Asociación Argentina
de Mecánica Computacional

Mecánica Computacional Vol XLI, pp. 1275-1284
C.I. Pairetti, M.A. Pucheta, M.A. Storti, C.M. Venier (Eds.)
L. Domínguez, P. Santoro, M. Ragessi (Issue eds.)
Rosario, November 5-8, 2024

SIMULACIÓN DEL FLUJO TURBULENTO EN CÁMARAS DE CLORACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO PARA ESTIMAR INDICADORES DE EFICIENCIA HIDRÁULICA E INCORPORARLOS AL PROCESO DE DISEÑO

SIMULATION OF TURBULENT FLOW IN LABORATORY-SCALE CHLORINATION CHAMBERS TO ESTIMATE HYDRAULIC EFFICIENCY INDICATORS AND INCORPORATE THEM INTO THE DESIGN PROCESS

Carrión Camila[1], Ragessi I. Matías[1,2], Molina L. Sofia[1], Rodríguez Andrés[1,3] y Hillman Gerardo[1]

[1]*Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (LH-FCEFyN-UNC).*

[2]*Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba (FI-UCC).*

[3]*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT CONICET/UNC).*

E-mail: camila.carrion@mi.unc.edu.ar

Página web sitio de afiliación: https://fcefyn.unc.edu.ar/

Palabras clave: Fluido Dinámica Computacional, Cámara de Cloración, RTD, Optimización de Diseño, Concentración de Cloro Residual.

Resumen. El equilibrio ambiental depende del agua y su saneamiento, lo que incluye la depuración de aguas residuales para eliminar contaminantes y recuperar su calidad antes de verterlas en cuerpos receptores. Este trabajo se enfoca en el tratamiento terciario del proceso de desinfección, la cloración controlada. Se utiliza la dinámica de fluidos computacional y la librería OpenFOAM(R) para simular diferentes diseños de una cámara de contacto, a escala de laboratorio, y evaluar la eficiencia hidráulica, considerando problemas como el desarrollo de zonas de recirculación y cortocircuito, que afectan el tiempo de contacto mínimo entre el cloro y el efluente.

Keywords: CFD, Contact Tank, RTD, design optimization, residual chlorine Concentration.

Abstract. The environmental balance depends on water and its sanitation, which includes the treatment of wastewater to remove contaminants and restore its quality before discharging it into receiving bodies. This work focuses on the tertiary treatment of the disinfection process, specifically controlled chlorination. Computational fluid dynamics and the OpenFOAM(R) library are used to simulate different designs of a contact chamber at a laboratory scale and evaluate hydraulic efficiency, considering issues such as the development of recirculation zones and short-circuiting, which affect the minimum contact time between chlorine and the effluent.

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional
ISSN: 2591-3522 DOI: 10.70567/mc.v41i24.126

1 INTRODUCCIÓN

En la búsqueda del desarrollo social, el ser humano impacta significativamente los recursos naturales y genera residuos líquidos, conocidos como aguas residuales, que representan una amenaza tanto social como ambiental. Es esencial implementar una gestión adecuada para eliminar patógenos y contaminantes antes de su vertido en cuerpos receptores, conforme a las normativas vigentes y a los objetivos específicos del tratamiento. A continuación, se detallan las etapas del tratamiento del agua residual, conjunto de operaciones y procesos unitarios destinados a la depuración eficaz de las mismas.

Tratamiento Primario: Etapa inicial del proceso, basada en operaciones físicas como la sedimentación y el desbaste. El objetivo es eliminar sólidos sedimentables y flotantes para reducir la carga de contaminantes y facilitar las siguientes etapas del tratamiento.

Tratamiento Secundario: En esta fase se emplean procesos biológicos y químicos para eliminar la materia orgánica disuelta en el agua residual. Los métodos biológicos, a través del accionar de microorganismos, descomponen compuestos orgánicos, mientras que los procesos químicos ayudan a completar esta descomposición.

Tratamiento Terciario: Esta etapa combina procesos y operaciones unitarias adicionales, con el fin de eliminar componentes específicos, como el nitrógeno y el fósforo. Además, complementa la reducción de elementos que no alcanzaron su nivel óptimo durante el tratamiento secundario, lo cual es crucial para evitar impactos negativos en los cuerpos receptores, como la eutrofización.

Esta última etapa será el foco de interés de este trabajo de investigación, donde se analizará la eficiencia hidráulica y posibilidades de mejora de una cámara de contacto o cloración.

2 CÁMARA DE CONTACTO O CLORACIÓN

En la cámara de contacto se realiza la desinfección de las aguas residuales, destruyendo selectivamente los organismos causantes de enfermedades. El cloro es el desinfectante más utilizado globalmente por su efectividad, seguridad y facilidad de medición, funcionando como un oxidante que rompe la pared celular de los microorganismos. La eficiencia de la desinfección con cloro depende de factores como el tiempo de contacto, la concentración del desinfectante, la temperatura, la cantidad y tipo de organismos, y la naturaleza del agua.

En general, los reactores se diseñan en base a normas del Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (ENOHSA), que establecen condiciones de flujo pistón (PFR) y mezcla completa (CSTR), con un tiempo de contacto mínimo de 15 minutos y una velocidad mínima de flujo de 0,075 m/s para evitar sedimentación. Además, la distancia media recorrida por el flujo en relación a la separación de los tabiques debe ser de al menos 40. El libro INGENIERÍA DE AGUAS RESIDUALES, TRATAMIENTO, VERTIDO Y REUTILIZACIÓN (TERCERA EDICIÓN) publicado por METCALF & EDDY, INC respalda como tiempo mínimo de contacto el establecido anteriormente.

Sin embargo, la hidrodinámica compleja del flujo en los reactores puede crear zonas de recirculación debido a efectos viscosos y turbulentos, y zonas de alta velocidad, lo que puede afectar el tiempo de contacto necesario para una desinfección efectiva. Por lo tanto, entender la hidrodinámica local es crucial para diseñar reactores eficientes.

Este trabajo tiene como objetivo analizar la hidrodinámica del flujo y el comportamiento de un trazador durante el tratamiento terciario en la unidad de desinfección, a escala de laboratorio. Utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se simula el flujo en diferentes diseños del reactor. Con los resultados, se generan curvas de Distribución de Tiempos de Residencia (RTD), se evalúan indicadores de eficiencia hidráulica (HEI's) y se estima la concentración de cloro residual para determinar los diseños más eficientes.

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional

2.1 Indicadores de eficiencia de la cámara de contacto

El modelo numérico se basa en condiciones de flujo pistón, inyectando una concentración constante de un escalar pasivo en la entrada y monitoreando su evolución en la salida. La simulación dura hasta que la concentración se estabiliza en ambas secciones. En la salida se obtiene la curva RTD y su gráfica acumulativa, sobre las cuales se estiman cuatro HEI's para cada diseño del reactor.

El primer **índice** θ_{10}, "factor deflector", es el tiempo normalizado para que el 10% de la masa del trazador inyectado pase por la sección de salida, es utilizado como indicador del desarrollo de atajos o cortocircuitos en el tanque de contacto. Se calcula a partir de la Ec. 1:

$$\theta_{10} = t_{10}/T_p \tag{1}$$

donde t_{10} es el tiempo que transcurre hasta muestrear en la sección de salida el 10% de la concentración del trazador inyectado y T_p es el tiempo de permanencia medio de la cámara de contacto, relación entre el volumen de la cámara y el caudal que fluye ($T_p = V/Q$).

El segundo es el **índice de Morril** (M_o) el cual es comúnmente utilizado para evaluar la eficiencia de mezcla del desinfectante con el agua y se calcula según la Ec. 2:

$$MO = \frac{\theta_{90}}{\theta_{10}} = \frac{(t_{90}/T_P)}{(t_{10}/T_P)} \tag{2}$$

donde $\theta_{90} = t_{90}/T_p$ relaciona el tiempo necesario para muestrear en la sección de salida el 90% de la concentración del trazador inyectado (t_{90}) y el tiempo de permanencia (T_p).

El tercero es el **índice AD**, propuesto por Demirel y Aral (2016b), el cual evalúa la mezcla y las características hidráulicas (desarrollo de atajos). Se calcula con la Ec. 3:

$$AD = \frac{\theta_{90} - 1}{1 - \theta_{10}} = \frac{(t_{90}/T_P) - 1}{1 - (t_{10}/T_P)} = \frac{t_{90} - T_P}{T_P - t_{10}} \tag{3}$$

El cuarto es el **índice** n_{eff}, indica el porcentaje de área efectiva de flujo en relación al área total de la cámara de contacto. Se calcula según la Ec. 4, donde A_R representa el área de las zonas de recirculación del flujo y A_T el área total de la cámara de contacto. Mientras más cercano a 1 sea este índice, menor área de cortocircuito.

$$n_{eff} = 1 - (A_R/A_T) \tag{4}$$

A continuación, se resumen los valores publicados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 1991) para cada índice y su clasificación cualitativa. Por otro lado, se incorporó el rango de valores del índice AD sugeridos por sus autores.

Índice	Excelente	Bueno	Comprometedor	Malo	Muy Malo
MO	< 1,5	1,5 < MO < 2,5	2,5 < MO < 3,5	3,5 < MO < 5	> 5
AD	> 3,5	1,75 < AD < 3,5	0,5 < AD < 1,75	0,2 < AD < 0,5	0,1 < AD < 0,2
θ_{10}	0,7 < θ_{10} < 0,9	0,5 < θ_{10} < 0,7	0,3 < θ_{10} < 0,5	-	< 0,3

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional

n_{eff}	> 0,9	$0,6 < n_{eff} < 0,9$	$0,4 < n_{eff} < 0,6$	$0,1 < n_{eff} < 0,4$	-

Tabla 1: Clasificación y rangos de los índices de eficiencia.

3 MATERIALES Y METODOLOGÍA

Como herramienta de trabajo se utilizó AutoCAD, software gratuito para estudiantes, Gmsh® (Geuzaine y Remacle, 2009), el lenguaje de programación Python y el paquete de librerías de OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation, (OpenCFD, 2005)). Este último, es un software de uso gratuito y código abierto, el cual ofrece la libertad de crear o modificar un solver o código de resolución específico, aplicable a un amplio rango de campos de la ingeniería. OpenFOAM® ofrece herramientas de pre y post-procesamiento, en este caso se utilizó el post-procesador paraView, para visualizar y analizar datos.

3.1 Alternativas de diseño

Las alternativas de diseño iniciales se basaron en el trabajo presentado por Molina et al (2023), en el cual se introdujo el análisis de 9 diseños. A partir de los resultados obtenidos, se seleccionaron los diseños 5 y 8 como los que presentan mejores HEI's. Este trabajo se centra en mejorar dichos diseños, para garantizar el tiempo de permanencia mínimo.

Se toma como base el tiempo de permanencia mínimo según normas ENOHSA (t_{10}) y los índices AD y MO de cada diseño, obtenidos de los resultados de la simulación y calculados según la Ec. 2 y Ec. 3. Estos índices se combinan para obtener la Ec. 5, que expresa el Tiempo de Permanencia Necesario (T_P') en función de AD, MO y t_{10}.

Despejo: $$t_{90} = MO * t_{10}$$

Reemplazo en: $$AD = \frac{(MO * t_{10}) - T_P}{T_P - t_{10}}$$

$$AD * (T_P - t_{10}) = (MO * t_{10}) - T_P$$

$$T_P * (AD + 1) = (MO * t_{10}) + (AD * t_{10})$$

$$T_P' = \left(\frac{MO + AD}{AD + 1}\right) * t_{10} \quad (5)$$

Establecido (t_{10}) igual a 15 min según ENOHSA (284,6 s a escala de laboratorio), para cada diseño se calculó T_P' y, en consecuencia, el volumen que debe tener el reactor ($V_{necesario} = Q * T_P$'). Por otro lado se calcula el ($V_{Teórico} = Q * T_{Teórico}$), y a partir de la diferencia entre ambos se obtiene el V_{Extra} que corresponde al volumen que se debe adicionar al reactor original para satisfacer T_P'. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Diseño	En base al caso:	T_P' [s]	T_P $Teórico$ [s]	Q [m3/s]	$V_{necesario}$ [m3]	$V_{Teórico}$ [m3]	V_{Extra} [m3]
10	8	311,71	286,2	0,000145	0,0452	0,0415	0,004
11 / 12	5	359,70	284,1	0,000107	0,0385	0,0304	0,008

Tabla 2: Nuevos diseños a modelar.

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional

Luego se simuló el reactor con el nuevo volumen, para verificar que el tiempo de permanencia mínimo (t_{10}) sea mayor o igual a lo indicado (284,6 s en escala de laboratorio). Se propuso una tercera alternativa de diseño que busca combinar la eficiencia hidráulica y constructiva, partiendo del diseño 5 redimensionado, sobre el cual se reemplazan los tabiques semicirculares por tabiques rectos.

A modo de resumen, este trabajo contempla 10 diseños en total (nombrados del 3 al 12), de los cuales 7 provienen del trabajo presentado por Molina et al (2023) y 3 nuevos correspondientes a remodelados del diseño 5 y 8, el enfoque principal de este estudio. Como herramienta se utilizó AutoCAD.

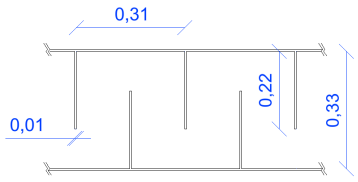
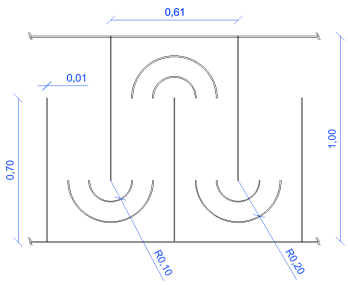
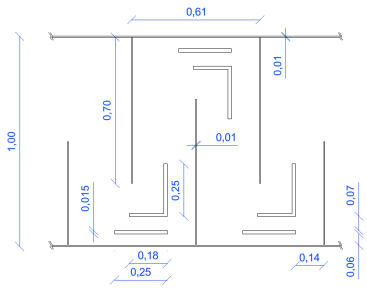
Diseño 10	Diseño 11	Diseño 12
		

Tabla 3: Diseños propuestos de Camara de Cloracion.

En el Diseño 10 los tabiques principales están dispuestos de forma longitudinal (paralela a la dirección principal de flujo), con pequeños tabiques transversales. En el Diseño 11 y 12 los tabiques están dispuestos de forma transversal a la dirección de ingreso del flujo a la cámara de contacto. El Diseño 11 posee deflectores semicirculares y el Diseño 12 deflectores rectos.

3.2 Construcción de la malla de volúmenes finitos

La construcción de la malla comienza con la generación de mallas de volúmenes finitos en hexaedros usando Gmsh®. Luego, se superpone esta malla base con la geometría de los tabiques sólidos de la cámara, generados en AutoCAD en formato “stl”, utilizando la herramienta snappyHexMesh de OpenFOAM®. A continuación, se resuelve la malla ajustando el tamaño de las celdas para capturar con precisión las áreas críticas, como las paredes y zonas de cambio de velocidad del flujo.

El nivel de refinado de la malla se estudia mediante el análisis de convergencia, aplicando diferentes niveles de resolución a las celdas, en este caso 2 cm, 1 cm y 5mm, se modela y compara parámetros clave como la velocidad, tomando sus valores en puntos estratégicos para cada resolución.

Luego de realizar el análisis de convergencia, se puede concluir que aumentar la resolución de la malla más allá de 2 cm no mejora significativamente los resultados, con errores menores al 3,8%. Por lo tanto, la resolución de 2 cm es la adecuada, optimizando el rendimiento computacional y ofreciendo buenos resultados experimentales. No se presentan todos los resultados del análisis de convergencia de malla por falta de espacio.

3.3 Ecuaciones: Modelo Matemático

Este estudio utilizó un modelo numérico basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS), implementado en el software libre OpenFOAM® (Open Field Operation

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional

and Manipulation, OpenCFD Ltd. 2005) (OpenCFD. http://www.opencfd.co.uk/openfoam/.). Se aplicaron los algoritmos SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) y PIMPLE (*Pressure Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) para resolver ecuaciones de flujo incompresible e isotérmico en una malla de volúmenes finitos, junto con el modelo de cierre k-ε (*KE*, por sus siglas en inglés), sin modificar sus constantes. En la primera etapa, se resolvió el estado estacionario del flujo utilizando el solver SIMPLE (simpleFOAM), y en la segunda etapa, se simuló el flujo no estacionario y el transporte del escalar pasivo con el esquema PIMPLE (pimpleFOAM).

3.4 Condiciones iniciales y de borde

El esquema numérico requiere establecer condiciones iniciales y de borde para las variables: presión (p), velocidad media (U, en sus tres componentes), energía cinética turbulenta (k), disipación de energía cinética turbulenta (ε) y viscosidad turbulenta (ν_t).

Superficie	U **[m/s]**	p **[m²/s²]**	k **[m²/s²]**	ε **[m²/s³]**	ν_t **[Pa.s]**
Entrada	U_{med}	*zeroGradient*	1e-6	1e-6	1e-6
Salida	*inletOutlet*	*Cero*	*zeroGradient*	*zeroGradient*	*calculated*
Frente/Fondo	empty	empty	empty	empty	empty
Paredes/Tabiques	*fixedValue*	*zeroGradient*	*kqRWallFunction*	*epsilonWallFunction*	*nutUSpaldingWallFunction*

Tabla 4: Condiciones de borde del modelo numérico RANS-KE.

3.5 Estimación del Cloro Residual

En esta etapa de la investigación, se busca encontrar una relación entre el cloro residual que queda en el efluente y el tiempo de permanencia mínimo al variar la configuración de la cámara y su volumen, con la intención de analizar si la eficiencia de los HEI's implica además eficiencia en la concentración de cloro residual.

La eficiencia del tanque de cloración se determina midiendo el cloro residual y analizando los organismos coliformes en el efluente. La Ec. 6 (Fuente: Metcalf & Eddy, 2004), estima la concentración de coliformes admisibles.

$$C_r = \frac{\left(\frac{N_t}{N_o}\right)^{-1/3} - 1}{0{,}23 * t_r} \tag{6}$$

Siendo: $\frac{N_t}{N_o} = 0,001$ el cual se obtiene al definir los valores de: $N_o = 10^7 NMP\ coliformes/100ml$ y $N_t = 1000\ NMP\ coliformes/100ml$

La Concentración total de cloro C, es un indicativo de la cantidad de desinfectante agregado. Además se calcula dif Cr [%], la diferencia porcentual en la concentración de coliformes respecto a un valor de referencia o a un valor esperado en este. Un valor negativo significa que la concentración de coliformes en el efluente es menor que la de referencia, lo cual es positivo para la desinfección.

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Gráfico 1 se presentan las curvas RTD que se obtuvieron de las simulaciones del flujo y transporte de un escalar no reactivo en cada reactor (Diseños 3 al 12) para el caudal de diseño.

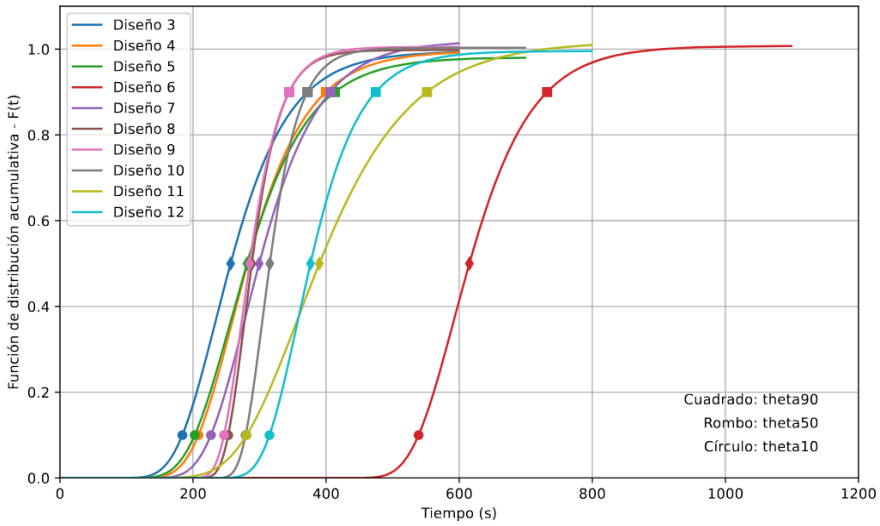


Gráfico 1: Tiempo Vs F(t)

A partir del Gráfico 1, se destacan los diseños que disminuyen la diferencia entre θ_{10} y θ_{90}, implicando mayor eficiencia en el recorrido del trazador, como son los diseños del 8 al 10. Si bien el resto de los diseños poseen diferencias mayores, no son significativas como para impedir o descartar su análisis.

Luego se calculan los HEI's de la Tabla 5, dentro de los cuales se destacan: en verde, Diseño 5 y su rediseño (Diseño 11); en rojo, el diseño 8 y su rediseño (Diseño 10); y en amarillo, el Diseño 12, que es un rediseño del Diseño 11 con tabiques rectos en lugar de semicirculares. Cabe recordar que el rediseño implica un aumento del volumen de la cámara.

ÍNDICES DE EFICIENCIA HIDRÁULICA									CLORO RESIDUAL		
Diseño	T_P [s]	Q [m3/s]	θ_{10}	θ_{90}	MO	AD	Volumen Efectivo [%]	t_{10}	Cr [mg/l]	C [mg/l]	dif Cr [%]
3	265,7	0,000106	0,786	1,591	2,023	2,765	0,608	183,99	4,04	9,11	0%
4	288,2	0,000106	0,804	1,543	1,919	2,769	0,640	208,21	3,57	8,63	-12%
5	284,1	0,000107	0,791	1,614	2,040	2,940	0,616	202,55	3,67	8,73	-9%
6	608,9	0,000069	0,910	1,236	1,358	2,621	0,835	538,67	1,38	6,38	-66%
7	289,1	0,000145	0,813	1,457	1,792	2,449	0,662	226,90	3,27	8,33	-19%
8	286,2	0,000145	0,913	1,243	1,362	2,799	0,839	252,91	2,94	7,98	-27%
9	287,1	0,000145	0,903	1,261	1,396	2,696	0,822	246,56	3,01	8,06	-25%
10	316,7	0,000146	0,918	1,223	1,332	2,712	0,849	279,04	2,66	7,70	-34%
11	387,11	0,000104	0,784	1,541	1,966	2,499	0,606	280,55	2,65	7,69	-34%
12	389,0	0,000104	0,882	1,329	1,507	2,794	0,783	314,92	2,36	7,39	-42%

Tabla 5: HEI's y Cloro Residual, para el Caudal de Diseño.

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional

Se corrobora que implementar la simulación numérica en el rediseño del reactor a partir de los HEI's y el tiempo de permanencia mínimo (t_{10}= 284,6 s), garantiza el cumplimiento del tiempo de permanencia establecido, lo cual se puede ver en los valores de t_{10} de la tabla.

Incluir el caudal de agua residual en el análisis es crucial para el diseño de instalaciones de tratamiento. El modelo anterior se realizó en base al caudal de diseño pico de la planta, se estudia ahora el comportamiento de los diseños con caudales del 75% y 50% del caudal de diseño, ya que la planta no siempre opera a máxima capacidad. Para los diseños 10, 11 y 12, se aplican estas nuevas condiciones de caudal, se obtienen las curvas RTD y se calculan los HEI's para comparar con el caudal de diseño original.

ÍNDICES DE EFICIENCIA HIDRÁULICA								
Diseño	T_P [s]	Q [m3/s]	θ_{10}	θ_{90}	MO	AD	Volumen Efectivo [%]	t_{10} [s]
10	424,03	0,000011	0,915	1,219	1,333	2,571	0,845	371,36
11	514,89	0,000078	0,742	1,557	2,098	2,163	0,537	359,98
12	505,69	0,000078	0,868	1,369	1,576	2,800	0,758	400,28

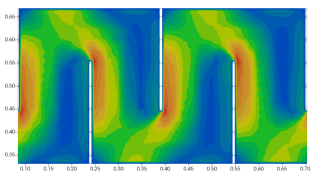
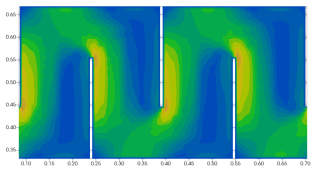
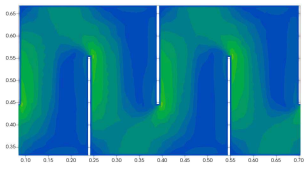
Tabla 6: HEI's y Cloro Residual, para el 75% Caudal de Diseño.

ÍNDICES DE EFICIENCIA HIDRÁULICA								
Diseño	T_P [s]	Q [m3/s]	θ_{10}	θ_{90}	MO	AD	Volumen Efectivo [%]	t_{10} [s]
10	631,9	0,000073	0,916	1,222	1,334	2,644	0,847	556,97
11	772,31	0,000052	0,757	1,603	2,116	2,483	0,558	545,99
12	758,53	0,000052	0,864	1,373	1,589	2,738	0,750	596,88

Tabla 7: HEI's y Cloro Residual, para el 50% Caudal de Diseño.

Se observó que al disminuir el caudal de diseño, el t_{10} aumenta significativamente, asegurando el cumplimiento de t_{10}= 284,6 s. Es un comportamiento esperable, pero además, se verificó que los HEI's se mantienen dentro del mismo nivel de clasificación, en comparación con los resultados obtenidos para el caudal pico.

Por último, en la Tabla 6 se presenta el campo de magnitud de la velocidad para cada diseño y una porción del reactor, con la finalidad de analizar la influencia entre el caudal de diseño y los valores de velocidad observados cerca de los tabiques y paredes.

Diseño	Caudal Diseño	75% Caudal Diseño	50% Caudal Diseño
10			

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional

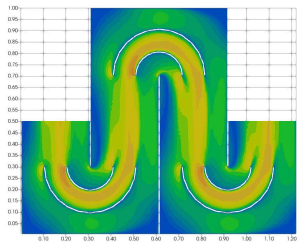
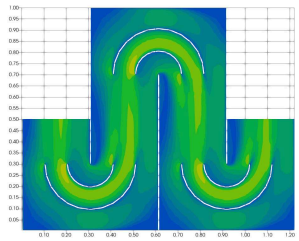
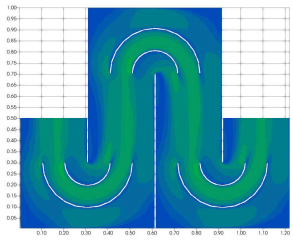
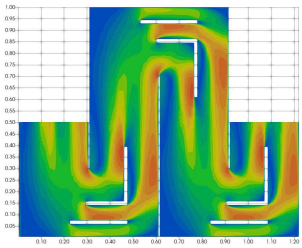
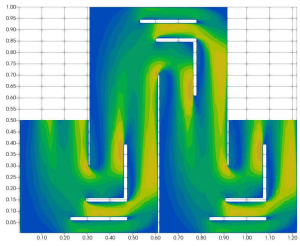
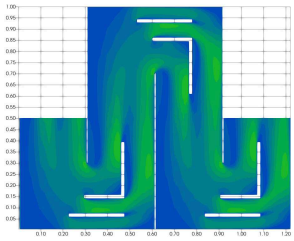
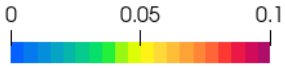
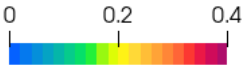
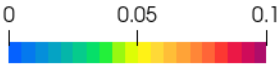
11			
12			
Escala (m/s)			

Tabla 8: Resultados correspondientes a valores de velocidad.

Los resultados anteriores, permiten demarcar zonas en las cuales la velocidad disminuye a valores que ocasionan zonas de estancamiento o recirculación, objetivo de este trabajo. Para el caudal de diseño, se destacan zonas con velocidades máximas aguas abajo de cada curva con valores máximos de 10 cm/s. A medida que el caudal de diseño disminuye, los valores de velocidad en la sección también lo hacen, y aumenta el tamaño de las zonas de estancamiento y recirculación (zonas de color azul).

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados de simulación de diferentes diseños de una cámara de contacto, a escala de laboratorio, con el objeto de evaluar la eficiencia hidráulica, considerando problemas como el desarrollo de zonas de recirculación y cortocircuito, que afectan el tiempo de contacto mínimo entre el cloro y el efluente.

Se presentan conclusiones principales sobre el impacto de la malla, el diseño de la cámara y el caudal de diseño en la eficiencia de la cámara de contacto:

Se comparan los resultados de siete (7) diseños. Al analizar las alternativas 3-9, se distinguen las configuraciones 5 y 8 que tienen menor desarrollo de cortocircuitos, y mejor mezcla según los indicadores de eficiencia.

En una segunda etapa se propuso redimensionar algunos diseños tomando como base tres parámetros: dos indicadores de eficiencia hidráulica (MO y AD), y el valor del tiempo de contacto mínimo según la norma (t_{10}= 15 min). Se determinó el Tiempo de Permanencia Necesario (T_P') y el $V_{necesario}$ para que el flujo en el reactor cumpla con el valor de t_{10}.

Se redimensionaron los diseños 5 y 8 y se propuso el diseño 12. Los resultados de la simulación muestran mejoras en los HEI's respecto a sus predecesores, con el diseño 12 destacando en eficiencia y facilidad constructiva, a pesar de poseer una ligera disminución en el índice AD. El redimensionado del volumen tuvo impacto positivo en los HEI's y se observa que en los tres casos el valor de t_{10} siempre cumple con el tiempo mínimo definido según

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional

norma. Esto último indica lo acertado de redimensionar el volumen de los reactores considerando los indicadores MO y AD según lo propuesto en este trabajo.

En cuanto al cloro residual, al redimensionar el volumen de la cámara de contacto se puede observar una significativa disminución en la diferencia porcentual de concentración de coliformes, lo cual es positivo para la definición. Luego, al modelar los diseños con caudales de 75% y 50% el valor antes mencionado sigue disminuyendo, lo cual implica un aumento en la eficiencia de desinfección a medida que el caudal de diseño disminuye.

El uso de modelos CFD para el diseño de la cámara de contacto demuestra ventajas en la eficiencia hidráulica y la desinfección. En trabajos futuros se continuará con la simulación tridimensional de los diseños 10, 11 y 12 para verificar los resultados obtenidos con las simulaciones bidimensionales. Esto permitirá crear un set de datos para estandarizar y optimizar un proceso de diseño que incorpore el uso de CFD.

REFERENCIAS

Angeloudis, A., Stoesser, T. and Falconer, R.A. (2014). Predicting the disinfection efficiency range in chlorine contact tanks through a CFD-based approach. Water Research, 60, pp.118–129. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.04.037.

Angeloudis, A., Stoesser, T., Gualtieri, C. and Falconer, R.A. (2016). Contact Tank Design Impact on Process Performance. Environmental Modeling & Assessment, 21(5), pp.563–576. doi:https://doi.org/10.1007/s10666-016-9502-x.

Demirel, E. y MM. Aral. 2016a. Unified análisis of multi-chamber contact tanks and mixing efficiency based on vorticidad field I: Hydrodynamic analysis.

Demirel, E. y MM. Aral. 2016b. Unified análisis of multi-chamber contact tanks and mixing efficiency based on vorticidad field II: Transport analysis.

Demirel, E. and Aral, M.M. (2018). Performance of Efficiency Indexes for Contact Tanks. Journal of Environmental Engineering, 144(9), p.04018076. doi:https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001431.

Metcalf & Eddy, INC (1995). Engineering Sewage Treatment, Disposal and reuse. Unitary chemical processes, 7, pp.343-403.

Molina, SL. y Ragessi, IM. 2022. Simulación del Flujo en Alternativas de Diseños de una Cámara

de Cloración a Escala de Laboratorio para Evaluar la Mejora en los Indicadores de Eficiencia Hidráulica.

Di Buo, M. y Ragessi, IM. 2022. Optimización del Diseño de la Cámara de Contacto en "EDAR-Bajo Grande", Córdoba, Argentina.

Geuzaine, C. Remacle, J. F. 2009 Gmsh: A 3-D element mesh generator with built-in pre and post-processing facilities. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Issue, 461-477.

OpenCFD. (2005) (http://www.opencfd.co.uk/openfoam/)

Ragessi I. M., Marquez Damian S., Garcia C. M., Pozzi Piacenza C., Romagnoli M., Hillman G. 2013. Validación de un modelo numérico para la simulación del flujo turbulento en una planta de tratamiento de agua potable. Mecánica Computacional Vol XXXII, págs. 3741-3761.

Raggesi, Iván Matías. (2017). Caracterización Hidrodinámica Detallada del Flujo en Estructuras Hidráulicas de Plantas de Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales para Evaluar su Funcionamiento.

USEPA. 1991, Guidance manual for compliance with the filtration and disinfection requirements for public water system using surface water.

Copyright © 2024 Asociación Argentina de Mecánica Computacional