



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS EN LA ERA DIGITAL

OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO HORIZONTAL PARA POTABILIZACIÓN DE AGUAS VEREDALES

Vargas Adriana K.N, López C. Laura

**Universidad Manuela Beltrán
Bogotá, Colombia**

Núñez-Vallejos Diego A

**Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá Colombia**

Resumen

Esta investigación presenta una optimización geométrica de un floculador hidráulico horizontal de múltiples etapas para la potabilización de agua. El objetivo es comparar el algoritmo de optimización mono-objetivo Simplex Modificado con el método de Evolución diferencial para evaluar los valores óptimos del sistema geométrico: ancho, largo, alto del floculador, número de baffles, ancho entre baffles y número de compartimientos. Los resultados muestran que aplicando los algoritmos de optimización es posible reducir hasta en un 10% la capacidad del sistema sin afectar la operación del mismo.

Palabras clave: potabilización de aguas; floculación; optimización mono objetivo

Abstract

This study presents a geometrical optimization applied to a multiple stage horizontal hydraulic flocculator. The aim was to compare the results of two optimization techniques, a modified simplex and Differential Evolution. The optimization was focused on search geometrical features, such as: width, height, length of the flocculator, number of baffles, width between baffles and number of compartments. Both techniques generated better geometric distributions than current system. The results showed that although simplex algorithm got results with less error, the features determined by Differential Evolution were more homogeneous.

Keywords: potabilization; flocculation; mono objective optimization

1. Introducción

Las plantas de potabilización veredales convencionales se caracterizan por tratar caudales inferiores a 30l/s. Su diseño debe dar cumplimiento a los criterios técnicos establecidos por la normatividad colombiana, sin embargo, en caudales muy bajos, se pueden generar problemas de sobredimensionamiento, afectando aspectos como desempeño y eficiencia de las unidades de tratamiento. Los floculadores hidráulicos de flujo horizontal son estructuras usadas dentro del tren de potabilización, diseñadas por compartimientos para asegurar una disipación de energía que permite cambiar de manera controlada, el régimen de flujo de turbulento, proveniente de la mezcla rápida, a laminar para la descarga en el sedimentador. En las plantas de potabilización veredal se recomiendan los floculadores hidráulicos por su fácil operación y mantenimiento en ausencia de equipos mecánicos y eléctricos (Ghawi, 2018). Su diseño es complejo por el gran número de variables geométricas y operacionales que deben ser ajustadas por el diseñador. Varios autores han desarrollado diversos estudios para evaluar variables operacionales como pH, dosis de coagulante y tipo de coagulante (Angreni, 2009; Degaard, 1995; Halters, Zondervan, & Haan, 2010; Piri, Homayoonzhad, & Amirian, 2010), sin embargo estudios han mostrado que la eficiencia también depende de variables de diseño como ancho entre baffles o altura de lámina de agua (Dhailmappa, Verink, Fujiwara, & Swaran, 2007; He, Xue, Gorczyca, Nan, & Shi, 2018). Para evaluar cada una de las variables técnicas de diseño en la formación de floc se requieren estudios de optimización que permiten obtener características físicas que garantizan buen desempeño a bajo costo.

2. Optimización mono objetivo por el método Simplex Modificado

El método Simplex es un algoritmo de optimización para encontrar el mínimo global de una función con menos iteraciones que métodos con enfoques no sistemáticos o uni variables que se basa en un diseño inicial de $k + 1$ iteraciones, donde k es el número de variables. Este método es secuencial, con la adición y evaluación de una nueva prueba en un determinado tiempo. El método Simplex modificado fue propuesto por Nelder & Mead (1965) para mejorar el método simplex convencional mediante movimientos adicionales en la localización del punto óptimo. Esto es posible porque el área de búsqueda puede ser constantemente modificada mediante la expansión y contracción de los vértices reflejados. Por lo tanto, los siguientes movimientos principales son prácticos para el algoritmo modificado: reflexión (R), expansión (E), contracción (CR) y contracción con cambio de dirección (Cw). La Figura 1 muestra estos tres tipos de movimientos comenzando con un simplex BNW para dos variables. BNR es el simplex obtenido por reflejar el vértice con la peor respuesta del simplex inicial, mientras que BNE es el simplex obtenido por expansión; BNCW es el simplex obtenido por el movimiento de contracción hacia el vértice con la peor respuesta. Finalmente, BNCR es el Simplex obtenido por el movimiento de contracción del vértice R.

Optimización mono objetivo por el método de Evolución Diferencial

El método de Evolución Diferencial (ED) es un algoritmo de optimización estocástico (Storn, 1997) que busca las variables óptimas en un espacio de búsqueda $S \subseteq \mathbb{R}^D$ el. Este método ha sido usado por algunos autores para la optimización de sistemas de tratamiento de agua (Hakanen, Sahlstedt, & Miettinen, 2013; Singh, 2012). ED involucra una población de NP vectores, equivalentes a las

posibles soluciones $x_{i,g} = \{x_{1i,g}, x_{2i,g}, \dots, x_{Di,g}\} \in S; i = 1, 2, \dots, NP$. Donde cada $x_{ji,g}$ son las variables de decisión, y g la generación a la cual pertenece el vector. Dichos vectores, después de ser inicializados, son modificados por operaciones de mutación, recombinación y selección en cada generación g .

Inicialización Se definen previamente los límites inferiores y superiores para cada variable de decisión: $x_j^i \leq x_{ji,1} \leq x_j^s$. Posteriormente se seleccionan, aleatoria y uniformemente, los valores iniciales de las variables de decisión sobre los intervalos $[x_j^i, x_j^s]$.

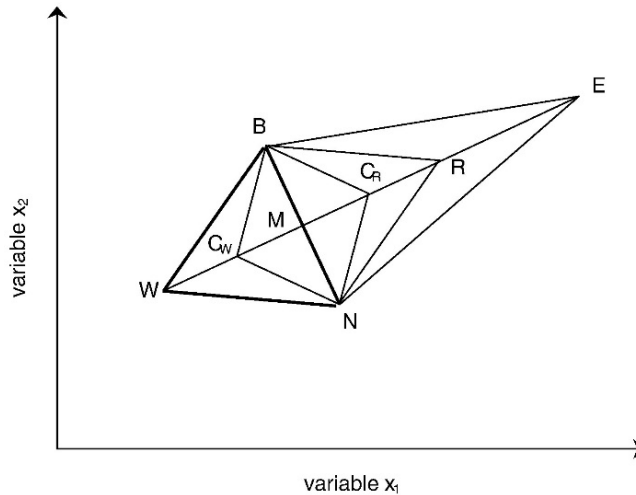


Figura 1. Esquema de iteración de la búsqueda Simplex Modificado Bezerra et al. (2016)

Mutación Para cada vector $x_{i,g}$ un vector de mutación es generado de acuerdo con:

$$v_{i,g+1} = x_{r1,g} + F(x_{r2,g} - x_{r3,g})$$

Donde los índices $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ son enteros aleatorios y mutuamente generados. F es un factor mayor a cero.

Recombinación Se hace una recombinación para aumentar la diversidad de los parámetros de los parámetros perturbados:

$$u_{i,g+1} = (u_{1i,g+1}, u_{2i,g+1}, \dots, u_{Di,g+1})$$

Donde,

$$u_{i,g+1} = \begin{cases} u_{ji,g+1} & \text{si } (rand_j[0,1] \leq CR) \text{ ó } (j = j_{rand}), \\ x_{ji,g+1} & \text{si } (rand_j[0,1] > CR) \text{ y } (j \neq j_{rand}), \end{cases}$$

para $j = 1, 2, \dots, D$; CR equivalente a la constante de probabilidad de recombinación en el rango $[0,1]$ y j_{rand} un entero aleatorio elegido en el rango $[1, NP]$.

Selección Se compara el valor de fitness de cada vector de prueba $f = (u_{i,g+1})$ con su correspondiente vector objetivo $f = (x_{i,g})$ en la población actual y el mejor valor entra en la población de la siguiente generación.

3. Optimización geométrica del floculador de flujo horizontal

El sistema de floculación de flujo horizontal es una estructura en concreto dividido en tres compartimientos (Figura 2).

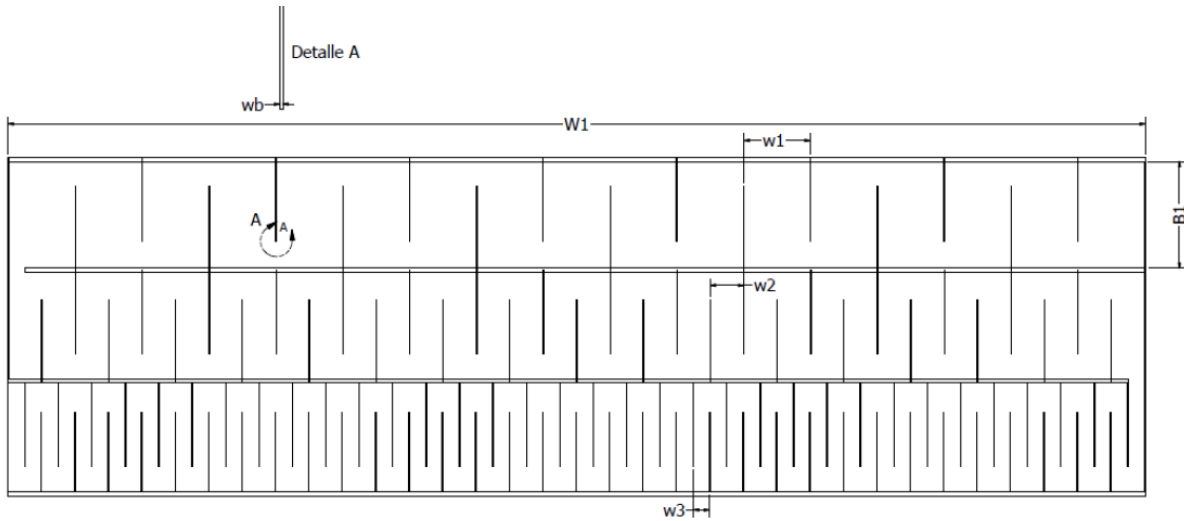


Figura 2. Vista en planta de un floculador hidráulico de flujo horizontal

La longitud recorrida por el fluido en el tramo 1, L_1 , se calcula en función de la velocidad de flujo en el tramo 1, V_1 , y el tiempo de retención hidráulica, T_1 :

$$L_1 = V_1 * T_1 \quad \text{Ec. 1}$$

El volumen de mezcla en el primer tramo, Vol_1 , y el área transversal, A_1 , son calculados con base en el caudal de diseño, Q , y el tiempo de retención del tramo, T_1 .

$$Vol_1 = Q * T_1 \quad \text{Ec. 2}$$

$$A_1 = \frac{Vol_1}{L_1} \quad \text{Ec. 3}$$

El ancho de zona efectiva, B_{ef} , es calculado en función del ancho de vuelta, b_v , y el ancho del compartimiento, B_1 :

$$B_{ef} = B_1 - b_v \quad \text{Ec. 4}$$

A partir de la longitud del tramo L_1 , se determina el número de baffles en el tramo 1, N_1 , como:

$$N_1 = L_1 / B_{ef} \quad \text{Ec. 5}$$

El largo del compartimiento, W , corresponde a:

$$W = (N * w) + (N + 1) * w_b \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

w : Distancia entre baffles.

w_b : Ancho del baffle.

El radio hidráulico, R_H , se determina en función del área transversal, la altura de lámina de agua, H_U y la distancia entre baffles:

$$R_H = \frac{A_1}{2 * (H_U + w)} \quad \text{Ec.7}$$

Las pérdidas totales en el compartimiento 1, h_f , se calculan como función de las pérdidas por fricción, $h_{fricción}$, y las pérdidas por cambio de dirección, $h_{vueltas}$ en el primer compartimiento:

$$h_f = h_{fricción} + h_{vueltas} \quad \text{Ec. 8}$$

Es decir:

$$h_f = \left(\frac{V_1 * n}{\frac{2}{R_H^3}} \right)^2 * L_1 + 3 \frac{V_1^2}{2g} * N_1 \quad \text{Ec. 9}$$

Donde n es el número de Manning.

Con las pérdidas totales se determina, el gradiente de velocidad, G_1 , en función de la gravedad, g , la viscosidad cinemática, μ , :

$$G_1 = \sqrt{\frac{g * h_f}{\mu * T_1}} \quad \text{Ec. 10}$$

El diseño debe cumplir con las siguientes ecuaciones e inecuaciones:

$$15 \text{ min} < T_1 + T_2 + T_3 < 30 \text{ min} \quad \text{Ec. 11}$$

$$G_1 > G_2 > G_3 \quad \text{Ec. 12}$$

$$\frac{G_1 + G_2 + G_3}{3} \approx 40 \quad \text{Ec. 13}$$

$$0.1 \frac{m}{s} < V_3 < V_2 < V_1 < 0.6 \frac{m}{s} \quad \text{Ec. 14}$$

$$20 \text{ s}^{-1} > G_1; G_2; G_3 > 70 \text{ s}^{-1} \quad \text{Ec. 15}$$

$$w_1 > w_2 > w_3 \quad \text{Ec. 16}$$

Cuya función objetivo es minimizar el área de floculación:

$$\min f = W * B \quad \text{Ec. 17}$$

Donde $B = B_1 + B_2 + B_3$

4. Resultados

El estudio se realizó en una planta veredal del Departamento de Boyacá, Colombia, diseñada para un caudal máximo 4,41 l/s y una temperatura media del fluido de 17°C. Los parámetros de diseño obtenidos por el método Simplex Modificado y Evolución Diferencial fueron comparados con el sistema de floculación actual. Los resultados se presentan en las tablas 1 y 2:

Tabla 1. Desempeño computacional de los algoritmos Simplex Modificado y Evolución Diferencial

PARÁMETRO	Sistema Actual	SIMPLEX MODIFICADO	EVOLUCIÓN DIFERENCIAL
Tiempo de ejecución (s)	-	19.8	2.81
Número de iteraciones	-	12000	10000
% error	19.6	7.4	13

El error calculado, se basa en la precisión de los métodos para asegurar la restricción de la Ec. 13, donde se debe garantizar un gradiente de velocidad promedio de 40 s^{-1} en todo el sistema. En este caso, con el método Simplex, se determinó el mínimo de la función con una menor violación de la restricción, comparado con el método de ED, con el cual se obtuvo un mejor desempeño computacional. Como lo mencionan Lampinen, J., y Zelinka (1999), las técnicas evolutivas abarcan un mayor espectro en el universo de búsqueda, permitiendo analizar en menor tiempo mayores posibilidades de optimización. La búsqueda de óptimos por evolución diferencial proporcionó a menor costo computacional resultados aptos de fabricación y ejecución del floculador hidráulico de flujo horizontal. La posibilidad que da este algoritmo de mutación y cruce aceleró su proceso de búsqueda. Esto se evidencia en el tiempo de ejecución de los algoritmos, en donde el método simplex modificado fue 7 veces más lento que el de Evolución Diferencial.

Según los resultados presentados en la tabla 2, con el método de ED se puede reducir hasta en un 10% el área superficial del floculador horizontal, respetando los requerimientos técnicos presentados en las restricciones, mientras que con el método simplex, la reducción es tan solo del 0.4%. Además, el diseño presentado con ED garantiza una mejor relación largo-ancho del floculador, la cual se espera sea cercana a 1.

5. Conclusiones

El diseño de un floculador hidráulico para plantas veredales fue realizado mediante la implementación de dos algoritmos de optimización, donde el método de Evolución diferencial presentó un mejor desempeño computacional y una menor relación entre el ancho y largo del floculador.

Tabla 2. Resultados obtenidos de las simulaciones usando los algoritmos Simplex Modificado y Evolución Diferencial

Parámetro	Tramo	Unidad	Sistema actual	Simplex modificado	Evolución Diferencial
Velocidad, V_1	1	m/s	0.12	0.18	0.122
Velocidad, V_2	2	m/s	0.11	0.172	0.118
Velocidad, V_3	3	m/s	0.10	0.170	0.110
Tiempo de retención, T_1	1	min	7.30	8.02	10.46
Tiempo de retención, T_2	2	min	5.32	7.29	10.30
Tiempo de retención, T_3	3	min	3.74	6.68	10.19
Gradiente, G_1	1	1/s	34.21	38.04	48.46
Gradiente, G_2	2	1/s	32.43	36.77	46.05
Gradiente, G_3	3	1/s	29.83	36.28	41.40
Promedio G_i		1/s	32.15	37.03	45.3
Ancho del canal, w_1	1	m	0.11	0.10	0.097
Ancho del canal, w_2	2	m	0.15	0.111	0.102
Ancho del canal, w_3	3	m	0.27	0.124	0.11
Ancho total, B		m	8.18	27.3	3.96
Largo total, W		m	3.32	1.00	6.24
Altura total, H		m	0.6	0.6	0.6
Área del Sistema, A		m	27.18	27.3	24.71

Referencias

- Angreni, E. (2009). Review on Optimization of Conventional Drinking Water Treatment Plant. *World Applied Sciences Journal*, 7(9), 1144–1151.
- Bezerra, M. A., Queila, O., Gomez, A., Galvao, C., Costa, S., & Santos de Souza, V. (2016). Simplex optimization: A tutorial approach and recent applications in analytical chemistry. *Microchemical Journal*, 45–54.
- Degaard, H. (1995). OPTIMIZATION OF FLOCCULATION FLOTATION IN CHEMICAL WASTEWATER TREATMENT. *Water Science and Technology*, 31(3), 73–82. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)99878-8](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)99878-8)
- Dhailmappa, H. B., Verink, J., Fujiwara, O., & Swaran, S. V. (2007). TECHNICAL NOTE OPTIMAL DESIGN OF A FLOCCULATOR. 27(3), 513–519.
- Ghawi, A. H. (2018). Optimal design parameters for hydraulic vertical flocculation in the package surface water treatment plant. *Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences*, 27, 438–451. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2018.27.4.42>
- Hakanen, J., Sahlstedt, K., & Miettinen, K. (2013). Environmental Modelling & Software Wastewater treatment plant design and operation under multiple conflicting objective functions. *Environmental Modelling & Software*, 46, 240–249.
- Halters, F., Zondervan, E., & Haan, A. De. (2010). Integrated optimization of a waste water treatment plant using statistical analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1–3), 480–487. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.028>
- He, W., Xue, L., Gorczyca, B., Nan, J., & Shi, Z. (2018). *Chemical Engineering Research and Design Comparative analysis on flocculation performance in unbaffled square stirred tanks with different height-to-width ratios: Experimental and CFD investigations*. 2, 518–535.
- Lampinen, J., y Zelinka, I. (1999). Mixed variable non-linear optimization by differential evolution. *Proceedings of Nostradamus*, 99(2), 7-8.

- Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7(4), 308–313.
- Piri, I., Homayoonnezhad, I., & Amirian, P. (2010). Investigation on Optimization of Conventional Drinking Water Treatment Plant. *2010 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering (ICBEE 2010)*, (Icbee), 304–310.
- Singh, A. (2012). An overview of the optimization modelling applications. *Journal of Hydrology*, 467, 167–182.
- Storn, R. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal Of Global Optimization*, 341–359.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)