

DEPÓSITO LEGAL ZU2020000153

ISSN 0041-8811

E-ISSN 2665-0428

Revista de la Universidad del Zulia

Fundada en 1947
por el Dr. Jesús Enrique Lossada



Ciencias
Exactas,
Naturales
y de la Salud

75

ANIVERSARIO

Año 13 N° 37

Mayo - Agosto 2022

Tercera Época

Maracaibo-Venezuela

Sistema de monitoreo de reactores empacados para el tratamiento de aguas residuales con colorantes

M. Castro-Bello *
E.F. Valencia-Díaz **
C.V. Marmolejo-Vega ***
E. Hernández-Ramírez ****
C. Morales-Morales *****

RESUMEN

Este artículo presenta la instrumentación electrónica de un sistema de biofiltración no convencional, que consta de tres biofiltros aerobios de flujo descendente para controlar el flujo de entrada/salida del agua residual y monitorear las variables de temperatura y color. Los biofiltros son usados en la remoción de colorantes tipo Azo, utilizados principalmente en el teñido de la mezclilla, las cuales debido a sus propiedades es difícil de degradar y son vertidos a las aguas de los ríos. Cada biofiltro se empacó con diferentes materiales, turba y perlita, inoculados con lodos aclimatados, para remover color y materia orgánica. Los resultados logrados consisten en mejorar el procedimiento de recolección y análisis de muestras realizadas en cada uno de los biofiltros, integrando sensores de color TCS230, sensores de temperatura PT100, electroválvulas que controlan el influente suministrado a cada uno de los biofiltros y la interfaz gráfica desarrollada en LabView, encargada de mostrar las mediciones de las variables físicas. La ventaja de un sistema de biofiltración automatizado es contar con mediciones en tiempo real y útil para otros estudios de diferente empacado del biofiltro. En este caso se observó que el biofiltro empacado con mezcla turba perlita presentó mayor remoción de color y materia orgánica.

PALABRAS CLAVE: Instrumentación electrónica, reactores empacados, interfaz gráfica, sensores.

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Guerrero, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0826-5535>.

**Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Guerrero, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8696-5556>.

***Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Guerrero, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2027-5664>.

****Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Guerrero, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0460-1984>.

*****Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Guerrero, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3470-4626>. Autor de correspondencia. E-mail: corneliomoralesmorales@gmail.com

Recibido: 20/01/2022

Aceptado: 16/03/2022

Packaged Reactor Monitoring System for the Treatment of Wastewater containing dyes

ABSTRACT

This paper present the electronic instrumentation of an unconventional biofiltration system, consisting of three downflow aerobic biofilters to control the inflow/outflow of wastewater and monitoring temperature and color variables. Biofilters are used in the removal of Azo-type dyes, used mainly in denim dyeing, which due to their properties are difficult to degrade and are discharged into river waters. Each biofilter was packaged with different materials, peat and perlite, inoculated with acclimatized sludge, to remove color and organic material. The results achieved were to improve the sample collection and analysis procedure carried out in each of the biofilters, integrating TCS230 color sensors, PT100 temperature sensors, solenoid valves that control the influent supplied to each of the biofilters and the graphical interface developed in LabView responsible for displaying the measurements of the physical variables. The advantage of an automated biofiltration system is to have measurements in real time and useful for other studies of different biofilter packaging. In this case, it was observed that the biofilter packed with perlite peat mixture presented greater removal of color and organic material.

KEYWORDS: Electronic instrumentation, packaged reactor, graphic interface, sensors.

Introducción

La industria textil a nivel mundial genera una gran cantidad de compuestos químicos utilizados en el proceso de teñido y deslavado, ocasionando que sus descargas de aguas residuales tengan un alto contenido de compuestos orgánicos e inorgánicos tóxicos al ambiente (Katheresan et al., 2018; Pineda Ayala & Durán Herrera, 2019; Premkumar et al., 2018). Los colorantes que usan contienen diferentes estructuras, las cuales son en mayor abundancia los colorantes ácidos, básicos, dispersos, azo, diazo, antraquinonas básicas y colorantes-complejo-metal (Castro-Peña & Durán-Herrera, 2014; Yaseen & Scholz, 2019; Zaruma Arias et al., 2018). Actualmente, no se conoce exactamente el número de colorantes producidos a nivel mundial, pero se tiene un estimado de 10,000 colorantes, con una producción mayor a 7×10^5 toneladas y un aproximado del 5 al 10% del colorante permanece en los efluentes (Saggioro et al., 2011; Venkata Mohan et al., 2002). El colorante tipo Azo es utilizado en el teñido de la mezclilla y es tipo azul directo 2, el cual debido a sus propiedades, es difícil de degradar, y su vertido al agua puede interferir con diversos procesos biológicos que se llevan a cabo en los cuerpos de agua (Sánchez, 2007).

Por lo tanto, han surgido diferentes tecnologías de reactores empacados, principalmente el uso de biofiltros implementados en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de malos olores desprendidos del proceso de remoción de contaminantes (Leson & Winer, 1991; Li et al., 2019). El proceso de biofiltración consiste en hacer pasar agua contaminada a través de

un cilindro que contiene como sustrato un empaque de materia orgánica y es ahí donde los microorganismos crecen (Garzón-Zúñiga et al., 2012). Estos microorganismos tienen la función de remover algunos contaminantes y su efectividad depende del tipo de materia orgánica y tipo de microorganismos degradadores.

La remoción de contaminantes en aguas residuales reportado en este artículo es del colorante tipo Azo, localizado en los procesos de teñido de las industrias textiles y son consideradas sustancias carcinógenas y recalcitrantes (Zaruma Arias et al., 2018). En el tema de tratamiento de colorantes en aguas residuales están los humedales artificiales y los sistemas de biofiltración, entre los que destacan el tratamiento de colorante azul (Jasim, 2020; Lalnunhlimi & Veenagayathri, 2016; Vargas Espinoza, 2015), colorante reactivo Sunfix Yellow (Anaya Meléndez, 2019) y remoción de colorante azo (Jaafarzadeh et al., 2018; Venkata Mohan et al., 2002).

Estos procesos de remoción de colorantes son realizados de forma tradicional siguiendo el procedimiento de tomar la muestra in situ, y posterior analizarla por un experto, quien requiere de tiempo de acondicionamiento del ambiente interno del biofiltro antes de recolectar la muestra. Aunado a la problemática de recolección de muestras para su análisis, la propuesta en este artículo es presentar un sistema de biofiltración automatizado y monitoreo en tiempo real de sus variables físicas, y el cual muestra algunos beneficios señalados en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis de laboratorio vs Medición de variables físicas en línea

Descripción	Muestras analizadas en el laboratorio	Muestras analizadas en línea
Número de muestras	Limitado por el tamaño del biofiltro y tiempo de análisis, recolectada en línea y analizada fuera de línea.	Las muestras son tomadas en línea y analizadas en línea, las cuales son recolectadas en tiempo real y permiten la retroalimentación en el suministro del efluente.
Preparación de la muestra	Requiere de preparación	No aplica
Generación de contaminantes	La muestra se convierte en residuo indeseable	Ninguno
Control del proceso	Respuesta lenta a perturbaciones o entradas exógenas	Respuesta rápida a perturbaciones
Exactitud y Precisión	Alta	Con errores del $\pm 10\%$

La tabla 1 presenta una comparativa entre muestras analizadas en un laboratorio y muestras analizadas en línea usando biofiltros instrumentados; este último presenta algunas ventajas, por ejemplo: su precisión tiene un margen de tolerancia del $\pm 10\%$, la muestra recolectada no se convierte en un contaminante y la información de los biofiltros está disponible siempre que el usuario desee emplearla. Por lo tanto, la principal contribución es un sistema de

biofiltración automatizado para el tratamiento de agua residual con colorante tipo azo, las cuales tienen las funciones de recolectar muestras de temperatura, color y flujo; además controla el ingreso de flujo a los biofiltros.

1. Material de los reactores empacados

El material usado en los reactores empacados para realizar la biofiltración consistió en mantener una relación 50-50 de turba, perlita y turba-perlita.

Turba: es un material orgánico compuesto de carbohidratos, minerales y un grupo de sustancias identificadas como ácidos húmicos y fúlvicos (humus), entre otros componentes. Es la materia vegetal parcialmente fosilizada, generalmente de color café oscuro, que se forma con poca oxigenación y abundante agua, en lugares donde la velocidad de acumulación de la materia vegetal es más grande que la de descomposición.

Perlita: es un sustrato de procedencia volcánica la cual es extraída a partir del calentamiento de la roca volcánica, normalmente de 1,000°C a 1,200°C; este sustrato está constituido principalmente de silicio y óxidos de aluminio como, aluminio, hierro, calcio, magnesio y sodio. Su estructura de celdas muy bien cerradas hace que el agua se adhiera solo en la superficie con el fin de que el sustrato que contenga la perlita tenga un buen drenaje; por otro lado, la ligereza en peso de este sustrato, es rígida y por consiguiente no se comprime con facilidad, lo cual promueve una buena porosidad.

2. Material de la instrumentación

Los materiales usados en la instrumentación de cada uno de los reactores empacados son:

- ✓ Sensores de temperatura, sensor PT100.
- ✓ Sensores de color para el influente / efluente, sensor de color TCS230.
- ✓ Sensores de flujo de entrada/salida, mide el flujo lt/min, sensor YF-S201
- ✓ Electroválvulas de paso que bloquean y desbloquean el ingreso del agua residual que ingresa a los reactores empacados.

El diagrama de la instrumentación usada en cada uno de los reactores empacados es mostrado en la Figura 1.

3. Resultados

Los procedimientos de recolección y análisis de muestras tomadas de los biofiltros comúnmente son realizados de la manera tradicional, es decir, implica tomar la muestra y usar equipo del laboratorio para su análisis, lo cual produce tomar la muestra en un instante de tiempo sin considerar otros instantes de tiempo del flujo de agua residual y, además, el ingreso del agua residual a cada biofiltro no es regulada en función del tiempo de residencia hidráulica.

Este problema de manipulación y regulación del agua residual que entra y sale de cada biofiltro es mejorado con la instrumentación, monitoreo y control en tiempo real a través de la plataforma de LabView.

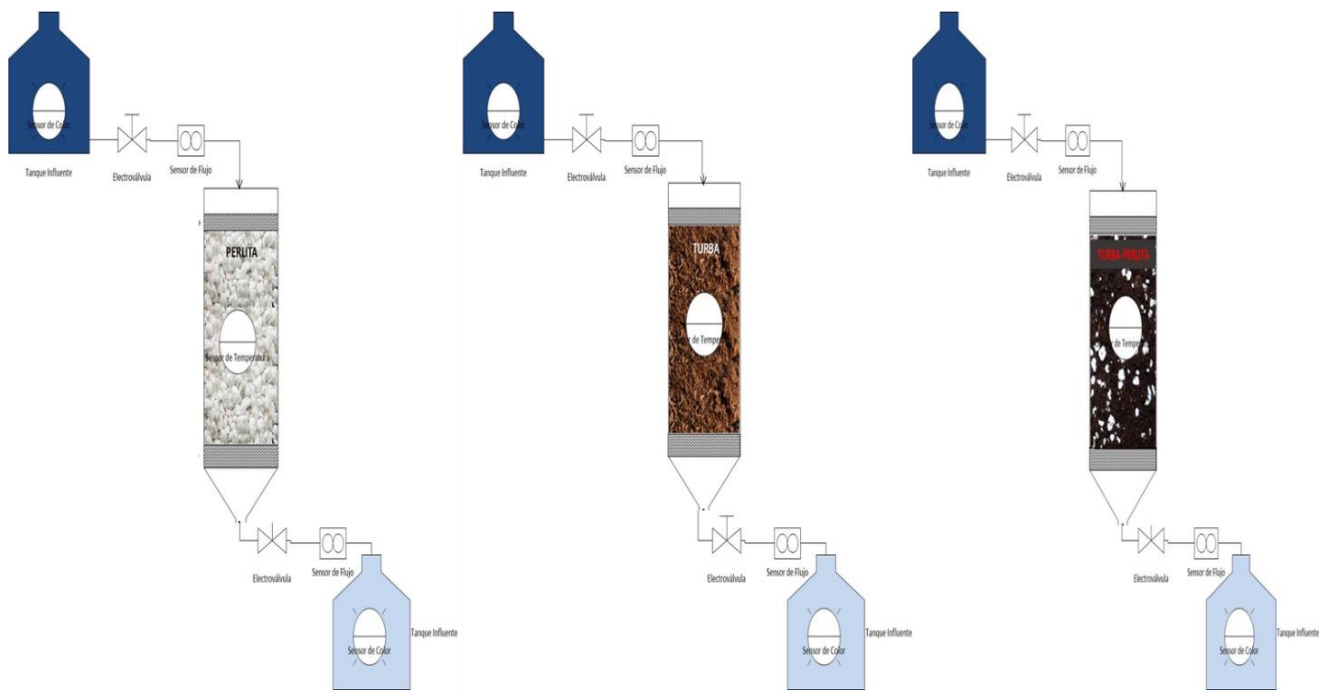


Figura 1. Diagrama de Conexión de los Sensores y Electroválvula.

El desarrollo de la plataforma en LabView denominada Estación de Monitoreo y Control en Tiempo Real de los Biofiltros requirió del uso de sensores de color (TCS230) del influente/efluente, sensores de temperatura (PT100), sensores de flujo (YF-S201) y control de electroválvulas de paso que regulan el flujo del agua residual hacia cada biofiltro. El sensor de color convierte la intensidad luminosa que incide y rebota de la superficie a una frecuencia determinada, esto es posible a su matriz de colores, integrada por 64 fotodiodos activadas por grupos de color (filtro rojo, filtro verde, filtro azul y sin filtro), los cuales promedian el valor medido de la muestra de la superficie con un error de 0.2% y estabilidad de 200 ppm. El sensor de flujo tiene un rango de operación de 1 a 30 lt/min a una presión máxima de 2MPa. El sensor de temperatura tiene un rango de operación de -20°C a 500°C . Las electroválvulas de paso con rosca de $\frac{1}{2}$ " están normalmente cerrada sin voltaje de corriente directa, capaz de trabajar a una presión de trabajo de 0.02 Mpa a 0.8 Mpa, con tiempo de respuesta abierta menor o igual a 0.15 segundos, y tiempo de respuesta cerrada menor o igual a 0.3 segundos. Es importante señalar que el criterio usado para la selección de los sensores y electroválvulas fue considerar un error de $\pm 5\%$ y con tiempos de respuesta basados en el comportamiento dinámico de los biofiltros, calificado como un proceso biológico lento.

La Figura 2a muestra los sensores y electroválvulas instaladas en el prototipo de biofiltración y la Figura 2b muestra la Estación de Monitoreo y Control desarrollada en LabView.

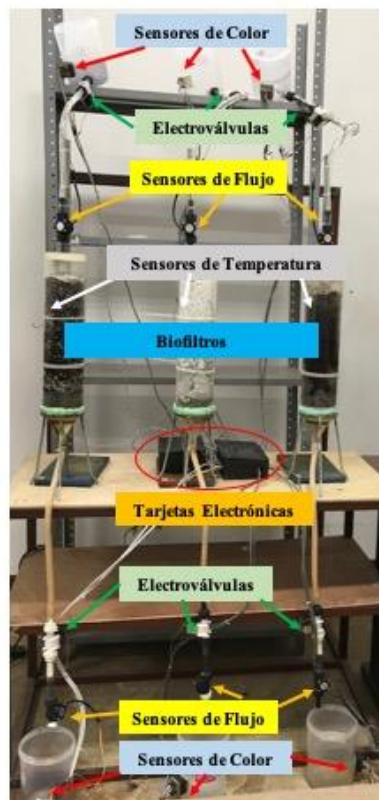


Figura 2a. Sistema de Biofiltración Instrumentado

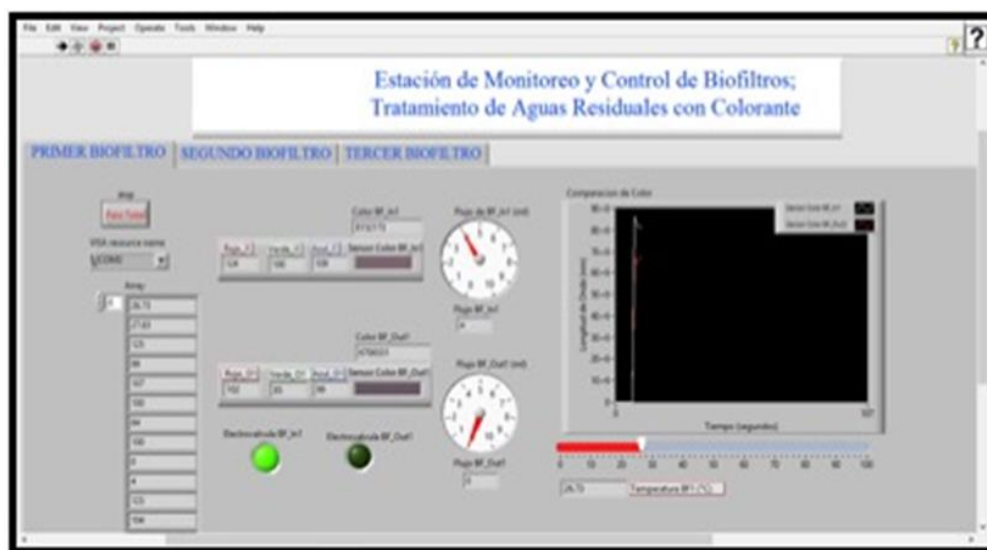


Figura 2b. Estación de monitoreo y control desarrollado en LabView.

El total de sensores instalados son: 6 sensores de color, 6 sensores de flujo, 3 sensores de temperatura y 6 electroválvulas, y la tarjeta de adquisición de datos usada Arduino Mega 2560. La pantalla de la estación de monitoreo y control despliega las mediciones realizadas en tiempo real de cada una de las variables medidas en cada biofiltro, control de las electroválvulas y comparación del color del agua residual que ingresa y sale de cada biofiltro. Con base en la

instrumentación y control de electroválvulas en el prototipo de biofiltración de agua residual con colorante en tiempo real, es posible realizar el análisis de la cantidad de colorante removido en cada biofiltro, además de observar en la gráfica de la estación de monitoreo del cómo se comporta en diferentes instantes de tiempo la remoción del colorante, y se guardan cada una de las mediciones en un archivo de Excel para posterior ser graficados.

La interfaz gráfica está desarrollada en el Software de LabView, que utiliza un lenguaje de programación gráfico y es comúnmente empleada en los sistemas de monitoreo de procesos industriales de gran escala o de baja escala, como es el caso del sistema de biofiltración automatizado. El número de funciones de la interfaz gráfica está en función del número de sensores instalados en cada reactor empacado y así recolecta las muestras en tiempo real, que las despliega en gráficas y las guarda en un archivo de Excel.

El enlace de comunicación entre los biofiltros y la interfaz gráfica es una tarjeta de adquisición de datos con entradas/salidas digitales y analógicas, a los cuales están conectadas los sensores y acopladas con tarjetas electrónicas de potencia el control de las electroválvulas.

Los resultados de las pruebas realizadas al sistema de biofiltración automatizado están divididos en tres secciones: a) Biofiltro con turba; b) Biofiltro con perlita y c) Biofiltro con turba-perlita.

3.1. Pruebas de color

Esta prueba consistió en alimentar el tanque de entrada 1 del sistema con 50mg de colorante azul directo del número 2 diluido en 1L de agua. La medición del sensor de color es mostrada en la figura 3a, la cual muestra una disminución de tonalidades rojas y verdes; a su vez muestra una dominancia en la tonalidad azul puesto que es el color que predomina en la muestra.



Figura 3a. Comparación de agua residual de Entrada (color blanco) y agua residual de salida del biofiltro (color rojo).

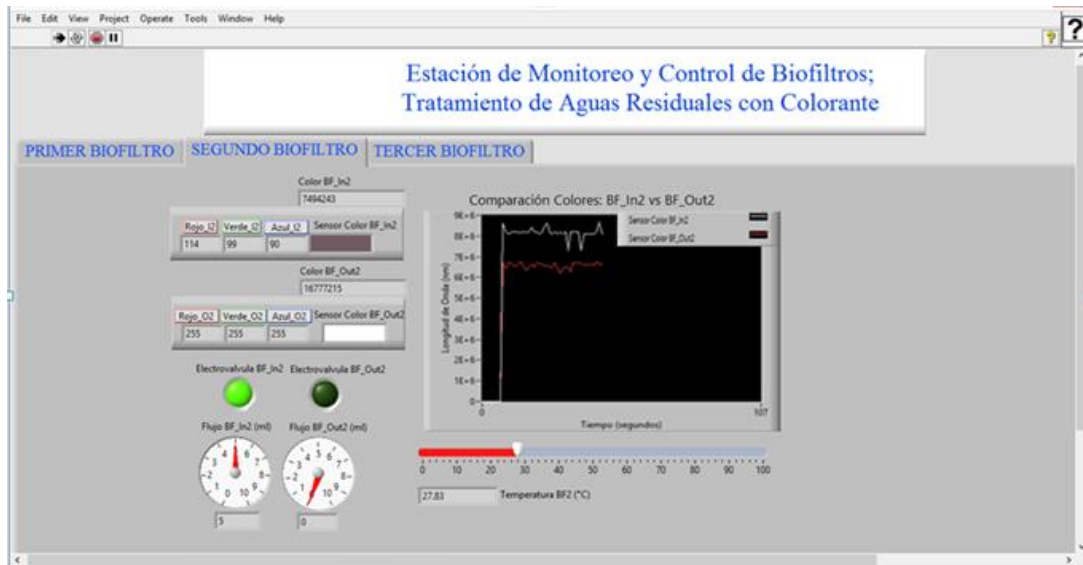


Figura 3b. Medición de color de entrada (color blanco) y salida del biofiltro (color rojo).

La alimentación del biofiltro con sustrato de turba es alimentada con líquido del influente de colorante tipo azo y sus resultados se muestran en la gráfica (ver figura 3b).

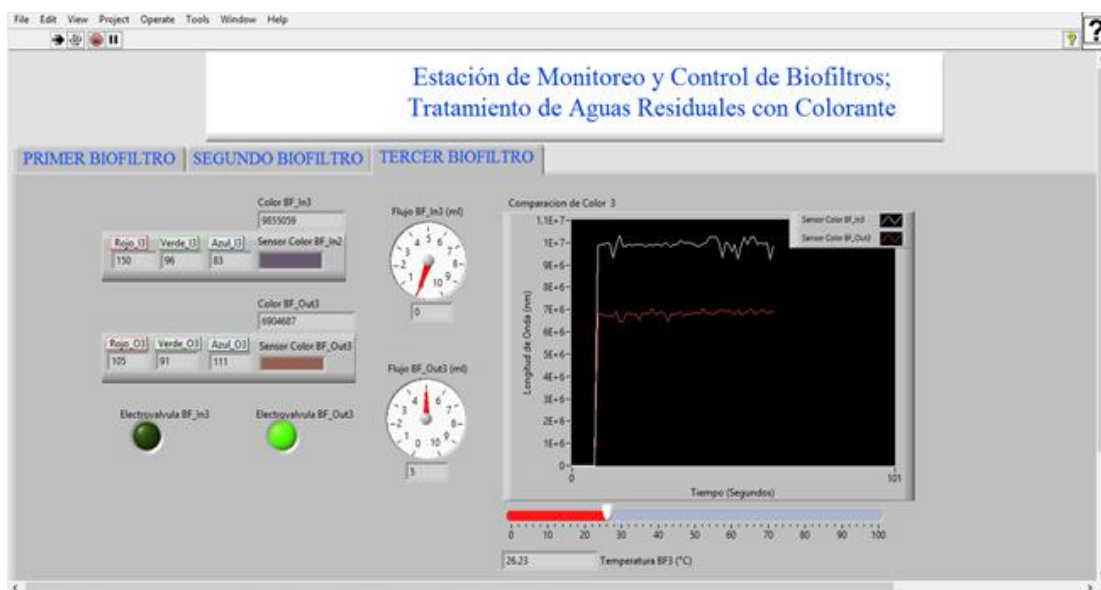


Figura 3c. Medición de color de entrada (color blanco) y salida del biofiltro (color rojo).

La alimentación del biofiltro con sustrato de perlita-turba en una relación 50/50 es alimentada es alimentada con líquido del influente de colorante tipo azo y sus resultados se muestran en la gráfica (ver figura 3c).

Lo resaltante en la Tabla 2 son las mediciones de colorante de salida, donde puede observarse un aumento en el valor de salida, como consecuencia de una reducción en la tonalidad del color azul, debido a que al filtrar el colorante de entrada a las tonalidades roja y verde, y esto conduce a un aumento en el valor del color de salida. La temperatura medida en cada uno de los biofiltros se mantiene en un rango óptimo.

Tabla 2. Comparación de resultados de la recolección de muestra de tres Biofiltros

Filtro	Color de entrada	Electroválvula de entrada	Flujo de entrada	Temperatura (°C)	Electroválvula de salida	Flujo de salida	Color de salida
#1	6314106	On/Off	5mm/s	26.45	On/Off	5mm/s- 2mm/s	6664986
#2	6314106	On/Off	5mm/s	26.32	On/Off	5mm/s- 3mm/s	6845374
#3	631410	On/Off	5mm/s	27.22	On/Off	5mm/s	6787421

En la Figura 4 se pueden observar los líquidos del influente y efluente del colorante utilizado en estas pruebas; claramente puede apreciarse la remoción del colorante tipo azo usando el sistema de biofiltración instrumentado y monitoreado en tiempo real.



Figura 4. Comparación entre colorante de entrada (lado izquierdo) y colorante de salida (lado derecho)

Los resultados que son mostrados en este artículo (con mayor atención al sensor de color), es debido a su importancia en los flujos de entrada y salida del biofiltro en la remoción de contaminantes de colorantes. Estos sensores de color son los que proporcionan la información de la cantidad de colorante que remueve cada uno de los biofiltros, en condiciones de temperatura y flujo controlado y monitoreado en tiempo real.

4. Discusión

Un sistema de biofiltración automatizado facilita la recolección de muestras para su análisis y estudio de los diferentes empaques de los biofiltros. Tal como esta propuesta de instrumentación electrónica y monitoreo de tres biofiltros con diferente empaque, se observó que el biofiltro con empaque turba-perlita, con tiempo de retención de 28 horas, presentó mayor remoción de colorante tipo azo y materia orgánica. El tiempo de retención hidráulica se determina con la medición del flujo de entrada y flujo de salida del agua residual que puede ser ajustada con la variación de los flujos medidos por los sensores. Esto a diferencia de la evaluación de los materiales usados en el empaque de los biofiltros, propuesta por (Sánchez, 2007), quien toma las muestras para su posterior análisis.

Conclusiones

La implementación del sistema de instrumentación y control de un sistema de biofiltración usado en el tratamiento de aguas residuales para la remoción de colorantes, representa la contribución principal del trabajo, dado que facilita el análisis de la cantidad de colorante removido en tiempo real y permite a los expertos estudiar la remoción de colorantes de las aguas residuales, contando con mayor información del estado del biofiltro. El biofiltro instrumentado con su interfaz gráfica puede ser probado ante condiciones de aguas residuales con poco colorante, y con grandes cantidades de colorantes del agua proveniente de la industria textil.

Los sensores de temperatura, color y flujo funcionaron de forma óptima siendo un apoyo para el monitoreo de los biofiltros, al mismo tiempo se obtuvieron resultados satisfactorios con la tarjeta de adquisición de datos que fueron fácilmente analizados.

Agradecimientos

Agradecemos al departamento de Ingeniería en Tecnología Ambiental de la Universidad Politécnica del Estado de Morelos por su apoyo en los biofiltros.

Referencias

- Anaya Meléndez, F. (2019). Tratamiento de aguas residuales con colorantes reactivos mediante proceso de oxidación avanzada Fenton y variantes. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 3(1), 55. doi.org/10.25127/aps.20191.483
- Castro-Peña, L., & Durán-Herrera, J. E. (2014). Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Revista Tecnología En Marcha*, 27(2), 40. doi.org/10.18845/tm.v27i2.1807
- Garzón-Zúñiga, M. A., Buelna, G., & Moeller-Chávez, G. E. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 3(3), 153–161.
- Jaafarzadeh, N., Takdastan, A., Jorfi, S., Ghanbari, F., Ahmadi, M., & Barzegar, G. (2018). The performance study on ultrasonic/Fe₃O₄/H₂O₂ for degradation of azo dye and real textile wastewater treatment. *Journal of Molecular Liquids*, 256(2017), 462–470. doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.047
- Jasim, N. A. (2020). Degradation of Direct Blue from Synthetic Wastewater using Electrochemical Oxidation Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 745(1). doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012138
- Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 6, Issue 4, pp. 4676–4697). doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060
- Lalnunhlimi, S., & Veenagayathri, K. (2016). Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and

Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(1), 39–46. doi.org/10.1016/j.bjm.2015.11.013

Leson, G., & Winer, A. M. (1991). Biofiltration: An innovative air pollution control technology for voc emissions. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 41(8), 1045–1054. doi.org/10.1080/10473289.1991.10466898

Li, W., Mu, B., & Yang, Y. (2019). Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology. *Bioresource Technology*, 277(January), 157–170. doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.002

Pineda Ayala, D. M., & Durán Herrera, J. E. (2019). Evaluation of oil palm empty fruit bunch wastes as adsorbent for the removal of reactive dyes from aqueous solutions. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(1), 1–9. doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2019.20n1.008

Premkumar, M. P., Thiruvengadaravi, K. V., Senthil Kumar, P., Nandagopal, J., & Sivanesan, S. (2018). Eco-Friendly Treatment Strategies for Wastewater Containing Dyes and Heavy Metals. *Energy, Environment, and Sustainability*, 317–360. doi.org/10.1007/978-981-10-7332-8_14

Saggiaro, E. M., Oliveira, A. S., Pavesi, T., Maia, C. G., Ferreira, L. F. V., & Moreira, J. C. (2011). Use of titanium dioxide photocatalysis on the remediation of model textile wastewaters containing azo dyes. *Molecules*, 16(12), 10370–10386. doi.org/10.3390/molecules161210370

Sánchez, L. G. (2007). Decoloración fúngica de efluentes industriales con colorantes azo en sistemas de biofiltración con diferentes empaques orgánicos. *Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería*, 165.

Vargas Espinoza, M. Y. (2015). *Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería*.

Venkata Mohan, S., Chandrasekhar Rao, N., & Karthikeyan, J. (2002). Adsorptive removal of direct azo dye from aqueous phase onto coal based sorbents: A kinetic and mechanistic study. *Journal of Hazardous Materials*, 90(2), 189–204. doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00348-X

Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 1193–1226. doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z

Zaruma Arias, P. E., Proal Nájera, J. B., Hernández, I. C., & Salas Ayala, H. I. (2018). Textile Industrial Dyes and optimal wastewater effluents treatments: A short review. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas, Instituto Politécnico Nacional*, 18, 38–48.