaciones propuestas por CEPIS (2004b).

Para el diseño se ha considerado un rango de gradientes de velocidad comprendidos entre 30 s^{-1} y 90 s^{-1} , valores que se encuentran dentro del rango recomendado por diferentes autores para el proceso de floculación (ver Tabla N° 1). Asimismo, se seleccionaron valores de altura de agua dentro del rango de 3 m a 6 m, si bien el Reglamento Nacional de Edificaciones recomienda un valor de profundidad máximo de 5 m, en esta investigación se decidió ampliar el rango hasta 6 m con la finalidad de tener una visión más amplia de la influencia de la altura de agua sobre el diseño final del tanque.

Igualmente, se seleccionaron diversas longitudes de tanque entre 4.5 m a 9 m y se eligieron diferentes tiempos de retención comprendidos entre 3 min y 9 min. A partir de la selección de estos parámetros y considerando un caudal de ingreso constante a las unidades de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$, se realizó el diseño tradicional basado en el gradiente de velocidad promedio y la pérdida de carga total.

Tabla N° 3 Resumen de la selección de parámetros considerados para el diseño de los tanques de floculación vertical.

Tiempo de retención (min)	Gradiente de velocidad (s^{-1})	Longitud de la unidad (m)	Profundidad de la unidad (m)
3, 5, 7 y 9	30, 50, 70 y 90	4.5, 6, 7.5 y 9	3, 4, 5 y 6

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla N° 3 se observa el resumen de los valores de todos los parámetros de diseño considerados en este estudio, a partir de estos valores se obtiene un número total de combinaciones igual a 256; es decir, 256 unidades de floculación vertical las cuales fueron dimensionadas y posteriormente simuladas con el programa FLOW-3D.

3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LOS FLOCULADORES DE FLUJO VERTICAL

A continuación se describen los criterios empleados para el dimensionamiento de las unidades de floculación vertical. Asimismo, en la Figura N° 16 se observa el esquema general de un tanque de floculación de flujo vertical.

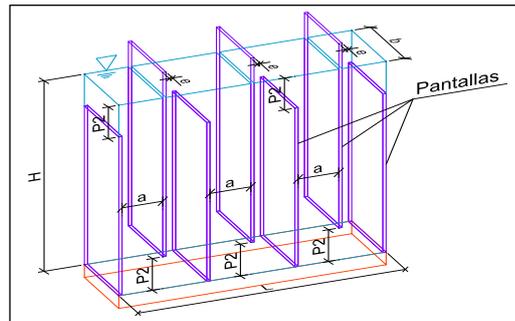


Figura N° 16 Esquema de un floculador de pantallas de flujo vertical.

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de retención teórico en minutos (T) en el tanque de floculación se calcula aplicando la Ecuación 34. Pero debido a que el tiempo de retención en este estudio es un dato conocido, esta expresión se empleó para estimar el ancho del tanque (b).

$$T = H * b * L / (Q * 60) \quad 34$$

H: Altura de agua o profundidad del tanque (m).

b: Ancho del tanque (m).

L: Longitud del tanque (m).

Q: Caudal de diseño (m³/s).

Como primera aproximación del número de compartimentos en el tanque (m), o canales de gradiente constante, se utilizó el criterio de Richter (Ecuación 35) recomendado por CEPIS (2004b).

$$m = 0.045 * \sqrt[3]{(b * L * G_{DISEÑO} / Q)^2 * T} \quad 35$$

b: Ancho del tanque (m).

L: Longitud del tanque (m).

G_{DISEÑO}: Gradiente de velocidad promedio de diseño (s⁻¹).

Q: Caudal de diseño (m³/s).

T: tiempo de retención en el tanque (min).

El espaciamiento entre pantallas (a) se calculó con la Ecuación 36

$$a = (L - e * (m - 1))/m \quad 36$$

L: Longitud del tanque (m).

e: Espesor de las pantallas (m).

m: número de compartimientos en el tanque.

Asimismo, para la estimación de la velocidad en los canales verticales (V_1) se empleó la Ecuación 37.

$$V_1 = Q/(a * b) \quad 37$$

Q: Caudal de diseño (m^3/s).

a: Espaciamiento entre pantallas (m).

b: Ancho del tanque (m).

Aplicando la Ecuación 38 se calculó la velocidad en los pasos (V_2)

$$V_2 = 2/3 V_1 \quad 38$$

V_1 : Velocidad en los canales verticales (m/s).

Igualmente, la altura del paso se obtuvo aplicando la Ecuación 39.

$$P_2 = (Q/V_2)/b \quad 39$$

Q: Caudal de diseño (m^3/s).

V_2 : Velocidad en los pasos (m/s).

b: Ancho del tanque (m).

Asimismo, la extensión total de los canales (l) se calculó con la Ecuación 40.

$$l = 60V_1 * T \quad 40$$

V_1 : Velocidad en los canales verticales (m/s).

T: tiempo de retención en el tanque (min).

Para el cálculo del radio hidráulico del canal (R_H) se empleó la Ecuación 41.

$$R_H = (a * b)/2(a + b) \quad 41$$

a: Espaciamiento entre pantallas (m).

b: Ancho del tanque (m).

El cálculo de la pérdida de carga continua en los canales (h_1) se realizó utilizando la fórmula de Manning (Ecuación 42).

$$h_1 = \left(nV_1 / R_H^{\frac{2}{3}} \right)^2 * l \quad 42$$

n : Coeficiente de rugosidad de Manning.

V_1 : Velocidad en los canales verticales (m/s).

R_H : Radio hidráulico del canal (m).

l : Extensión total de los canales (m).

Asimismo, la pérdida de carga en las vueltas (h_2) se calculó mediante la Ecuación 43:

$$h_2 = [(m + 1)V_1^2 + mV_2^2] / 2g \quad 43$$

m : número de compartimientos en el tanque.

V_1 : Velocidad en los canales verticales (m/s).

V_2 : Velocidad en los pasos (m/s).

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

La pérdida de carga total en el tanque (h_f) se calculó con la Ecuación 44.

$$h_f = h_1 + h_2 \quad 44$$

h_1 : Pérdida de carga continua en los canales (m).

h_2 : Pérdida de carga en las vueltas (m).

El cálculo del volumen útil del tanque (\forall) se realizó con la Ecuación 45.

$$\forall = H * b * L - e * (m - 1) * b * (H - P_2) \quad 45$$

H : Altura de agua o profundidad del tanque (m).

b : Ancho del tanque (m).

L : Longitud del tanque (m).

e : Espesor de las pantallas (m).

m : número de compartimientos en el tanque.

P_2 : Altura del paso (m).

Posteriormente, el gradiente de velocidad promedio final (G_{FINAL}) en el tanque de floculación se comprobó mediante la Ecuación 46:

$$G_{FINAL} = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{1/2g} * \sqrt{f/4R_H} * V_1^{1.5} \quad 46$$

γ : Peso específico del agua a 20 °C.

μ : Viscosidad dinámica del agua a 20 °C.

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

f : Coeficiente de Darcy Weisbach. Se recomienda utilizar un valor de 0.02.

R_H : Radio hidráulico del canal (m).

V_1 : Velocidad en los canales verticales (m/s).

De igual manera, el gradiente de velocidad en el canal vertical (G_{CV}) se comprobó mediante la Ecuación 47:

$$G_{CV} = \sqrt{\gamma/\mu} * \sqrt{(f * V_1^3)/(8 * R_H * g)} \quad 47$$

γ : Peso específico del agua a 20 °C.

μ : Viscosidad dinámica del agua a 20 °C.

f : Coeficiente de Darcy Weisbach. Se recomienda utilizar un valor de 0.02.

V_1 : Velocidad en los canales verticales (m/s).

R_H : Radio hidráulico del canal (m).

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Cabe señalar que MVCS (2006) recomienda que el gradiente de velocidad en los canales verticales debe ser de alrededor de $20 s^{-1}$, pero este valor generalmente no se cumple cuando se diseñan tanques con gradientes de velocidad bajos, cercanos a $30 s^{-1}$, por lo que no se consideró como un factor limitante para el diseño de los tanques de floculación. Finalmente, según las recomendaciones del CEPIS (2004b) y MVCS (2006) se debe verificar la correcta elección del ancho del floculador de tal manera que en el diseño de las unidades con gradientes de velocidad bajos, los deflectores se superpongan por lo menos en 1/3 de la altura útil (ver Ecuación 48). Esto con la finalidad de evitar la formación de espacios muertos y cortocircuitos.

$$H - 2P_2 \geq 1/3 H \quad 48$$

H : Altura de agua o profundidad del tanque (m).

P_2 : Altura del paso (m).

Tabla Nº 4 Proceso de dimensionamiento de un tanque de floculación de pantallas de flujo vertical.

PASO	DATOS			UNIDAD	CRITERIOS	CÁLCULOS		RESULTADOS	UNIDAD
1	CAUDAL DE DISEÑO	Q	0.100	m ³ /s	$T = H*b*L/(Q*60)$	T	5.00	TIEMPO DE RETENCIÓN EN EL TANQUE	min
2	LONGITUD DEL TANQUE	L	6.00	m	$m = 0.045((b*L*G_{DISEÑO}/Q)^{2*}T)^{1/3}$	m	18.57	NRO APROXIMADO DE COMPARTIMIENTOS	N°
	PROFUNDIDAD DEL TANQUE	H	4.00	m			16.00	NRO FINAL DE COMPARTIMIENTOS ELEGIDO	
3	ANCHO DEL TANQUE	b	1.250	m	$a = (L-e(m-1))/m$	a	0.340	ESPACIAMIENTO ENTRE PANTALLAS	m
4	GRADIENTE DE VELOCIDAD PROMEDIO DE DISEÑO	G _{DISEÑO}	50.0	s ⁻¹	$V_1 = Q/(a*b)$	V ₁	0.235	VELOCIDAD EN LOS CANALES VERTICALES	m/s
					$V_2 = 2/3V_1$	V ₂	0.157	VELOCIDAD EN LOS PASOS	m/s
5	ESPESOR DE LAS PANTALLAS DE PVC	e	0.0375	m	$P_2 = (Q/V_2)/b$	P ₂	0.511	ALTURA DEL PASO	m
6					$l = 60*V_1*T$	l	70.50	EXTENSIÓN TOTAL DE LOS CANALES EN EL TANQUE	m
7					$R_H = a*b/(2(a+b))$	R _H	0.134	RADIO HIDRÁULICO ENTRE PANTALLAS	m
8	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DEL PVC	n	0.009		$h_1 = (nV_1/R_H)^{2/3}*l$	h ₁	0.005	PÉRDIDA DE CARGA CONTINUA EN LOS CANALES	m
9					$h_2 = ((m+1)V_1^2 + mV_2^2)/2g$	h ₂	0.068	PÉRDIDA DE CARGA EN LAS VUELTAS	m
10					$hf = h_1 + h_2$	hf	0.073	PÉRDIDA DE CARGA TOTAL EN EL TANQUE	m
11					$v = H*b*L-e(m-1)*b(H-P_2)$	v	27.55	VOLUMEN ÚTIL DEL TANQUE	m ³
12	T° = 20 °C	$\sqrt{(v/\mu)}$	3,126.29		$G_{FINAL} = \sqrt{(v/\mu)*\sqrt{(hf*Q/v)}}$	G _{FINAL}	50.75	COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD FINAL	s ⁻¹
13	COEFICIENTE DE DARCY	f	0.02		$G_{CV} = \sqrt{(v/\mu)*\sqrt{((f*V_1^3)/(8*R_H*g))}}$	G _{CV}	15.53	COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD EN EL CANAL VERTICAL	s ⁻¹
	ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD	g	9.81	m/s ²					

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla Nº 4 muestra el proceso de dimensionamiento descrito anteriormente para un tanque de floculación vertical con $G_{DISEÑO} = 50 \text{ s}^{-1}$, $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 4 \text{ m}$. Este mismo procedimiento se realizó reiteradas veces para dimensionar el grupo de 256 unidades de floculación de flujo vertical que fueron simuladas en esta investigación.

En la Tabla N° 5 se resumen los resultados obtenidos en la etapa de dimensionamiento para las 256 unidades de floculación consideradas en este estudio. En esta tabla se aprecia que ocho de los diseños (número 45, 57, 58, 59, 61, 62, 63 y 64) no cumplen con la condición de que las pantallas se entrecrucen como mínimo $1/3 H$; sin embargo, se consideraron en el grupo de simulaciones.

Tabla N° 5 Resumen de resultados de la etapa de diseño de los tanques de floculación vertical.

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	a (m)	V ₁ (m/s)	G _{FINAL} (s ⁻¹)	≥ 1/3H
1	3	90	4.5	3.0	1.333	16	0.246	0.305	86.42	OK
2	3	90	4.5	4.0	1.000	14	0.287	0.348	92.56	OK
3	3	90	4.5	5.0	0.800	12	0.341	0.367	90.42	OK
4	3	90	4.5	6.0	0.667	11	0.375	0.400	95.03	OK
5	3	90	6.0	3.0	1.000	17	0.318	0.314	89.64	OK
6	3	90	6.0	4.0	0.750	14	0.394	0.338	87.96	OK
7	3	90	6.0	5.0	0.600	12	0.466	0.358	86.64	OK
8	3	90	6.0	6.0	0.500	11	0.511	0.391	91.50	OK
9	3	90	7.5	3.0	0.800	17	0.406	0.308	86.88	OK
10	3	90	7.5	4.0	0.600	14	0.501	0.333	85.53	OK
11	3	90	7.5	5.0	0.480	12	0.591	0.353	84.50	OK
12	3	90	7.5	6.0	0.400	11	0.648	0.386	89.57	OK
13	3	90	9.0	3.0	0.667	18	0.465	0.323	93.10	OK
14	3	90	9.0	4.0	0.500	15	0.565	0.354	93.78	OK
15	3	90	9.0	5.0	0.400	13	0.658	0.380	94.82	OK
16	3	90	9.0	6.0	0.333	11	0.784	0.383	88.79	OK
17	3	70	4.5	3.0	1.333	14	0.287	0.261	68.53	OK
18	3	70	4.5	4.0	1.000	12	0.341	0.293	71.14	OK
19	3	70	4.5	5.0	0.800	10	0.416	0.300	66.71	OK
20	3	70	4.5	6.0	0.667	9	0.467	0.321	68.29	OK
21	3	70	6.0	3.0	1.000	15	0.365	0.274	73.10	OK
22	3	70	6.0	4.0	0.750	12	0.466	0.286	68.08	OK
23	3	70	6.0	5.0	0.600	11	0.511	0.326	74.99	OK
24	3	70	6.0	6.0	0.500	9	0.633	0.316	66.21	OK
25	3	70	7.5	3.0	0.800	15	0.465	0.269	70.92	OK
26	3	70	7.5	4.0	0.600	12	0.591	0.282	66.58	OK
27	3	70	7.5	5.0	0.480	11	0.648	0.322	73.63	OK
28	3	70	7.5	6.0	0.400	9	0.800	0.313	65.54	OK
29	3	70	9.0	3.0	0.667	15	0.565	0.265	69.12	OK
30	3	70	9.0	4.0	0.500	12	0.716	0.279	65.81	OK
31	3	70	9.0	5.0	0.400	11	0.784	0.319	73.01	OK
32	3	70	9.0	6.0	0.333	9	0.967	0.310	65.08	OK
33	3	50	4.5	3.0	1.333	12	0.341	0.220	52.68	OK
34	3	50	4.5	4.0	1.000	10	0.416	0.240	52.53	OK
35	3	50	4.5	5.0	0.800	8	0.530	0.236	46.72	OK

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	a (m)	V ₁ (m/s)	G _{FINAL} (s ⁻¹)	≥ 1/3H
36	3	50	4.5	6.0	0.667	7	0.611	0.245	45.49	OK
37	3	50	6.0	3.0	1.000	12	0.466	0.215	50.61	OK
38	3	50	6.0	4.0	0.750	10	0.566	0.236	51.23	OK
39	3	50	6.0	5.0	0.600	9	0.633	0.263	54.36	OK
40	3	50	6.0	6.0	0.500	8	0.717	0.279	55.19	OK
41	3	50	7.5	3.0	0.800	12	0.591	0.212	49.56	OK
42	3	50	7.5	4.0	0.600	10	0.716	0.233	50.31	OK
43	3	50	7.5	5.0	0.480	9	0.800	0.260	53.55	OK
44	3	50	7.5	6.0	0.400	8	0.905	0.276	54.52	OK
45	3	50	9.0	3.0	0.667	12	0.716	0.209	48.69	NO
46	3	50	9.0	4.0	0.500	10	0.866	0.231	49.57	OK
47	3	50	9.0	5.0	0.400	9	0.967	0.259	53.49	OK
48	3	50	9.0	6.0	0.333	8	1.092	0.275	54.07	OK
49	3	30	4.5	3.0	1.333	8	0.530	0.142	27.55	OK
50	3	30	4.5	4.0	1.000	7	0.611	0.164	29.67	OK
51	3	30	4.5	5.0	0.800	6	0.719	0.174	29.69	OK
52	3	30	4.5	6.0	0.667	6	0.719	0.209	36.26	OK
53	3	30	6.0	3.0	1.000	9	0.633	0.158	32.26	OK
54	3	30	6.0	4.0	0.750	7	0.825	0.162	29.44	OK
55	3	30	6.0	5.0	0.600	6	0.969	0.172	29.53	OK
56	3	30	6.0	6.0	0.500	6	0.969	0.206	35.30	OK
57	3	30	7.5	3.0	0.800	9	0.800	0.156	31.18	NO
58	3	30	7.5	4.0	0.600	7	1.039	0.160	28.36	NO
59	3	30	7.5	5.0	0.480	6	1.219	0.171	28.54	NO
60	3	30	7.5	6.0	0.400	6	1.219	0.205	35.31	OK
61	3	30	9.0	3.0	0.667	9	0.967	0.155	31.07	NO
62	3	30	9.0	4.0	0.500	7	1.254	0.159	28.33	NO
63	3	30	9.0	5.0	0.400	6	1.469	0.170	28.56	NO
64	3	30	9.0	6.0	0.333	6	1.469	0.204	35.40	NO
65	5	90	4.5	3.0	2.222	25	0.144	0.313	92.06	OK
66	5	90	4.5	4.0	1.667	21	0.179	0.335	88.94	OK
67	5	90	4.5	5.0	1.333	19	0.201	0.373	94.35	OK
68	5	90	4.5	6.0	1.111	17	0.229	0.393	93.58	OK
69	5	90	6.0	3.0	1.667	26	0.195	0.308	88.05	OK
70	5	90	6.0	4.0	1.250	22	0.237	0.338	88.41	OK
71	5	90	6.0	5.0	1.000	19	0.280	0.357	86.55	OK
72	5	90	6.0	6.0	0.833	17	0.318	0.377	86.45	OK
73	5	90	7.5	3.0	1.333	27	0.242	0.310	88.14	OK
74	5	90	7.5	4.0	1.000	23	0.290	0.345	90.45	OK
75	5	90	7.5	5.0	0.800	20	0.339	0.369	90.09	OK
76	5	90	7.5	6.0	0.667	18	0.381	0.394	91.81	OK
77	5	90	9.0	3.0	1.111	28	0.285	0.316	90.08	OK
78	5	90	9.0	4.0	0.833	23	0.355	0.338	87.06	OK
79	5	90	9.0	5.0	0.667	20	0.414	0.362	87.33	OK
80	5	90	9.0	6.0	0.556	18	0.465	0.387	89.03	OK

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	a (m)	V ₁ (m/s)	G _{FINAL} (s ⁻¹)	≥ 1/3H
81	5	70	4.5	3.0	2.222	22	0.169	0.266	71.42	OK
82	5	70	4.5	4.0	1.667	18	0.215	0.279	66.81	OK
83	5	70	4.5	5.0	1.333	16	0.246	0.305	68.70	OK
84	5	70	4.5	6.0	1.111	14	0.287	0.314	66.10	OK
85	5	70	6.0	3.0	1.667	23	0.225	0.267	70.54	OK
86	5	70	6.0	4.0	1.250	19	0.280	0.286	68.44	OK
87	5	70	6.0	5.0	1.000	17	0.318	0.314	70.96	OK
88	5	70	6.0	6.0	0.833	15	0.365	0.329	70.03	OK
89	5	70	7.5	3.0	1.333	24	0.277	0.271	71.82	OK
90	5	70	7.5	4.0	1.000	20	0.339	0.295	71.22	OK
91	5	70	7.5	5.0	0.800	17	0.406	0.308	68.59	OK
92	5	70	7.5	6.0	0.667	15	0.465	0.323	67.86	OK
93	5	70	9.0	3.0	1.111	24	0.339	0.265	69.09	OK
94	5	70	9.0	4.0	0.833	20	0.414	0.290	68.99	OK
95	5	70	9.0	5.0	0.667	17	0.494	0.304	66.81	OK
96	5	70	9.0	6.0	0.556	15	0.565	0.319	66.48	OK
97	5	50	4.5	3.0	2.222	18	0.215	0.209	49.20	OK
98	5	50	4.5	4.0	1.667	15	0.265	0.226	48.30	OK
99	5	50	4.5	5.0	1.333	13	0.312	0.240	47.63	OK
100	5	50	4.5	6.0	1.111	12	0.341	0.264	50.53	OK
101	5	50	6.0	3.0	1.667	19	0.280	0.214	50.26	OK
102	5	50	6.0	4.0	1.250	16	0.340	0.235	50.75	OK
103	5	50	6.0	5.0	1.000	14	0.394	0.254	51.45	OK
104	5	50	6.0	6.0	0.833	12	0.466	0.258	48.31	OK
105	5	50	7.5	3.0	1.333	19	0.359	0.209	48.19	OK
106	5	50	7.5	4.0	1.000	16	0.434	0.230	48.86	OK
107	5	50	7.5	5.0	0.800	14	0.501	0.250	50.04	OK
108	5	50	7.5	6.0	0.667	12	0.591	0.254	47.03	OK
109	5	50	9.0	3.0	1.111	20	0.414	0.217	51.09	OK
110	5	50	9.0	4.0	0.833	16	0.527	0.228	48.04	OK
111	5	50	9.0	5.0	0.667	14	0.608	0.247	48.94	OK
112	5	50	9.0	6.0	0.556	13	0.658	0.274	52.87	OK
113	5	30	4.5	3.0	2.222	14	0.287	0.157	31.98	OK
114	5	30	4.5	4.0	1.667	11	0.375	0.160	28.54	OK
115	5	30	4.5	5.0	1.333	10	0.416	0.180	31.05	OK
116	5	30	4.5	6.0	1.111	9	0.467	0.193	31.66	OK
117	5	30	6.0	3.0	1.667	14	0.394	0.152	30.10	OK
118	5	30	6.0	4.0	1.250	12	0.466	0.172	31.82	OK
119	5	30	6.0	5.0	1.000	10	0.566	0.177	29.99	OK
120	5	30	6.0	6.0	0.833	9	0.633	0.190	30.66	OK
121	5	30	7.5	3.0	1.333	14	0.501	0.150	29.14	OK
122	5	30	7.5	4.0	1.000	12	0.591	0.169	30.93	OK
123	5	30	7.5	5.0	0.800	10	0.716	0.175	29.17	OK
124	5	30	7.5	6.0	0.667	9	0.800	0.188	29.90	OK
125	5	30	9.0	3.0	1.111	14	0.608	0.148	28.91	OK

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	a (m)	V ₁ (m/s)	G _{FINAL} (s ⁻¹)	≥ 1/3H
126	5	30	9.0	4.0	0.833	12	0.716	0.168	30.19	OK
127	5	30	9.0	5.0	0.667	10	0.866	0.173	29.04	OK
128	5	30	9.0	6.0	0.556	9	0.967	0.186	29.81	OK
129	7	90	4.5	3.0	3.111	31	0.109	0.295	86.74	OK
130	7	90	4.5	4.0	2.333	27	0.131	0.327	88.37	OK
131	7	90	4.5	5.0	1.867	24	0.152	0.352	88.73	OK
132	7	90	4.5	6.0	1.556	22	0.169	0.380	91.42	OK
133	7	90	6.0	3.0	2.333	34	0.140	0.306	89.07	OK
134	7	90	6.0	4.0	1.750	29	0.171	0.334	88.59	OK
135	7	90	6.0	5.0	1.400	26	0.195	0.366	91.51	OK
136	7	90	6.0	6.0	1.167	23	0.225	0.381	89.12	OK
137	7	90	7.5	3.0	1.867	36	0.172	0.311	89.81	OK
138	7	90	7.5	4.0	1.400	31	0.206	0.347	92.42	OK
139	7	90	7.5	5.0	1.120	27	0.242	0.369	91.27	OK
140	7	90	7.5	6.0	0.933	24	0.277	0.387	90.00	OK
141	7	90	9.0	3.0	1.556	37	0.207	0.311	88.76	OK
142	7	90	9.0	4.0	1.167	31	0.254	0.337	87.47	OK
143	7	90	9.0	5.0	0.933	27	0.297	0.361	87.32	OK
144	7	90	9.0	6.0	0.778	25	0.324	0.397	92.86	OK
145	7	70	4.5	3.0	3.111	28	0.125	0.257	69.67	OK
146	7	70	4.5	4.0	2.333	24	0.152	0.282	69.68	OK
147	7	70	4.5	5.0	1.867	21	0.179	0.299	68.24	OK
148	7	70	4.5	6.0	1.556	19	0.201	0.320	69.12	OK
149	7	70	6.0	3.0	2.333	30	0.164	0.261	69.39	OK
150	7	70	6.0	4.0	1.750	26	0.195	0.293	72.07	OK
151	7	70	6.0	5.0	1.400	22	0.237	0.301	67.26	OK
152	7	70	6.0	6.0	1.167	20	0.264	0.325	69.34	OK
153	7	70	7.5	3.0	1.867	31	0.206	0.260	68.04	OK
154	7	70	7.5	4.0	1.400	27	0.242	0.295	71.75	OK
155	7	70	7.5	5.0	1.120	23	0.290	0.308	68.76	OK
156	7	70	7.5	6.0	0.933	21	0.321	0.334	71.53	OK
157	7	70	9.0	3.0	1.556	32	0.245	0.262	68.19	OK
158	7	70	9.0	4.0	1.167	27	0.297	0.289	68.87	OK
159	7	70	9.0	5.0	0.933	24	0.339	0.316	71.25	OK
160	7	70	9.0	6.0	0.778	21	0.393	0.327	68.94	OK
161	7	50	4.5	3.0	3.111	24	0.152	0.211	50.91	OK
162	7	50	4.5	4.0	2.333	20	0.189	0.227	49.09	OK
163	7	50	4.5	5.0	1.867	18	0.215	0.249	51.00	OK
164	7	50	4.5	6.0	1.556	16	0.246	0.261	50.32	OK
165	7	50	6.0	3.0	2.333	25	0.204	0.210	49.30	OK
166	7	50	6.0	4.0	1.750	21	0.250	0.229	49.10	OK
167	7	50	6.0	5.0	1.400	19	0.280	0.255	51.91	OK
168	7	50	6.0	6.0	1.167	17	0.318	0.270	52.05	OK
169	7	50	7.5	3.0	1.867	26	0.252	0.213	49.86	OK
170	7	50	7.5	4.0	1.400	22	0.305	0.234	50.14	OK

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	a (m)	V ₁ (m/s)	G _{FINAL} (s ⁻¹)	≥ 1/3H
171	7	50	7.5	5.0	1.120	19	0.359	0.249	49.67	OK
172	7	50	7.5	6.0	0.933	17	0.406	0.264	49.95	OK
173	7	50	9.0	3.0	1.556	27	0.297	0.216	50.75	OK
174	7	50	9.0	4.0	1.167	22	0.373	0.230	48.54	OK
175	7	50	9.0	5.0	0.933	19	0.438	0.245	48.20	OK
176	7	50	9.0	6.0	0.778	17	0.494	0.260	48.57	OK
177	7	30	4.5	3.0	3.111	18	0.215	0.150	29.85	OK
178	7	30	4.5	4.0	2.333	15	0.265	0.162	29.06	OK
179	7	30	4.5	5.0	1.867	13	0.312	0.172	28.85	OK
180	7	30	4.5	6.0	1.556	12	0.341	0.189	30.31	OK
181	7	30	6.0	3.0	2.333	19	0.280	0.153	30.43	OK
182	7	30	6.0	4.0	1.750	16	0.340	0.168	30.70	OK
183	7	30	6.0	5.0	1.400	14	0.394	0.181	30.64	OK
184	7	30	6.0	6.0	1.167	12	0.466	0.184	29.16	OK
185	7	30	7.5	3.0	1.867	19	0.359	0.149	28.97	OK
186	7	30	7.5	4.0	1.400	16	0.434	0.165	29.34	OK
187	7	30	7.5	5.0	1.120	14	0.501	0.178	29.77	OK
188	7	30	7.5	6.0	0.933	12	0.591	0.181	28.37	OK
189	7	30	9.0	3.0	1.556	20	0.414	0.155	30.89	OK
190	7	30	9.0	4.0	1.167	16	0.527	0.163	29.04	OK
191	7	30	9.0	5.0	0.933	14	0.608	0.176	29.51	OK
192	7	30	9.0	6.0	0.778	12	0.716	0.180	27.76	OK
193	9	90	4.5	3.0	4.000	37	0.085	0.294	89.60	OK
194	9	90	4.5	4.0	3.000	32	0.104	0.321	88.67	OK
195	9	90	4.5	5.0	2.400	29	0.119	0.350	90.86	OK
196	9	90	4.5	6.0	2.000	26	0.137	0.365	88.43	OK
197	9	90	6.0	3.0	3.000	41	0.110	0.303	90.17	OK
198	9	90	6.0	4.0	2.250	35	0.135	0.329	88.42	OK
199	9	90	6.0	5.0	1.800	31	0.157	0.354	88.67	OK
200	9	90	6.0	6.0	1.500	28	0.178	0.375	88.62	OK
201	9	90	7.5	3.0	2.400	44	0.134	0.311	91.59	OK
202	9	90	7.5	4.0	1.800	37	0.166	0.335	88.79	OK
203	9	90	7.5	5.0	1.440	33	0.191	0.364	90.75	OK
204	9	90	7.5	6.0	1.200	30	0.214	0.389	92.16	OK
205	9	90	9.0	3.0	2.000	46	0.159	0.314	91.48	OK
206	9	90	9.0	4.0	1.500	39	0.194	0.344	91.30	OK
207	9	90	9.0	5.0	1.200	34	0.228	0.365	89.79	OK
208	9	90	9.0	6.0	1.000	31	0.254	0.394	92.66	OK
209	9	70	4.5	3.0	4.000	33	0.100	0.250	68.42	OK
210	9	70	4.5	4.0	3.000	29	0.119	0.280	70.73	OK
211	9	70	4.5	5.0	2.400	26	0.137	0.304	71.97	OK
212	9	70	4.5	6.0	2.000	23	0.160	0.313	68.59	OK
213	9	70	6.0	3.0	3.000	36	0.130	0.256	68.61	OK
214	9	70	6.0	4.0	2.250	31	0.157	0.283	69.45	OK
215	9	70	6.0	5.0	1.800	27	0.186	0.299	67.61	OK

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	a (m)	V ₁ (m/s)	G _{FINAL} (s ⁻¹)	≥ 1/3H
216	9	70	6.0	6.0	1.500	25	0.204	0.327	71.16	OK
217	9	70	7.5	3.0	2.400	38	0.161	0.259	68.48	OK
218	9	70	7.5	4.0	1.800	33	0.191	0.291	71.19	OK
219	9	70	7.5	5.0	1.440	29	0.222	0.313	71.35	OK
220	9	70	7.5	6.0	1.200	26	0.252	0.331	71.22	OK
221	9	70	9.0	3.0	2.000	40	0.188	0.266	70.43	OK
222	9	70	9.0	4.0	1.500	34	0.228	0.292	70.75	OK
223	9	70	9.0	5.0	1.200	30	0.264	0.316	71.76	OK
224	9	70	9.0	6.0	1.000	26	0.310	0.323	67.93	OK
225	9	50	4.5	3.0	4.000	29	0.119	0.210	51.42	OK
226	9	50	4.5	4.0	3.000	25	0.144	0.231	51.77	OK
227	9	50	4.5	5.0	2.400	22	0.169	0.247	51.34	OK
228	9	50	4.5	6.0	2.000	20	0.189	0.265	52.32	OK
229	9	50	6.0	3.0	3.000	31	0.157	0.212	50.85	OK
230	9	50	6.0	4.0	2.250	26	0.195	0.228	49.30	OK
231	9	50	6.0	5.0	1.800	23	0.225	0.247	49.96	OK
232	9	50	6.0	6.0	1.500	21	0.250	0.267	51.70	OK
233	9	50	7.5	3.0	2.400	32	0.198	0.210	49.38	OK
234	9	50	7.5	4.0	1.800	27	0.242	0.230	49.31	OK
235	9	50	7.5	5.0	1.440	24	0.277	0.251	50.74	OK
236	9	50	7.5	6.0	1.200	21	0.321	0.260	48.92	OK
237	9	50	9.0	3.0	2.000	33	0.236	0.212	49.47	OK
238	9	50	9.0	4.0	1.500	28	0.285	0.234	50.25	OK
239	9	50	9.0	5.0	1.200	24	0.339	0.246	48.69	OK
240	9	50	9.0	6.0	1.000	22	0.373	0.268	50.95	OK
241	9	30	4.5	3.0	4.000	22	0.169	0.148	29.74	OK
242	9	30	4.5	4.0	3.000	19	0.201	0.166	30.64	OK
243	9	30	4.5	5.0	2.400	17	0.229	0.182	31.60	OK
244	9	30	4.5	6.0	2.000	15	0.265	0.189	30.62	OK
245	9	30	6.0	3.0	3.000	23	0.225	0.148	29.02	OK
246	9	30	6.0	4.0	2.250	20	0.264	0.168	30.73	OK
247	9	30	6.0	5.0	1.800	17	0.318	0.175	29.38	OK
248	9	30	6.0	6.0	1.500	15	0.365	0.183	28.89	OK
249	9	30	7.5	3.0	2.400	24	0.277	0.150	29.52	OK
250	9	30	7.5	4.0	1.800	20	0.339	0.164	29.33	OK
251	9	30	7.5	5.0	1.440	18	0.381	0.182	31.06	OK
252	9	30	7.5	6.0	1.200	16	0.434	0.192	30.70	OK
253	9	30	9.0	3.0	2.000	25	0.324	0.154	30.54	OK
254	9	30	9.0	4.0	1.500	21	0.393	0.170	30.76	OK
255	9	30	9.0	5.0	1.200	18	0.465	0.179	30.00	OK
256	9	30	9.0	6.0	1.000	16	0.527	0.190	30.03	OK

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV. VALIDACIÓN DEL MODELO CFD FLOW-3D

4.1 GEOMETRÍA Y CONDICIONES DE FRONTERA

La validación del modelo computacional es un paso importante en el proceso de simulación porque permite conocer el comportamiento real del flujo. Cuando se trata de estudios con CFD, AIAA (1998) define “validación” como el proceso de determinar el grado en que un modelo es una representación precisa del mundo real desde la perspectiva del uso previsto del modelo. En esta investigación la validación del modelo FLOW-3D se realizó utilizando los datos numéricos de velocidad (validados experimentalmente) reportados por Kim et al. (2010), los cuales han servido de base para la validación de otros estudios (Demirel y Aral, 2016 y Zhang, Martinez y Zhang, 2013).

Cabe señalar que Kim et al. (2010) en su investigación utilizaron el modelo físico de una cámara de contacto de flujo vertical (ver Figura N° 17), pero debido a que esta estructura de tratamiento de agua es muy similar a un tanque de floculación de flujo vertical, por presentar pantallas o deflectores, los resultados encontrados en la unidad de cloración pueden ser utilizados para el escenario de un tanque de floculación vertical.

En la Figura N° 17 se puede observar las dimensiones de la cámara de contacto, esta estructura cuenta con cuatro compartimentos que poseen un ancho (W) de 0.113 m, la altura de las pantallas (D) es de 0.18 m. Además, la cámara posee un ancho (L) de 0.23 m y presenta una altura de agua (H) constante de 0.21 m en toda la unidad. También, en el estudio se consideró un caudal constante de ingreso de 0.202 l/s con el cual se obtiene una velocidad promedio de entrada (Ve) a la unidad de 0.02927 m/s. Asimismo, el valor de la densidad del agua con la que se trabajó en esta investigación fue de 1,000 kg/m³ y se consideró una viscosidad dinámica igual a 0.001 N.s/m², todos estos valores son idénticos a los utilizados por Kim et al. (2010) en sus simulaciones.

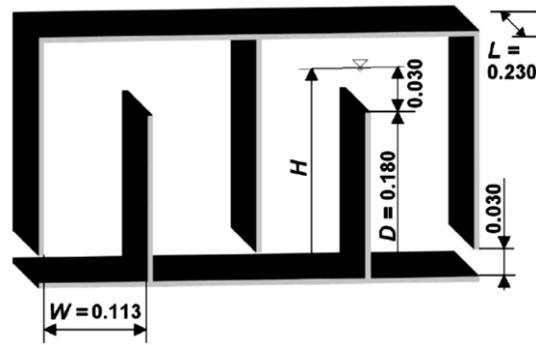


Figura N° 17 Esquema de la cámara de contacto de flujo vertical utilizada para la validación del modelo FLOW-3D (Kim et al., 2010).

Por otra parte, las condiciones de frontera se establecieron de la siguiente manera: en la entrada y salida del tanque se definió una condición de frontera del tipo velocidad o “velocity” igual a 0.02927 m/s, en las paredes y en la cara superior una condición de borde del tipo “symmetry” y por último en la base una condición del tipo “wall” tal y como se puede observar en la Figura N° 18.

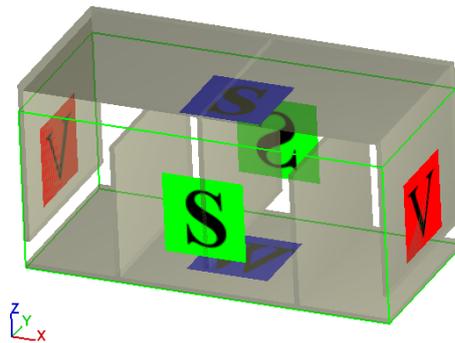


Figura N° 18 Condiciones de frontera utilizadas para la validación del modelo FLOW-3D.
Fuente: Elaboración propia.

4.2 ELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA

En el programa FLOW-3D existen diferentes modelos de turbulencia disponibles como son el modelo de longitud de mezcla de Prandtl, el modelo de dos ecuaciones ecuaciones $k-\epsilon$ y RNG $k-\epsilon$ y un modelo de grandes vórtices LES (Flow Science, 2017). En esta etapa se compararon tres modelos de turbulencia los cuales fueron: $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ y LES. También, para las simulaciones se consideró un tamaño de malla promedio de 3 mm que se obtuvo como una primera aproximación con ayuda de la herramienta FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) disponible en el programa. Asimismo, en este punto se optó por efectuar simulaciones en dos dimensiones (plano XZ) con

la finalidad de reducir el número total de celdas y; por consiguiente, el tiempo de cálculo computacional.

En la Figura N° 19, Figura N° 20 y Figura N° 21 se muestran la distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para diferentes elevaciones ($y/H = 0.27, 0.5$ y 0.72), cabe señalar que Kim et al. (2010) en sus gráficos 2D consideran al eje z como eje y. En las figuras mencionadas se aprecia que el modelo computacional FLOW-3D en general puede predecir con precisión las zonas con altas velocidades (cortocircuitos) así como las zonas muertas o de recirculación (valores negativos de velocidad).

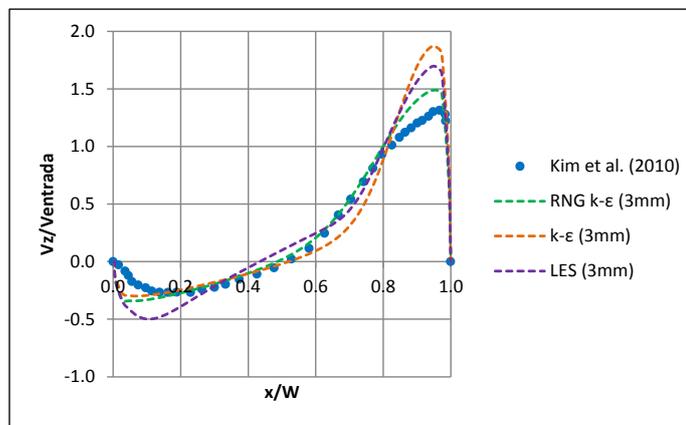


Figura N° 19 Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para una elevación de $y/H = 0.27$.

Fuente: Elaboración propia.

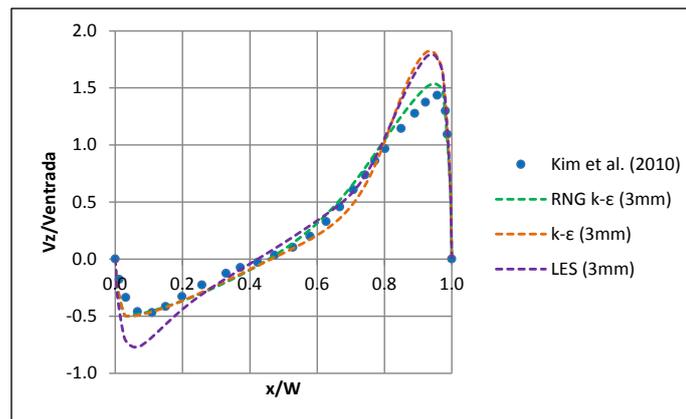


Figura N° 20 Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para una elevación de $y/H = 0.5$.

Fuente: Elaboración propia.

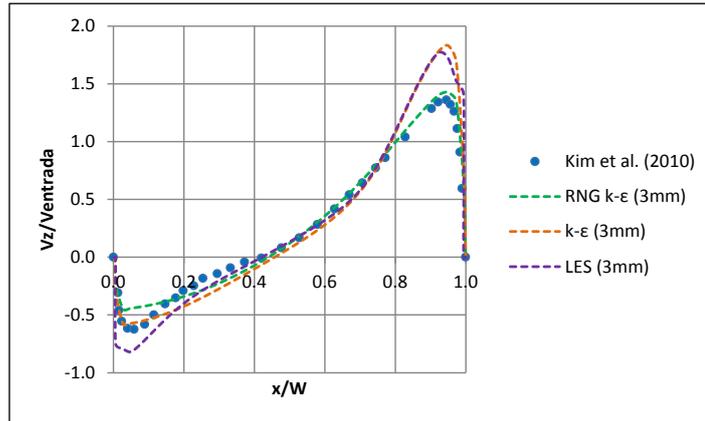


Figura N° 21 Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para una elevación de $y/H = 0.72$.

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados se distingue que los perfiles de velocidad calculados se desvían claramente de los del flujo pistón; es decir, de un perfil de velocidad uniforme. Asimismo, en las figuras anteriores se aprecia que el modelo de turbulencia RNG k- ϵ se ajusta mejor a los datos obtenidos por Kim et al. (2010), además se observa como los modelos k- ϵ y LES sobreestiman los valores de velocidad.

Por otra parte, en la Figura N° 22 se muestra la distribución de la magnitud de velocidad dentro de la cámara de contacto obtenida por Kim et al. (2010). En esta figura se ve que a medida que el flujo sale de cada compartimento, cerca del fondo o cerca de la superficie libre, se acelera al doble la velocidad promedio esto debido a la presencia de los deflectores.

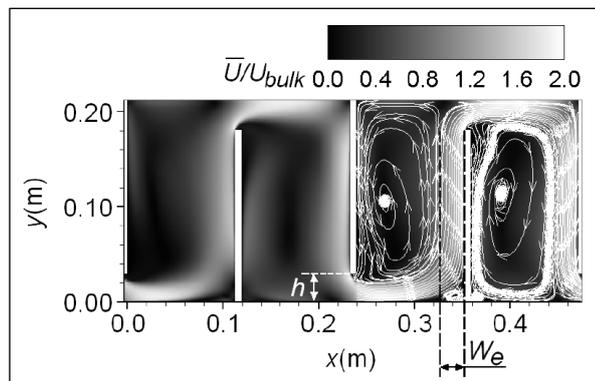


Figura N° 22 Distribución de la magnitud de velocidad dentro de la cámara de contacto para el plano ubicado a la mitad del ancho de la estructura (Kim et al., 2010).

En general los tres modelos de turbulencia examinados reproducen correctamente los patrones del flujo dentro de la cámara de contacto como puede observarse en la Figura N° 23, Figura N° 24 y Figura N° 25.

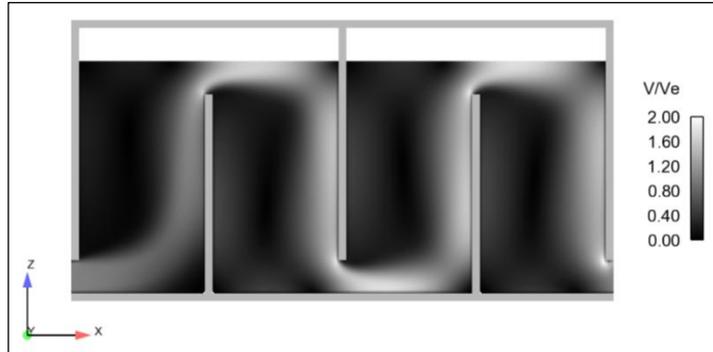


Figura N° 23 Distribución de la magnitud de velocidad en la cámara de contacto obtenida con el modelo de turbulencia RNG k- ϵ .

Fuente: Elaboración propia.

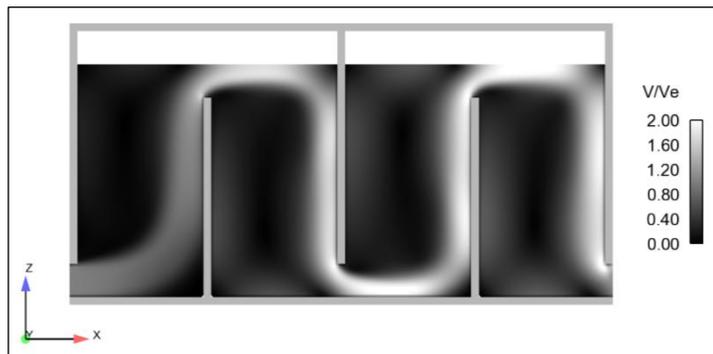


Figura N° 24 Distribución de la magnitud de velocidad en la cámara de contacto obtenida con el modelo de turbulencia k- ϵ .

Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 25 Distribución de la magnitud de velocidad en la cámara de contacto obtenida con el modelo de turbulencia LES.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, luego de comparar los resultados obtenidos con los tres modelos de turbulencia (RNG k- ϵ , k- ϵ y LES). Para todo el proceso de simulación siguiente se decidió trabajar con el modelo de turbulencia RNG k- ϵ por ajustarse mejor a los datos reportados por Kim et al. (2010) y; además, por ser uno de los modelos de turbulencia más precisos y robustos disponibles en el programa FLOW-3D (Flow Science, 2017).

4.3 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE MALLA

Luego de la selección del modelo de turbulencia RNG k- ϵ el paso siguiente fue definir el tamaño adecuado de malla para el proceso de simulación, la determinación cuidadosa del tamaño de malla no solo posibilita la precisión deseada en los resultados sino también la optimización del tiempo de cálculo computacional requerido. Por esta razón se analizaron diferentes tamaños de malla como se indica en la Tabla N° 6.

Tabla N° 6 Tamaños de malla evaluados en las simulaciones.

Tamaño de malla promedio (mm)	Nro total de celdas	Nro de celdas entre pantallas
2	26,596	56
3	11,736	37
5	4,214	22
7	2,100	15

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 26, Figura N° 27 y Figura N° 28 se observan los resultados obtenidos para los diferentes tamaños de malla, en estas figuras se nota que a pesar de que existe un incremento en el tamaño de malla el modelo de turbulencia RNG k- ϵ sigue reproduciendo de manera correcta los patrones de flujo dentro de la unidad. Lo anterior demuestra que las mallas computacionales seleccionadas siguen siendo lo suficientemente finas como para capturar con precisión el flujo turbulento dentro del tanque.

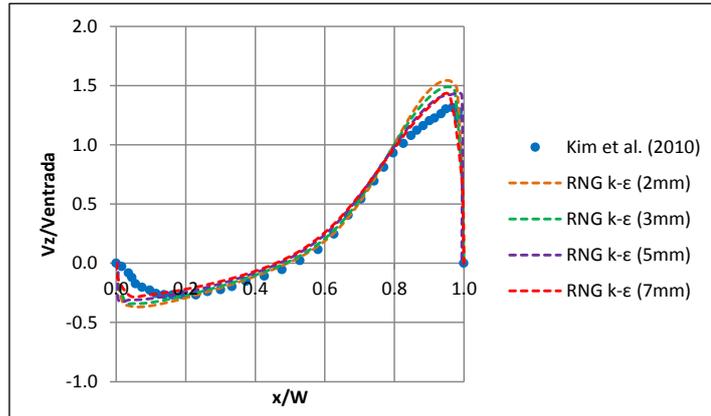


Figura N° 26 Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para diferentes tamaños de malla ($y/H = 0.27$).

Fuente: Elaboración propia.

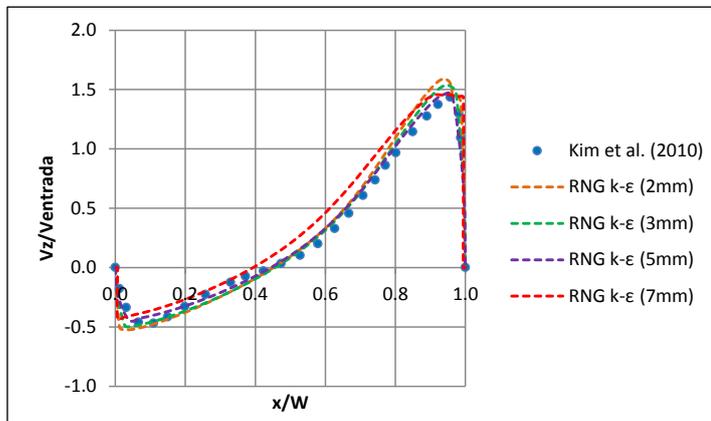


Figura N° 27 Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para diferentes tamaños de malla ($y/H = 0.5$).

Fuente: Elaboración propia.

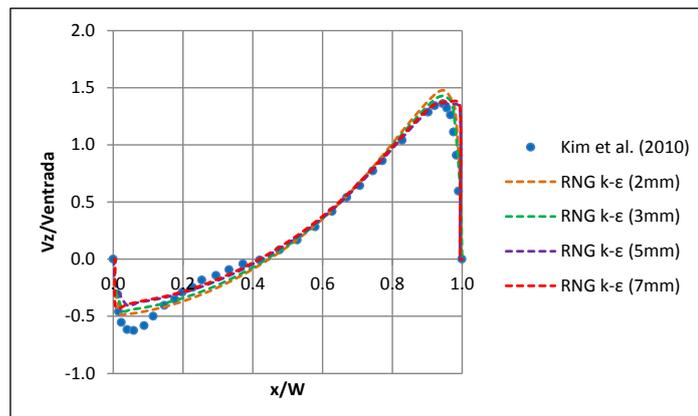


Figura N° 28 Distribución de la componente z de velocidad (V_z) a lo largo de la longitud del tercer tramo para diferentes tamaños de malla ($y/H = 0.72$).

Fuente: Elaboración propia.

Debido a la gran cantidad de simulaciones que se realizarán en el proceso de simulación siguiente, con diferentes dimensiones, efectuar un análisis similar al anterior demandaría una gran cantidad de tiempo. Por ello, se decidió seleccionar el tamaño adecuado de malla promedio para cada simulación en base a la condición de que el número de celdas (o divisiones) entre pantallas consecutivas se encuentre comprendido entre un rango de 15 a 37 celdas, dependiendo del espaciamiento entre pantallas.

CAPÍTULO V. SIMULACIÓN NUMÉRICA

5.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Una vez realizado el diseño de todos los tanques de floculación vertical (ver Tabla N° 5), y la validación del programa, se procedió a realizar la simulación numérica de las unidades de floculación con el modelo FLOW-3D versión 11.2, el cual se destaca principalmente por simular fluidos en lámina libre y modelar regiones geométricas complejas. En la Tabla N° 7 se observa el valor de los parámetros utilizados en la etapa de simulación numérica.

Tabla N° 7 Parámetros utilizados en el proceso de simulación.

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura del agua (T°)	20	$^{\circ}\text{C}$
Densidad del agua (ρ)	998.29	kg/m^3
Viscosidad dinámica del agua (μ)	1.002E-03	N.s/m^2
Rugosidad absoluta del concreto	1.00E-03	m
Rugosidad absoluta de las pantallas de PVC	1.50E-06	m
Aceleración de la gravedad (g)	9.81	m/s^2

Fuente: Elaboración propia.

Como se explicó a detalle en el capítulo anterior, el modelo de turbulencia elegido para las simulaciones fue el RNG k- ϵ (Choudhury, 1993), por ser el que mejor se ajustaba a los resultados obtenidos por Kim et al. (2010). También, todas las simulaciones fueron realizadas en dos dimensiones (plano XZ) debido a que los tanques en donde el flujo es serpenteante y contornea las pantallas interiores generalmente se han modelado bajo la premisa de que las variaciones de las cantidades relevantes en la dirección perpendicular, en este estudio en la dirección del ancho del tanque, al sentido de la corriente son sustancialmente menores que las variaciones de las cantidades en el sentido principal de la corriente (Xu, 2010; Templeton, Hofmann y Andrews, 2006; Hannoun, Boulos y List, 1998 y Crozes et al., 1999). Lo cual concuerda con los hallazgos experimentales encontrados por Teixeira y Shiono (2000) en donde se observó que el flujo en este tipo de tanques tenía principalmente una naturaleza bidimensional con excepción de las regiones de entrada y salida. Por lo mencionado anteriormente, se pueden aplicar modelos bidimensionales para describir la hidrodinámica y los procesos de transferencia de masa en las

unidades de floculación. La gran ventaja de utilizar modelos bidimensionales es que reducen significativamente el tiempo de cálculo computacional y la complejidad general del modelado en comparación con los modelos tridimensionales.

Asimismo, para la estimación del gradiente de velocidad local (G_{Local}) se empleó la Ecuación 6 aplicada por Haarhoff y Van der Walt (2001), igualmente la estimación de la microescala de longitud turbulenta (η) se realizó con la Ecuación 7. De las referidas ecuaciones, con el programa FLOW-3D se halló la disipación de energía turbulenta local (ϵ) y esta seguidamente fue transformada a G y η aplicando las herramientas de cálculo disponibles en el programa. Por otro lado, las simulaciones se llevaron a cabo con un ordenador con procesador Intel Core i7-10510U (4 procesadores de 1.8 GHz), memoria RAM de 16.0 GB (DDR4) y sistema operativo Windows 8 de 64 bits.

5.2 CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA, GENERACIÓN DE LA MALLA Y DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA

Para la elaboración de la geometría se utilizó el programa AutoCAD en la versión 2020, posteriormente la geometría se exportó al formato de intercambio Stereolithography (cuya extensión es “.stl”), el cual es utilizado por el programa FLOW-3D. En la Figura N° 29 se muestra un ejemplo de la geometría en 3D importada en el programa FLOW-3D.

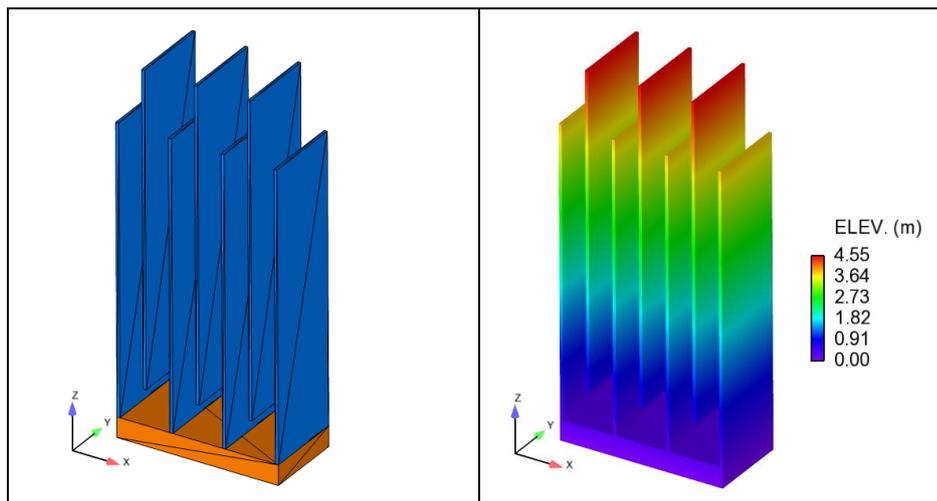


Figura N° 29 Geometría en 3D (izquierda) y elevación (derecha) del tanque de floculación vertical ($G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al mallado (ver Figura N° 31), en todas las simulaciones de las unidades se trabajó con un mallado computacional conformado por un solo bloque o prisma rectangular. Seguidamente se definieron las condiciones de borde que se detallan a continuación.

En el ingreso del tanque se estableció una condición de borde del tipo caudal o “volume flow rate” (caudal constante de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$) con la cual el programa calculará la velocidad de entrada en el tanque en las celdas activas de la superficie de entrada. Por otra parte, en la cara superior se asignó una condición de borde de presión o “pressure” con una presión igual a 0; es decir, no se consideró el valor de la presión atmosférica en las simulaciones.

Asimismo, en la base inferior del dominio, en donde todas las celdas se encuentran a lo largo de contornos sólidos caracterizados por la base de la estructura, una condición de frontera del tipo pared o “wall”; este tipo de condición de frontera considera velocidades cero en la frontera, lo que no permite que el fluido escape de la malla. Sin embargo, los efectos viscosos son calculados en el límite de la pared (Flow Science, 2017).

En las superficies laterales se consideró una condición del tipo “symmetry” que es compatible con modelos bidimensionales. La condición de contorno de simetría es muy útil en problemas de flujo de superficie libre. Esta condición de contorno considera una simetría en la región de malla para predecir las mismas condiciones de fluido en la región sin malla. Asimismo, en este tipo de condición de frontera no se calculan esfuerzos cortantes a través de la frontera. Además, las transferencias de flujo y calor no están permitidas. Esta condición de frontera puede ser aplicable en todas las caras de la malla donde no existe una condición impuesta de velocidad o presión, básicamente manteniendo las características del flujo dentro de la malla, evitando ondas de presión dentro o fuera del dominio computacional del problema (Flow Science, 2017).

Finalmente, a la salida de la unidad se asignó una condición del tipo “pressure”. La especificación de la presión como condición de contorno en una o más regiones es una herramienta importante para las simulaciones de flujo a superficie libre. Este tipo de condición de contorno puede representar embalses, control hidráulico en canales o presiones de equipos mecánicos. En este estudio se consideró la condición del tipo presión de estancamiento la cual considera

condiciones de estancamiento fuera de la región límite; es decir, considera las velocidades iguales a cero. Para esta condición, es necesario especificar la altura de presión expresada en metros de altura de agua la cual definirá el nivel de agua a la salida de la unidad.

Para estimar la altura de agua a la salida de la unidad (H') se tuvo en cuenta el proceso de dimensionamiento mostrado en la Tabla N° 4, en donde se aprecia que la pérdida de carga total en el tanque (h_f) se obtiene al considerar tanto la pérdida de carga continua en la unidad (h_1) como las pérdidas de carga en las vueltas (h_2). De acuerdo con CEPIS (2004b) el valor de la altura de agua a la salida de la unidad se verá levemente reducida esto debido a la pérdida de carga total en el tanque (h_f), teniendo en consideración lo anterior se estimó de forma práctica la pérdida de carga total en el sexto canal (h_f') realizando una proporción entre la longitud correspondiente a los seis primeros canales (L') y longitud total del tanque (L) como se observa en la Figura N° 30. Una vez hallado h_f' se calculó el valor de la altura de agua a la salida del sexto canal ($H' = H - h_f'$). Seguidamente, este valor expresado en metros fue insertado en el programa como condición de salida.

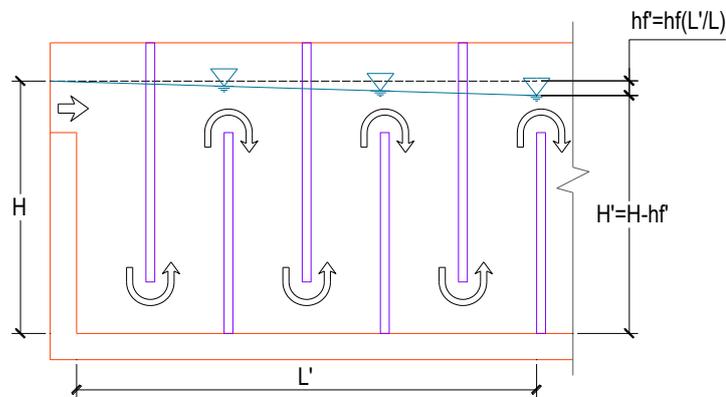


Figura N° 30 Representación gráfica de la influencia de la pérdida de carga total (h_f) sobre la altura de agua del tanque.

Fuente: Elaboración propia.

Para evitar horas de simulación innecesarias se estableció como condición inicial una altura de agua igual al nivel de salida de la unidad; es decir, la simulación comenzó cuando el tanque de floculación se encontraba lleno. En la Figura N° 31 se observa un modelo de la malla computacional y las condiciones de frontera utilizadas en esta investigación.

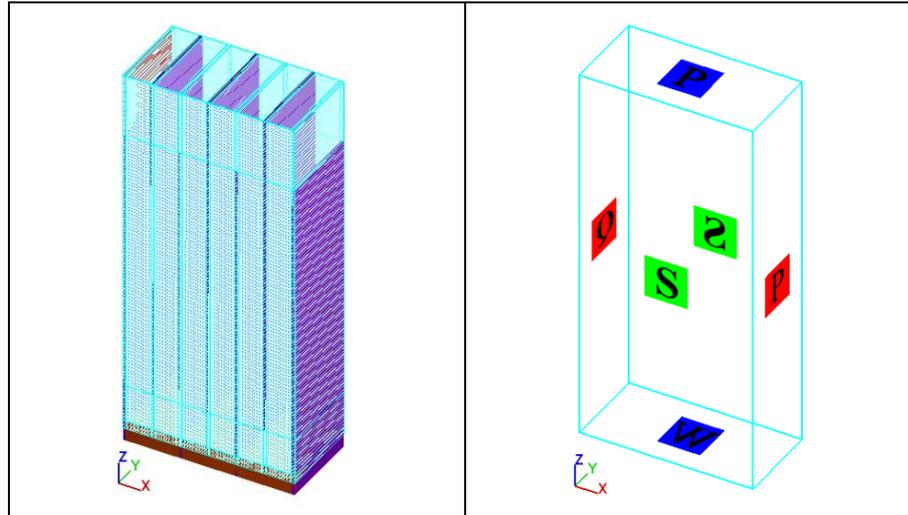


Figura N° 31 Mallado (izquierda) y condiciones de frontera (derecha) de la unidad de floculación siendo Q = volume flow rate, P = pressure, W = wall y S = symmetry ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).

Fuente: Elaboración propia.

5.3 OPCIONES NUMÉRICAS

De acuerdo a Flow Science (2017) el método de iteración GMRES (generalized minimal residual) es computacionalmente más eficiente que el algoritmo SOR (successive over - relaxation), ya que es capaz de converger con mucho menos iteraciones. Por ello, en todas las simulaciones efectuadas se utilizó este método de iteración conjuntamente con un método implícito de resolución de presión, el cual es recomendado para flujos incompresibles.

Por otra parte, se está considerando aproximaciones numéricas explícitas para el cálculo de la advección del momentum, y de todas las demás magnitudes del fluido. Asimismo, Flow Science (2017) indica que los métodos explícitos son precisos y simples, pero es necesario limitar en el tamaño máximo del paso de tiempo en las simulaciones.

En el programa existen diferentes métodos para efectuar el seguimiento de las interfases del fluido algunos más adecuados que otros dependiendo del tipo de problema. En la presente investigación, se empleó el método Split Lagrangian (conocido también como TruVOF) que es similar al método VOF debido a que presenta una buena aproximación en el seguimiento de interfases fuertes (agua/aire), lo cual resulta adecuado para la simulación de las unidades de

floculación de flujo vertical. Las opciones numéricas restantes no fueron modificadas y se dejaron por defecto.

5.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS VARIABLES HIDRODINÁMICAS

Con la finalidad de reducir el tiempo de cálculo computacional y el número total de celdas se decidió modelar sólo los seis primeros canales verticales de cada tanque de floculación. Esta simplificación se justifica debido a que se observa un campo de velocidad repetitivo a lo largo de toda la unidad (ver Figura N° 32).

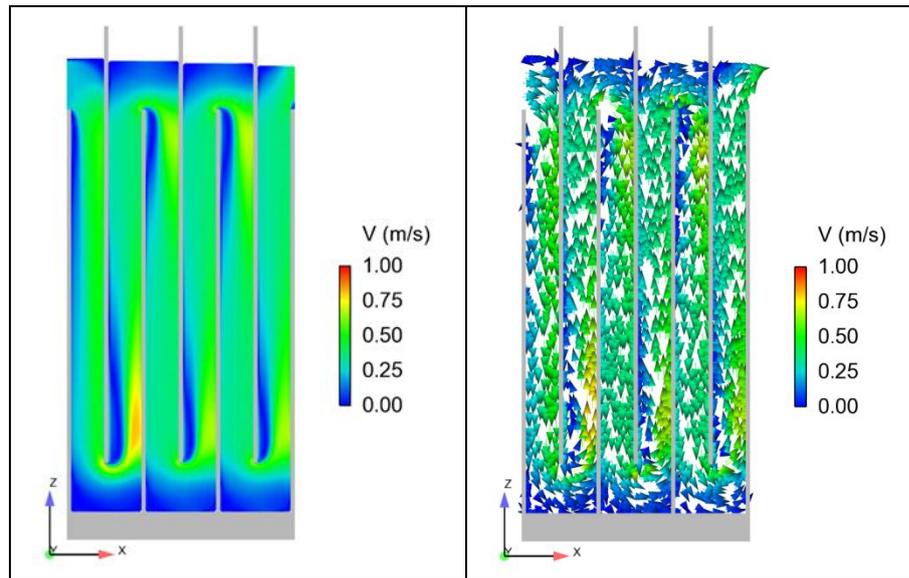


Figura N° 32 Magnitud de velocidad (izquierda) y vectores de velocidad (derecha) de la unidad de floculación ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 32 se muestra la presencia de altas velocidades (cortocircuitos) después de que el flujo cambia de un canal a otro. También se observa una zona de recirculación la cual se genera en la esquina de cada deflector y se prolonga una distancia importante (aproximadamente hasta la parte media de la altura del tanque). Si la longitud de la pantalla es pequeña el perfil de flujo solo podrá desarrollarse parcialmente, en cambio en canales largos se desarrollará en su totalidad. Los cortocircuitos y las zonas de recirculación reducen e incrementan, respectivamente, el tiempo de residencia dentro de las unidades lo que da como resultado una reducción de la eficiencia hidráulica del tanque (Zhang et al., 2013). Por otro lado, los deflectores son los causantes indiscutibles de generar gran cantidad de turbulencia en el tanque. Esta turbulencia se produce cuando el fluido es obligado a desplazarse a través de una trayectoria curvilínea y cuando

las grandes velocidades que se desarrollan al salir de un compartimiento a otro inciden sobre las paredes de las pantallas (Haarhoff y Van der Walt, 2001). En la Figura N° 33 se observa como la energía cinética turbulenta local (izquierda) varía espacialmente, la cual está vinculada con la generación de turbulencia. Asimismo, se observa la variación espacial de la disipación de energía cinética turbulenta asociada a la escala de longitud de los remolinos que se generan en el campo de flujo turbulento. Según los valores obtenidos con el FLOW-3D los remolinos más grandes se producirán en el extremo de cada pantalla.

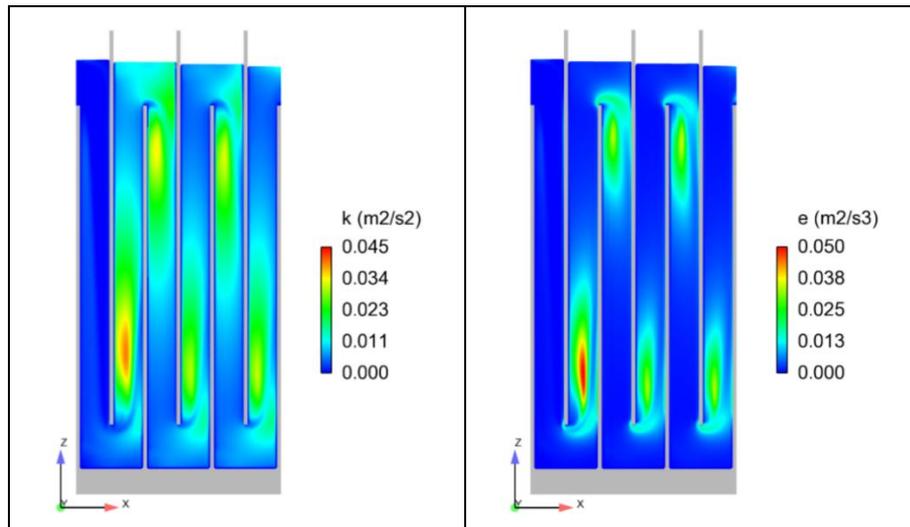


Figura N° 33 Variación espacial de la energía cinética turbulenta (k), izquierda; y disipación de energía turbulenta (ϵ), derecha ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).

Fuente: Elaboración propia.

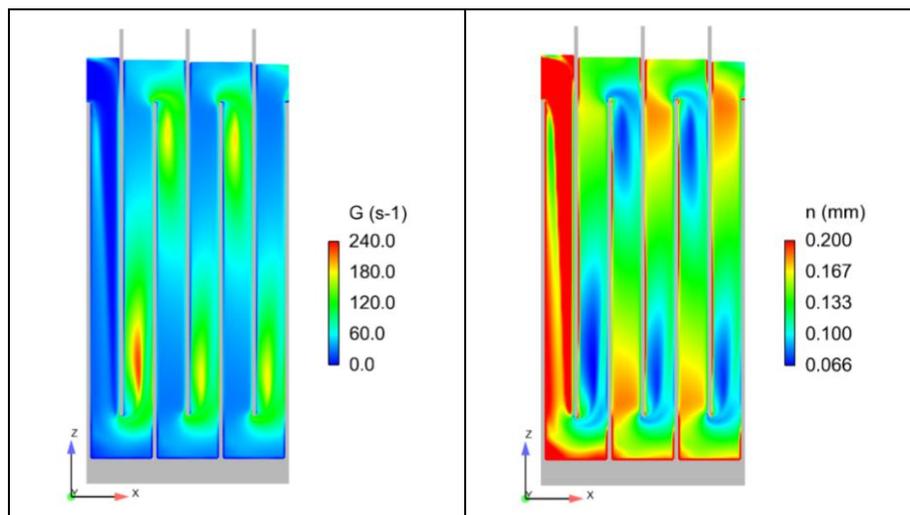


Figura N° 34 Variación espacial del gradiente de velocidad local (G_{Local}), izquierda; y microescala turbulenta (η), derecha ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 7.5 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ y $b = 1 \text{ m}$).

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos con el modelo numérico se puede observar que la distribución del gradiente de velocidad local (G_{Local}) dentro de una unidad de floculación claramente no es uniforme (ver Figura N° 34); por ende, utilizar un valor promedio no sería suficiente para lograr el diseño adecuado de los tanques de floculación en donde el campo de velocidades tridimensional posee un rol fundamental (Bridgeman et al., 2009). Muchos investigadores han manifestado que la concepción de gradiente de velocidad promedio es equivocada, debido a que simplifica un campo de flujo complejo a través de un único valor (Clark, 1985; Cleasby, 1984 y Graber, 1994). Considerar un valor promedio es errado porque justamente son las variaciones de cizallamiento local lo que garantiza que se lleve a cabo el proceso de floculación de las partículas. En la Figura N° 34 (derecha) se aprecia la distribución espacial de la microescala de longitud (η), el fraccionamiento de las partículas floculantes pequeñas (menores que η) sería ocasionada por los remolinos en la zona de flujo laminar, en donde la disipación de energía se realiza por efecto de la viscosidad. Asimismo, para las partículas floculantes mayores a η la fragmentación sería provocada debido a la turbulencia con disipación de energía producto de la inercia (CEPIS, 2004a).

Por otra parte, para la evaluación de la eficiencia de todos los tanques de floculación vertical se emplearon los índices de eficiencia hidráulicos IM y θ_{10} , los cuales fueron calculados en base a las curvas de distribución del tiempo de residencia (ver Figura N° 35), obtenidas a partir de la simulación del ingreso de un trazador (por dosificación continua) a la entrada de la unidad de floculación (ver Figura N° 36).

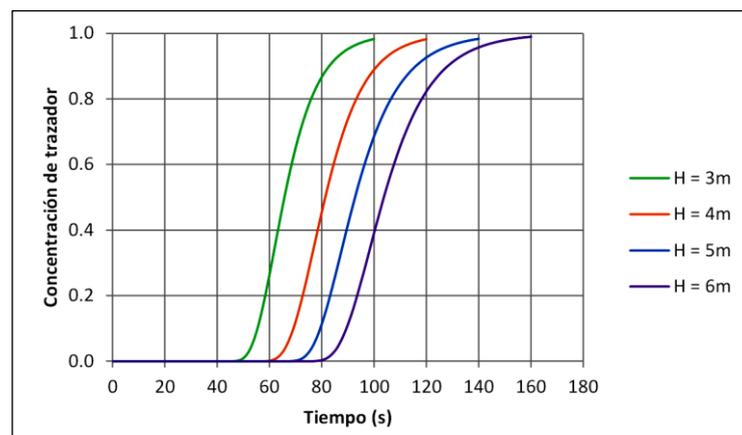


Figura N° 35 Curvas de distribución del tiempo de residencia para diferentes alturas de agua ($G_{DISEÑO} = 70 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$ y $L = 6 \text{ m}$).

Fuente: Elaboración propia.

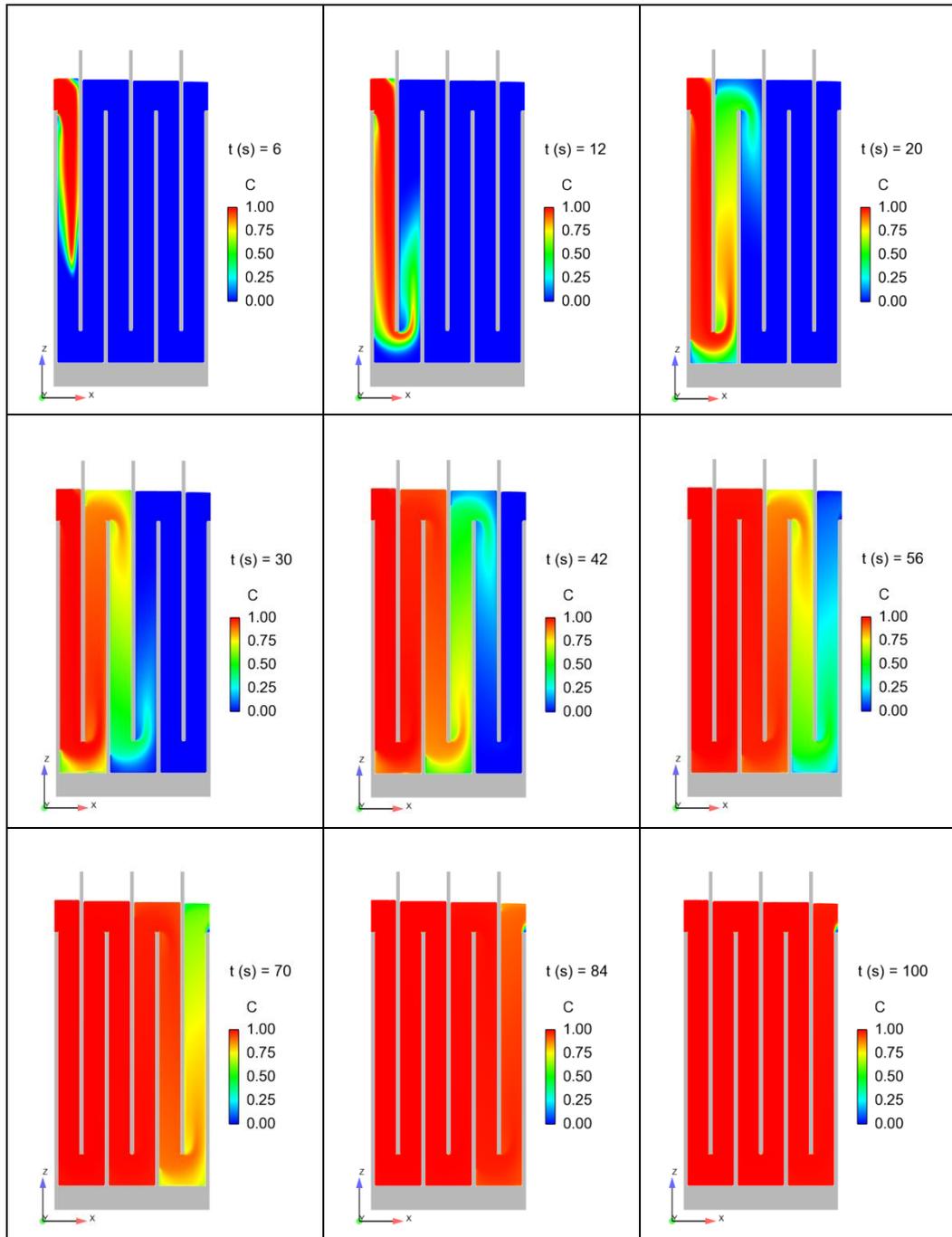


Figura N° 36 Concentración del trazador a través del tiempo a lo largo del tanque de floculación ($G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $L = 6 \text{ m}$, $H = 3 \text{ m}$ y $b = 1.66 \text{ m}$).

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en el Anexo 1 se muestra una tabla resumen de todos los resultados obtenidos en la etapa de simulación para los 256 diseños de tanques de floculación. En el Anexo 2 se muestran algunos resultados gráficos obtenidos en las simulaciones. Asimismo, en el Anexo 3 se presentan sus respectivas curvas de distribución del tiempo de residencia.

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 GRADIENTE DE VELOCIDAD PROMEDIO

En este punto se analizó la relación que existe entre gradiente de velocidad promedio calculado con el programa FLOW-3D y los parámetros de diseño. En la Figura N° 37, Figura N° 38, Figura N° 39 y Figura N° 40 se puede observar claramente como los valores de gradiente de velocidad promedio calculados con el programa, para un mismo gradiente promedio de diseño, disminuyen a medida que se reduce la longitud del tanque y en muchos casos no se alcanzan los gradientes promedios con los que fueron diseñados, lo cual es de gran importancia debido a que se estarían cometiendo errores cuando se aplica el diseño convencional (basado en la pérdida de carga total y velocidad promedio) propuesto por CEPIS (2004b). Estos valores bajos de gradiente de velocidad no favorecerán la formación flóculos y provocará un aumento de la turbidez del agua y, por lo tanto, una disminución de la eficiencia de la unidad.

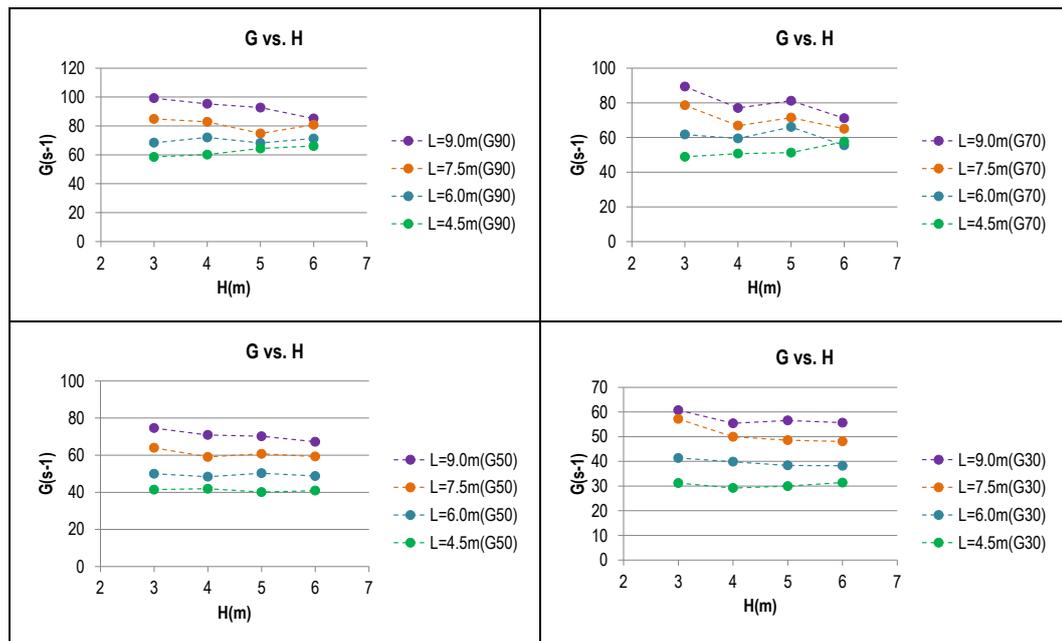


Figura N° 37 Relación entre el gradiente de velocidad promedio ($G_{FLOW-3D}$) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 s^{-1}, 70 s^{-1}, 50 s^{-1}, 30 s^{-1}$ y $T = 3$ min).

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 41 se muestra una comparación entre dos diseños diferentes de tanques de floculación para un mismo gradiente de velocidad promedio de diseño y altura de agua con diferentes longitudes, aquí se distingue como el incremento de la longitud del tanque, y espaciamiento entre pantallas, favorece

el desarrollo de turbulencia en los canales verticales esto a su vez ocasiona un aumento del gradiente.

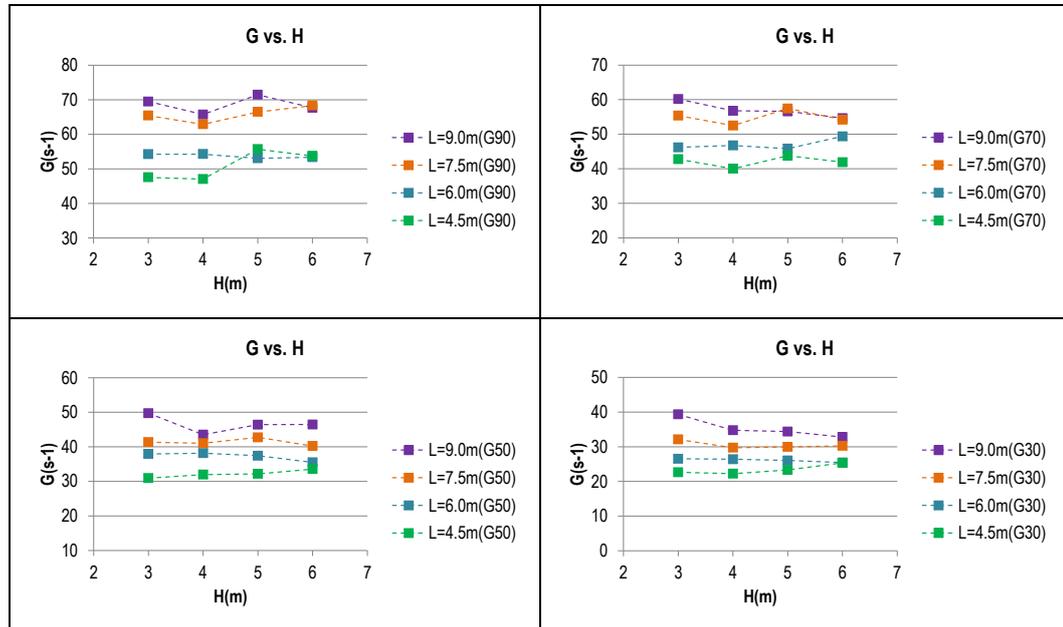


Figura N° 38 Relación entre el gradiente de velocidad promedio ($G_{\text{FLOW-3D}}$) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 5 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

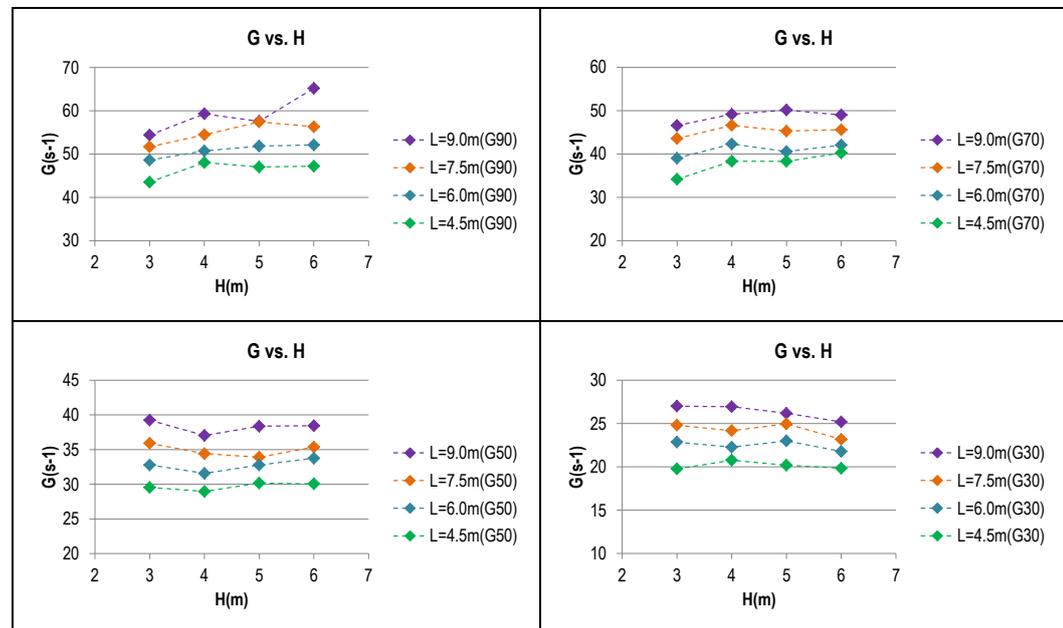


Figura N° 39 Relación entre el gradiente de velocidad promedio ($G_{\text{FLOW-3D}}$) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 7 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

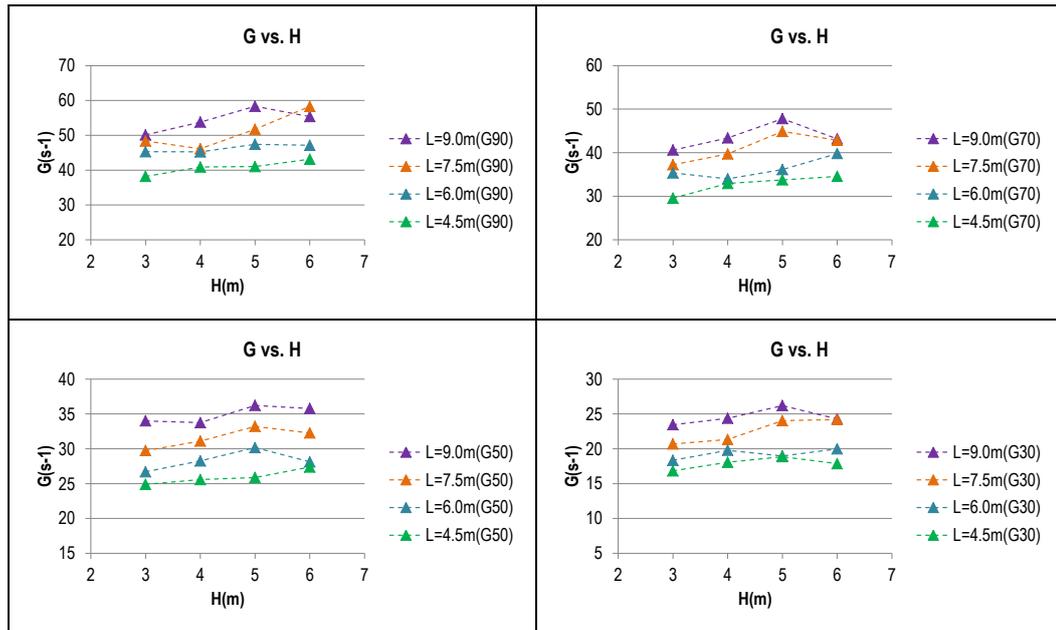


Figura N° 40 Relación entre el gradiente de velocidad promedio ($G_{FLOW-3D}$) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 s^{-1}, 70 s^{-1}, 50 s^{-1}, 30 s^{-1}$ y $T = 9$ min).

Fuente: Elaboración propia.

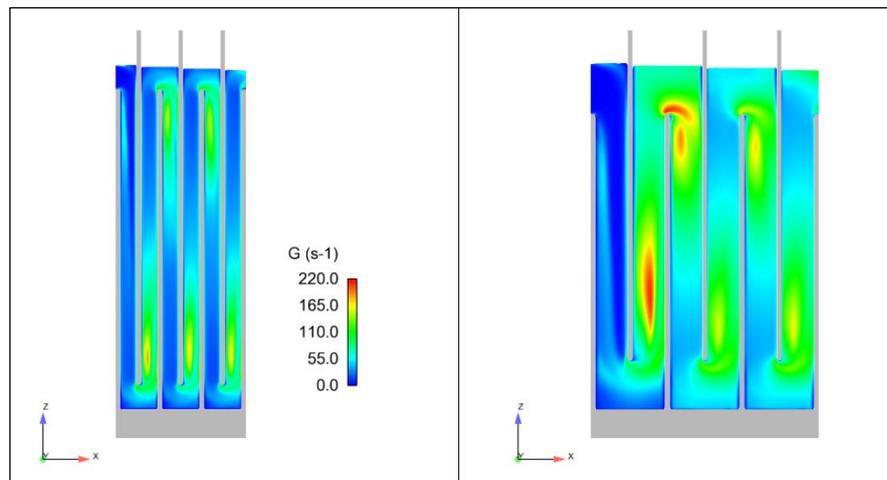


Figura N° 41 Comparación entre distribuciones de gradiente de velocidad local (G_{Local}) para $G_{DISEÑO} = 90 s^{-1}$, $T = 5$ min, $H = 3$ m, $L = 4.5$ m (izquierda) y 9 m (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en la Figura N° 42 se observa como el aumento del tiempo de retención (T) provoca una disminución del gradiente de velocidad promedio. Esto nos indica que es recomendable diseñar sistemas de floculación compuestos por varios tanques en serie, para de esta manera reducir el tiempo de retención de cada tanque y como consecuencia lograr un incremento del gradiente de velocidad hasta alcanzar el valor de diseño adecuado.

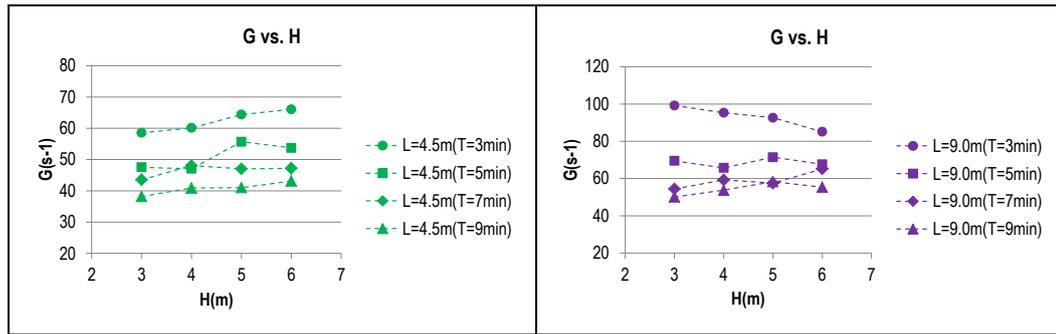


Figura N° 42 Relación entre $G_{\text{FLOW-3D}}$ y altura de agua para diferentes tiempos de retención y longitudes, $L = 4.5 \text{ m}$ (izquierda), $L = 9 \text{ m}$ (derecha) y $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, con el propósito de generalizar la relación entre los parámetros de diseño y el valor del gradiente de velocidad promedio se propuso la Ecuación 51, la cual se obtuvo de la siguiente manera.

En un inicio se formuló la Ecuación 49 con la finalidad de realizar una regresión lineal múltiple.

$$c * L^{\beta_1} * H^{\beta_2} * q^{\beta_3} * m^{\beta_4} = G \quad 49$$

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ y β_4 : Coeficientes.

c: Constante.

L: Longitud del tanque (m).

H: Altura de agua o profundidad del tanque (m).

q: Caudal unitario = caudal (Q)/ancho (b) (m^2/s).

m: Número de compartimientos en el tanque.

G: Gradiente de velocidad promedio (s^{-1}).

Seguidamente, se tomaron logaritmos a todos los términos de la ecuación anterior obteniéndose la Ecuación 50.

$$\ln(c) + \beta_1 \ln(L) + \beta_2 \ln(H) + \beta_3 \ln(q) + \beta_4 \ln(m) = \ln(G) \quad 50$$

$$\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 = Y$$

Para el cálculo de los coeficientes de la ecuación mostrada se utilizaron las herramientas disponibles en el programa Excel. Cabe señalar que a partir de este punto se trabajó únicamente con un grupo de 248 unidades de las 256 en total, debido a que ocho de los diseños no cumplieron con la condición de que las pantallas se traslaparan $1/3 H$ como mínimo (ver Tabla N° 5).

Tabla N° 8 Resultados de la regresión lineal múltiple obtenidos con el programa Excel para G.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.983
Coefficiente de determinación R ²	0.966
R ² ajustado	0.965
Error típico	0.071
Observaciones	248

Descripción	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Probabilidad
Regresión	4	34.993	1726.941	4.174E-177
Residuos	243	1.231		
Total	247	36.224		

Descripción	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	7.54035	0.08145	92.580	1.688E-191
Variable X 1	-1.22774	0.02830	-43.381	2.056E-116
Variable X 2	-0.77175	0.02138	-36.089	1.344E-99
Variable X 3	1.54531	0.01978	78.133	3.543E-174
Variable X 4	1.19700	0.01944	61.577	2.927E-150

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla N° 8 se aprecia que con el modelo de regresión lineal múltiple propuesto se obtiene un valor de $R^2 = 0.966$; es decir, que el modelo de regresión consigue explicar el 96.6 % de la variabilidad total de la variable dependiente gradiente de velocidad promedio (G). Seguidamente, en esta tabla se muestra el valor de probabilidad (p-valor) requerido para el contraste de significatividad global en donde:

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$. La hipótesis nula (H_0) indica que el modelo de regresión no es explicativo; es decir, ninguna de las variables explicativas influye en la variable gradiente de velocidad promedio.

$H_1: \beta_i \neq 0$, para algún $i = 1, 2, 3, 4$. La hipótesis alternativa (H_1) indica que al menos una de las variables explicativas influye en la variable gradiente de velocidad promedio.

Al considerar un nivel de significancia (α) igual a 0.05 se tiene que el p-valor es igual a $4.174E-177 < \alpha$; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; es decir, el modelo de regresión propuesto es significativo y es válido para explicar la variable gradiente de velocidad. De igual manera, se observan los valores de probabilidad (p-valor) necesarios para el contraste de significatividad individual de la constante y de los coeficientes en donde:

$H_0: \beta_i = 0$, para $i = 0, 1, 2, 3, 4$. La hipótesis nula (H_0) indica que la constante o variable X_i no es significativa.

$H_1: \beta_i \neq 0$, para $i = 0, 1, 2, 3, 4$. La hipótesis alternativa (H_1) indica que la constante o variable X_i es significativa; es decir, influye en la variable gradiente de velocidad promedio.

Al considerar un nivel de significancia (α) igual a 0.05 se tiene que el p-valor $< \alpha$ para todos los casos; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; es decir, que la intercepción junto con las variables consideradas en el modelo de regresión son significativas.

Finalmente, una vez obtenidos los coeficientes y teniendo en consideración que el caudal unitario (q) = caudal (Q)/ancho (b), al generalizar los resultados se obtiene la Ecuación 51.

$$G = e^{7.54035} * L^{-1.22774} * H^{-0.77175} * (Q/b)^{1.54531} * m^{1.197} \quad 51$$

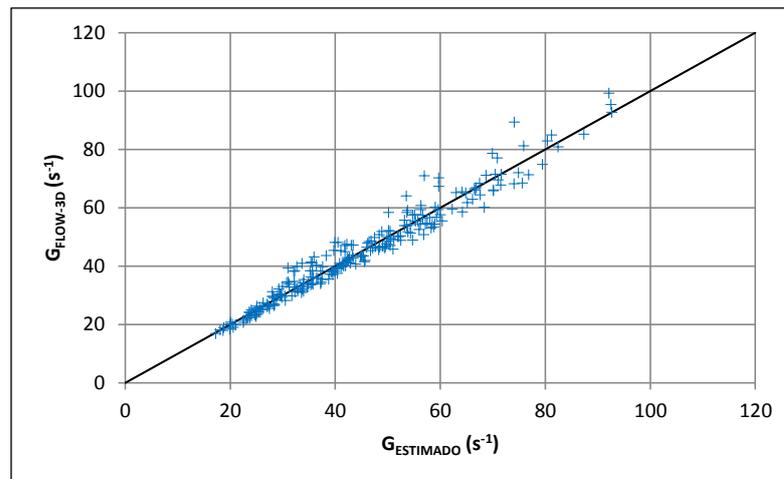


Figura N° 43 Comparación entre los valores $G_{ESTIMADO}$ obtenidos con el modelo de regresión y los valores de G calculados con el FLOW-3D ($G_{FLOW-3D}$).

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 43 se muestra una comparación entre los valores estimados de gradiente de velocidad promedio obtenidos con el modelo de regresión propuesto (Ecuación 51) y los valores calculados con el modelo numérico FLOW-3D. En esta figura claramente se observa que los valores estimados por el modelo de regresión propuesto se asemejan bastante bien a los valores calculados con el FLOW-3D.

6.2 ÍNDICE DE MORRILL (IM)

De igual forma en esta sección se hizo un análisis de la relación existente entre el índice de Morrill calculado con el programa FLOW-3D y los parámetros geométricos de diseño. En la Figura N° 44, Figura N° 45, Figura N° 46 y Figura N° 47 se observa en general que para un mismo diseño de tanque los valores de índice de Morrill disminuyen favorablemente (aproximándose al flujo pistón) al reducir la longitud y al incrementar la altura de la unidad. Tener en consideración esta influencia sobre el índice de Morrill es importante porque nos ayudará a alcanzar diseños de tanques mucho más eficientes.

Por otra parte, en la Figura N° 48 se observa la comparación entre dos diseños de tanques de floculación para un mismo gradiente de velocidad y altura de agua pero con diferentes longitudes, aquí se aprecia como el incremento de la longitud del tanque, y por ende del espaciamiento entre pantallas, favorece el incremento de zonas muertas y de recirculación en los canales verticales esto provoca a su vez un aumento negativo en el valor del índice de Morrill.

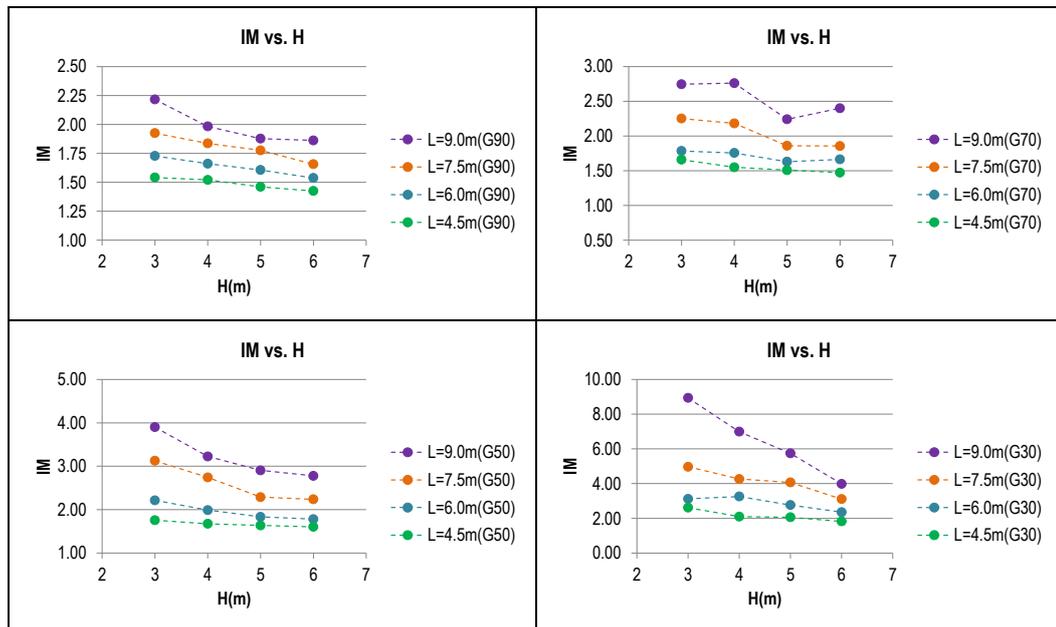


Figura N° 44 Relación entre el índice de Morrill (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 3 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

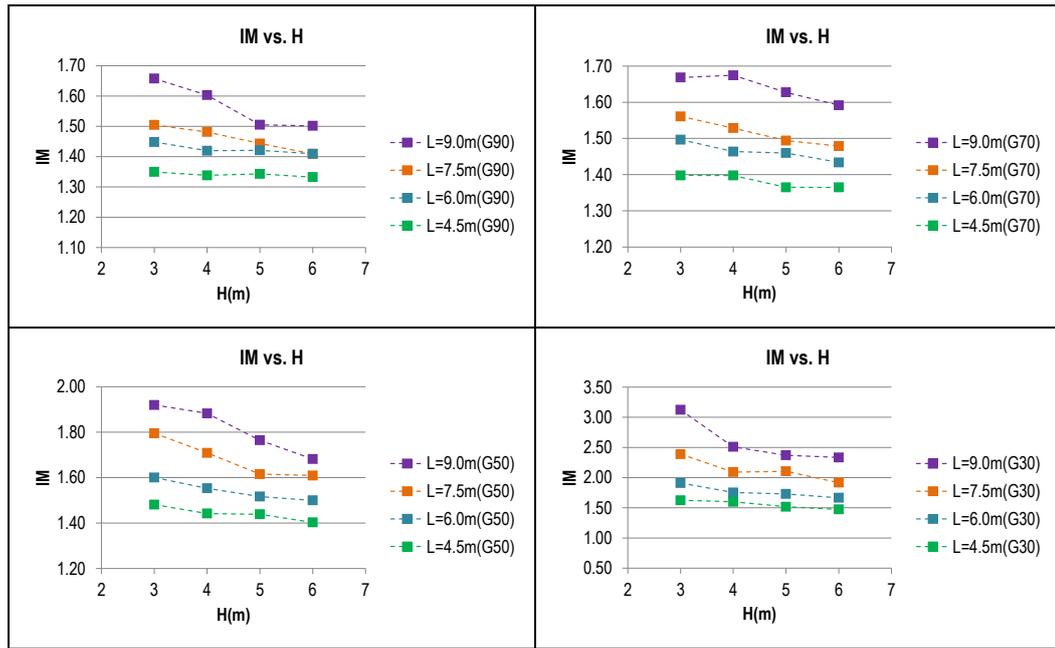


Figura N° 45 Relación entre el índice de Morrill (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 5 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

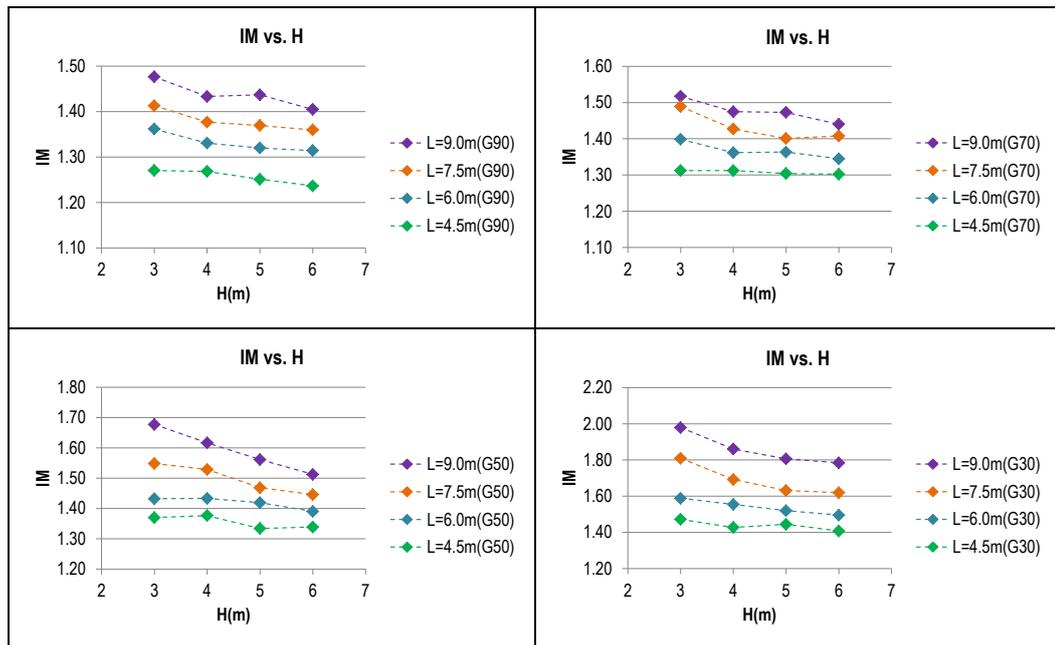


Figura N° 46 Relación entre el índice de Morrill (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 7 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

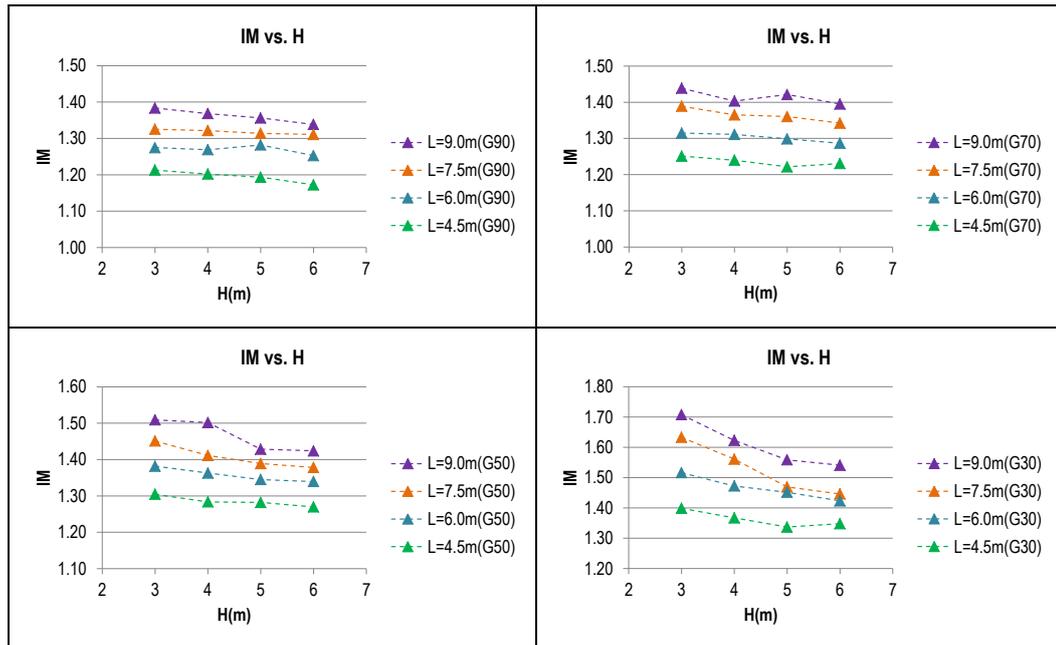


Figura N° 47 Relación entre el índice de Morrill (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 9 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

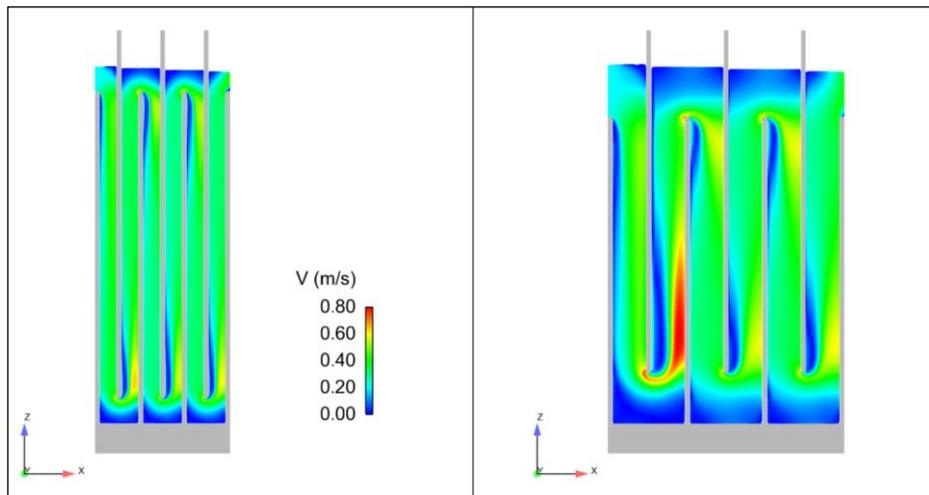


Figura N° 48 Comparación entre magnitudes de velocidad (FLOW-3D) para $G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$, $T = 5 \text{ min}$, $H = 3 \text{ m}$, $L = 4.5 \text{ m}$ (izquierda) y 9 m (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en la Figura N° 49 se aprecia que el aumento del tiempo de retención (T) o volumen de la unidad provoca una disminución favorable del índice de Morrill. A diferencia del gradiente de velocidad promedio, esto nos indica que es recomendable diseñar sistemas de floculación compuestos por tanques de mayor volumen, para de esta manera reducir el valor del índice de Morrill y diseñar sistemas más eficientes (valores de IM cercanos a 1).

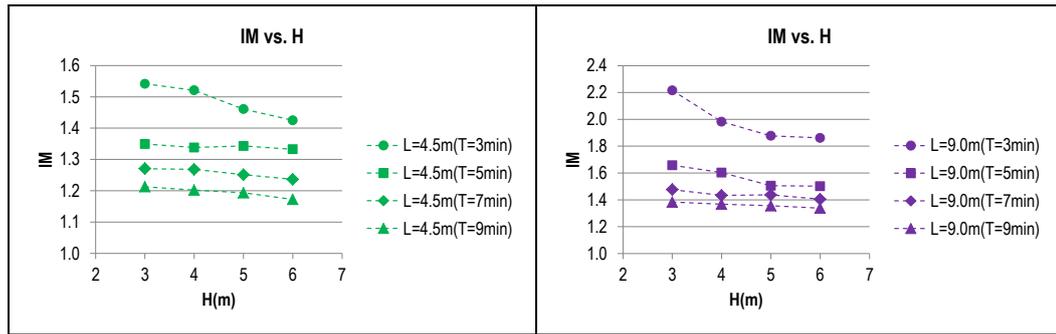


Figura N° 49 Relación entre índice de Morrill (FLOW-3D) y altura de agua para diferentes tiempos de retención y longitudes, L = 4.5 m (izquierda), L = 9 m (derecha) y $G_{DISEÑO} = 90 \text{ s}^{-1}$.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior, con la finalidad de realizar una regresión lineal múltiple entre los parámetros de diseño y el valor de índice de Morrill se propuso la Ecuación 52.

$$\ln(c) + \beta_1 \ln(L) + \beta_2 \ln(H) + \beta_3 \ln(q) + \beta_4 \ln(m) = 1/IM^3 \quad 52$$

$$\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 = Y$$

En la Tabla N° 9 se observa que con el modelo de regresión múltiple planteado se logra un valor de $R^2 = 0.986$; es decir, que el modelo de regresión consigue explicar el 98.6 % de la variabilidad total de la variable dependiente índice de Morrill.

Tabla N° 9 Resultados de la regresión lineal múltiple obtenidos con programa Excel para IM.

Estadísticas de la regresión				
Coefficiente de correlación múltiple	0.993			
Coefficiente de determinación R ²	0.986			
R ² ajustado	0.986			
Error típico	0.015			
Observaciones	248			
Descripción	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Probabilidad
Regresión	4	4.048	4243.605	1.833E-223
Residuos	243	0.058		
Total	247	4.106		
Descripción	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	-0.36613	0.01767	-20.717	1.301E-55
Variable X 1	-0.27313	0.00614	-44.477	9.413E-119
Variable X 2	0.24839	0.00464	53.532	1.697E-136
Variable X 3	-0.00644	0.00429	-1.501	1.347E-01
Variable X 4	0.27356	0.00422	64.856	2.018E-155

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se muestra el valor de probabilidad (p-valor) requerido para el contraste de significatividad global en donde:

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$. La hipótesis nula (H_0) indica que el modelo de regresión no es explicativo; es decir, ninguna de las variables explicativas influye en la variable índice de Morrill.

$H_1: \beta_i \neq 0$, para algún $i = 1, 2, 3, 4$. La hipótesis alternativa (H_1) indica que al menos una de las variables explicativas influye en la variable índice de Morrill.

Al considerar un nivel de significancia (α) igual a 0.05 se tiene que el p-valor es igual a $1.833E-223 < \alpha$; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; es decir, el modelo de regresión propuesto es significativo y es válido para explicar la variable índice de Morrill.

Asimismo, en las últimas filas se observan los valores de probabilidad (p-valor) necesarios para el contraste de significatividad individual de la constante y de los coeficientes en donde:

$H_0: \beta_i = 0$, para $i = 0, 1, 2, 3, 4$. La hipótesis nula (H_0) indica que la constante o variable X_i no es significativa.

$H_1: \beta_i \neq 0$, para $i = 0, 1, 2, 3, 4$. La hipótesis alternativa (H_1) indica que la constante o variable X_i es significativa; es decir, influye en la variable índice de Morrill.

Si se considera un nivel de significancia (α) igual a 0.05 se tiene que el p-valor $< \alpha$ para todos los casos excepto para X_3 (caudal unitario), pero debido a que el p-valor correspondiente a X_3 posee un valor no muy distante a $\alpha = 0.10$, esta variable también será tomada en cuenta en el modelo de regresión; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; en otras palabras, que la intercepción conjuntamente con las variables consideradas en el modelo de regresión son significativas. Posteriormente, una vez obtenidos los coeficientes se tiene la Ecuación 53.

$$IM = 1/\sqrt[3]{\ln(e^{-0.36613} * L^{-0.27313} * H^{0.24839} * (Q/b)^{-0.00644} * m^{0.27356}} \quad 53$$

En la Figura N° 50 se muestra una comparación entre los valores estimados del índice de Morrill obtenidos con el modelo de regresión presentado y los valores

calculados con el modelo numérico FLOW-3D. En esta figura claramente se observa en general que los valores estimados por el modelo de regresión se asemejan bastante bien a los valores calculados con el FLOW-3D. Cabe señalar que para valores de IM mayores a 2.5 el modelo de regresión pierde exactitud y se aleja de los valores de $IM_{\text{FLOW-3D}}$.

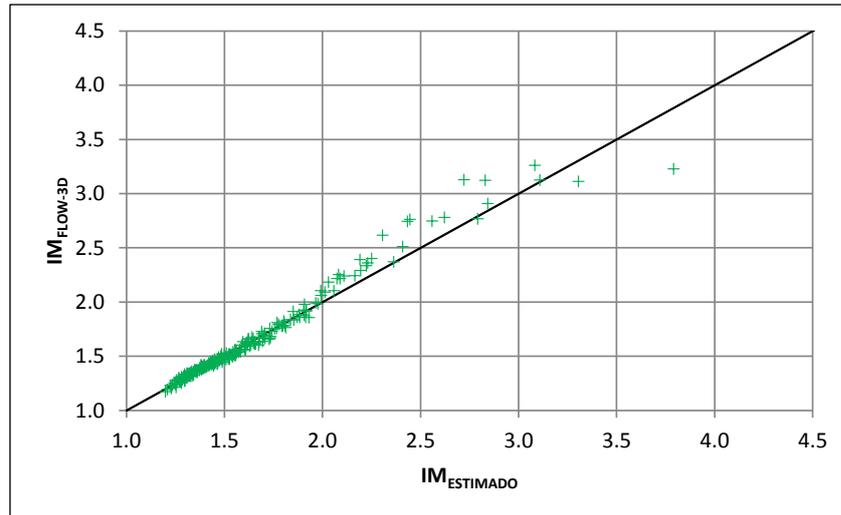


Figura N° 50 Comparación entre los valores estimados de IM obtenidos con el modelo de regresión y los valores de IM calculados con el FLOW-3D.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la eficiencia hidráulica de una unidad de floculación de flujo vertical puede ser evaluada utilizando conjuntamente la Ecuación 53 y los valores de la Tabla N° 2. Con las herramientas anteriormente mencionadas se puede realizar la evaluación de diferentes configuraciones geométricas y elegir aquellas en donde se consiguen condiciones de flujo pistón cercanas a las ideales.

6.3 ÍNDICE θ_{10}

De la misma manera en esta sección se estudió la relación existente entre el índice θ_{10} calculado con el programa FLOW-3D y los parámetros de diseño mencionados anteriormente. En la Figura N° 51, Figura N° 52, Figura N° 53 y Figura N° 54 se observa en general que los valores del índice θ_{10} aumentan favorablemente (condiciones de flujo pistón) al reducir la longitud de la unidad y al aumentar la altura.

Del mismo modo, en la Figura N° 55 se aprecia que el aumento del tiempo de retención (T) o volumen del tanque provoca un aumento favorable del índice θ_{10} . De igual manera a lo señalado anteriormente, esto nos indica que es

recomendable diseñar sistemas de floculación compuestos por tanques de mayor volumen, para de esta manera incrementar el valor del índice θ_{10} y obtener sistemas más eficientes (índice θ_{10} cercano a 1).

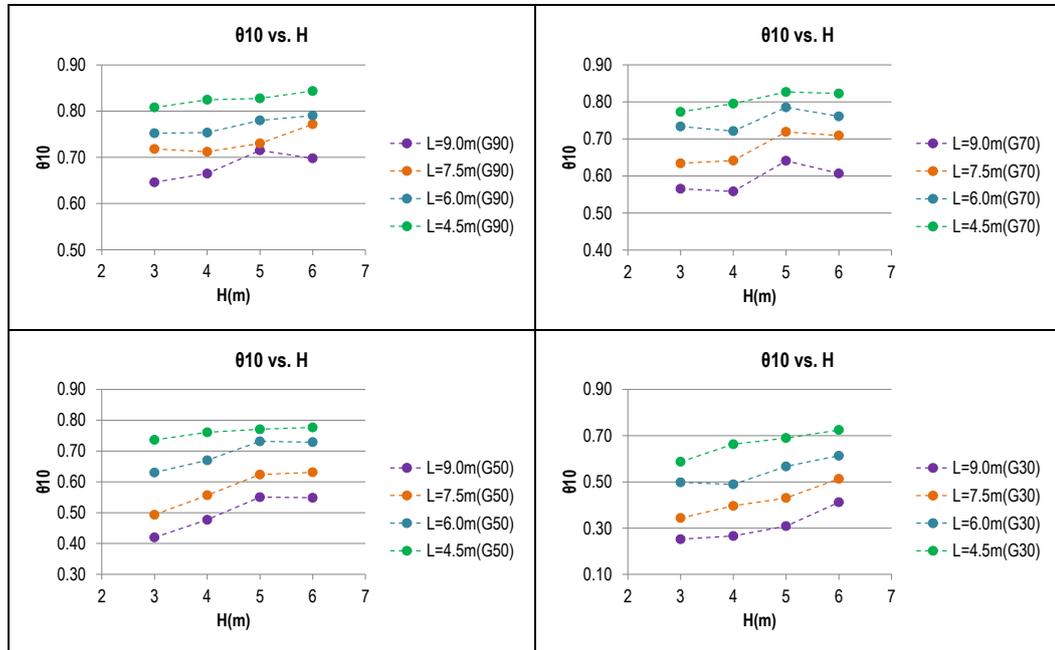


Figura N° 51 Relación entre el índice θ_{10} (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 3 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

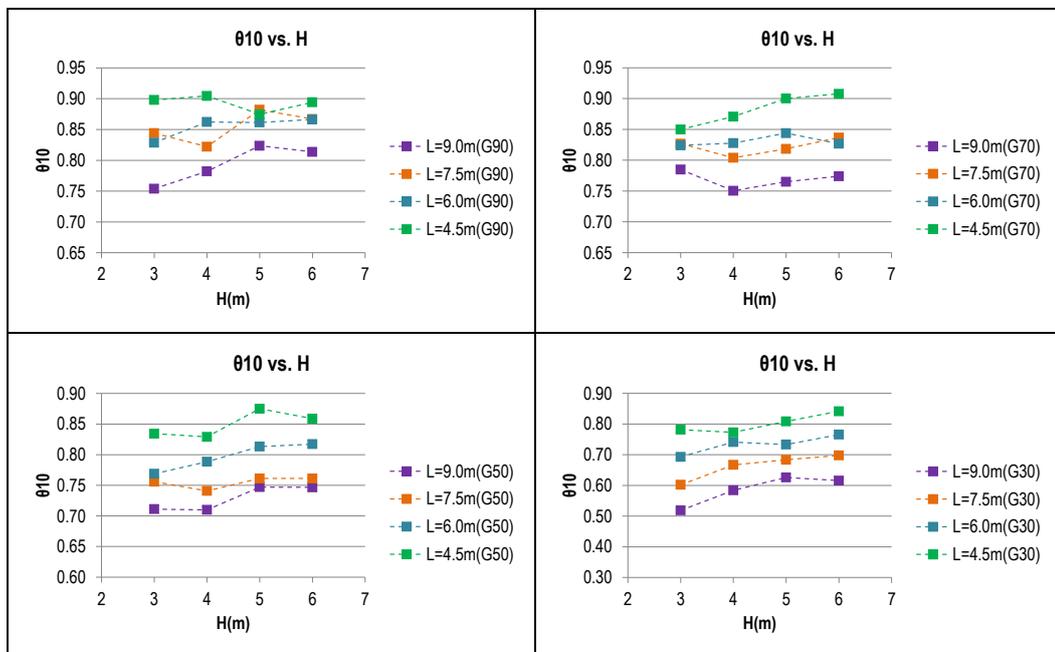


Figura N° 52 Relación entre el índice θ_{10} (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 5 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

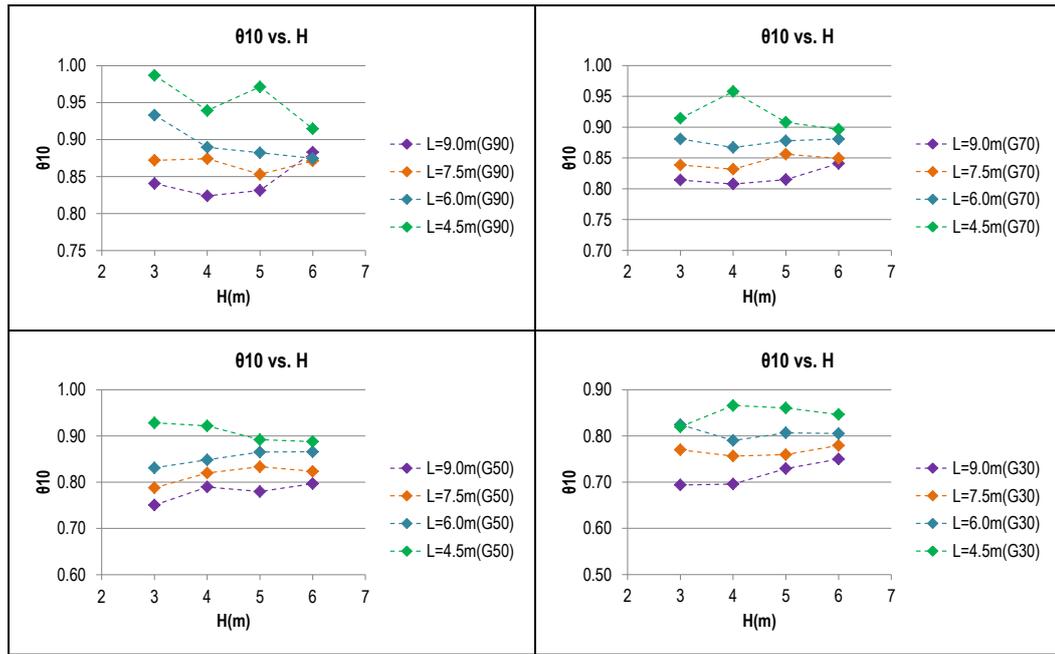


Figura N° 53 Relación entre el índice θ_{10} (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 7 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

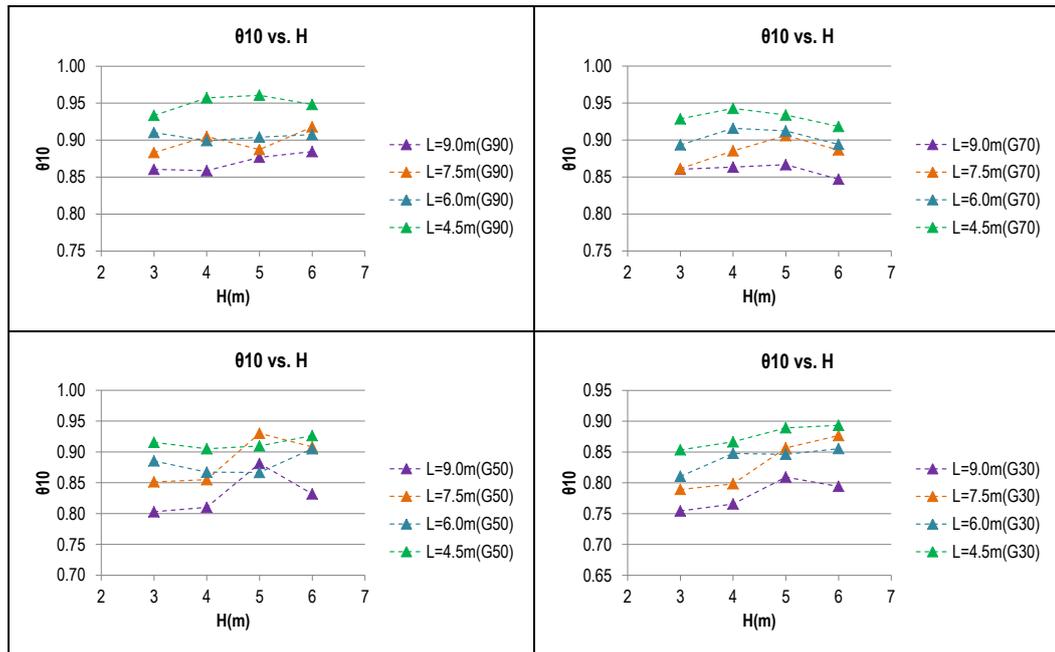


Figura N° 54 Relación entre el índice θ_{10} (FLOW-3D) y la altura de agua para diferentes longitudes ($G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}, 70 \text{ s}^{-1}, 50 \text{ s}^{-1}, 30 \text{ s}^{-1}$ y $T = 9 \text{ min}$).

Fuente: Elaboración propia.

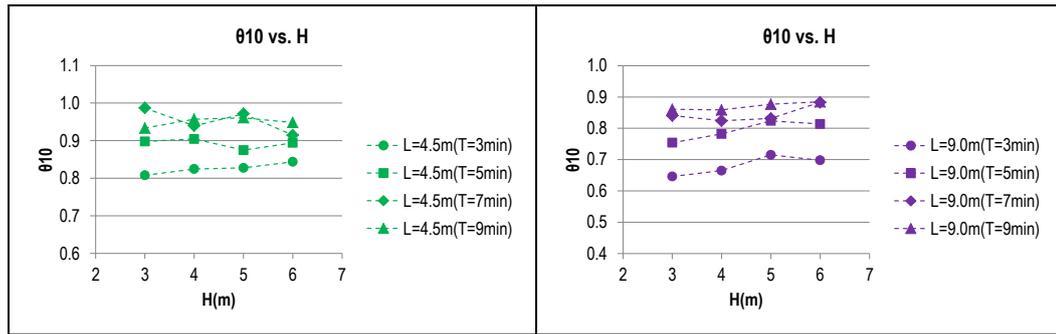


Figura N° 55 Relación entre índice θ_{10} (FLOW-3D) y altura de agua para diferentes tiempos de retención y longitudes, $L = 4.5$ m (izquierda), $L = 9$ m (derecha) y $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$.

Fuente: Elaboración propia.

De forma similar al caso anterior, con la finalidad de realizar una regresión lineal múltiple entre los parámetros de diseño y el valor de índice θ_{10} se propuso la Ecuación 54.

$$\ln(c) + \beta_1 \ln(L) + \beta_2 \ln(H) + \beta_3 \ln(q) + \beta_4 \ln(m) = \theta_{10}^3 \quad 54$$

$$\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 = Y$$

En la Tabla N° 10 se observa que con el modelo de regresión lineal múltiple propuesto se obtiene un valor de $R^2 = 0.936$; es decir, que el modelo de regresión consigue explicar el 93.6 % de la variabilidad total de la variable dependiente índice θ_{10} .

Tabla N° 10 Resultados de la regresión lineal múltiple obtenidos con el programa Excel para θ_{10} .

Estadísticas de la regresión				
Coefficiente de correlación múltiple	0.968			
Coefficiente de determinación R^2	0.936			
R^2 ajustado	0.935			
Error típico	0.046			
Observaciones	248			
Descripción	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Probabilidad
Regresión	4	7.425	894.593	4.692E-144
Residuos	243	0.504		
Total	247	7.930		
Descripción	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	-0.34082	0.05213	-6.538	3.639E-10
Variable X 1	-0.36363	0.01811	-20.075	1.647E-53
Variable X 2	0.31969	0.01369	23.358	4.691E-64
Variable X 3	-0.01830	0.01266	-1.446	1.496E-01
Variable X 4	0.36305	0.01244	29.181	2.230E-81

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados anteriores se muestra el valor de probabilidad (p-valor) requerido para el contraste de significatividad global en donde:

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$. La hipótesis nula (H_0) indica que el modelo de regresión no es explicativo; es decir, ninguna de las variables explicativas influye en la variable índice θ_{10} .

$H_1: \beta_i \neq 0$, para algún $i = 1, 2, 3, 4$. La hipótesis alternativa (H_1) indica que al menos una de las variables explicativas influye en la variable índice θ_{10} .

Al considerar un nivel de significancia (α) igual a 0.05 se tiene que el p-valor es igual a $4.692E-144 < \alpha$; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; es decir, el modelo de regresión propuesto es significativo y es válido para explicar la variable índice θ_{10} .

Igualmente, en las últimas filas se observan los valores de probabilidad (p-valor) necesarios para el contraste de significatividad individual de la constante y de los coeficientes en donde:

$H_0: \beta_i = 0$, para $i = 0, 1, 2, 3, 4$. La hipótesis nula (H_0) indica que la constante o variable X_i no es significativa.

$H_1: \beta_i \neq 0$, para $i = 0, 1, 2, 3, 4$. La hipótesis alternativa (H_1) indica que la constante o variable X_i es significativa; es decir, influye en la variable índice θ_{10} .

Considerando un nivel de significancia (α) igual a 0.05 se tiene que el p-valor $< \alpha$ para todos los casos excepto para X_3 (similar al caso del índice de Morrill), pero debido a que el p-valor correspondiente a X_3 (0.1496) posee también un valor no muy distante a $\alpha = 0.10$, esta variable igualmente se considerará en el modelo de regresión; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; en otras palabras, que la intercepción conjuntamente con las variables consideradas en el modelo de regresión son significativas.

Posteriormente, una vez obtenidos los coeficientes se tiene la Ecuación 55.

$$\theta_{10} = \sqrt[3]{\ln(e^{-0.34082} * L^{-0.36363} * H^{0.31969} * (Q/b)^{-0.01830} * m^{0.36305})} \quad 55$$

En la Figura N° 56 se muestra una comparación entre los valores estimados del índice θ_{10} obtenidos con el modelo de regresión planteado y los valores calculados con el modelo numérico FLOW-3D.

En esta figura se observa en general que los valores estimados por el modelo de regresión se ajustan bastante bien con los valores calculados con el FLOW-3D. Es necesario destacar que para valores de θ_{10} menores a aproximadamente 0.6 el modelo de regresión pierde exactitud.

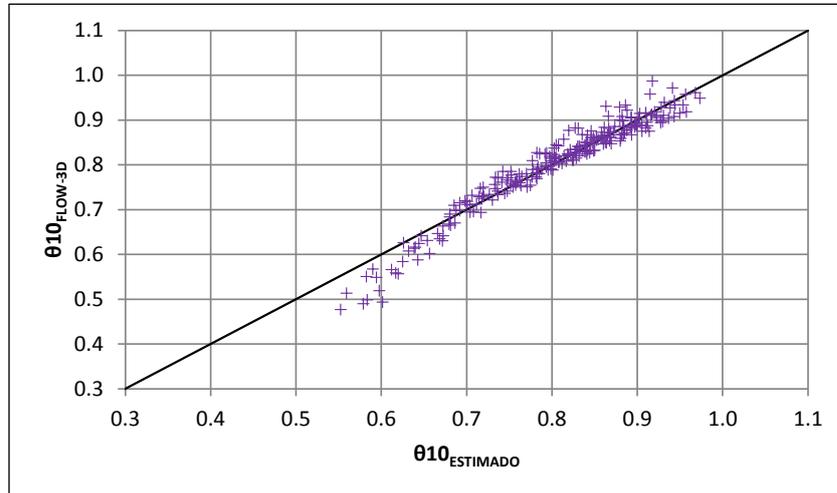


Figura N° 56 Comparación entre los valores estimados de θ_{10} obtenidos con el modelo de regresión y los valores de θ_{10} calculados con el FLOW-3D.

Fuente: Elaboración propia.

6.4 EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UNA UNIDAD DE FLOCULACIÓN

Antes de evaluar y comparar diferentes diseños, inicialmente se debe verificar que el valor del gradiente de velocidad promedio que existe en la unidad de floculación sea igual o lo más próximo posible al valor del gradiente de velocidad de diseño óptimo, esto puede ser realizado con ayuda de la Ecuación 51 previamente propuesta. Como ya se ha indicado anteriormente la metodología de diseño convencional, la cual utiliza velocidades promedio, no toma en cuenta la influencia significativa de la modificación de las dimensiones de la unidad, principalmente de la longitud de diseño, sobre el gradiente de velocidad promedio del tanque (ver Figura N° 37, Figura N° 38, Figura N° 39 y Figura N° 40).

En la Figura N° 57, correspondiente a un ensayo de prueba de jarras, se puede observar que para cada familia de curva de tiempo de retención existe un valor correspondiente de gradiente de velocidad óptimo (con el que se consigue una turbiedad residual mínima). Si el gradiente de velocidad promedio dentro de la unidad de floculación es mayor o menor al valor de diseño óptimo, el valor de la

turbiedad residual en la prueba de jarras aumenta lo que indica que la eficiencia del tanque disminuirá si no se realiza un diseño adecuado de la unidad de floculación.

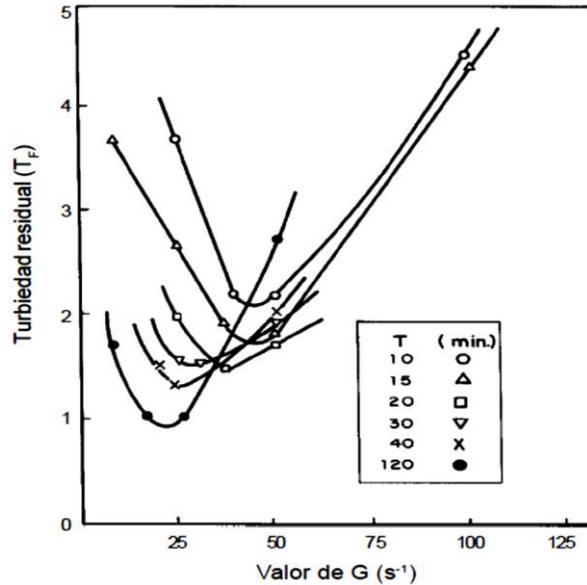


Figura N° 57 Cambio de turbiedad residual para diferentes valores de gradiente de velocidad promedio obtenidos en una prueba de jarras (CEPIS, 2004a).

Para realizar un ejemplo del proceso de evaluación de diferentes diseños se han seleccionado dos casos de referencia (ver Tabla N° 11) del grupo de unidades de floculación anteriormente diseñadas, en donde se cumple la condición inicial de que el gradiente de velocidad promedio existente calculado con el programa (G_{FLOW3D}) presenta un valor bastante cercano a $G_{\text{DISEÑO}}$.

Tabla N° 11 Diseños seleccionados para el proceso de evaluación.

T (min)	$G_{\text{DISEÑO}}$ (s^{-1})	L (m)	H (m)	b (m)	m	G_{FLOW3D} (s^{-1})	IM	Incremento eficiencia (%)	θ_{10}	Incremento eficiencia (%)
3	50	6.0	3.0	1.000	12	50.00	2.216	-	0.630	-
3	50	6.0	4.0	0.750	10	48.41	1.990	10.18	0.670	6.32
3	50	6.0	5.0	0.600	9	50.31	1.835	17.19	0.731	16.07
3	50	6.0	6.0	0.500	8	48.77	1.782	19.58	0.729	15.63
3	50	3.0	4.0	1.500	12	49.97	1.386	37.45	0.868	37.77
3	30	4.5	3.0	1.333	8	31.21	2.615	-	0.587	-
3	30	4.5	4.0	1.000	7	29.20	2.102	19.62	0.663	12.87
3	30	4.5	5.0	0.800	6	29.97	2.061	21.21	0.690	17.46
3	30	4.5	6.0	0.667	6	31.39	1.824	30.24	0.725	23.43
3	30	2.5	3.0	2.400	10	30.35	1.483	43.29	0.830	41.40

Fuente: Elaboración propia.

Para el primer caso ($T = 3$ min y $G_{\text{DISEÑO}} = 50 \text{ s}^{-1}$) se observa que si se toma un valor de altura de diseño igual a 3 m se obtiene un índice de Morrill de 2.216 que según la Tabla N° 2 corresponde a una clasificación de eficiencia buena. Se observa además que si mantiene fija la longitud de diseño y se aumenta el valor de la altura de la unidad hasta 6 m se consigue un incremento de la eficiencia hidráulica de 19.58 % respecto a la anterior. Asimismo, al considerar una altura de 3 m se obtiene un índice θ_{10} igual a 0.63, esto según la Tabla N° 2 corresponde a una eficiencia buena. Por otra parte, si se aumenta la altura hasta 5 m se logra un incremento de la eficiencia de 16.07 % y, además, al realizar esta modificación la eficiencia de la unidad cambia favorablemente de una clasificación buena a excelente.

Por otra parte, si se aplican directamente las ecuaciones 51, 53 y 55 propuestas sin tener en consideración el proceso de dimensionamiento recomendado por el CEPIS (ver Tabla N° 4), diferentes dimensiones podrían ser examinadas y finalmente se seleccionarían aquellas con las cuales se obtengan las mayores eficiencias. Por ejemplo, con las dimensiones propuestas en la quinta fila de la Tabla N° 11 se obtienen incrementos de eficiencia de 37.45 % y 37.77 % para los índices IM y θ_{10} , respectivamente. Además, con ello se consigue cambiar la eficiencia del tanque de una clasificación buena a excelente.

Algo similar ocurre para el segundo caso ($T = 3$ min y $G_{\text{DISEÑO}} = 30 \text{ s}^{-1}$) en donde se si considera una altura de diseño de 3 m se obtiene un valor de IM igual a 2.615 que corresponde a una eficiencia comprometida según la Tabla N° 2, pero si se aumenta la altura de diseño hasta un valor de 6 m se alcanza un incremento de eficiencia de 30.24 %. Además, se observa que la unidad cambia de una clasificación de eficiencia comprometida a buena. Por otra parte, se obtiene un índice θ_{10} igual a 0.587 al elegir una altura de 3 m, lo cual corresponde a una eficiencia buena y si se aumenta la altura hasta un valor de 6 m se logra un aumento de eficiencia del 23.43 %, esto provoca que la eficiencia de la unidad cambie de una clasificación buena a excelente.

Como en el caso anterior, si se aplican directamente las ecuaciones propuestas. Y por ejemplo se proponen las dimensiones de la décima fila, las eficiencias se incrementan hasta alcanzar valores importantes de 43.29 % y 41.40 % para los índices IM y θ_{10} , respectivamente. Con estas dimensiones además se logra mejorar la clasificación de eficiencia a excelente.

CONCLUSIONES

- Se aplicó el modelo numérico FLOW-3D para determinar los valores de gradiente de velocidad promedio e índices de eficiencia, de cada uno de los diferentes tanques, los cuales permitieron seleccionar los diseños más eficientes de las unidades de floculación vertical. Además, se encontraron mejoras de la eficiencia del orden del 40%.
- Se realizó el diseño de 256 unidades de floculación, conforme a lo establecido por el Reglamento Nacional de Edificaciones y las recomendaciones del CEPIS, en donde se han variado las dimensiones de diseño; sin embargo, sus eficiencias se desconocen.
- Se validó el modelo FLOW-3D con los valores de velocidad encontrados por Kim et al. (2010) en el modelo físico de una cámara de contacto. Los valores más cercanos de velocidad en el eje z se obtuvieron con el modelo de turbulencia RNG k- ϵ . Asimismo, se definió el rango del número de celdas entre pantallas con las que se realizaron las simulaciones.
- Se efectuaron simulaciones bidimensionales de todos los tanques de floculación, en régimen permanente considerando un caudal constante de 0.1 m³/s, en donde se obtuvieron valores de velocidad, energía cinética turbulenta, disipación de energía cinética turbulenta, gradiente de velocidad local y concentraciones del trazador a través del tiempo con las cuales se elaboraron las curvas DTR.
- Se propusieron expresiones en función de los parámetros de diseño con las que se podrán evaluar el gradiente de velocidad promedio, así como la eficiencia hidráulica (a través de los índices de Morrill y θ_{10}) de los tanques de floculación de pantallas de flujo vertical.
- Se constató que las pantallas o deflectores son los causantes de que existan zonas de gran turbulencia dentro de un floculador, en los extremos de cada deflector se apreciaron altos valores de velocidad así como valores elevados de gradiente de velocidad local. Asimismo, se observaron zonas de recirculación que se prolongaban hasta casi alcanzar la mitad de la altura del tanque.

- Se observó que en gran parte de las unidades no se alcanzan los gradientes de velocidad promedio con los que fueron diseñados teóricamente. Para un mismo gradiente de velocidad promedio de diseño y tiempo de retención, el valor del gradiente promedio calculado con el programa disminuye al reducirse la longitud de diseño del tanque. Esto se debe principalmente a la reducción del espaciamiento entre pantallas lo que limita el desarrollo de turbulencia y, por consiguiente, provoca una disminución del gradiente de velocidad en los canales verticales.
- Con respecto al índice de Morrill, se observó que para un mismo gradiente de velocidad promedio de diseño y tiempo de retención, el valor del IM aumenta desfavorablemente (hacia valores mayores a 1) al aumentar la longitud o al disminuir la altura de diseño del tanque. El aumento del espaciamiento entre pantallas ocasiona el incremento de los cortocircuitos, zonas muertas y zonas de recirculación lo que provoca una disminución de la eficiencia de la unidad de floculación.
- Con relación al índice θ_{10} , para un mismo gradiente de velocidad promedio de diseño y tiempo de retención, el valor del θ_{10} aumenta favorablemente (hacia valores cercanos a 1) al reducirse la longitud del tanque de floculación vertical. Tal como se indicó anteriormente, el incremento del espaciamiento entre pantallas ocasiona una disminución de la eficiencia de la unidad de floculación.
- A partir de los resultados obtenidos, es posible concluir que las simulaciones por CFD son una herramienta válida para el estudio y diseño de tanques de floculación de flujo vertical.

RECOMENDACIONES

- Utilizar las expresiones obtenidas en la presente investigación para estimar los valores de gradiente de velocidad promedio e índices de eficiencia, y así lograr una selección adecuada de las dimensiones del tanque de floculación vertical.
- Continuar con el estudio para diferentes gradientes de velocidad de diseño, caudales, dimensiones de tanque, así como también para otros valores de tiempo de retención.
- La validación y calibración del modelo numérico es un aspecto importante del proceso de simulación; por ende, es aconsejable utilizar un modelo físico para así corroborar los resultados obtenidos con el modelo numérico. De no ser posible esto es recomendable trabajar con datos experimentales recogidos de estudios semejantes.
- En vista de que los tanques de floculación de flujo vertical son bastante similares a las unidades de flujo horizontal, se recomienda llevar a cabo investigaciones similares para este tipo de floculadores.
- A causa de la gran velocidad con la que avanza la tecnología de los ordenadores, se recomienda en el futuro realizar simulaciones tridimensionales, con un mallado más fino, considerando las dimensiones totales de la unidad de floculación vertical.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). (1998). Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations, G-077-1998.
- Angeloudis, A., Stoesser, T. y Falconer, R. A. (2014). Predicting the disinfection efficiency range in chlorine contact tanks through a CFD-based approach. *Water Research*, 60(4), 118-129.
- Arboleda, J. (1973). Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Lima, Perú: CEPIS.
- Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. Bogotá, Colombia: McGraw Hill Colombia.
- Argaman, Y. y Kaufman, W. J. (1970). Turbulence and flocculation. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 96(2), 223-241.
- Bouyer, D., Coufort, C., Liné, A. y Do-Quang, Z. (2005). Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 292, 413-428.
- Bridgeman, J., Jefferson, B. y Parsons, S. A. (2009). Computational fluid dynamics modelling of flocculation in water treatment: A Review. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 3(2), 220-241.
- Bridgeman, J., Jefferson, B. y Parsons, S. A. (2010). The development and application of CFD models for water treatment flocculators. *Advances in Engineering Software*, 41(1), 99-109.
- Camp, T. R. y Stein, P. C. (1943). Velocity gradients and internal work in fluid motion. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 30(4), 219-237.
- Camp, T. R. (1955). Flocculation and Flocculation Basins. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 120(1), 1-16.
- CEPIS. (2002). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua: Manual de capacitación para operadores. Lima, Perú: CEPIS/OPS.

- CEPIS. (2004a). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría (Tomo 1). Lima, Perú: CEPIS/OPS.
- CEPIS. (2004b). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada. Lima, Perú: CEPIS/OPS.
- CEPIS. (2005a). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, Perú: CEPIS/OPS.
- CEPIS. (2005b). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual IV: Operación, mantenimiento y control de calidad. Lima, Perú: CEPIS/OPS.
- Choudhury, D. (1993). Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling. Technical Memorandum TM-107. New York, United States: Fluent Inc.
- Clark, M. M. (1985). Critique of Camp and Stein's RMS velocity gradient. *Journal of Environmental Engineering*, 111(6), 741-754.
- Cleasby, J. L. (1984). Is velocity gradient a valid turbulent flocculation parameter?. *J. Journal of Environmental Engineering*, 110(5), 875-897.
- Craig, K., De Traversay, C., Browen, B., Essemiani, K., Levecq, C. y Naylor, R. (2002). Hydraulic study and optimization of water treatment processes using numerical simulation. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(5), 135-142.
- Crozes, G. F., Hagstrom, J. P., Clark, M. M., Ducoste, J. y Burns, C. (1999). Improving clearwell design for CT compliance. Denver, Colorado: American WaterWorks Association Research Foundation.
- Demirel, E. y Aral, M. (2016). Unified analysis of multi-chamber contact tanks and mixing efficiency based on vorticity field. Part I: Hydrodynamic analysis. *Water*, 8(11), 495-516.
- Demirel, E. y Aral, M. (2018). Performance of Efficiency Indexes for Contact Tanks. *Journal of Environmental Engineering*, 144(9), 1-13.

- Fair, G. M. y Geyer, J. C. (1954). *Water Supply and Waste-water Disposal*. New York, United States: John Wiley.
- Farjood, A., Melville, B. W., Shamseldin, A. Y., Adams, K. N. y Khan, S. (2015). Evaluation of hydraulic performance indices for retention ponds. *Water Science & Technology*, 72(1), 10-21.
- Flow Science. (2017). *User Manual Version 11.2*. Santa Fe, NM.
- Graber, S. D. (1994). A critical review of the use of the G-value (RMS velocity gradient) in environmental engineering. *Developments in Theoretical and applied mechanics*, 17, 533-556.
- Gualtieri, C. (2010). Discussion of "Performance assessment of hydraulic efficiency indexes" by Edmilson Costa Teixeira and Renato do Nascimento Siqueira. *Journal of Environmental Engineering*, 136(9), 851-859.
- Haarhoff, J. y Van der Walt, J. (2001). Towards optimal design parameters for around-the-end hydraulic flocculators. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 50(3), 149-159.
- Hannoun, I. A., Boulos, P. F. y List, E. J. (1998). Using hydraulic modeling to optimize contact time. *Journal of the American Water Works Association*, 90(8), 77-87.
- Harlow, F. H. y Nakayama, P. I. (1967). Turbulence Transport Equations. *Physics of Fluids*, 10(11), 2323-2332.
- Hirt, C. W. y Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225.
- Hirt, C. W. y Sicilian, J. M. (1985). A Porosity Technique for the Definition of Obstacles in Rectangular Cell Meshes. *Proc. Fourth International Conf. Ship Hydro*. National Academy of Science. Washington, D.C.
- Jiyuan, T., Guan, H. Y. y Chaoqun, L. (2013). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann.

- Kim, D., Kim, J. H. y Stoesser, T. (2010). Large Eddy Simulation of Flow and Tracer Transport in Multichamber Ozone Contactors. *Journal of Environmental Engineering*, 136(1), 22-31.
- McConnachie, G. L. (1993). Water treatment for developing countries using baffledchannel hydraulic flocculation. *Proc. Institution of Civil Engineers - Water, Maritime and Energy*, 100(1), 55-61.
- McConnachie, G. L. y Liu, J. (2000). Design of baffled hydraulic channels for turbulence - induced flocculation. *Water Research*, 34(6), 1886-1896.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2006). Reglamento Nacional de Edificaciones: Norma OS.020 Plantas de Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Lima, Perú.
- Monk, R. D. y Willis, J. F. (1987). Designing Water Treatment Facilities. *Journal of the American Water Works Association*, 79(2), 45-57.
- Ohm, T., Cae, J., Zhang, M. Y. y Joo, J. C. (2020). Computational Fluid Dynamics Modeling and Field Applications of Non-Powered Hydraulic Mixing in Water Treatment Plants. *Water*, 12(4), 939.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Ginebra, Suiza: OMS.
- Rodi, W. (1980). *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics - A State of the Art Review*. Delft: International Association of Hydraulic Research publication.
- Samaras, K., Zouboulis, A., Karapantsios, T. y Kostoglou, M. (2010) A CFD based simulation study of a large scale flocculation tank for potable water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 162(1), 208-216.
- Shiono, K. y Teixeira, E. C. (2000). Turbulent characteristics in a baffled contact tank. *Journal of Hydraulic Research*, 38(6), 403-416.
- Siqueira, R. N. (1998). Desenvolvimento e aperfeiçoamento de critérios de avaliação da eficiência hidráulica e do cálculo do coeficiente de mistura em unidade de tratamento de água e efluentes (Tesis de Maestría). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

- Smagorinsky, J. (1963). General Circulation Experiments with the Primitive Equations. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99-165.
- Smith, G. D. (1985). *Numerical solution of partial differential equations: Finite difference methods*. Oxford, United Kingdom: Clarendon Press.
- Stamou, A. I. (2002). Verification and application of a mathematical model for the assessment of the effect of guiding walls on hydraulic efficiency of chlorination tanks. *Journal of Hydroinformatics*, 4(4), 245-254.
- Stumm, W. y O'Melia, C. R. (1968). Stechiometry of coagulation. *Journal of the American Water Works Association*, 60(5), 514-539.
- Teefy, S. M. (1996). *Tracer Studies in Water Treatment Facilities: A Protocol and Case Studies*. Denver: American Water Works Association Research Foundation.
- Templeton, M. R., Hofmann, R. y Andrews, R. C. (2006). Case study comparisons of computational fluid dynamics (CFD) modeling versus tracer testing for determining clearwell residence times in drinking water treatment. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 5(6), 529-536.
- Teixeira, E. y Siqueira, R. (2008). Performance assessment of hydraulic efficiency indexes. *Journal of Environmental Engineering*, 134, 851-859.
- Torres, R. y Grau, J. (2007). *Introducción a la mecánica de fluidos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics*. Barcelona, España: Addlink Software Científico S.L.
- United States Environmental Protect Agency (USEPA). (2003). *Disinfection profiling and benchmarking guidance manual: Appendix A*. Rep. No. EPA 816-R-03-004. Washington, DC: USEPA.
- Versteeg, H. K. y Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. England: Longman Scientific and Technical.
- Wei, P., Mudde, R. F., Uittewaal, W., Spanjers, H., van Lier J. B., de Kreuk, M. (2019). Characterising the two-phase flow and mixing performance in a gas-

- mixed anaerobic digester: Importance for scale-up applications. *Water Research*, 149, 86-97.
- Wilson, J. M. (2011). *Evaluation of Flow and Scalar Transport Characteristics of Small Public Drinking Water Disinfection Systems Using Computational Fluid Dynamics (Tesis de Maestría)*. Colorado State University, Colorado.
- Wilson, J. M. y Venayagamoorthy, K. (2010). Evaluation of hydraulic efficiency of disinfection systems based on residence time distribution curves. *Environmental Science and Technology*, 44(24), 9377-9382.
- Xu, Q. (2010). *Internal Hydraulics of Baffled Disinfection Contact Tanks Using Computational Fluid Dynamics (Tesis de Maestría)*. Colorado State University, Colorado.
- Yakhot, V. y Orszag, S. A. (1986). Renormalization Group Analysis of Turbulence: I. Basic Theory. *Journal of Scientific Computing*, 1, 1-51.
- Zhang, J., Martinez, A. E. y Zhang, Q. (2013). Hydraulic efficiency in RANS of the flow in multi-chambered contactors. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(11), 1150-1157.
- Zienkiewicz, O. y Taylor, R. (1989). *The finite element method*. New York: McGraw-Hill.

ANEXOS

Anexo 1: Resumen de los resultados obtenidos en el proceso de simulación.

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
1	3	90	4.5	3.0	1.333	16	86.42	58.55	1.542	0.808	25,857	0.0150	100	0d:0h:38min:43s	484 MB
2	3	90	4.5	4.0	1.000	14	92.56	60.13	1.521	0.824	21,168	0.0200	100	0d:0h:21min:50s	413 MB
3	3	90	4.5	5.0	0.800	12	90.42	64.38	1.461	0.827	24,544	0.0225	120	0d:0h:32min:04s	505 MB
4	3	90	4.5	6.0	0.667	11	95.03	66.07	1.425	0.844	26,471	0.0250	130	0d:0h:43min:51s	564 MB
5	3	90	6.0	3.0	1.000	17	89.64	68.38	1.728	0.752	18,700	0.0200	100	0d:0h:37min:47s	373 MB
6	3	90	6.0	4.0	0.750	14	87.96	72.00	1.661	0.753	22,620	0.0225	110	0d:0h:54min:10s	474 MB
7	3	90	6.0	5.0	0.600	12	86.64	68.18	1.606	0.780	26,352	0.0250	120	0d:1h:12min:54s	576 MB
8	3	90	6.0	6.0	0.500	11	91.50	71.29	1.537	0.790	28,548	0.0275	130	0d:1h:30min:23s	669 MB
9	3	90	7.5	3.0	0.800	17	86.88	84.84	1.925	0.718	18,300	0.0225	110	0d:0h:47min:27s	368 MB
10	3	90	7.5	4.0	0.600	14	85.53	82.85	1.836	0.712	19,520	0.0275	120	0d:0h:52min:01s	404 MB
11	3	90	7.5	5.0	0.480	12	84.50	74.77	1.776	0.730	18,792	0.0325	130	0d:0h:59min:02s	427 MB
12	3	90	7.5	6.0	0.400	11	89.57	80.79	1.657	0.772	25,216	0.0325	150	0d:2h:03min:01s	658 MB
13	3	90	9.0	3.0	0.667	18	93.10	99.22	2.216	0.646	16,592	0.0250	120	0d:1h:03min:31s	339 MB
14	3	90	9.0	4.0	0.500	15	93.78	95.31	1.983	0.665	17,934	0.0300	130	0d:1h:39min:17s	368 MB
15	3	90	9.0	5.0	0.400	13	94.82	92.67	1.877	0.715	21,248	0.0325	140	0d:1h:39min:20s	477 MB
16	3	90	9.0	6.0	0.333	11	88.79	85.13	1.862	0.698	25,620	0.0350	150	0d:2h:09min:26s	573 MB
17	3	70	4.5	3.0	1.333	14	68.53	48.89	1.659	0.773	16,758	0.0200	110	0d:0h:19min:40s	343 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
18	3	70	4.5	4.0	1.000	12	71.14	50.72	1.550	0.795	20,384	0.0225	120	0d:0h:24min:25s	437 MB
19	3	70	4.5	5.0	0.800	10	66.71	51.27	1.509	0.827	23,760	0.0250	140	0d:0h:42min:24s	590 MB
20	3	70	4.5	6.0	0.667	9	68.29	57.59	1.473	0.823	25,630	0.0275	160	0d:1h:08min:17s	681 MB
21	3	70	6.0	3.0	1.000	15	73.10	61.72	1.785	0.734	13,328	0.0250	110	0d:0h:22min:32s	286 MB
22	3	70	6.0	4.0	0.750	12	68.08	59.44	1.756	0.721	17,600	0.0275	120	0d:0h:34min:14s	367 MB
23	3	70	6.0	5.0	0.600	11	74.99	66.05	1.630	0.785	19,910	0.0300	140	0d:1h:10min:11s	496 MB
24	3	70	6.0	6.0	0.500	9	66.21	55.46	1.664	0.761	24,696	0.0325	160	0d:1h:16min:15s	625 MB
25	3	70	7.5	3.0	0.800	15	70.92	78.59	2.251	0.634	13,640	0.0275	120	0d:0h:43min:23s	326 MB
26	3	70	7.5	4.0	0.600	12	66.58	66.86	2.182	0.642	15,544	0.0325	140	0d:0h:41min:21s	343 MB
27	3	70	7.5	5.0	0.480	11	73.63	71.42	1.859	0.719	21,248	0.0325	160	0d:1h:14min:39s	536 MB
28	3	70	7.5	6.0	0.400	9	65.54	65.02	1.856	0.709	26,718	0.0350	180	0d:2h:41min:37s	712 MB
29	3	70	9.0	3.0	0.667	15	69.12	89.33	2.746	0.565	13,664	0.0300	140	0d:1h:02min:13s	322 MB
30	3	70	9.0	4.0	0.500	12	65.81	77.03	2.760	0.558	18,900	0.0325	170	0d:1h:25min:17s	442 MB
31	3	70	9.0	5.0	0.400	11	73.01	81.18	2.240	0.641	21,700	0.0350	190	0d:2h:05min:38s	531 MB
32	3	70	9.0	6.0	0.333	9	65.08	71.07	2.400	0.607	28,208	0.0375	210	0d:3h:21min:48s	712 MB
33	3	50	4.5	3.0	1.333	12	52.68	41.43	1.757	0.736	15,704	0.0225	130	0d:0h:19min:13s	339 MB
34	3	50	4.5	4.0	1.000	10	52.53	41.92	1.674	0.761	19,360	0.0250	150	0d:0h:31min:38s	435 MB
35	3	50	4.5	5.0	0.800	8	46.72	40.13	1.638	0.771	24,500	0.0275	180	0d:0h:54min:58s	646 MB
36	3	50	4.5	6.0	0.667	7	45.49	40.88	1.603	0.777	33,552	0.0275	210	0d:2h:09min:47s	942 MB
37	3	50	6.0	3.0	1.000	12	50.61	50.00	2.216	0.630	13,530	0.0275	150	0d:0h:26min:50s	306 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
38	3	50	6.0	4.0	0.750	10	51.23	48.41	1.990	0.670	17,812	0.0300	170	0d:0h:47min:16s	424 MB
39	3	50	6.0	5.0	0.600	9	54.36	50.31	1.835	0.731	20,790	0.0325	190	0d:1h:03min:13s	529 MB
40	3	50	6.0	6.0	0.500	8	55.19	48.77	1.782	0.729	27,580	0.0325	210	0d:1h:37min:56s	707 MB
41	3	50	7.5	3.0	0.800	12	49.56	63.98	3.126	0.493	14,336	0.0300	170	0d:0h:32min:40s	335 MB
42	3	50	7.5	4.0	0.600	10	50.31	59.06	2.744	0.556	19,600	0.0325	190	0d:1h:24min:11s	464 MB
43	3	50	7.5	5.0	0.480	9	53.55	60.72	2.289	0.624	22,484	0.0350	210	0d:1h:56min:26s	581 MB
44	3	50	7.5	6.0	0.400	8	54.52	59.27	2.238	0.631	25,992	0.0375	230	0d:2h:48min:42s	691 MB
45	3	50	9.0	3.0	0.667	12	48.69	74.61	3.900	0.419	14,700	0.0325	190	0d:1h:00min:03s	366 MB
46	3	50	9.0	4.0	0.500	10	49.57	70.88	3.227	0.477	19,908	0.0350	220	0d:1h:55min:29s	506 MB
47	3	50	9.0	5.0	0.400	9	53.49	70.19	2.906	0.550	23,780	0.0375	250	0d:2h:42min:00s	639 MB
48	3	50	9.0	6.0	0.333	8	54.07	67.23	2.778	0.548	27,200	0.0400	270	0d:3h:28min:50s	736 MB
49	3	30	4.5	3.0	1.333	8	27.55	31.21	2.615	0.587	12,992	0.0300	210	0d:0h:21min:12s	335 MB
50	3	30	4.5	4.0	1.000	7	29.67	29.20	2.102	0.663	16,470	0.0325	260	0d:0h:28min:35s	433 MB
51	3	30	4.5	5.0	0.800	6	29.69	29.97	2.061	0.690	23,100	0.0325	280	0d:1h:07min:39s	683 MB
52	3	30	4.5	6.0	0.667	6	36.26	31.39	1.824	0.725	27,440	0.0325	320	0d:1h:05min:22s	862 MB
53	3	30	6.0	3.0	1.000	9	32.26	41.36	3.123	0.498	13,230	0.0325	250	0d:0h:32min:42s	342 MB
54	3	30	6.0	4.0	0.750	7	29.44	39.86	3.260	0.489	18,774	0.0350	270	0d:1h:22min:28s	533 MB
55	3	30	6.0	5.0	0.600	6	29.53	38.36	2.766	0.567	23,780	0.0375	290	0d:2h:50min:18s	762 MB
56	3	30	6.0	6.0	0.500	6	35.30	38.22	2.359	0.613	28,208	0.0375	310	0d:2h:52min:07s	926 MB
57	3	30	7.5	3.0	0.800	9	31.18	57.17	4.969	0.344	14,162	0.0350	270	0d:1h:09min:29s	407 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
58	3	30	7.5	4.0	0.600	7	28.36	49.98	4.265	0.396	20,296	0.0375	300	0d:2h:17min:15s	643 MB
59	3	30	7.5	5.0	0.480	6	28.54	48.59	4.067	0.430	25,568	0.0400	320	0d:3h:50min:17s	866 MB
60	3	30	7.5	6.0	0.400	6	35.31	48.08	3.111	0.513	30,268	0.0400	330	0d:4h:38min:11s	1 GB
61	3	30	9.0	3.0	0.667	9	31.07	60.74	8.933	0.252	15,088	0.0375	350	0d:1h:38min:43s	595 MB
62	3	30	9.0	4.0	0.500	7	28.33	55.41	6.990	0.266	21,534	0.0400	380	0d:4h:18min:41s	875 MB
63	3	30	9.0	5.0	0.400	6	28.56	56.56	5.740	0.309	26,924	0.0425	410	0d:5h:49min:29s	1 GB
64	3	30	9.0	6.0	0.333	6	35.40	55.67	3.986	0.412	31,800	0.0425	340	0d:11h:08min:24s	1 GB
65	5	90	4.5	3.0	2.222	25	92.06	47.53	1.349	0.898	38,192	0.0100	90	0d:0h:44min:55s	604 MB
66	5	90	4.5	4.0	1.667	21	88.94	47.04	1.338	0.904	37,065	0.0125	90	0d:0h:30min:42s	459 MB
67	5	90	4.5	5.0	1.333	19	94.35	55.69	1.343	0.875	35,640	0.0150	100	0d:0h:30min:58s	478 MB
68	5	90	4.5	6.0	1.111	17	93.58	53.74	1.332	0.894	47,397	0.0150	120	0d:0h:59min:12s	664 MB
69	5	90	6.0	3.0	1.667	26	88.05	54.24	1.448	0.829	31,707	0.0125	90	0d:0h:31min:50s	402 MB
70	5	90	6.0	4.0	1.250	22	88.41	54.26	1.419	0.862	32,634	0.0150	100	0d:0h:27min:33s	435 MB
71	5	90	6.0	5.0	1.000	19	86.55	53.04	1.421	0.861	33,990	0.0175	110	0d:0h:35min:18s	510 MB
72	5	90	6.0	6.0	0.833	17	86.45	53.36	1.409	0.866	35,200	0.0200	120	0d:0h:32min:10s	557 MB
73	5	90	7.5	3.0	1.333	27	88.14	65.42	1.505	0.844	36,720	0.0125	100	0d:0h:54min:45s	513 MB
74	5	90	7.5	4.0	1.000	23	90.45	62.88	1.481	0.822	39,555	0.0150	100	0d:0h:48min:51s	547 MB
75	5	90	7.5	5.0	0.800	20	90.09	66.47	1.443	0.882	41,406	0.0175	110	0d:1h:08min:31s	667 MB
76	5	90	7.5	6.0	0.667	18	91.81	68.31	1.409	0.867	41,088	0.0200	120	0d:1h:06min:34s	703 MB
77	5	90	9.0	3.0	1.111	28	90.08	69.50	1.658	0.754	21,809	0.0175	110	0d:0h:29min:04s	319 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
78	5	90	9.0	4.0	0.833	23	87.06	65.74	1.603	0.782	26,962	0.0200	120	0d:0h:34min:58s	412 MB
79	5	90	9.0	5.0	0.667	20	87.33	71.46	1.505	0.824	29,280	0.0225	120	0d:0h:48min:24s	498 MB
80	5	90	9.0	6.0	0.556	18	89.03	67.68	1.502	0.814	31,232	0.0250	130	0d:0h:46min:20s	529 MB
81	5	70	4.5	3.0	2.222	22	71.42	42.75	1.398	0.850	44,070	0.0100	90	0d:0h:46min:47s	536 MB
82	5	70	4.5	4.0	1.667	18	66.81	40.01	1.398	0.871	43,296	0.0125	120	0d:0h:38min:56s	586 MB
83	5	70	4.5	5.0	1.333	16	68.70	43.76	1.365	0.900	42,237	0.0150	140	0d:0h:46min:41s	648 MB
84	5	70	4.5	6.0	1.111	14	66.10	41.90	1.365	0.908	42,456	0.0175	150	0d:0h:52min:41s	692 MB
85	5	70	6.0	3.0	1.667	23	70.54	46.19	1.497	0.824	35,088	0.0125	100	0d:0h:31min:17s	454 MB
86	5	70	6.0	4.0	1.250	19	68.44	46.75	1.464	0.828	37,797	0.0150	120	0d:0h:42min:33s	518 MB
87	5	70	6.0	5.0	1.000	17	70.96	45.81	1.460	0.844	29,700	0.0200	140	0d:0h:24min:11s	447 MB
88	5	70	6.0	6.0	0.833	15	70.03	49.38	1.434	0.827	38,918	0.0200	160	0d:0h:52min:01s	624 MB
89	5	70	7.5	3.0	1.333	24	71.82	55.39	1.561	0.827	29,412	0.0150	120	0d:0h:54min:19s	430 MB
90	5	70	7.5	4.0	1.000	20	71.22	52.49	1.529	0.804	32,379	0.0175	120	0d:0h:56min:37s	472 MB
91	5	70	7.5	5.0	0.800	17	68.59	57.45	1.494	0.818	36,046	0.0200	140	0d:0h:53min:42s	620 MB
92	5	70	7.5	6.0	0.667	15	67.86	54.20	1.479	0.837	37,922	0.0225	160	0d:0h:56min:40s	676 MB
93	5	70	9.0	3.0	1.111	24	69.09	60.16	1.668	0.785	25,026	0.0175	110	0d:0h:57min:43s	397 MB
94	5	70	9.0	4.0	0.833	20	68.99	56.78	1.674	0.750	23,912	0.0225	120	0d:0h:42min:28s	388 MB
95	5	70	9.0	5.0	0.667	17	66.81	56.60	1.627	0.765	22,852	0.0275	140	0d:0h:44min:33s	398 MB
96	5	70	9.0	6.0	0.556	15	66.48	54.65	1.592	0.774	25,864	0.0300	170	0d:0h:48min:52s	462 MB
97	5	50	4.5	3.0	2.222	18	49.20	30.95	1.481	0.834	33,456	0.0125	120	0d:0h:22min:22s	455 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
98	5	50	4.5	4.0	1.667	15	48.30	31.95	1.442	0.829	36,039	0.0150	140	0d:0h:35min:44s	517 MB
99	5	50	4.5	5.0	1.333	13	47.63	32.19	1.438	0.875	37,698	0.0175	160	0d:0h:36min:34s	624 MB
100	5	50	4.5	6.0	1.111	12	50.53	33.55	1.403	0.859	37,236	0.0200	190	0d:0h:40min:18s	737 MB
101	5	50	6.0	3.0	1.667	19	50.26	37.93	1.600	0.769	29,283	0.0150	130	0d:0h:31min:11s	448 MB
102	5	50	6.0	4.0	1.250	16	50.75	38.17	1.553	0.789	33,634	0.0175	150	0d:0h:42min:50s	572 MB
103	5	50	6.0	5.0	1.000	14	51.45	37.44	1.517	0.813	36,043	0.0200	170	0d:0h:42min:08s	644 MB
104	5	50	6.0	6.0	0.833	12	48.31	35.51	1.500	0.817	31,232	0.0250	190	0d:0h:35min:40s	579 MB
105	5	50	7.5	3.0	1.333	19	48.19	41.34	1.795	0.756	20,740	0.0200	140	0d:0h:25min:27s	363 MB
106	5	50	7.5	4.0	1.000	16	48.86	41.03	1.709	0.741	20,416	0.0250	160	0d:0h:23min:28s	364 MB
107	5	50	7.5	5.0	0.800	14	50.04	42.74	1.615	0.761	23,912	0.0275	180	0d:0h:41min:49s	444 MB
108	5	50	7.5	6.0	0.667	12	47.03	40.24	1.609	0.761	27,136	0.0300	210	0d:1h:02min:14s	576 MB
109	5	50	9.0	3.0	1.111	20	51.09	49.75	1.920	0.711	18,422	0.0225	150	0d:0h:35min:27s	346 MB
110	5	50	9.0	4.0	0.833	16	48.04	43.52	1.882	0.710	20,125	0.0275	170	0d:0h:35min:38s	378 MB
111	5	50	9.0	5.0	0.667	14	48.94	46.41	1.764	0.747	20,252	0.0325	190	0d:0h:41min:55s	431 MB
112	5	50	9.0	6.0	0.556	13	52.87	46.47	1.681	0.747	25,216	0.0325	210	0d:1h:08min:33s	537 MB
113	5	30	4.5	3.0	2.222	14	31.98	22.66	1.625	0.782	22,620	0.0175	160	0d:0h:15min:41s	368 MB
114	5	30	4.5	4.0	1.667	11	28.54	22.24	1.599	0.773	28,160	0.0200	200	0d:0h:26min:12s	547 MB
115	5	30	4.5	5.0	1.333	10	31.05	23.31	1.518	0.808	29,280	0.0225	230	0d:0h:34min:43s	688 MB
116	5	30	4.5	6.0	1.111	9	31.66	25.35	1.474	0.842	31,232	0.0250	270	0d:0h:45min:56s	834 MB
117	5	30	6.0	3.0	1.667	14	30.10	26.52	1.911	0.693	17,516	0.0225	180	0d:0h:16min:26s	341 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
118	5	30	6.0	4.0	1.250	12	31.82	26.40	1.754	0.741	21,472	0.0250	200	0d:0h:20min:18s	418 MB
119	5	30	6.0	5.0	1.000	10	29.99	26.05	1.729	0.733	21,838	0.0300	240	0d:0h:26min:12s	517 MB
120	5	30	6.0	6.0	0.833	9	30.66	25.46	1.667	0.766	24,696	0.0325	260	0d:0h:38min:33s	625 MB
121	5	30	7.5	3.0	1.333	14	29.14	32.11	2.389	0.602	15,128	0.0275	210	0d:0h:24min:46s	322 MB
122	5	30	7.5	4.0	1.000	12	30.93	29.73	2.092	0.667	18,816	0.0300	230	0d:0h:33min:32s	419 MB
123	5	30	7.5	5.0	0.800	10	29.17	29.94	2.105	0.684	23,240	0.0325	250	0d:0h:47min:06s	572 MB
124	5	30	7.5	6.0	0.667	9	29.90	30.26	1.917	0.698	26,718	0.0350	280	0d:1h:16min:52s	739 MB
125	5	30	9.0	3.0	1.111	14	28.91	39.34	3.122	0.519	14,336	0.0300	230	0d:0h:38min:15s	321 MB
126	5	30	9.0	4.0	0.833	12	30.19	34.76	2.510	0.584	18,900	0.0325	250	0d:0h:46min:18s	442 MB
127	5	30	9.0	5.0	0.667	10	29.04	34.37	2.370	0.626	21,170	0.0375	280	0d:1h:19min:18s	605 MB
128	5	30	9.0	6.0	0.556	9	29.81	32.80	2.333	0.616	28,208	0.0375	330	0d:1h:49min:23s	831 MB
129	7	90	4.5	3.0	3.111	31	86.74	43.52	1.270	0.987	56,625	0.0075	90	0d:1h:09min:17s	713 MB
130	7	90	4.5	4.0	2.333	27	88.37	48.06	1.268	0.939	82,626	0.0075	100	0d:2h:29min:29s	985 MB
131	7	90	4.5	5.0	1.867	24	88.73	47.03	1.251	0.971	63,720	0.0100	110	0d:1h:25min:54s	857 MB
132	7	90	4.5	6.0	1.556	22	91.42	47.20	1.237	0.915	52,633	0.0125	120	0d:0h:54min:12s	683 MB
133	7	90	6.0	3.0	2.333	34	89.07	48.62	1.362	0.933	38,080	0.0100	110	0d:0h:56min:22s	473 MB
134	7	90	6.0	4.0	1.750	29	88.59	50.74	1.331	0.890	57,330	0.0100	120	0d:1h:58min:00s	736 MB
135	7	90	6.0	5.0	1.400	26	91.51	51.84	1.320	0.882	50,427	0.0125	130	0d:1h:38min:44s	712 MB
136	7	90	6.0	6.0	1.167	23	89.12	52.11	1.314	0.875	46,434	0.0150	150	0d:1h:23min:47s	680 MB
137	7	90	7.5	3.0	1.867	36	89.81	51.67	1.413	0.872	28,665	0.0125	90	0d:0h:24min:01s	389 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
138	7	90	7.5	4.0	1.400	31	92.42	54.46	1.377	0.874	42,007	0.0125	100	0d:0h:45min:24s	534 MB
139	7	90	7.5	5.0	1.120	27	91.27	57.42	1.369	0.853	41,040	0.0150	110	0d:0h:51min:56s	548 MB
140	7	90	7.5	6.0	0.933	24	90.00	56.31	1.360	0.871	40,737	0.0175	120	0d:0h:50min:32s	572 MB
141	7	90	9.0	3.0	1.556	37	88.76	54.39	1.476	0.841	32,912	0.0125	90	0d:0h:29min:40s	421 MB
142	7	90	9.0	4.0	1.167	31	87.47	59.29	1.433	0.824	34,164	0.0150	110	0d:0h:47min:50s	434 MB
143	7	90	9.0	5.0	0.933	27	87.32	57.56	1.437	0.831	28,080	0.0200	120	0d:0h:23min:53s	397 MB
144	7	90	9.0	6.0	0.778	25	92.86	65.17	1.405	0.883	35,090	0.0200	130	0d:0h:48min:08s	554 MB
145	7	70	4.5	3.0	3.111	28	69.67	34.18	1.312	0.914	34,000	0.0100	100	0d:0h:22min:06s	403 MB
146	7	70	4.5	4.0	2.333	24	69.68	38.33	1.312	0.958	51,920	0.0100	120	0d:0h:53min:06s	699 MB
147	7	70	4.5	5.0	1.867	21	68.24	38.31	1.304	0.908	45,465	0.0125	140	0d:0h:41min:51s	675 MB
148	7	70	4.5	6.0	1.556	19	69.12	40.25	1.302	0.896	61,308	0.0125	160	0d:1h:37min:43s	890 MB
149	7	70	6.0	3.0	2.333	30	69.39	39.04	1.399	0.881	27,027	0.0125	120	0d:0h:19min:06s	362 MB
150	7	70	6.0	4.0	1.750	26	72.07	42.31	1.362	0.867	41,067	0.0125	140	0d:0h:41min:37s	550 MB
151	7	70	6.0	5.0	1.400	22	67.26	40.55	1.363	0.878	40,071	0.0150	160	0d:0h:41min:05s	562 MB
152	7	70	6.0	6.0	1.167	20	69.34	42.06	1.345	0.881	38,535	0.0175	180	0d:0h:32min:16s	562 MB
153	7	70	7.5	3.0	1.867	31	68.04	43.58	1.489	0.839	22,572	0.0150	130	0d:0h:21min:13s	320 MB
154	7	70	7.5	4.0	1.400	27	71.75	46.62	1.427	0.832	33,402	0.0150	120	0d:0h:31min:57s	497 MB
155	7	70	7.5	5.0	1.120	23	68.76	45.29	1.401	0.856	36,153	0.0175	140	0d:0h:31min:44s	483 MB
156	7	70	7.5	6.0	0.933	21	71.53	45.60	1.408	0.849	35,200	0.0200	160	0d:0h:33min:30s	529 MB
157	7	70	9.0	3.0	1.556	32	68.19	46.58	1.517	0.814	26,676	0.0150	120	0d:0h:21min:53s	381 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
158	7	70	9.0	4.0	1.167	27	68.87	49.18	1.475	0.808	29,250	0.0175	140	0d:0h:26min:45s	440 MB
159	7	70	9.0	5.0	0.933	24	71.25	50.14	1.473	0.815	31,204	0.0200	140	0d:0h:32min:47s	523 MB
160	7	70	9.0	6.0	0.778	21	68.94	49.02	1.440	0.841	32,828	0.0225	160	0d:0h:39min:03s	570 MB
161	7	50	4.5	3.0	3.111	24	50.91	29.53	1.370	0.928	40,120	0.0100	120	0d:0h:35min:49s	543 MB
162	7	50	4.5	4.0	2.333	20	49.09	28.96	1.376	0.922	39,183	0.0125	140	0d:0h:34min:17s	569 MB
163	7	50	4.5	5.0	1.867	18	51.00	30.16	1.334	0.892	37,905	0.0150	160	0d:0h:33min:27s	606 MB
164	7	50	4.5	6.0	1.556	16	50.32	30.06	1.339	0.888	50,076	0.0150	180	0d:0h:48min:08s	895 MB
165	7	50	6.0	3.0	2.333	25	49.30	32.78	1.432	0.831	31,707	0.0125	130	0d:0h:27min:33s	448 MB
166	7	50	6.0	4.0	1.750	21	49.10	31.57	1.433	0.848	34,398	0.0150	150	0d:0h:24min:07s	489 MB
167	7	50	6.0	5.0	1.400	19	51.91	32.77	1.419	0.865	33,990	0.0175	170	0d:0h:30min:47s	539 MB
168	7	50	6.0	6.0	1.167	17	52.05	33.75	1.390	0.866	35,520	0.0200	190	0d:0h:31min:15s	580 MB
169	7	50	7.5	3.0	1.867	26	49.86	35.91	1.548	0.788	26,559	0.0150	130	0d:0h:23min:50s	382 MB
170	7	50	7.5	4.0	1.400	22	50.14	34.41	1.529	0.820	22,880	0.0200	140	0d:0h:15min:32s	343 MB
171	7	50	7.5	5.0	1.120	19	49.67	33.90	1.468	0.833	25,334	0.0225	160	0d:0h:19min:55s	402 MB
172	7	50	7.5	6.0	0.933	17	49.95	35.36	1.446	0.823	28,050	0.0250	180	0d:0h:24min:07s	468 MB
173	7	50	9.0	3.0	1.556	27	50.75	39.24	1.677	0.750	17,576	0.0200	130	0d:0h:13min:19s	278 MB
174	7	50	9.0	4.0	1.167	22	48.54	37.03	1.616	0.790	21,450	0.0225	150	0d:0h:24min:15s	360 MB
175	7	50	9.0	5.0	0.933	19	48.20	38.37	1.561	0.780	25,056	0.0250	170	0d:0h:29min:54s	443 MB
176	7	50	9.0	6.0	0.778	17	48.57	38.44	1.512	0.797	27,028	0.0275	190	0d:0h:35min:37s	558 MB
177	7	30	4.5	3.0	3.111	18	29.85	19.76	1.472	0.820	23,730	0.0150	170	0d:0h:10min:17s	401 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
178	7	30	4.5	4.0	2.333	15	29.06	20.77	1.427	0.866	35,916	0.0150	190	0d:0h:35min:19s	772 MB
179	7	30	4.5	5.0	1.867	13	28.85	20.18	1.445	0.860	28,783	0.0200	240	0d:0h:25min:33s	687 MB
180	7	30	4.5	6.0	1.556	12	30.31	19.84	1.408	0.846	37,120	0.0200	260	0d:0h:42min:05s	1 GB
181	7	30	6.0	3.0	2.333	19	30.43	22.85	1.588	0.824	21,534	0.0175	180	0d:0h:15min:58s	393 MB
182	7	30	6.0	4.0	1.750	16	30.70	22.27	1.555	0.790	25,520	0.0200	210	0d:0h:20min:53s	449 MB
183	7	30	6.0	5.0	1.400	14	30.64	22.99	1.520	0.807	27,840	0.0225	230	0d:0h:22min:18s	581 MB
184	7	30	6.0	6.0	1.167	12	29.16	21.78	1.495	0.805	25,630	0.0275	250	0d:0h:23min:33s	674 MB
185	7	30	7.5	3.0	1.867	19	28.97	24.80	1.809	0.770	15,900	0.0225	190	0d:0h:14min:31s	279 MB
186	7	30	7.5	4.0	1.400	16	29.34	24.17	1.692	0.756	20,416	0.0250	210	0d:0h:21min:53s	395 MB
187	7	30	7.5	5.0	1.120	14	29.77	24.96	1.632	0.759	23,912	0.0275	240	0d:0h:30min:51s	504 MB
188	7	30	7.5	6.0	0.933	12	28.37	23.18	1.620	0.779	27,392	0.0300	270	0d:0h:50min:37s	784 MB
189	7	30	9.0	3.0	1.556	20	30.89	27.00	1.979	0.694	14,960	0.0250	190	0d:0h:13min:33s	266 MB
190	7	30	9.0	4.0	1.167	16	29.04	26.93	1.861	0.696	16,936	0.0300	220	0d:0h:19min:54s	345 MB
191	7	30	9.0	5.0	0.933	14	29.51	26.18	1.806	0.729	20,252	0.0325	250	0d:0h:26min:26s	513 MB
192	7	30	9.0	6.0	0.778	12	27.76	25.18	1.784	0.750	27,580	0.0325	280	0d:1h:01min:58s	864 MB
193	9	90	4.5	3.0	4.000	37	89.60	38.19	1.213	0.933	45,753	0.0075	90	0d:0h:30min:51s	414 MB
194	9	90	4.5	4.0	3.000	32	88.67	40.89	1.202	0.957	69,853	0.0075	100	0d:0h:54min:40s	675 MB
195	9	90	4.5	5.0	2.400	29	90.86	41.03	1.193	0.961	54,000	0.0100	120	0d:0h:44min:21s	602 MB
196	9	90	4.5	6.0	2.000	26	88.43	43.14	1.172	0.948	67,946	0.0100	130	0d:1h:09min:59s	909 MB
197	9	90	6.0	3.0	3.000	41	90.17	45.29	1.275	0.910	56,625	0.0075	110	0d:0h:38min:13s	559 MB

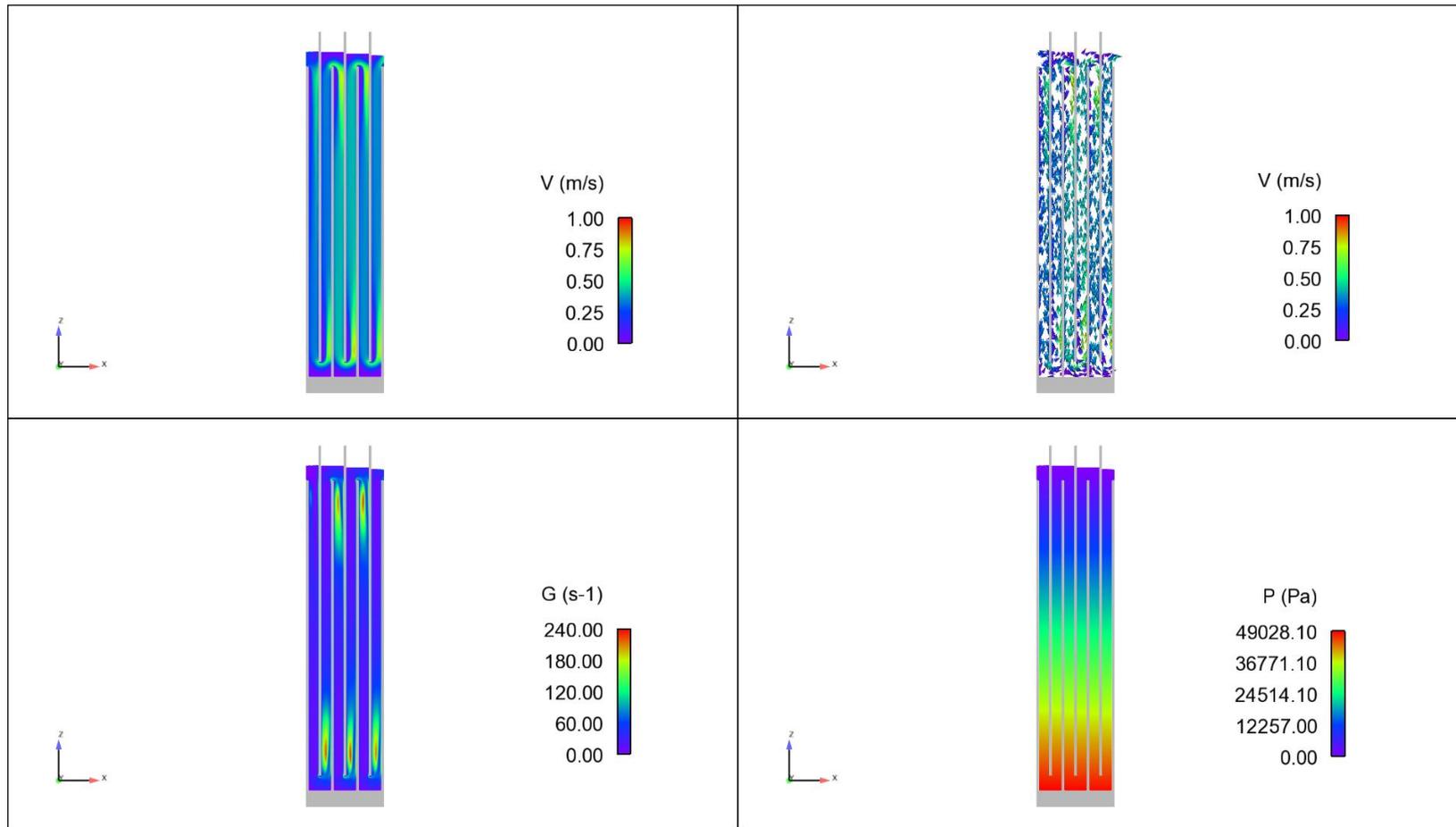
Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
198	9	90	6.0	4.0	2.250	35	88.42	45.24	1.269	0.899	46,534	0.0100	130	0d:0h:36min:57s	531 MB
199	9	90	6.0	5.0	1.800	31	88.67	47.42	1.282	0.904	63,838	0.0100	130	0d:1h:21min:04s	841 MB
200	9	90	6.0	6.0	1.500	28	88.62	47.13	1.253	0.907	53,655	0.0125	160	0d:0h:53min:51s	816 MB
201	9	90	7.5	3.0	2.400	44	91.59	48.38	1.325	0.883	36,040	0.0100	90	0d:0h:22min:44s	389 MB
202	9	90	7.5	4.0	1.800	37	88.79	46.16	1.322	0.905	34,848	0.0125	120	0d:0h:21min:03s	450 MB
203	9	90	7.5	5.0	1.440	33	90.75	51.76	1.314	0.887	33,480	0.0150	130	0d:0h:29min:13s	504 MB
204	9	90	7.5	6.0	1.200	30	92.16	58.30	1.311	0.918	44,730	0.0150	150	0d:1h:03min:23s	772 MB
205	9	90	9.0	3.0	2.000	46	91.48	50.12	1.384	0.861	26,928	0.0125	100	0d:0h:17min:43s	329 MB
206	9	90	9.0	4.0	1.500	39	91.30	53.78	1.368	0.859	40,365	0.0125	110	0d:0h:37min:11s	479 MB
207	9	90	9.0	5.0	1.200	34	89.79	58.33	1.356	0.877	40,071	0.0150	130	0d:0h:39min:21s	548 MB
208	9	90	9.0	6.0	1.000	31	92.66	55.37	1.338	0.885	38,168	0.0175	160	0d:0h:37min:34s	555 MB
209	9	70	4.5	3.0	4.000	33	68.42	29.55	1.251	0.929	29,920	0.0100	100	0d:0h:11min:27s	283 MB
210	9	70	4.5	4.0	3.000	29	70.73	32.93	1.240	0.943	44,000	0.0100	110	0d:0h:24min:53s	463 MB
211	9	70	4.5	5.0	2.400	26	71.97	33.76	1.222	0.934	37,497	0.0125	130	0d:0h:25min:53s	466 MB
212	9	70	4.5	6.0	2.000	23	68.59	34.56	1.231	0.918	50,688	0.0125	150	0d:0h:40min:19s	724 MB
213	9	70	6.0	3.0	3.000	36	68.61	35.35	1.315	0.893	36,040	0.0100	110	0d:0h:20min:58s	389 MB
214	9	70	6.0	4.0	2.250	31	69.45	34.00	1.311	0.916	34,144	0.0125	130	0d:0h:21min:55s	425 MB
215	9	70	6.0	5.0	1.800	27	67.61	36.12	1.299	0.912	33,573	0.0150	160	0d:0h:24min:15s	450 MB
216	9	70	6.0	6.0	1.500	25	71.16	39.79	1.287	0.894	42,174	0.0150	160	0d:0h:37min:24s	634 MB
217	9	70	7.5	3.0	2.400	38	68.48	37.23	1.389	0.861	26,829	0.0125	120	0d:0h:15min:06s	328 MB

Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
218	9	70	7.5	4.0	1.800	33	71.19	39.70	1.365	0.885	39,072	0.0125	120	0d:0h:28min:05s	518 MB
219	9	70	7.5	5.0	1.440	29	71.35	44.87	1.360	0.906	37,800	0.0150	150	0d:0h:34min:07s	569 MB
220	9	70	7.5	6.0	1.200	26	71.22	42.84	1.342	0.887	36,333	0.0175	170	0d:0h:34min:15s	524 MB
221	9	70	9.0	3.0	2.000	40	70.43	40.60	1.439	0.861	21,204	0.0150	120	0d:0h:09min:04s	272 MB
222	9	70	9.0	4.0	1.500	34	70.75	43.38	1.403	0.863	23,436	0.0175	130	0d:0h:14min:46s	318 MB
223	9	70	9.0	5.0	1.200	30	71.76	47.80	1.421	0.867	32,550	0.0175	150	0d:0h:34min:32s	522 MB
224	9	70	9.0	6.0	1.000	26	67.93	43.18	1.395	0.847	33,280	0.0200	180	0d:0h:25min:53s	549 MB
225	9	50	4.5	3.0	4.000	29	51.42	24.89	1.304	0.915	34,000	0.0100	110	0d:0h:14min:45s	337 MB
226	9	50	4.5	4.0	3.000	25	51.77	25.59	1.284	0.905	32,292	0.0125	130	0d:0h:16min:09s	375 MB
227	9	50	4.5	5.0	2.400	22	51.34	25.88	1.282	0.910	31,407	0.0150	160	0d:0h:19min:56s	413 MB
228	9	50	4.5	6.0	2.000	20	52.32	27.39	1.270	0.926	39,804	0.0150	180	0d:0h:29min:41s	645 MB
229	9	50	6.0	3.0	3.000	31	50.85	26.71	1.382	0.885	26,384	0.0125	130	0d:0h:12min:12s	330 MB
230	9	50	6.0	4.0	2.250	26	49.30	28.26	1.363	0.867	28,324	0.0150	150	0d:0h:13min:47s	385 MB
231	9	50	6.0	5.0	1.800	23	49.96	30.18	1.345	0.867	28,737	0.0175	170	0d:0h:18min:14s	448 MB
232	9	50	6.0	6.0	1.500	21	51.70	28.12	1.339	0.905	27,606	0.0200	190	0d:0h:15min:31s	525 MB
233	9	50	7.5	3.0	2.400	32	49.38	29.75	1.451	0.851	22,572	0.0150	140	0d:0h:09min:09s	310 MB
234	9	50	7.5	4.0	1.800	27	49.31	31.10	1.411	0.855	24,948	0.0175	160	0d:0h:14min:59s	379 MB
235	9	50	7.5	5.0	1.440	24	50.74	33.21	1.389	0.930	26,558	0.0200	170	0d:0h:24min:05s	515 MB
236	9	50	7.5	6.0	1.200	21	48.92	32.27	1.378	0.908	27,832	0.0225	190	0d:0h:24min:44s	594 MB
237	9	50	9.0	3.0	2.000	33	49.47	34.00	1.509	0.803	18,430	0.0175	130	0d:0h:10min:38s	280 MB

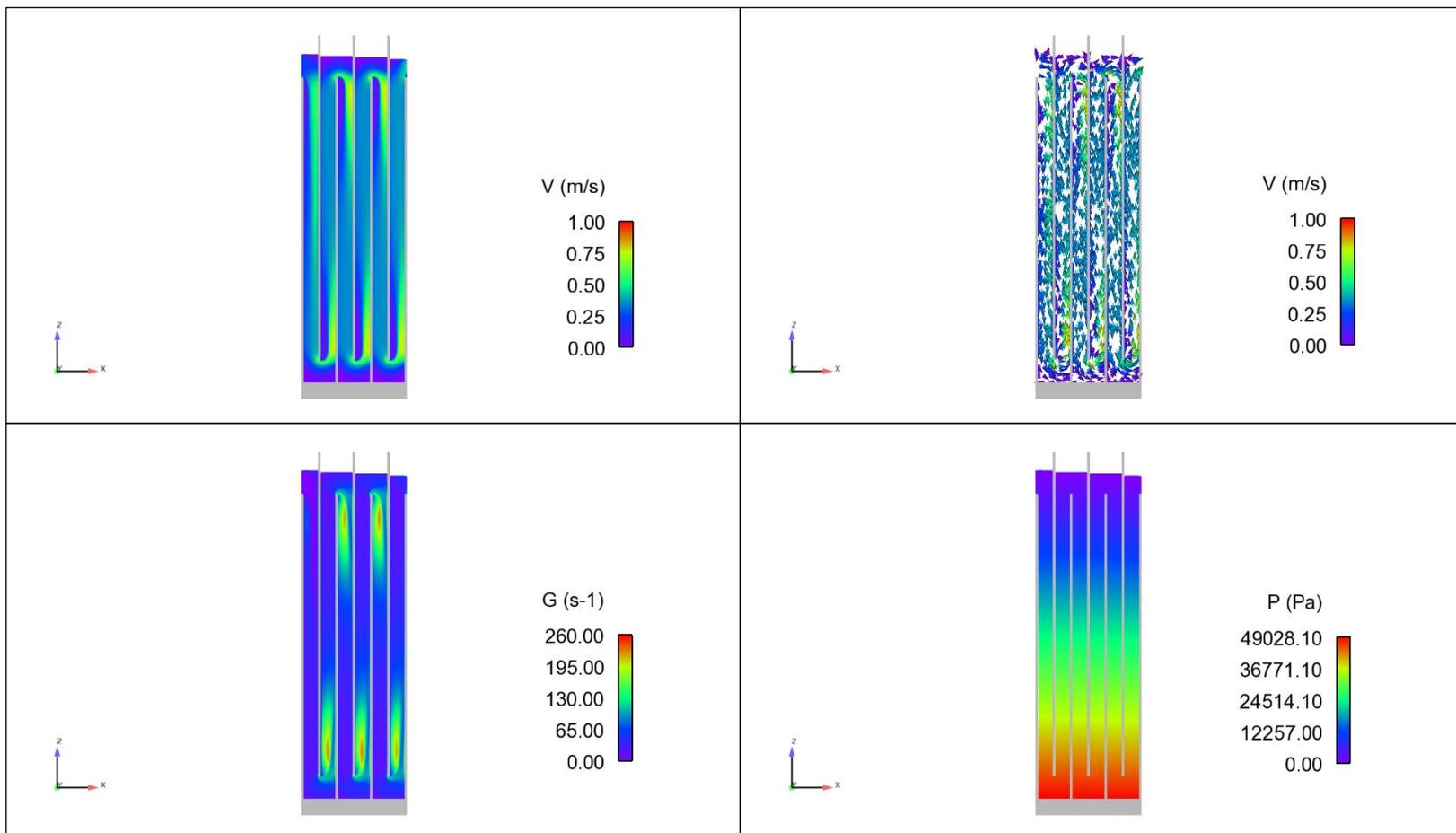
Nº	T (min)	G _{DISEÑO} (s ⁻¹)	L (m)	H (m)	b (m)	m	G _{FINAL} (s ⁻¹)	G _{FLOW3D} (s ⁻¹)	IM	θ ₁₀	Nº de celdas	Tamaño de malla promedio (m)	Tiempo de simulación (s)	Tiempo de cálculo computacional	Tamaño del archivo
238	9	50	9.0	4.0	1.500	28	50.25	33.76	1.502	0.810	21,462	0.0200	150	0d:0h:13min:34s	369 MB
239	9	50	9.0	5.0	1.200	24	48.69	36.22	1.428	0.881	24,960	0.0225	180	0d:0h:24min:18s	524 MB
240	9	50	9.0	6.0	1.000	22	50.95	35.78	1.424	0.832	24,990	0.0250	210	0d:0h:19min:38s	509 MB
241	9	30	4.5	3.0	4.000	22	29.74	16.83	1.398	0.853	28,016	0.0125	160	0d:0h:13min:07s	346 MB
242	9	30	4.5	4.0	3.000	19	30.64	18.06	1.367	0.866	29,007	0.0150	190	0d:0h:13min:53s	482 MB
243	9	30	4.5	5.0	2.400	17	31.60	18.87	1.337	0.889	28,830	0.0175	220	0d:0h:14min:32s	512 MB
244	9	30	4.5	6.0	2.000	15	30.62	17.86	1.348	0.893	29,440	0.0200	260	0d:0h:17min:26s	681 MB
245	9	30	6.0	3.0	3.000	23	29.02	18.35	1.516	0.810	17,848	0.0175	180	0d:0h:06min:10s	331 MB
246	9	30	6.0	4.0	2.250	20	30.73	19.78	1.472	0.848	20,240	0.0200	200	0d:0h:09min:46s	408 MB
247	9	30	6.0	5.0	1.800	17	29.38	18.98	1.451	0.846	23,520	0.0225	230	0d:0h:14min:07s	516 MB
248	9	30	6.0	6.0	1.500	15	28.89	19.99	1.423	0.855	25,088	0.0250	260	0d:0h:20min:02s	629 MB
249	9	30	7.5	3.0	2.400	24	29.52	20.69	1.633	0.789	16,660	0.0200	200	0d:0h:08min:43s	354 MB
250	9	30	7.5	4.0	1.800	20	29.33	21.33	1.561	0.798	20,384	0.0225	220	0d:0h:16min:27s	469 MB
251	9	30	7.5	5.0	1.440	18	31.06	24.04	1.469	0.857	22,464	0.0250	250	0d:0h:20min:42s	592 MB
252	9	30	7.5	6.0	1.200	16	30.70	24.19	1.446	0.877	20,874	0.0300	280	0d:0h:18min:37s	597 MB
253	9	30	9.0	3.0	2.000	25	30.54	23.45	1.708	0.754	14,798	0.0225	220	0d:0h:12min:10s	329 MB
254	9	30	9.0	4.0	1.500	21	30.76	24.37	1.623	0.766	15,360	0.0275	220	0d:0h:13min:30s	363 MB
255	9	30	9.0	5.0	1.200	18	30.00	26.19	1.559	0.809	18,616	0.0300	250	0d:0h:28min:07s	486 MB
256	9	30	9.0	6.0	1.000	16	30.03	24.29	1.541	0.794	20,488	0.0325	280	0d:0h:31min:04s	539 MB

Anexo 2: Fracción de los resultados gráficos obtenidos en la etapa de simulación.

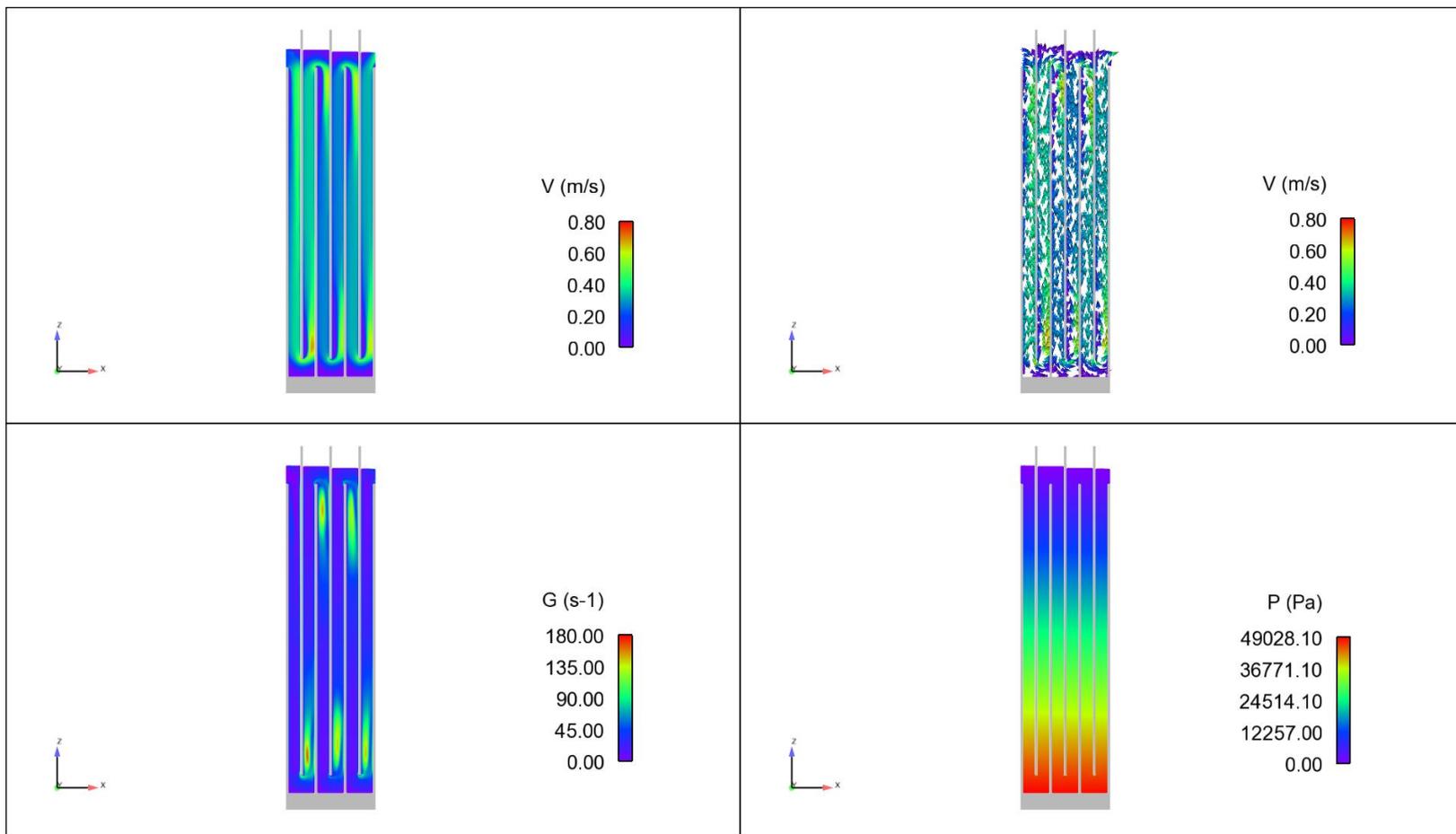
$T = 9 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



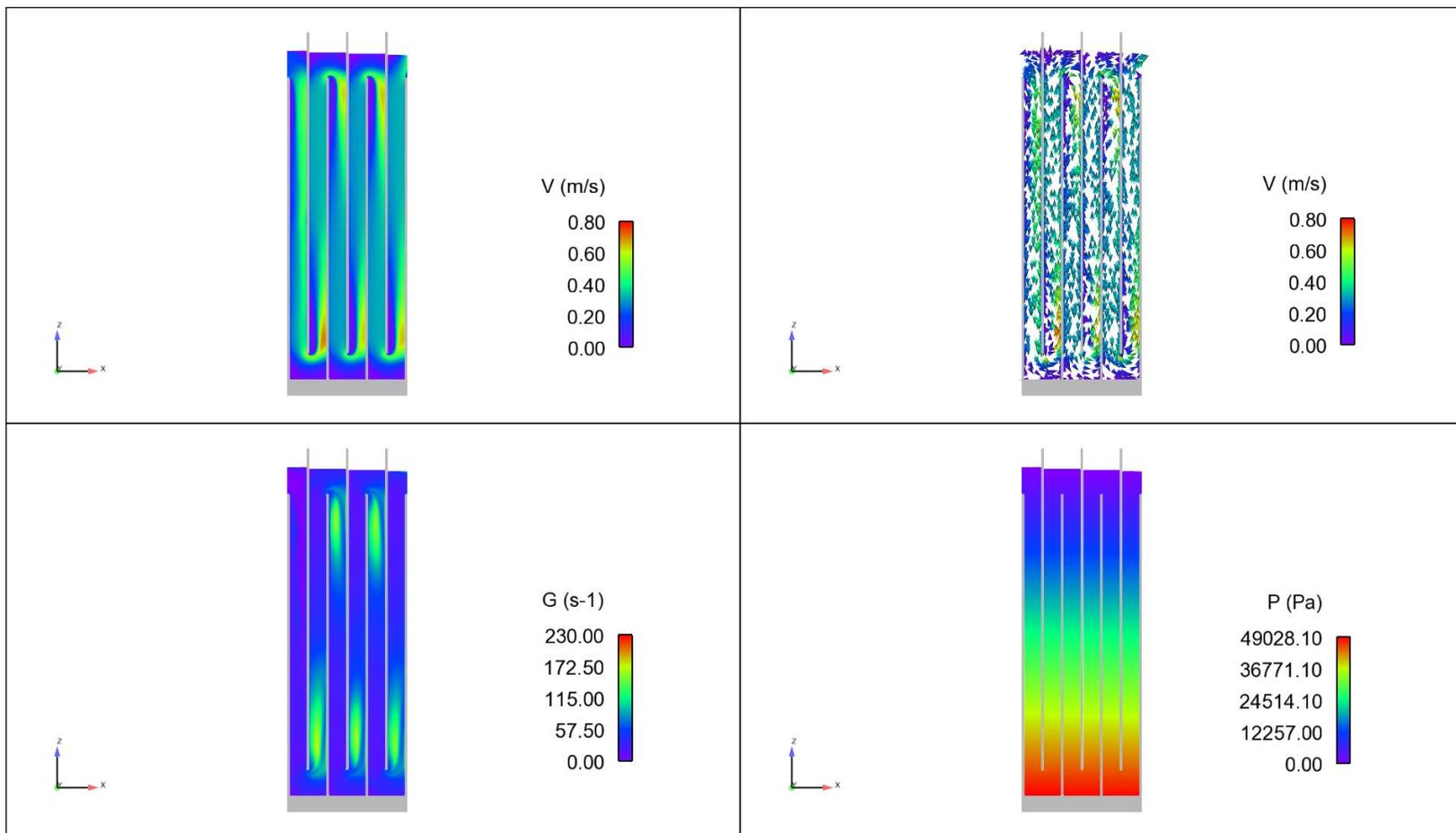
$T = 9 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



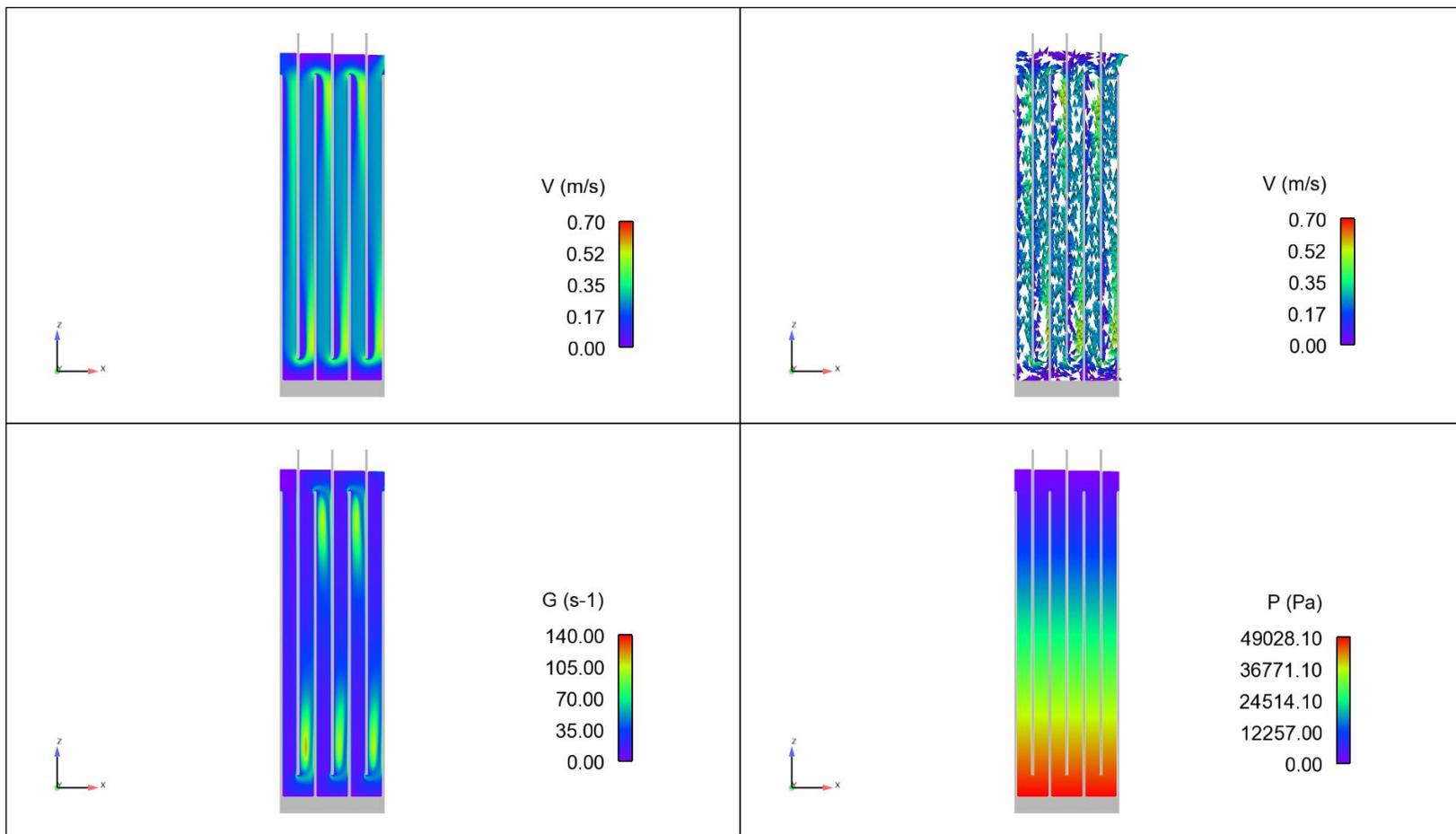
$T = 9 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



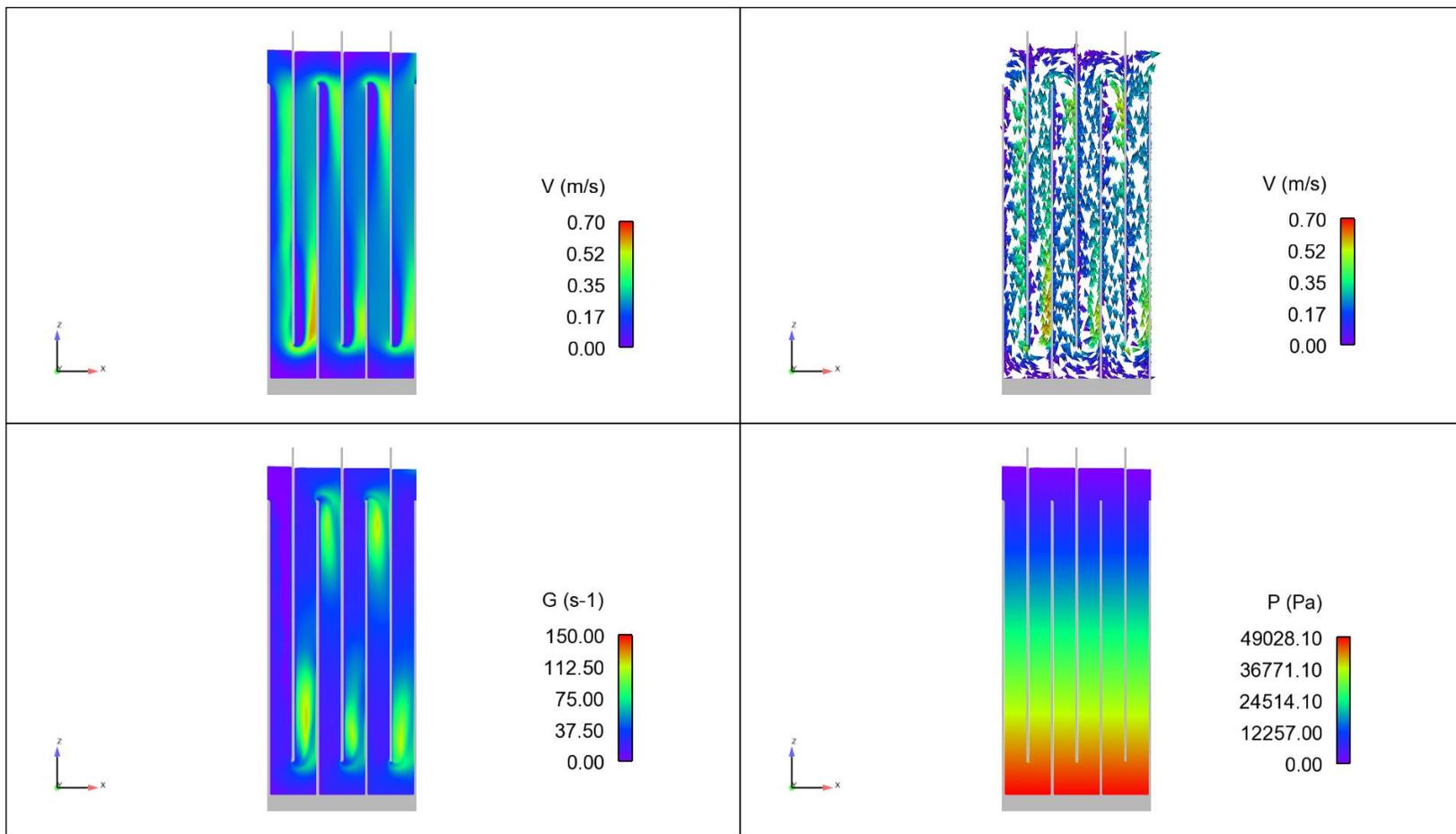
$T = 9 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



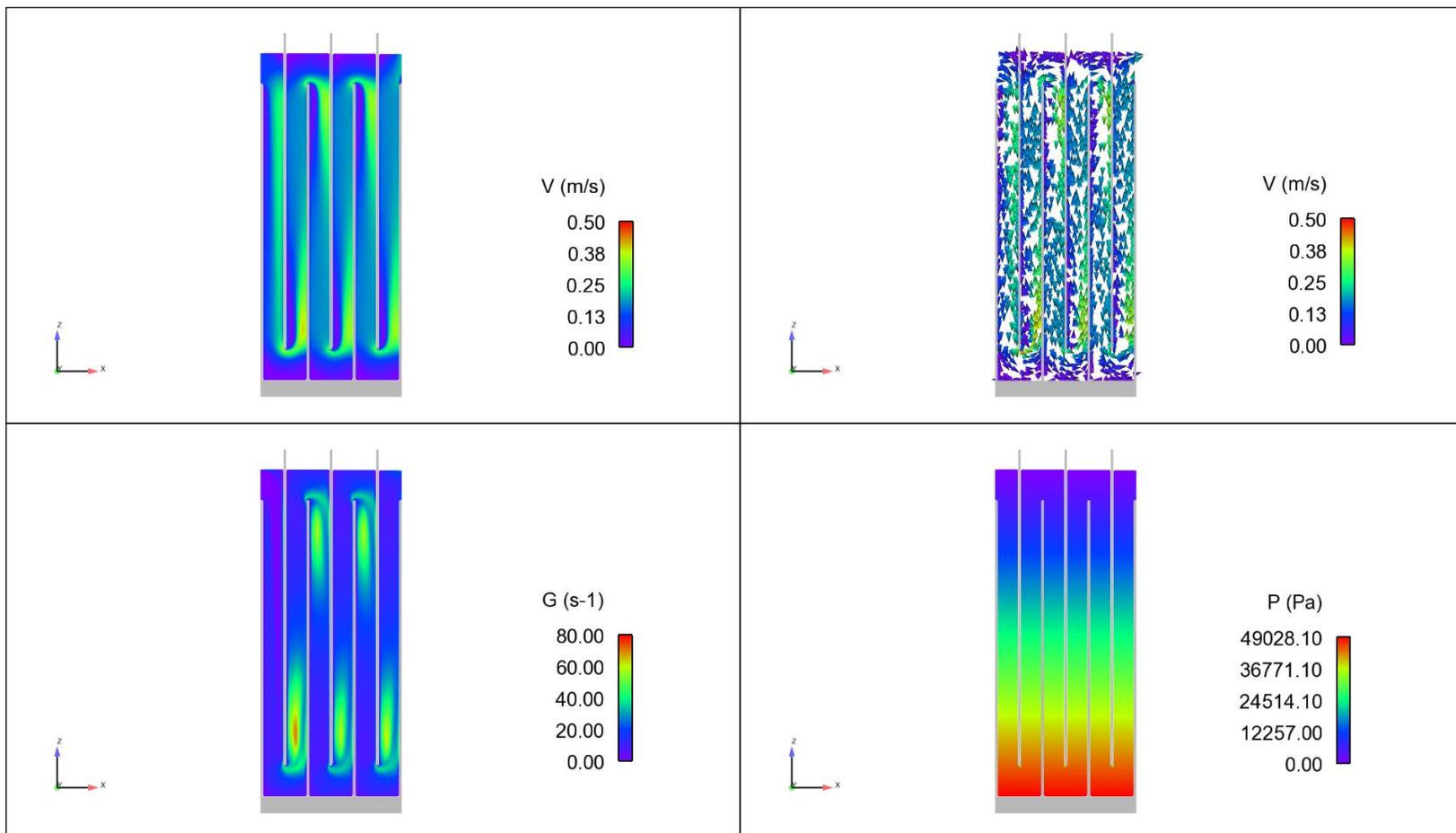
$T = 9 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 50 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



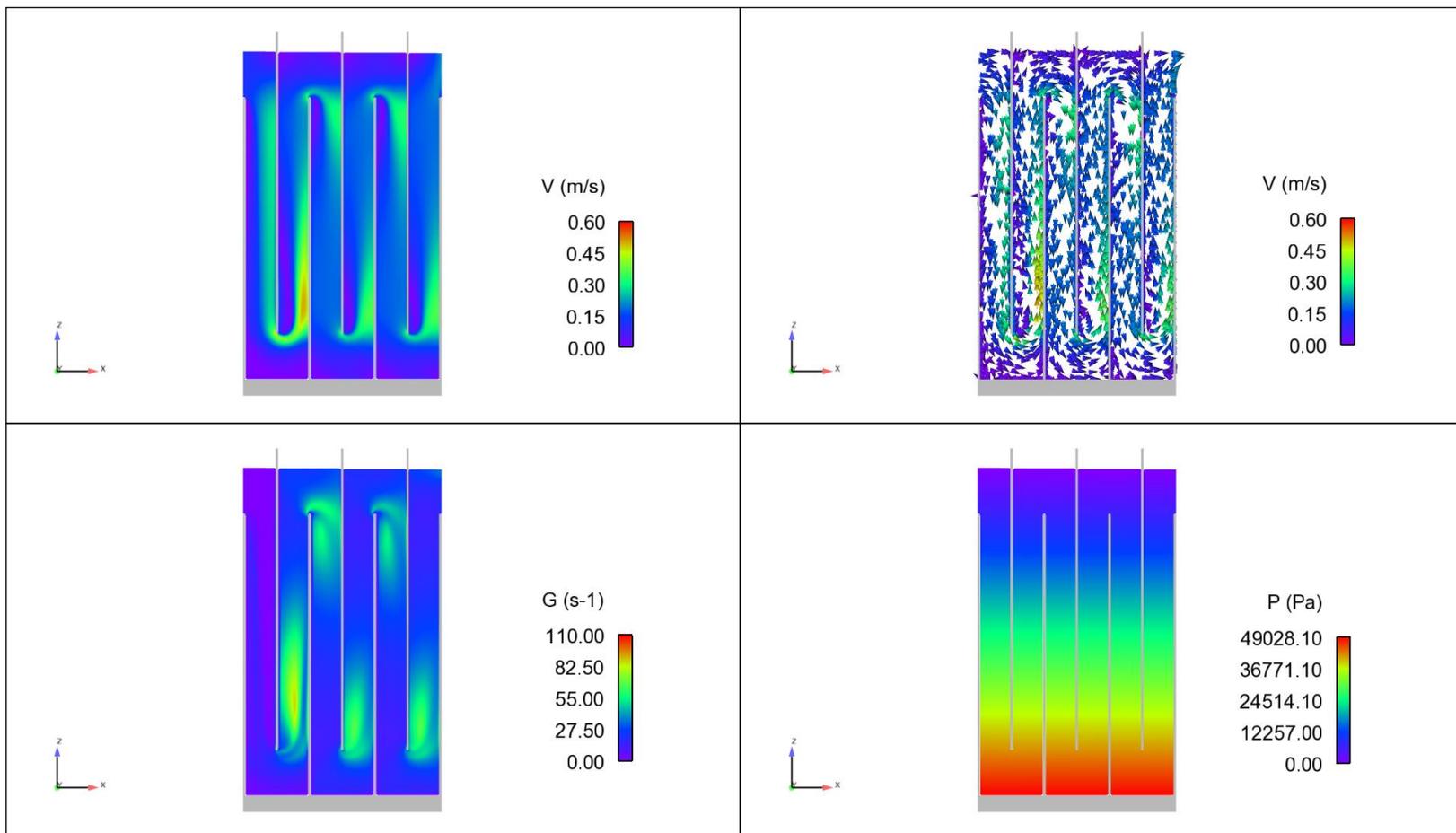
$T = 9 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 50 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



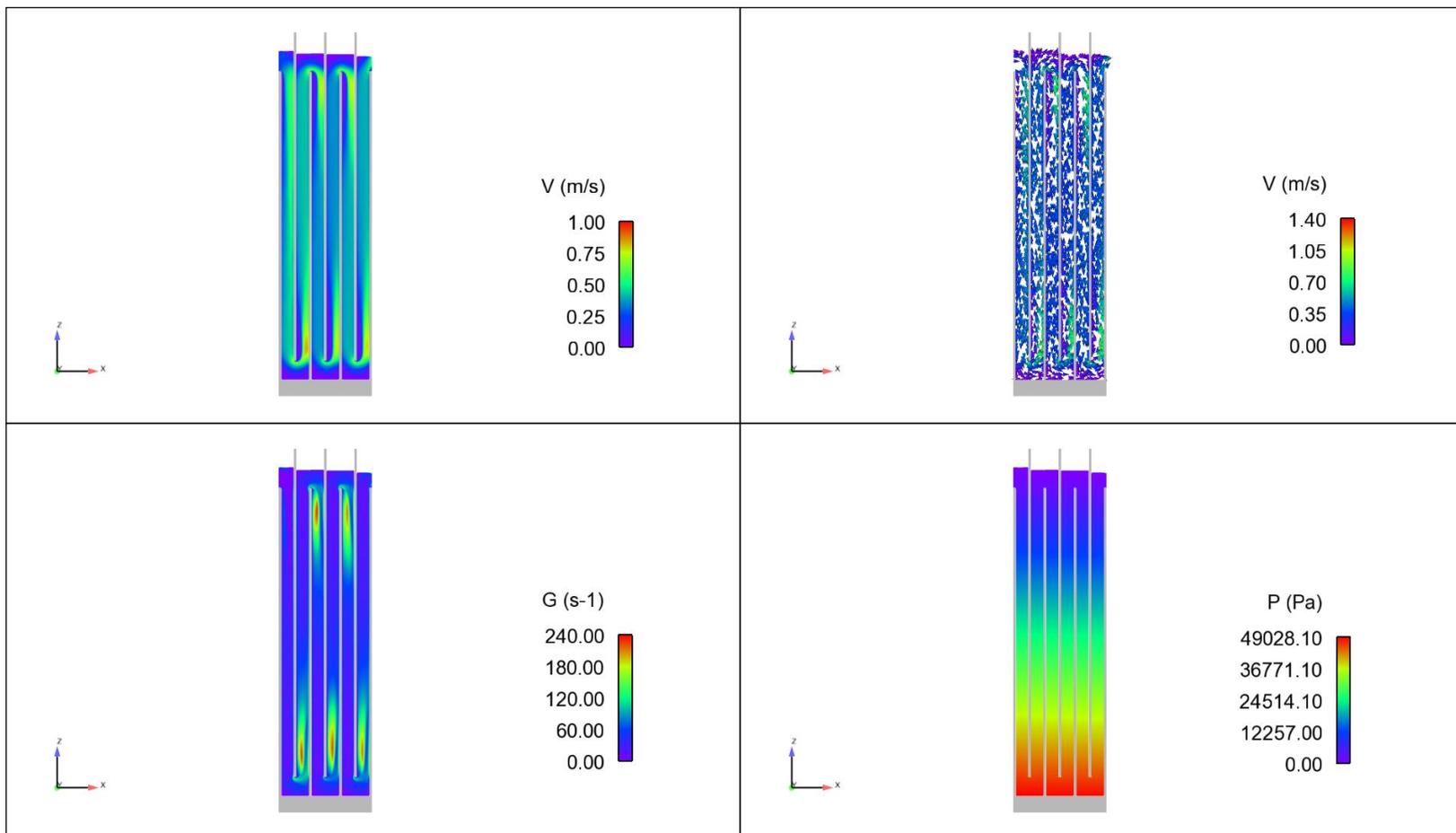
$T = 9 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 30 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



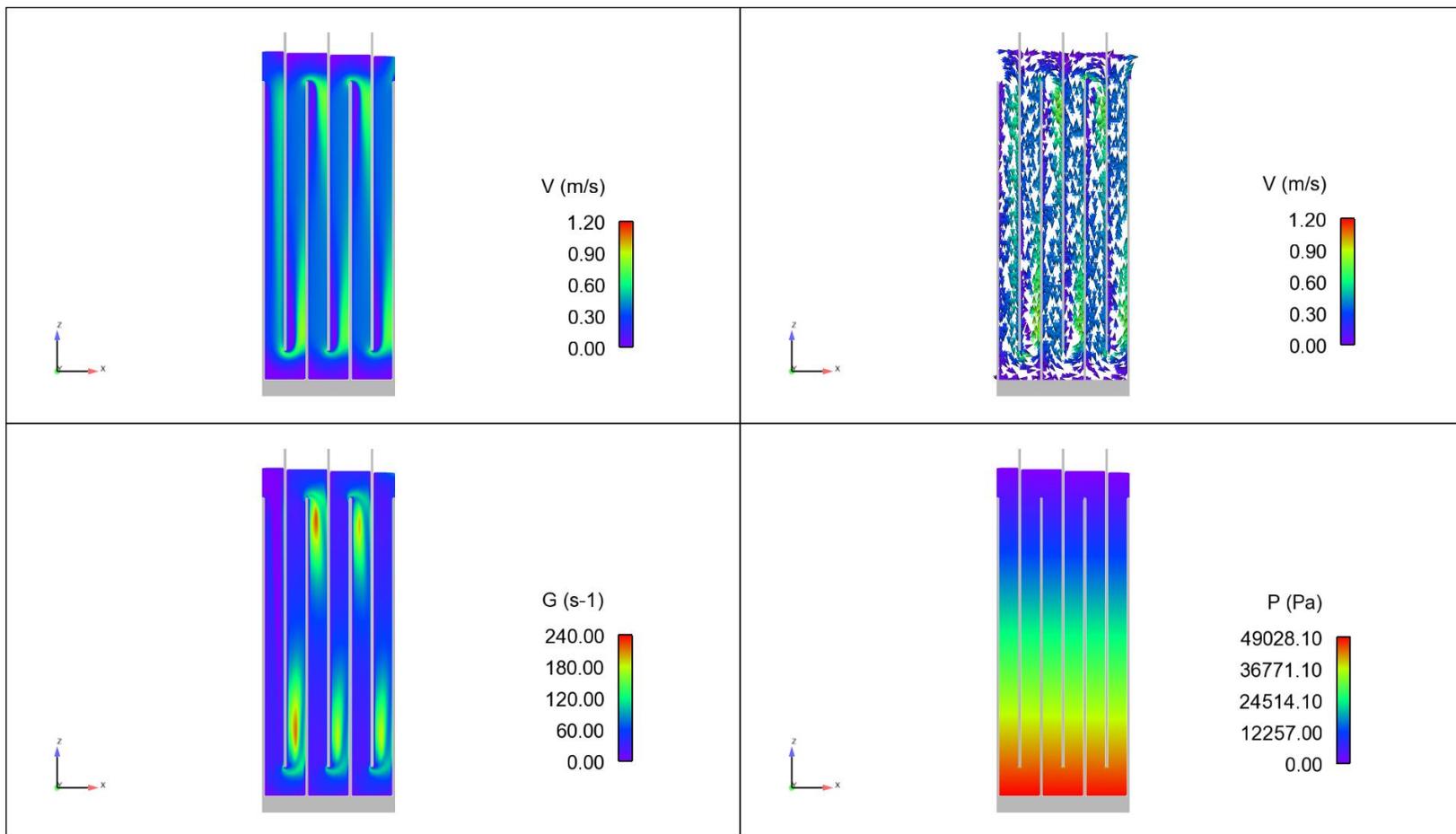
$T = 9 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 30 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



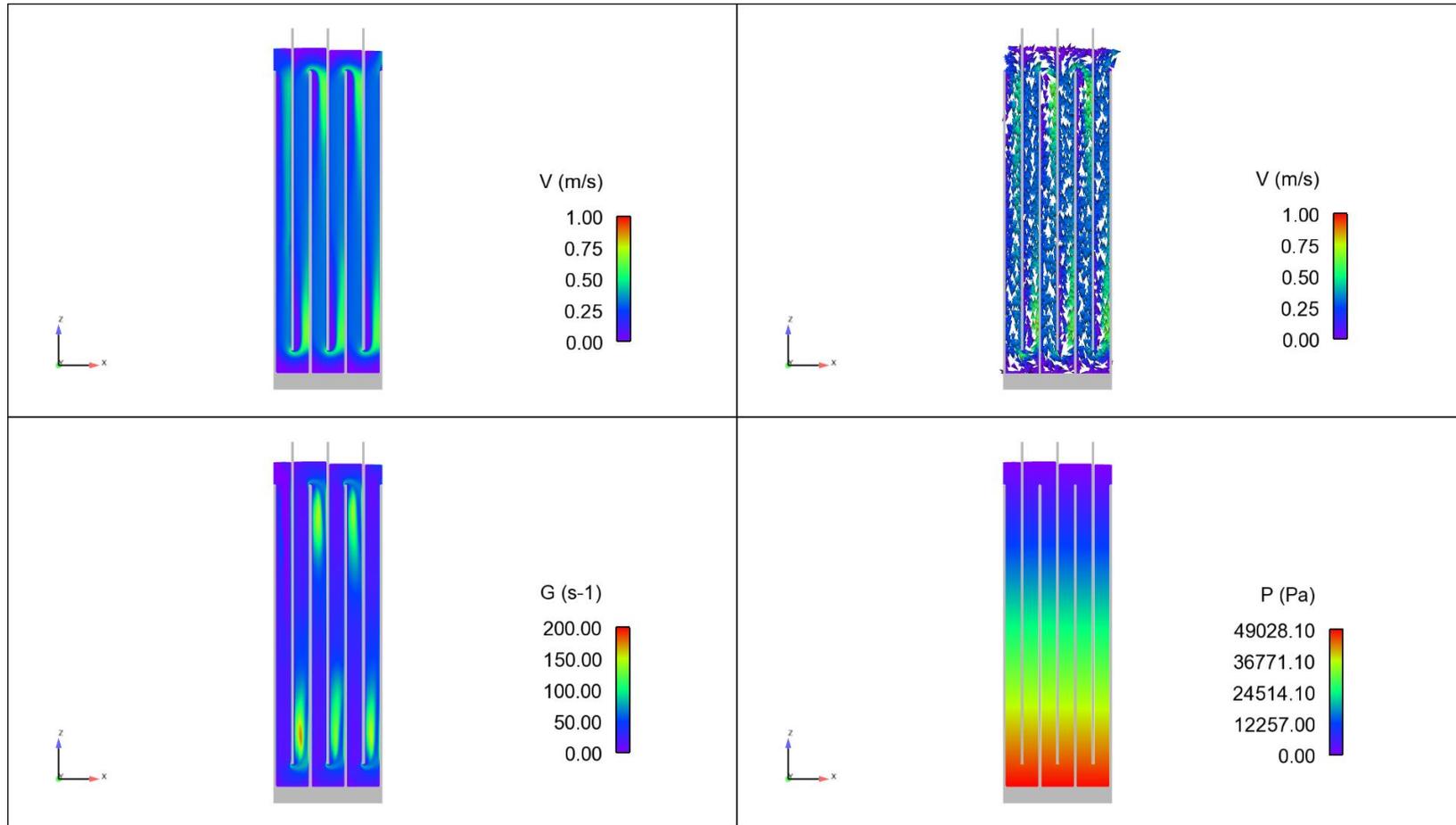
$T = 7 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



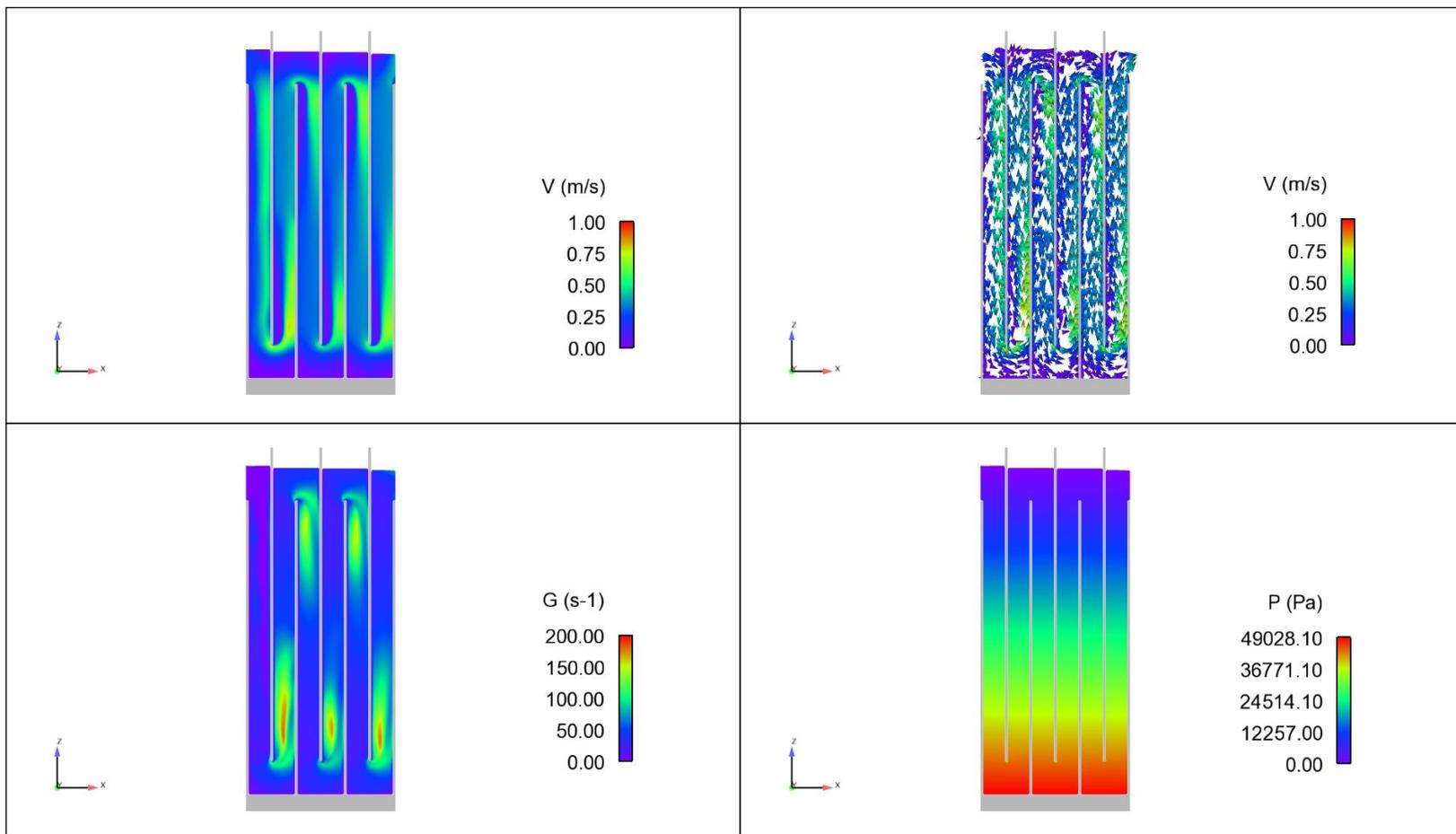
$T = 7 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



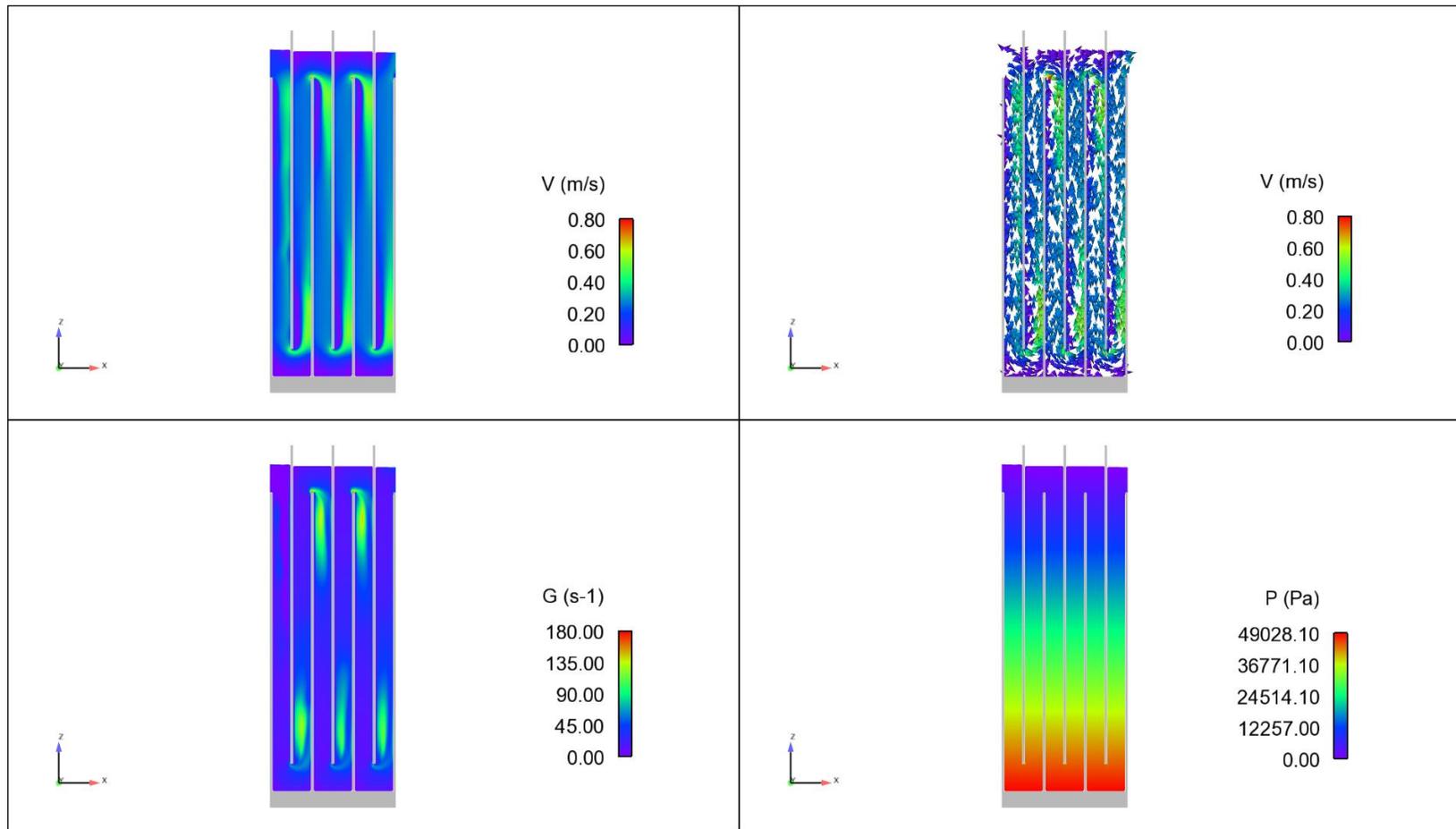
$T = 7 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



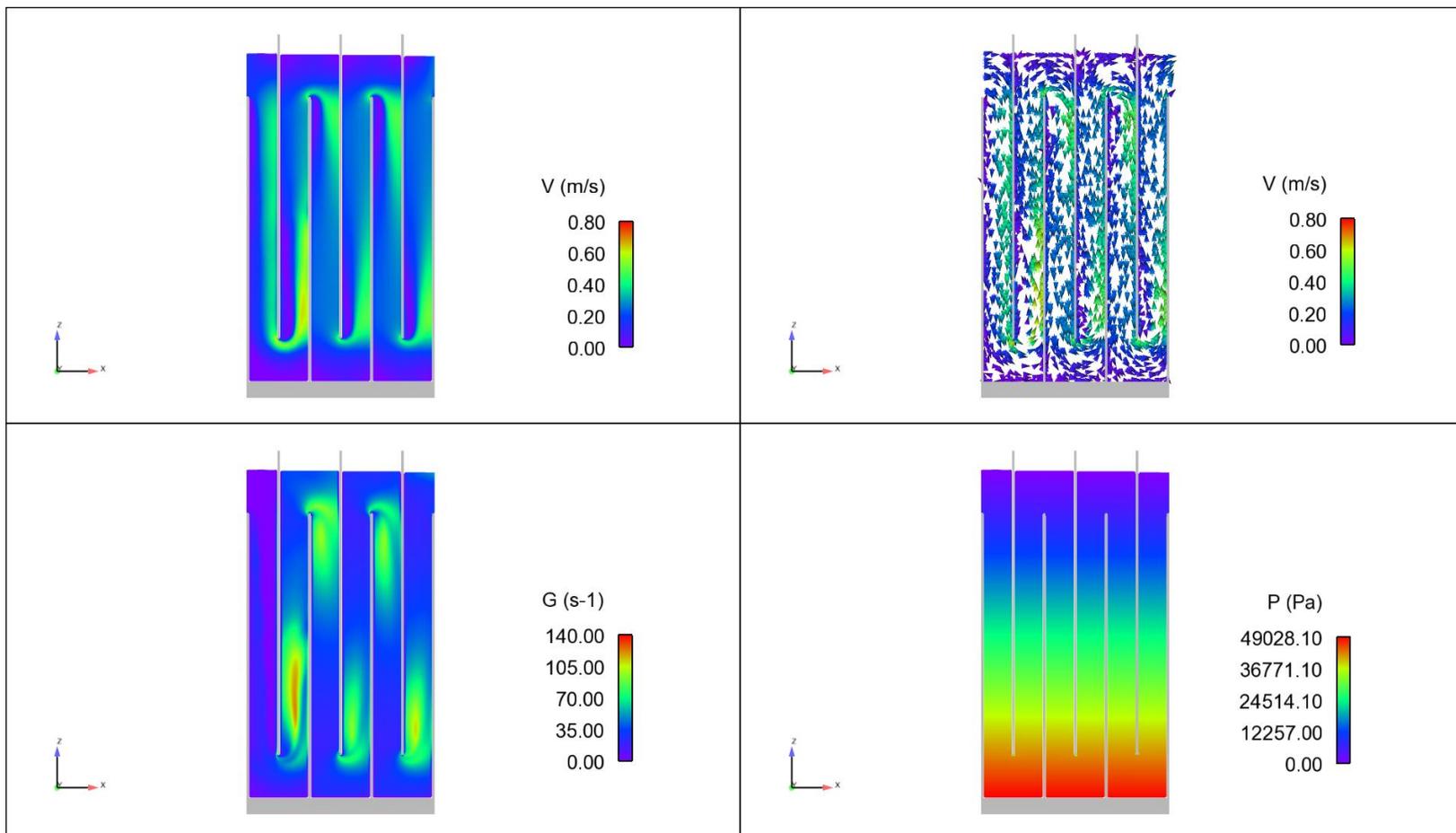
$T = 7 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



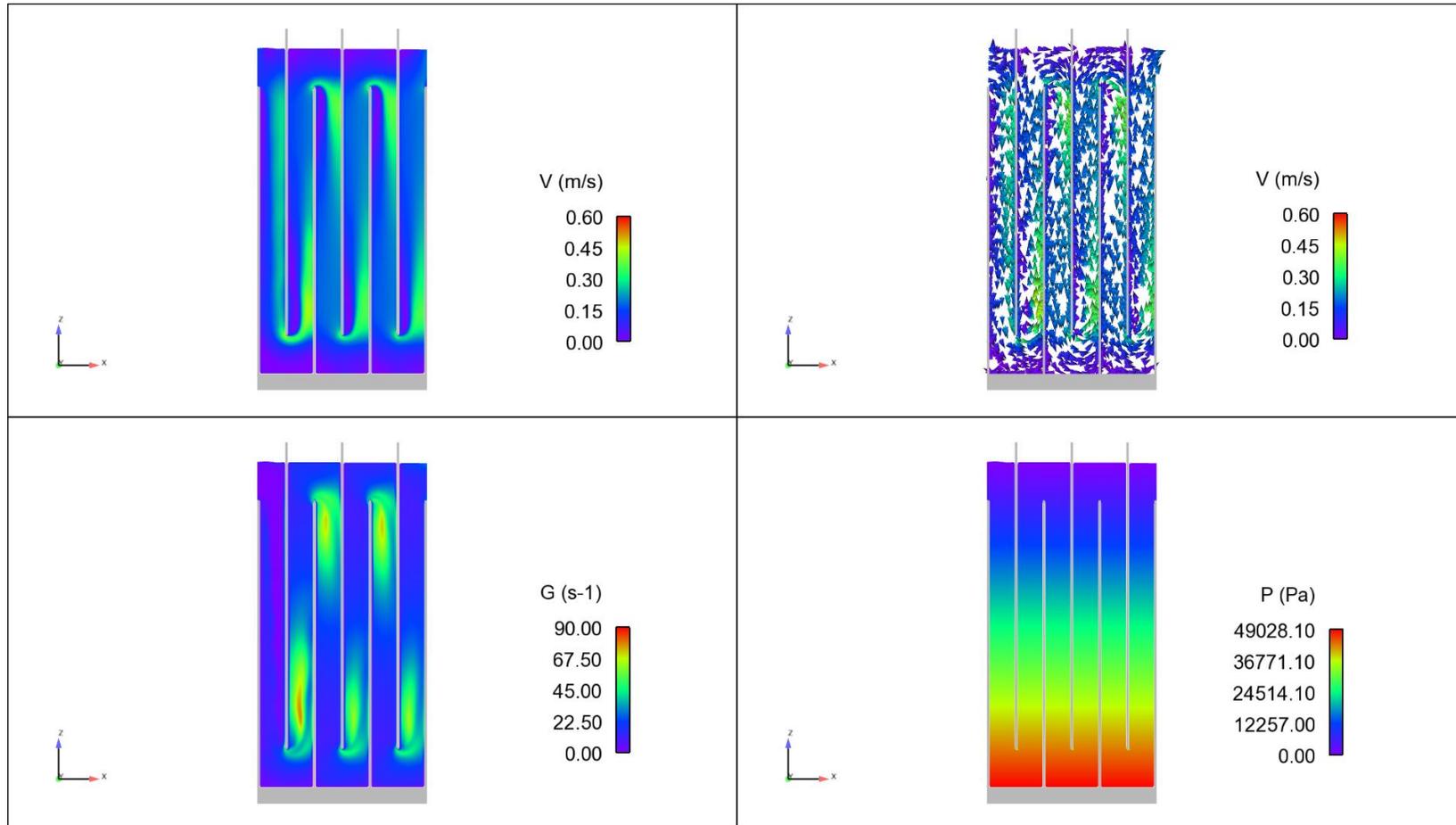
$T = 7 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 50 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



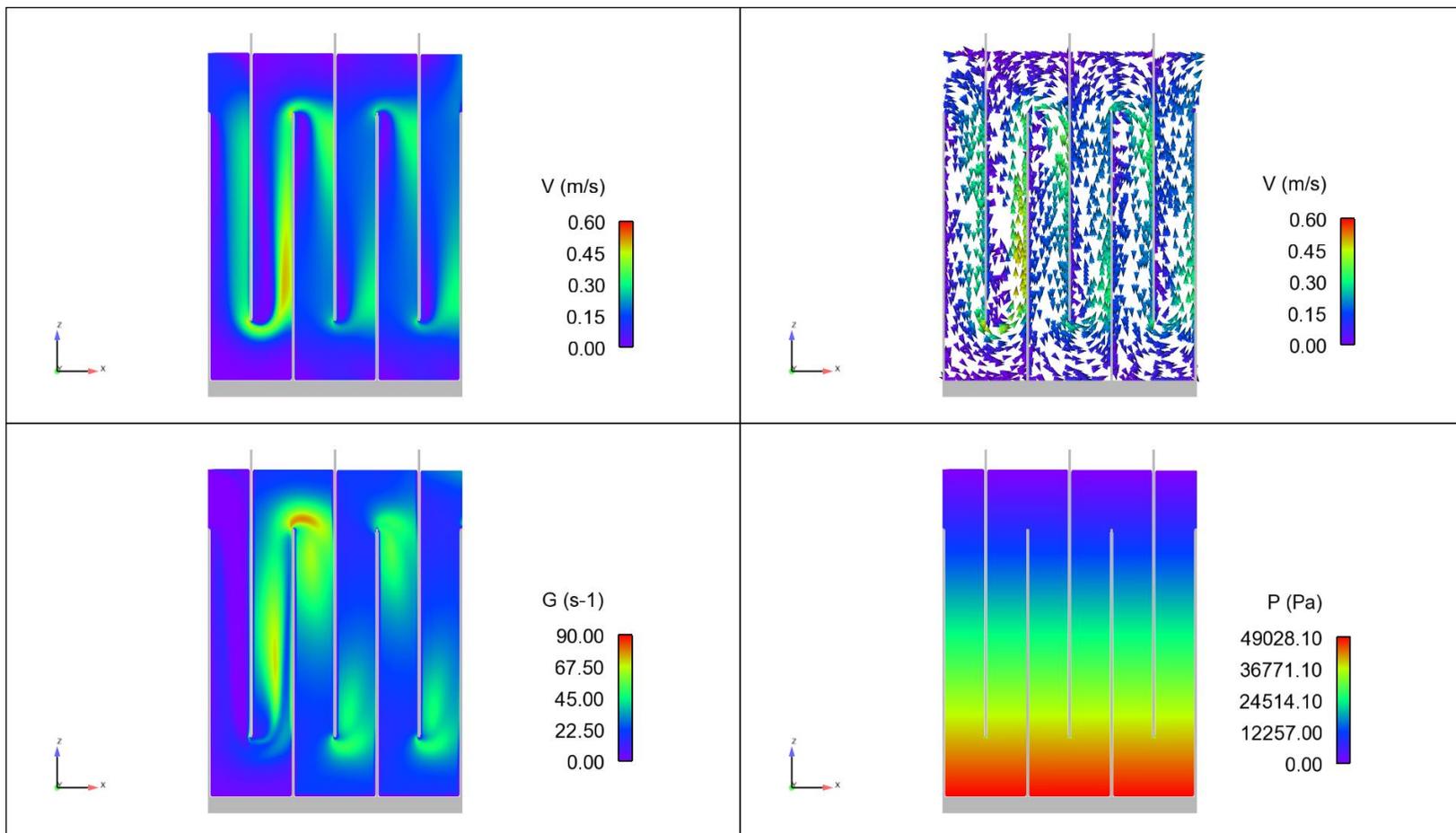
$T = 7 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 50 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



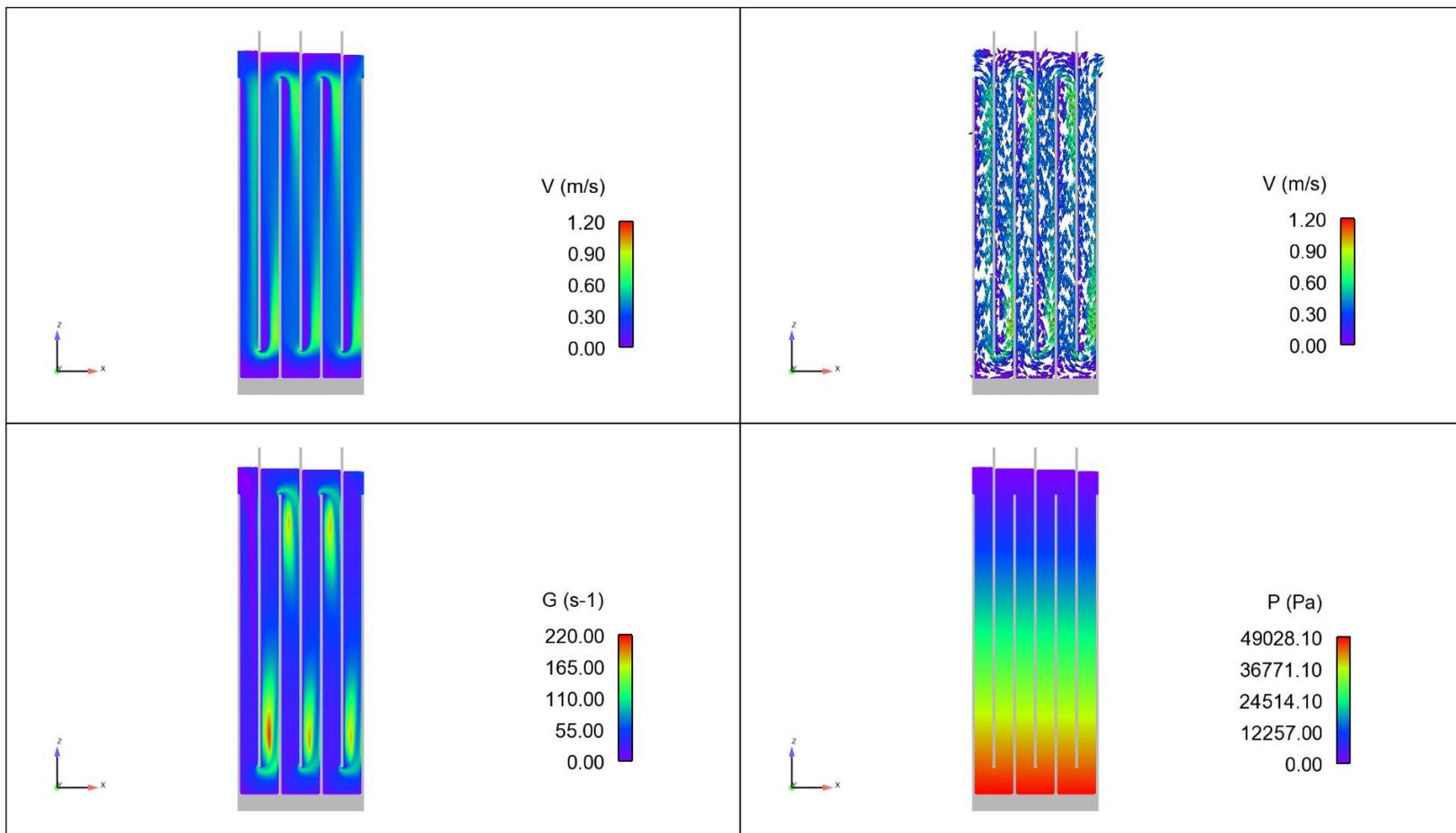
$T = 7 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 30 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



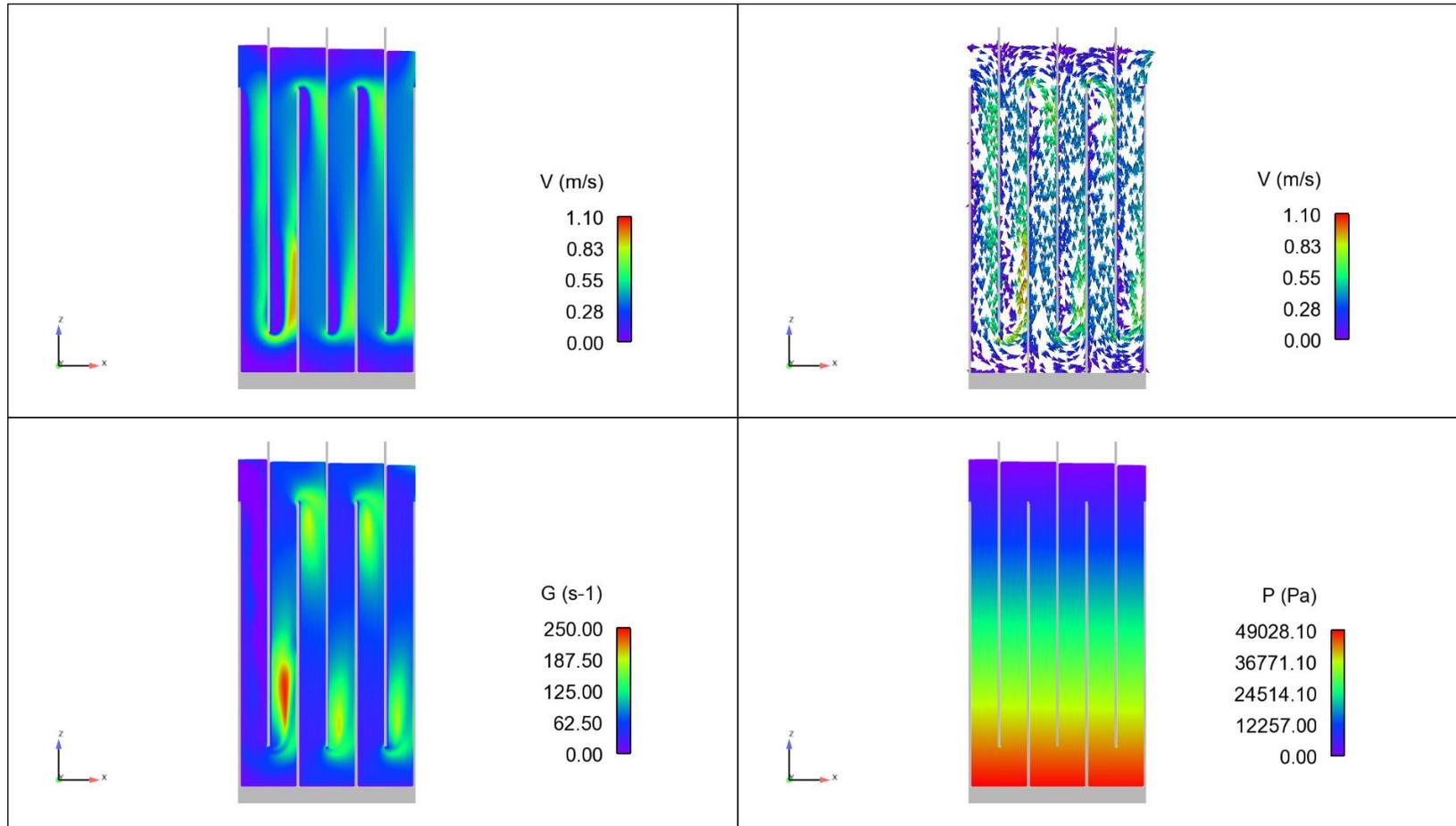
$T = 7 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 30 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



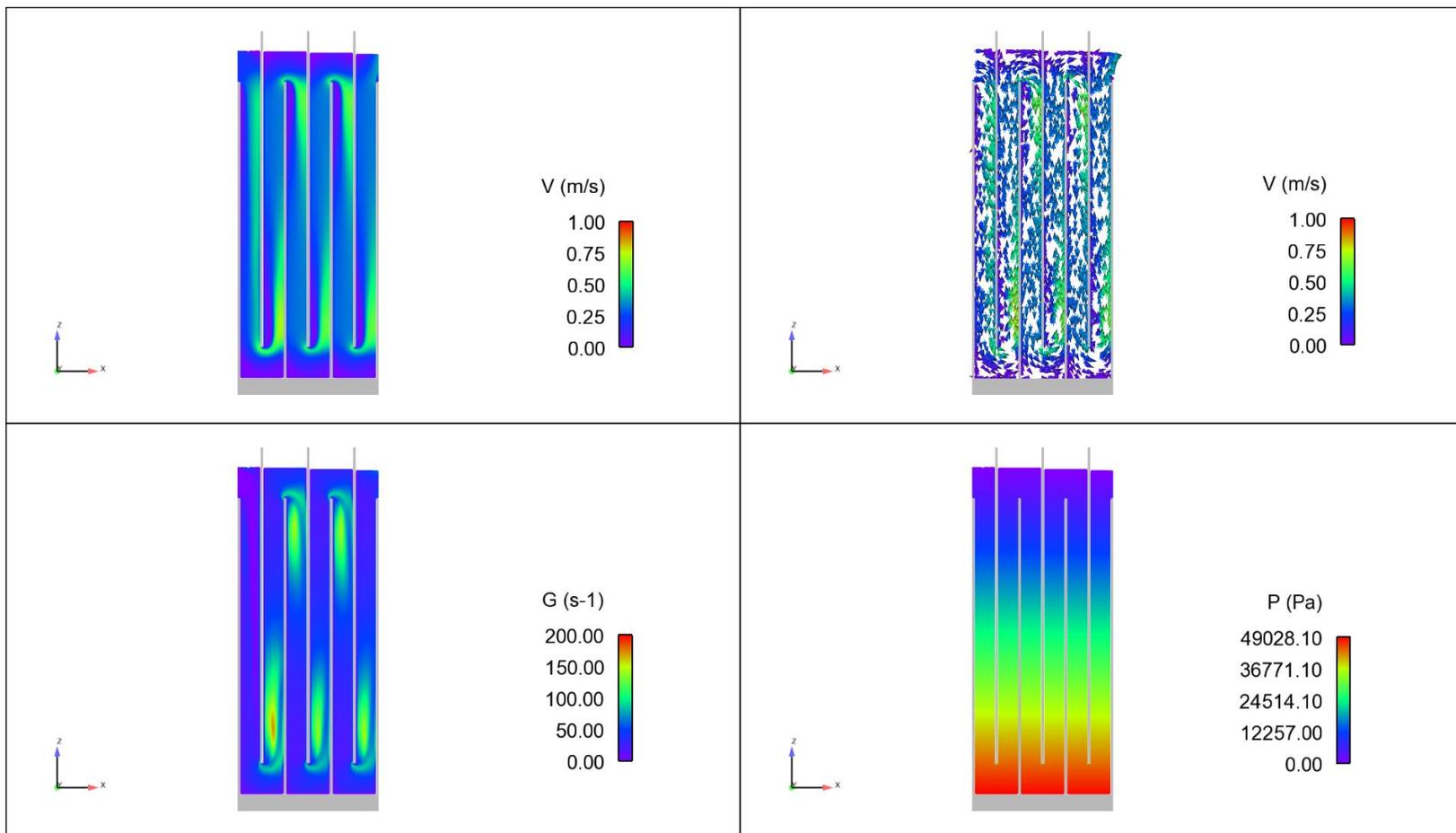
$T = 5 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



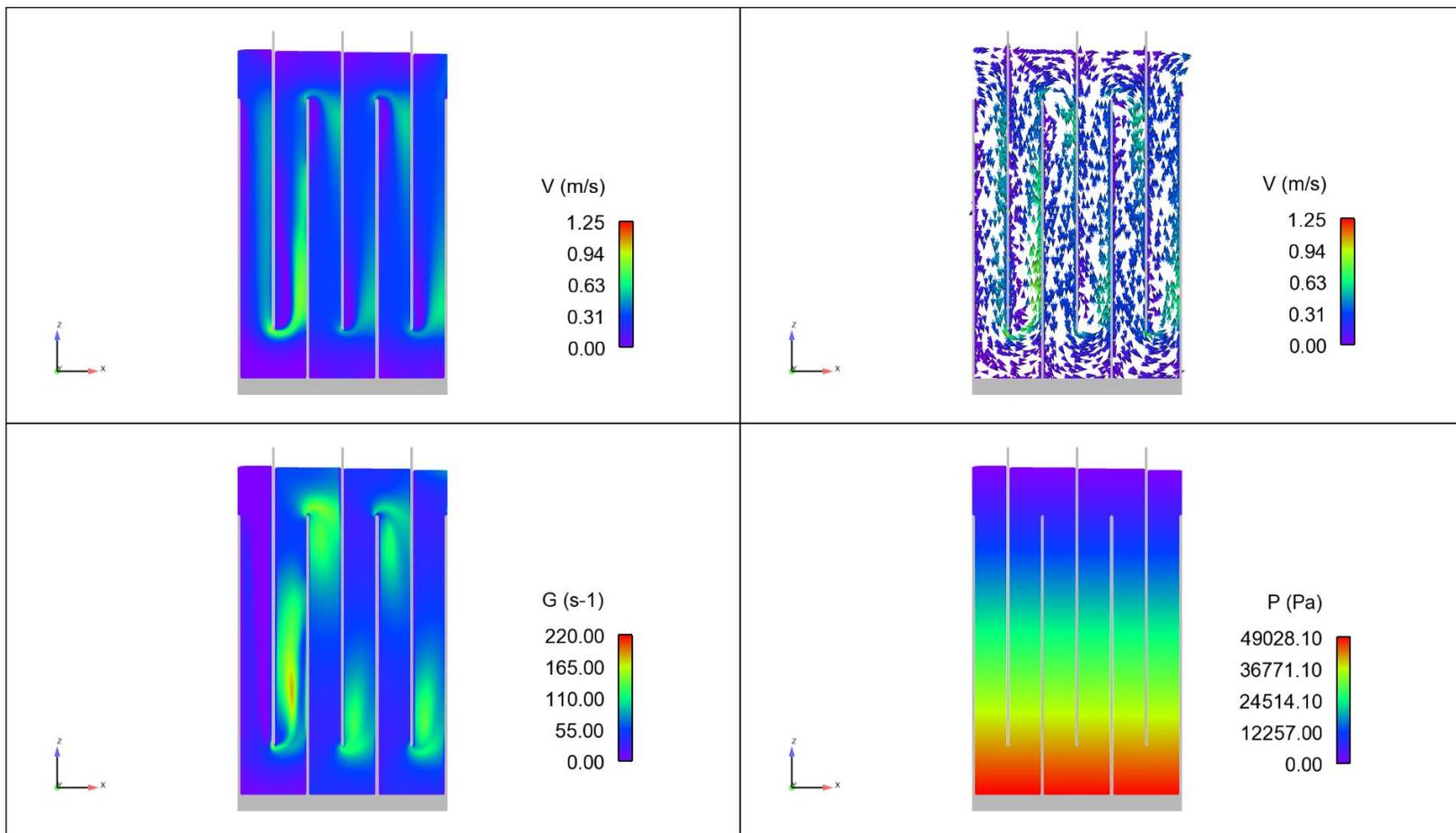
$T = 5 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



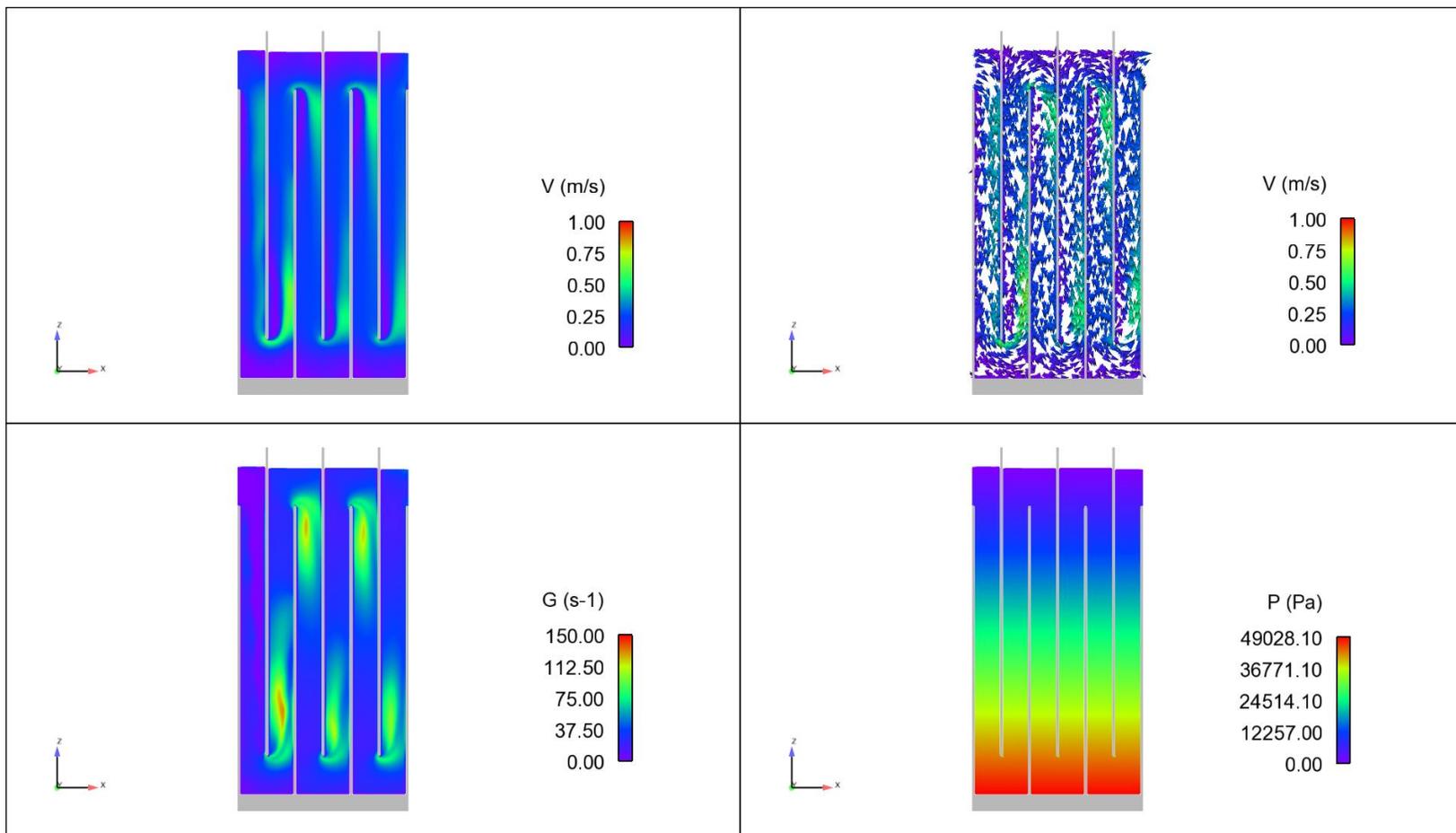
$T = 5 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



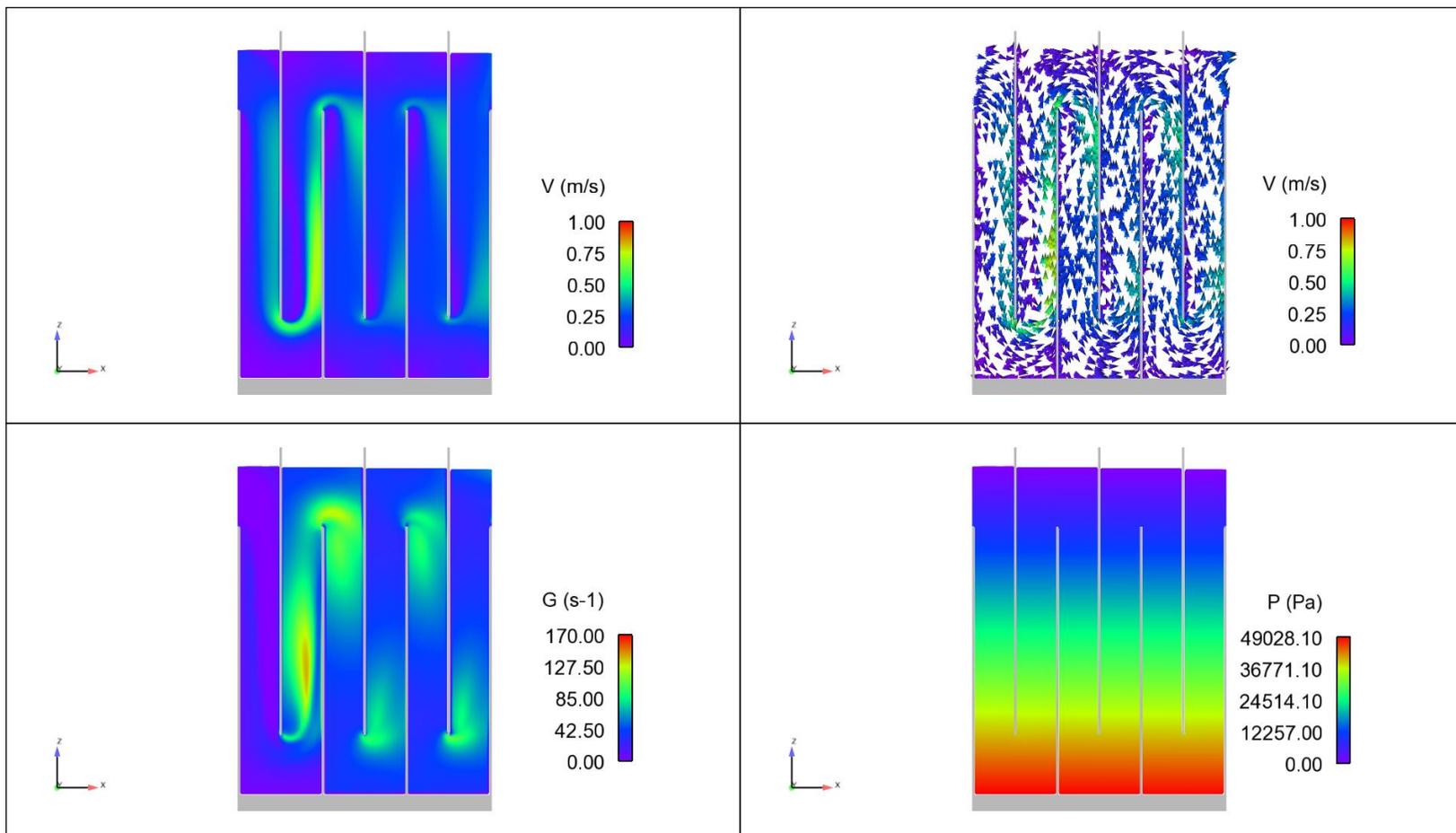
$T = 5 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



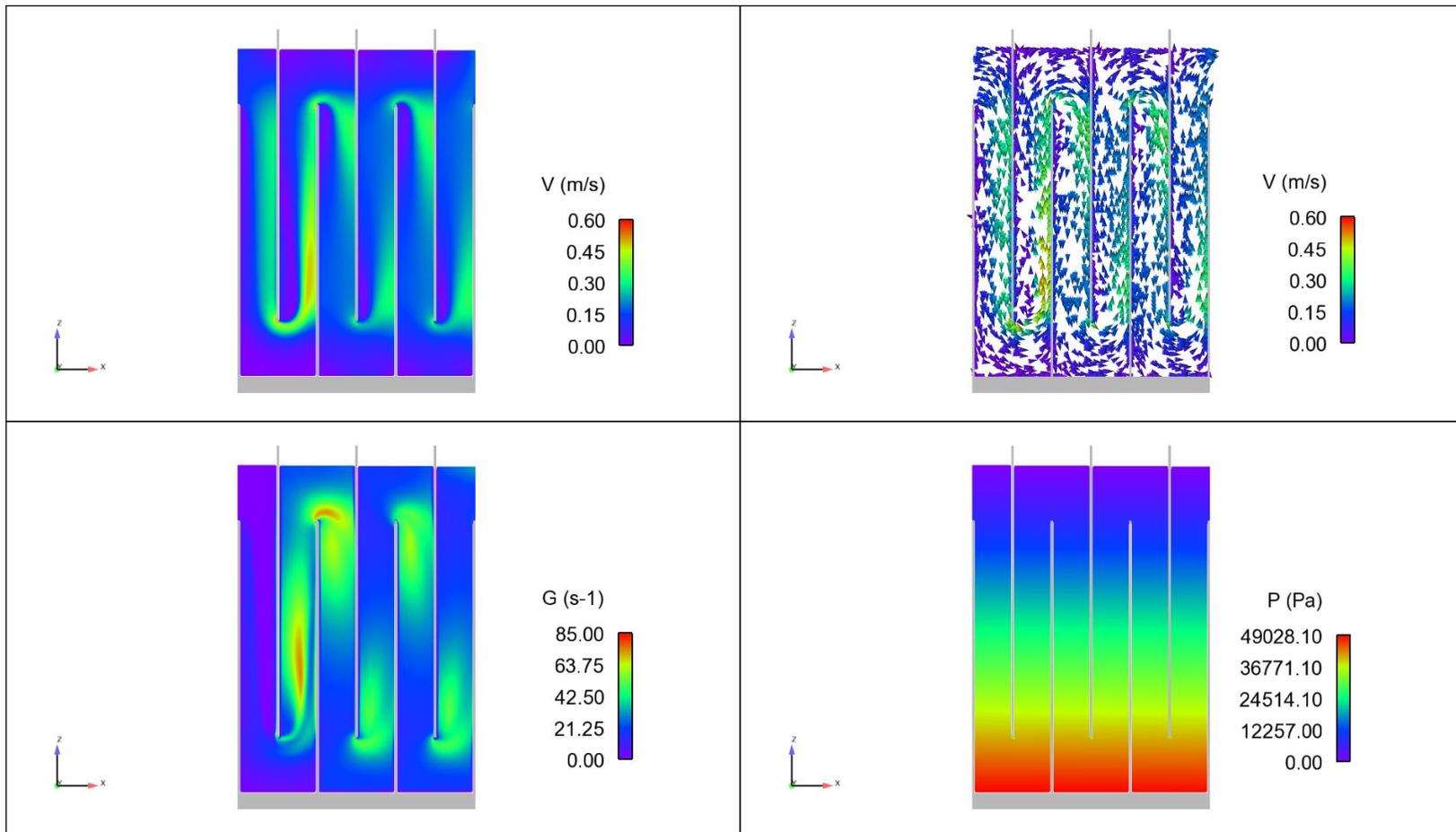
$T = 5 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 50 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



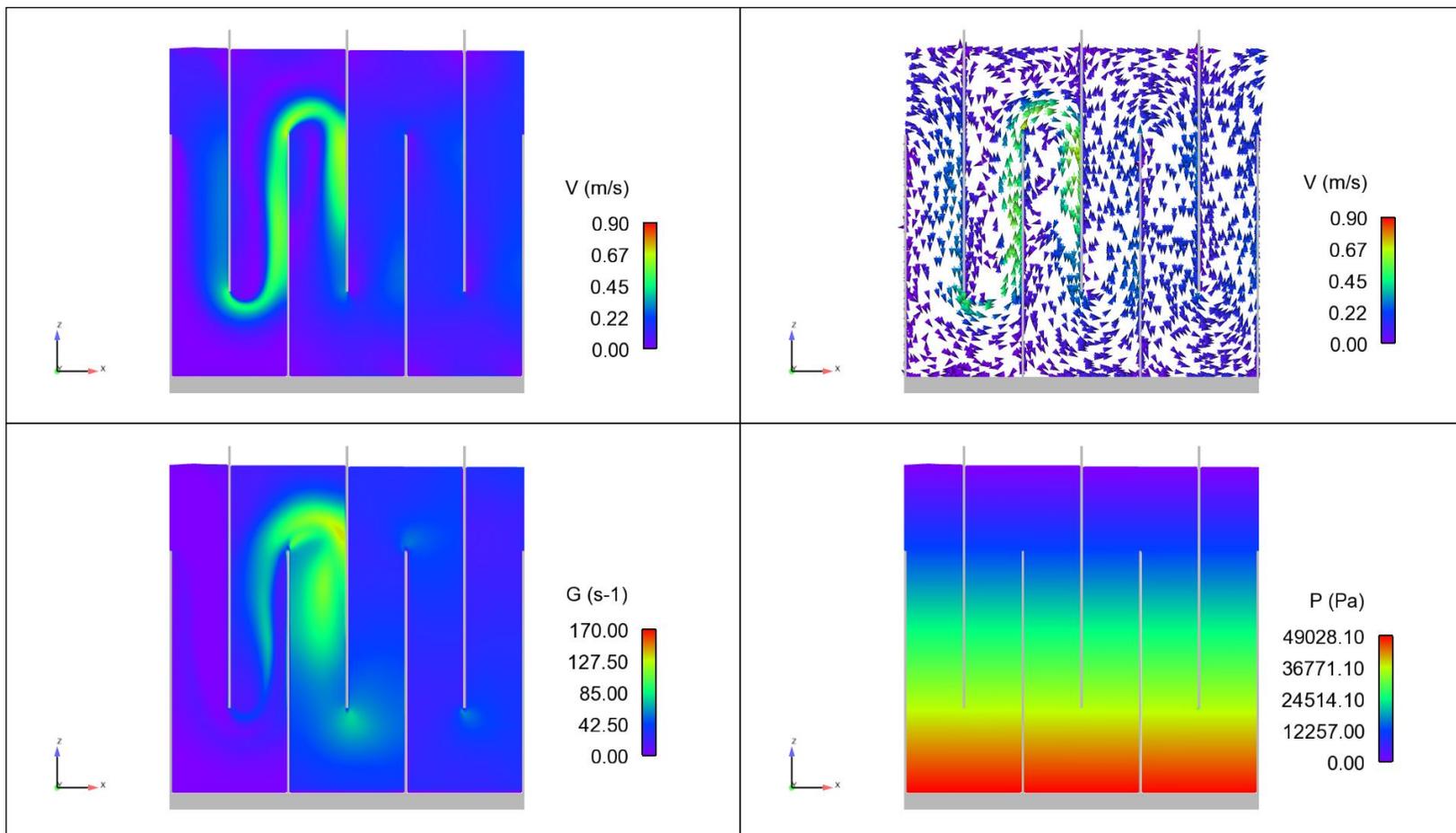
$T = 5 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 50 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



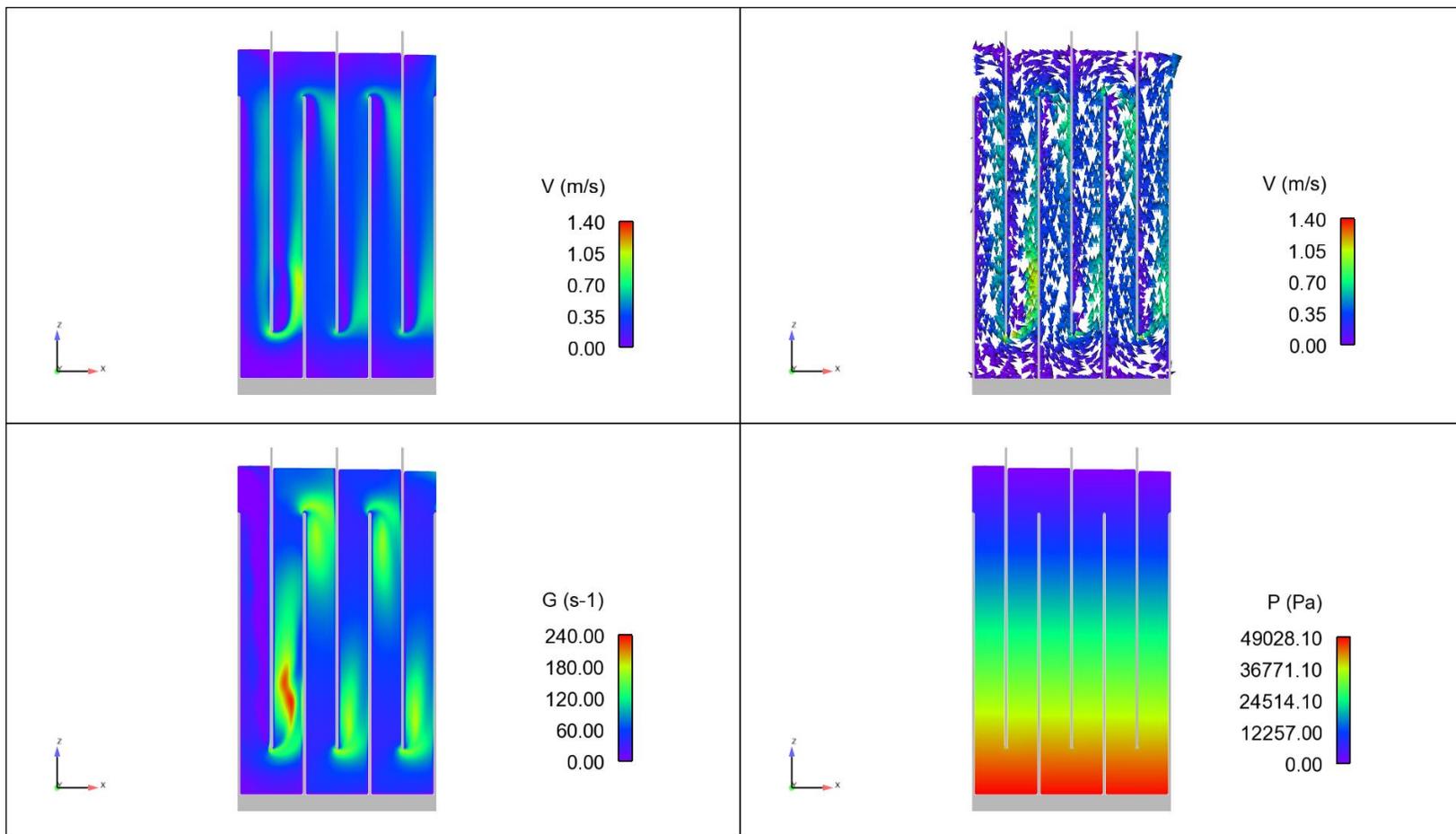
$T = 5 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 30 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



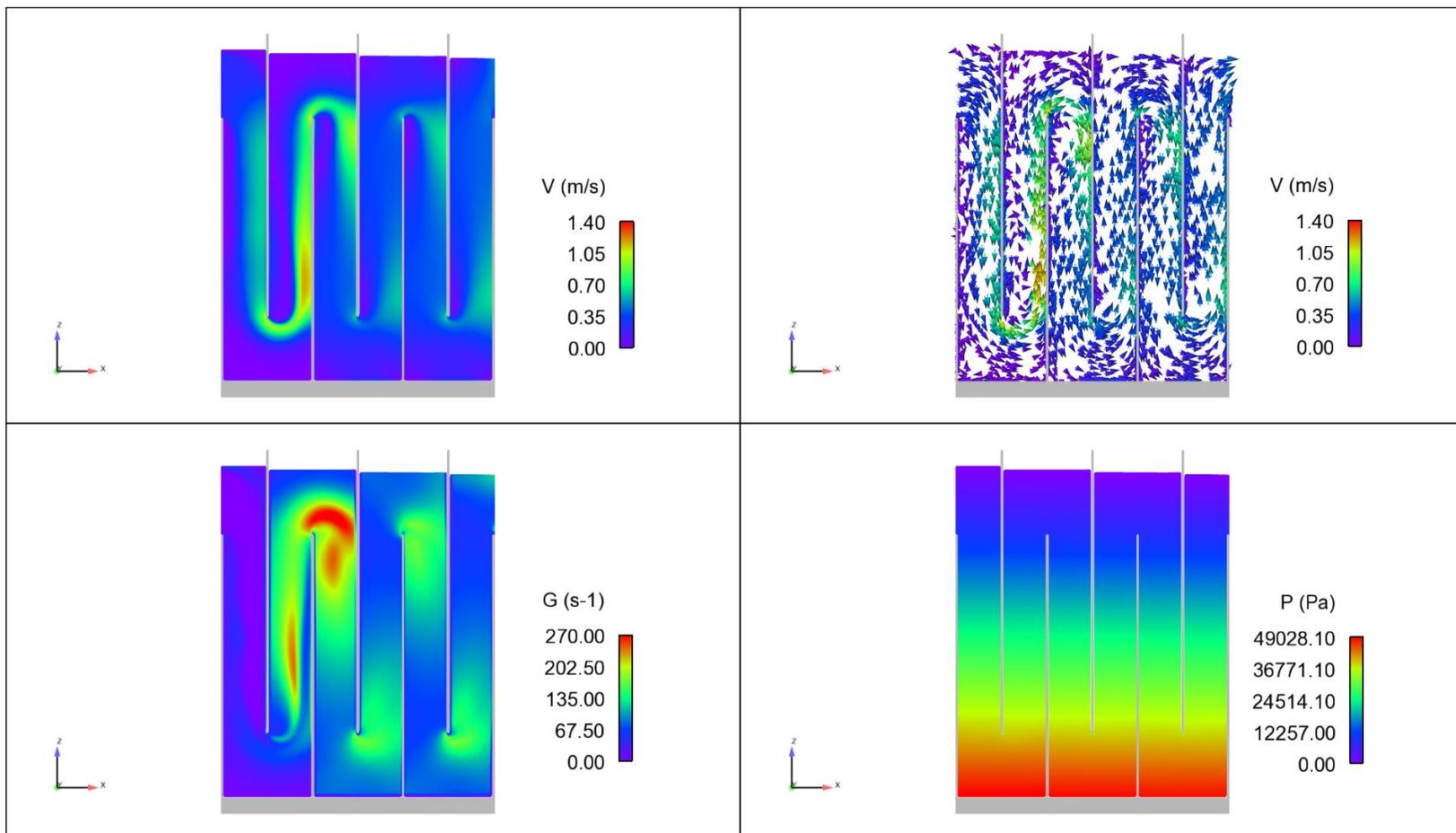
$T = 5 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 30 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



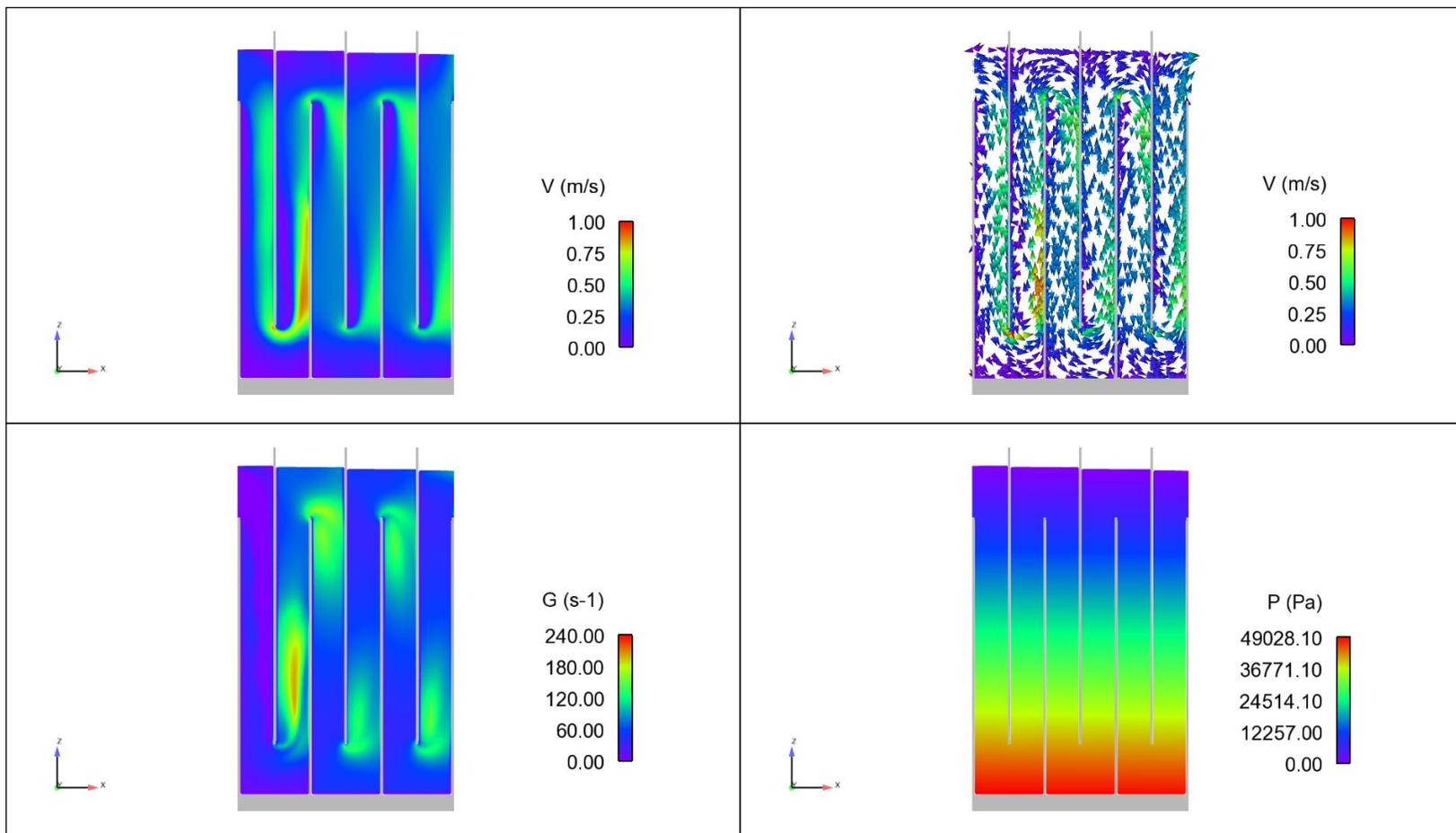
$T = 3 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



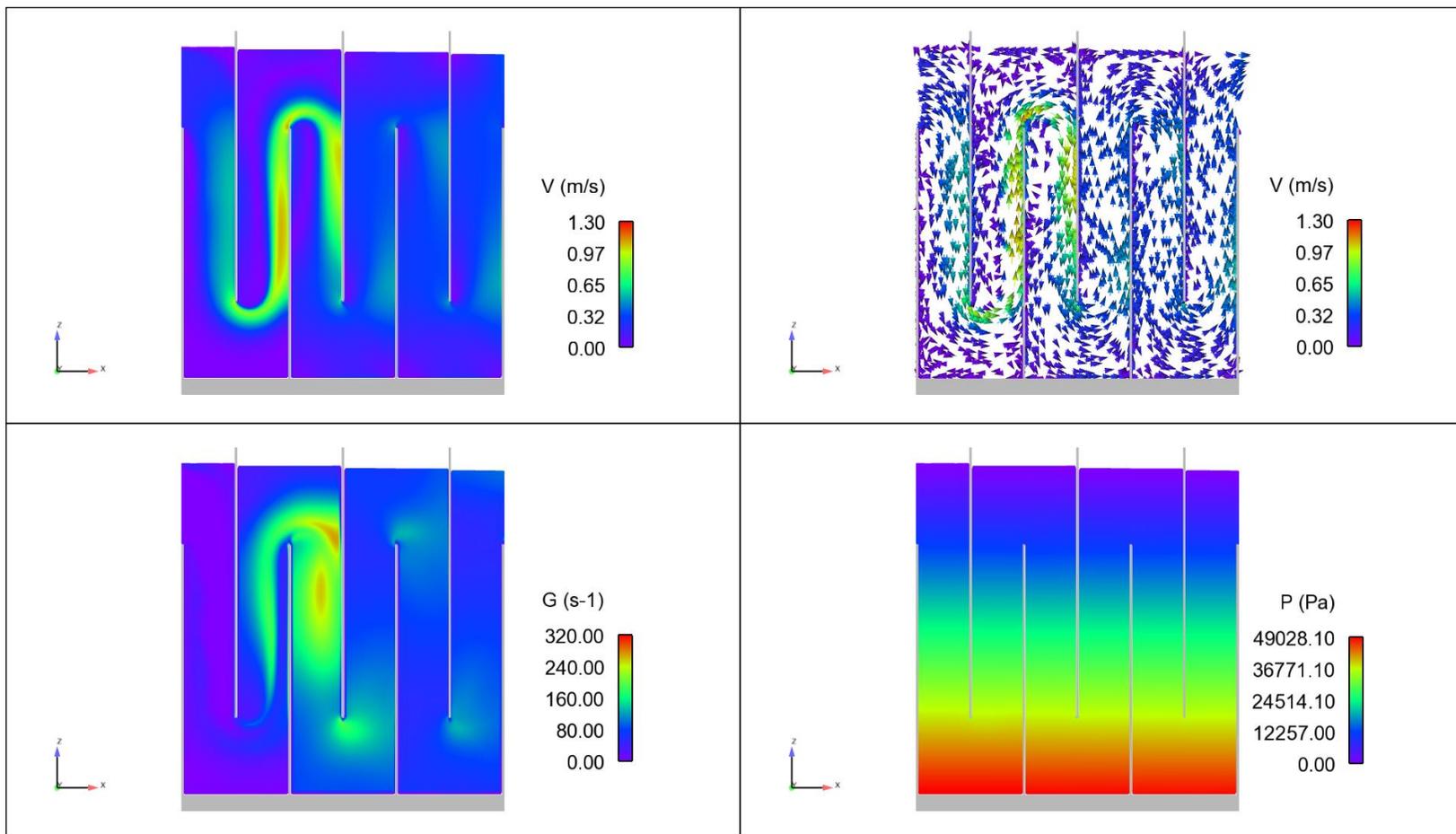
$T = 3 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 90 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



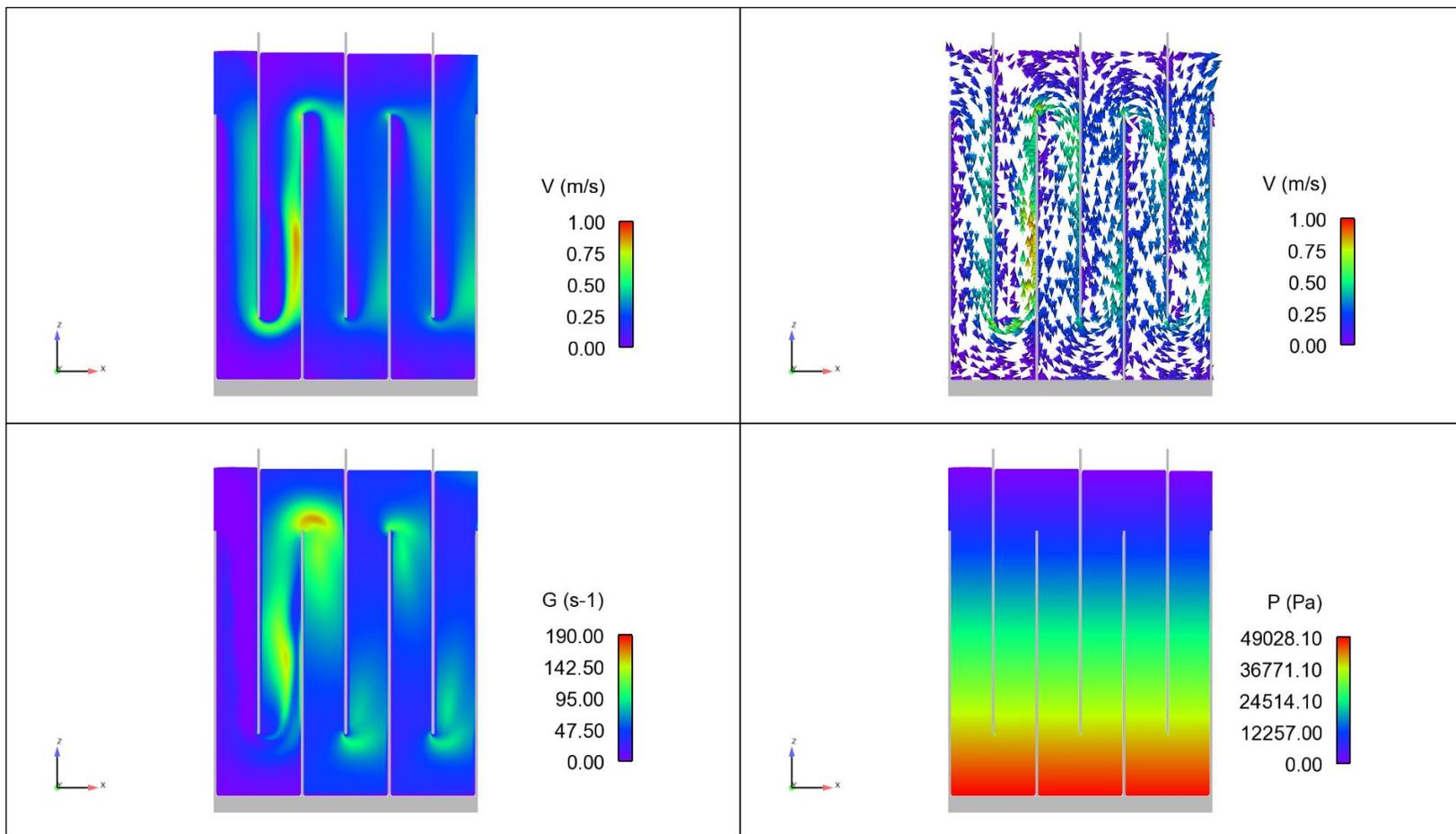
$T = 3 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



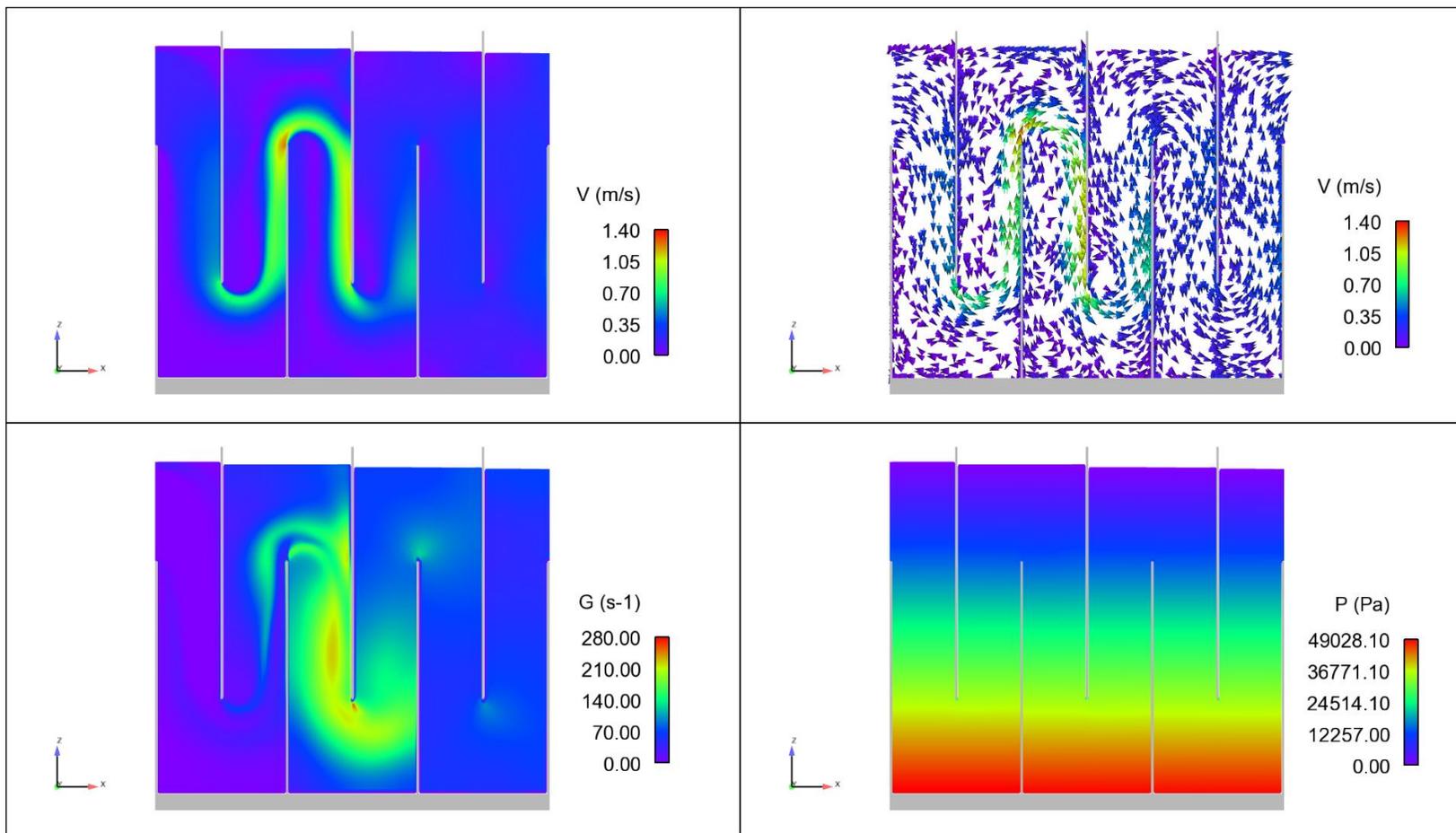
$T = 3 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 70 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



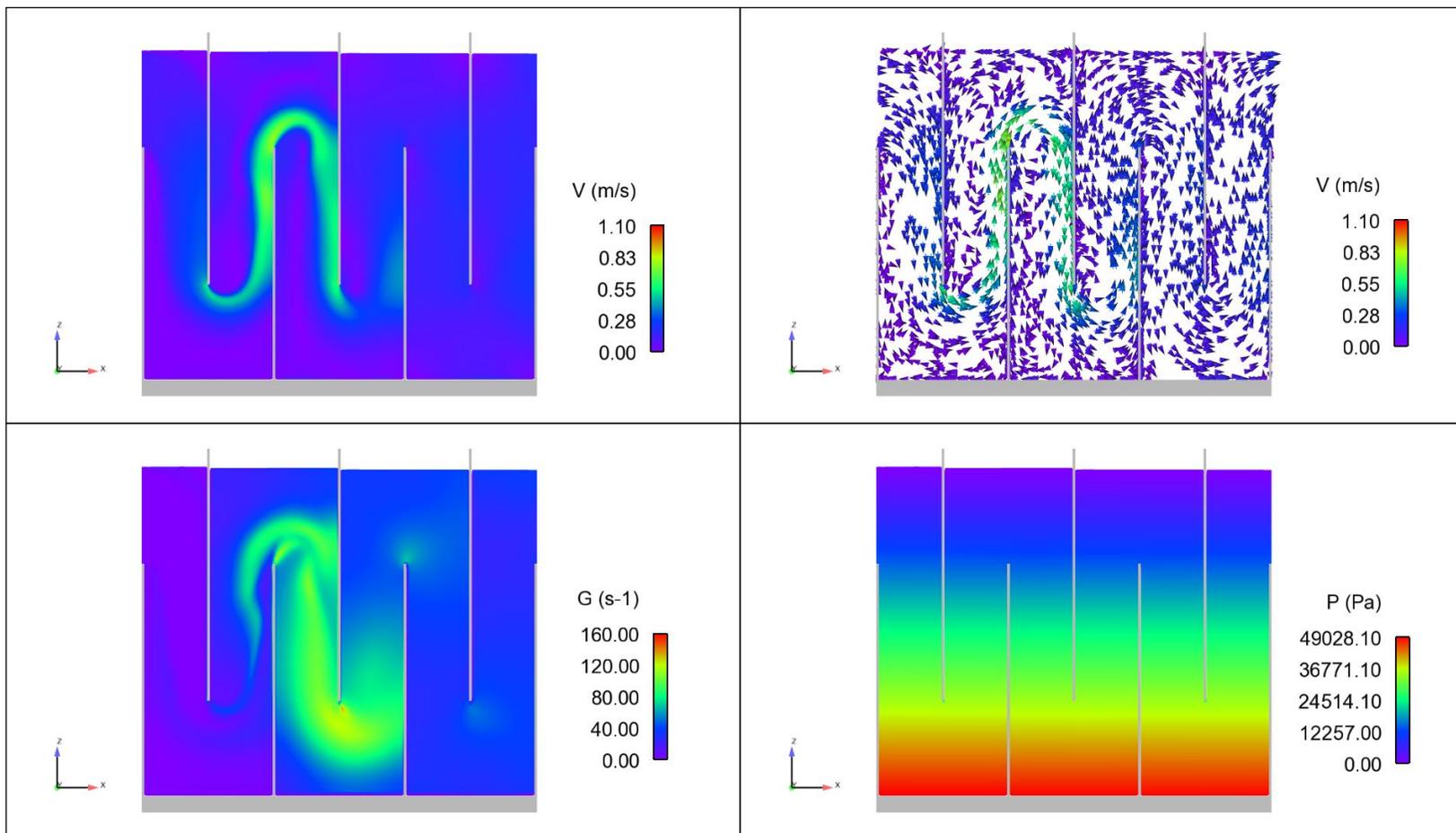
$T = 3 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 50 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



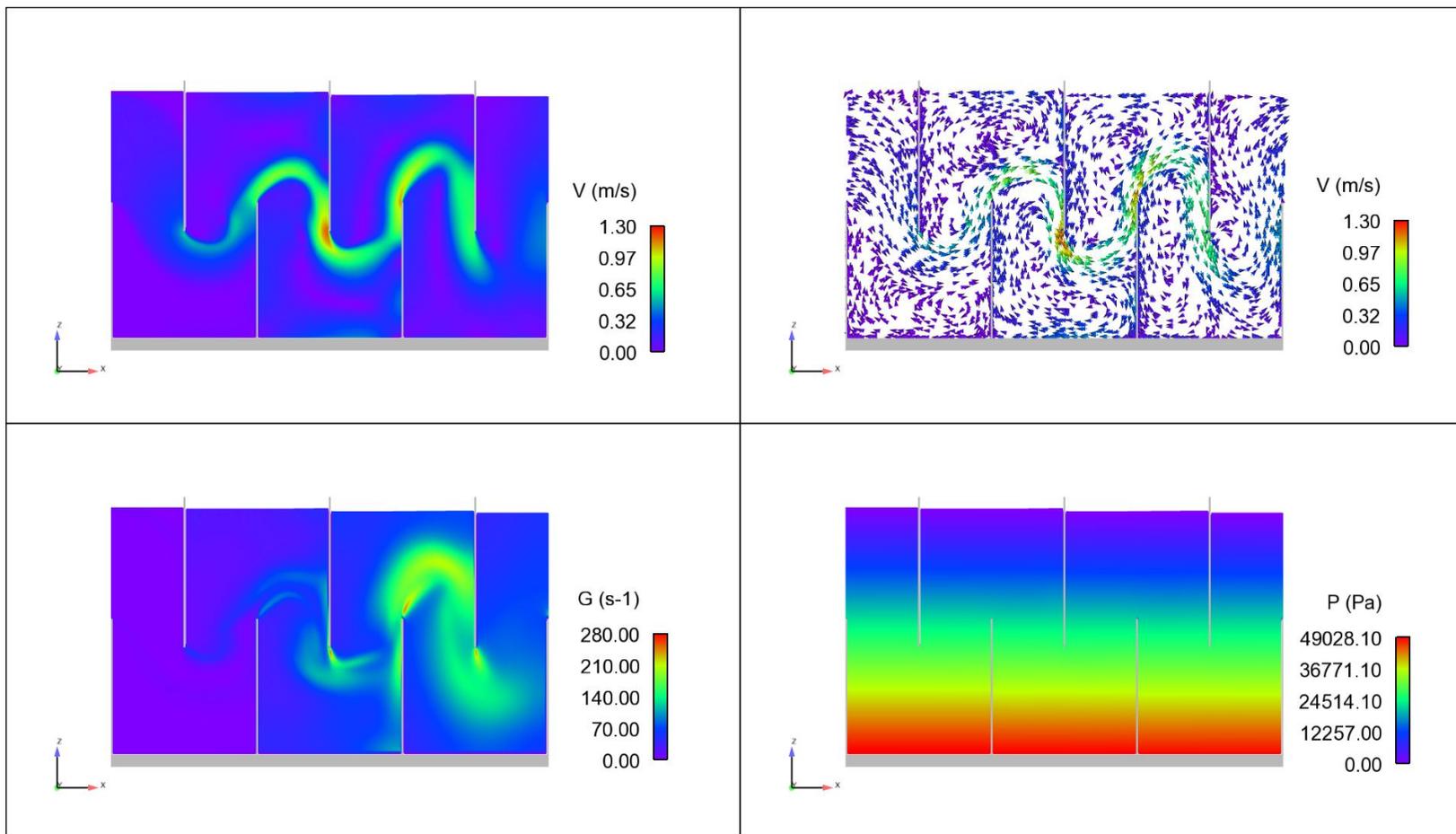
$T = 3 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 50 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



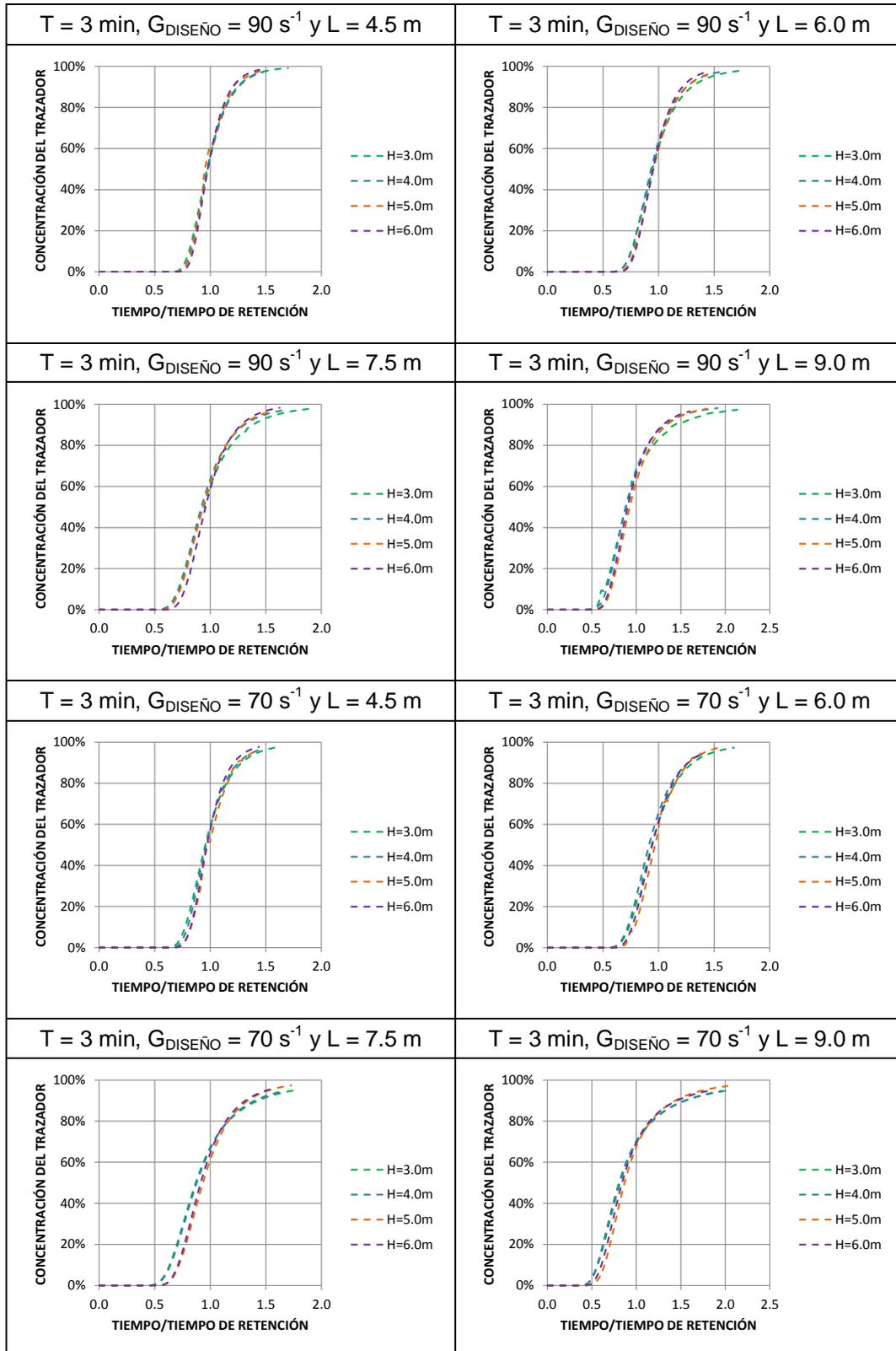
$T = 3 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 30 \text{ s}^{-1}$, $L = 6 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



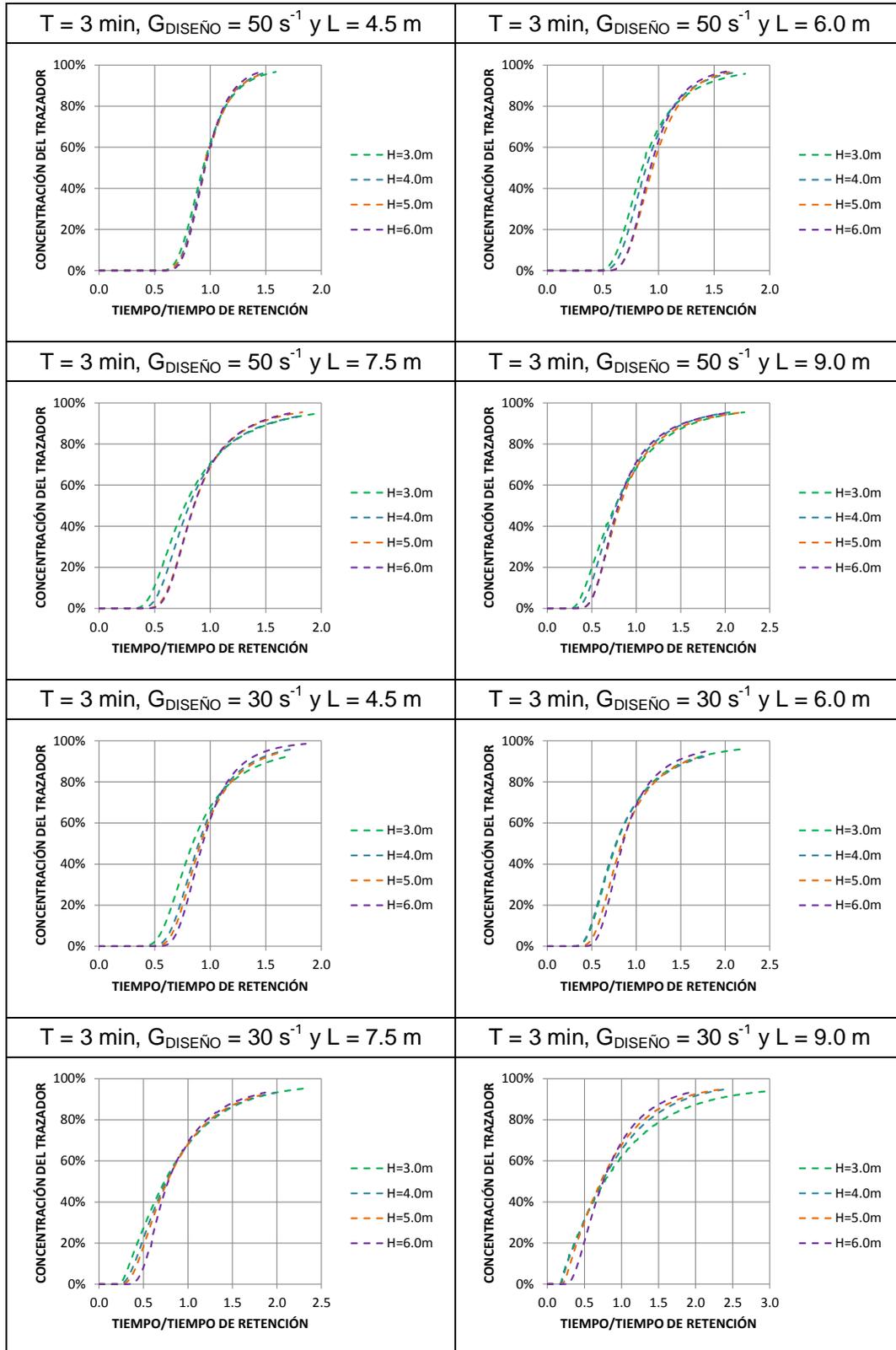
$T = 3 \text{ min}$, $G_{\text{DISEÑO}} = 30 \text{ s}^{-1}$, $L = 9 \text{ m}$ y $H = 5 \text{ m}$.



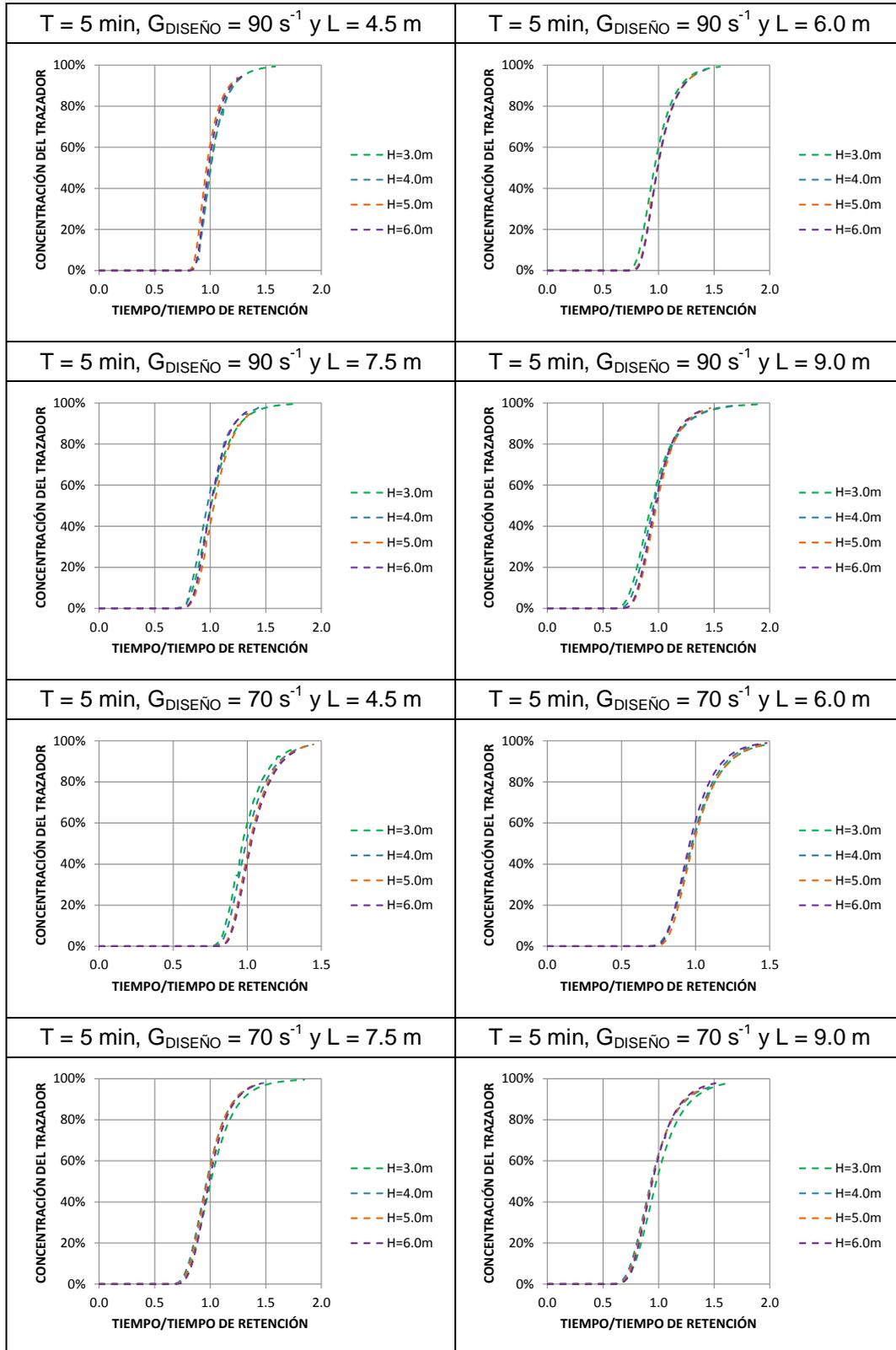
Anexo 3: Curvas de distribución del tiempo de residencia para T = 3 min, 5 min, 7 min y 9 min.



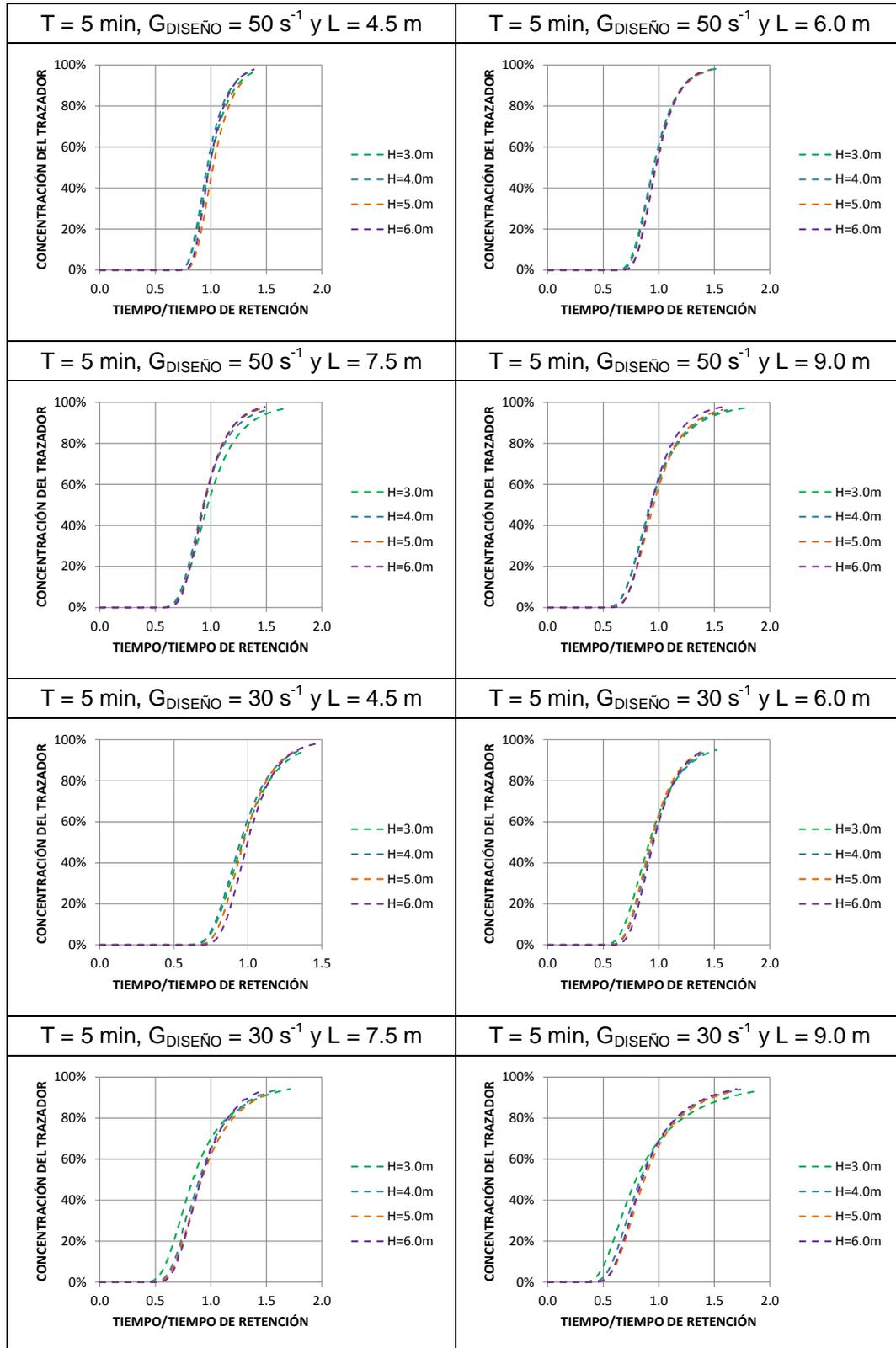
Continuación.



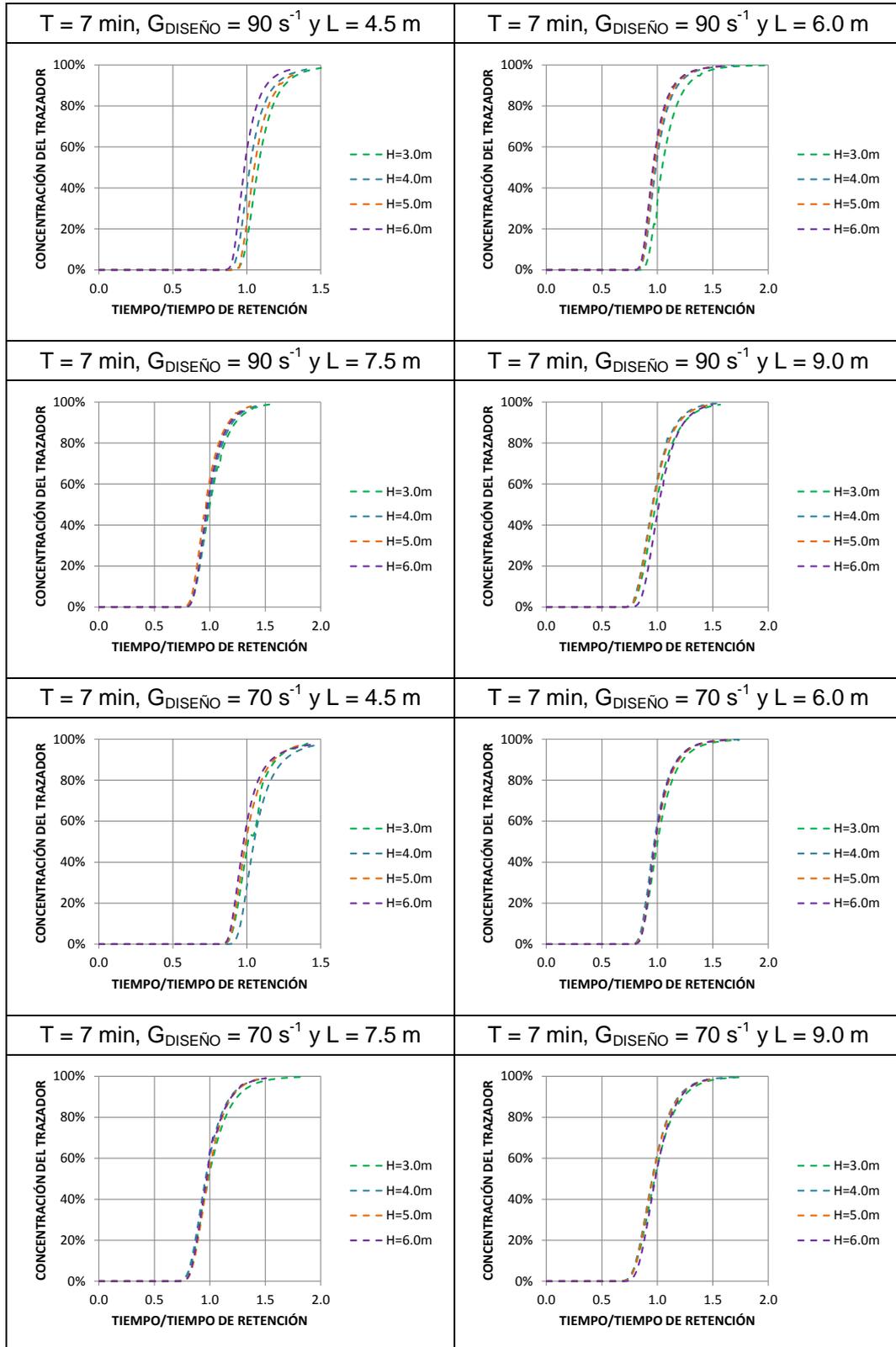
Continuación.



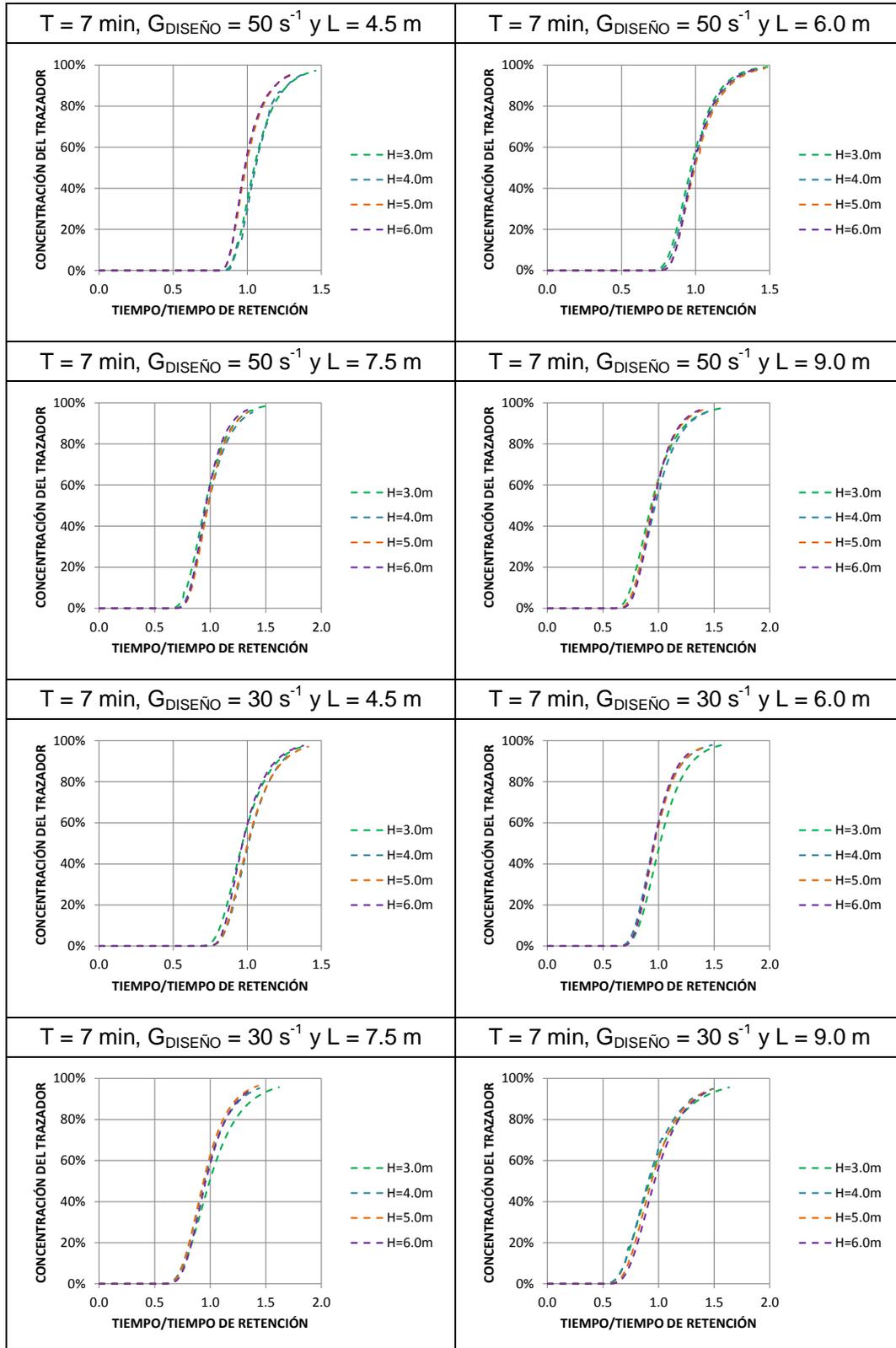
Continuación.



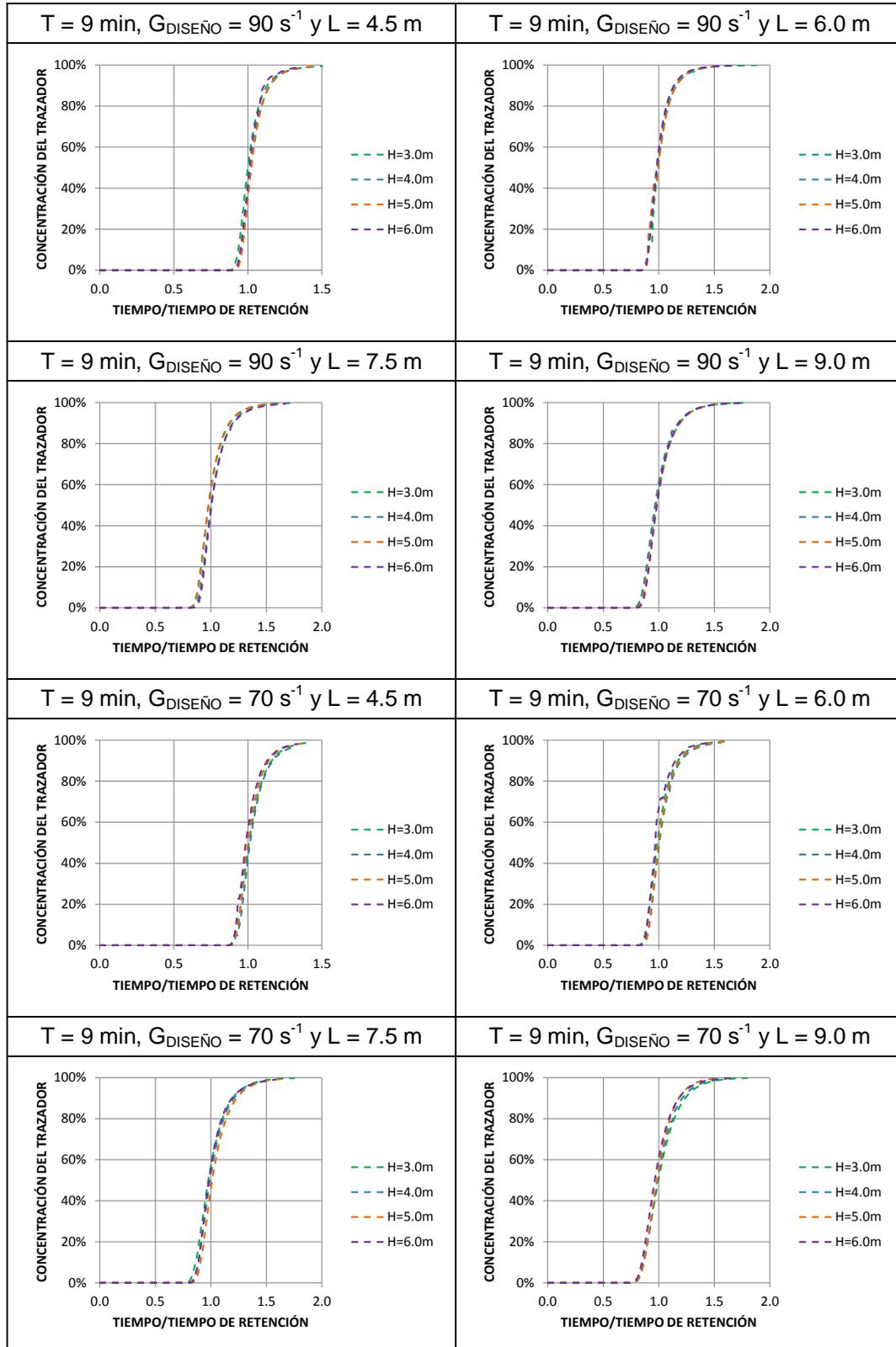
Continuación.



Continuación.



Continuación.



Continuación.

