



Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales

Measurement and control system of temperature for a wastewater treatment plant prototype

Diego Fernando Ramírez Jiménez



Instituto de Educación Técnica Profesional de Roldanillo, Colombia

OPEN ACCESS

Recibido: 04/11/2020

Aceptado: 27/01/2021

Publicado: 05/04/2021

Correspondencia de autores:
dframirez_docente@intep.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Diseñar e implementar un sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales a escala de laboratorio. **Metodología:** El trabajo realizado consistió en la implementación a escala de laboratorio de una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual efectuó la etapa de tratamiento secundario del afluente disponible a través de un proceso biológico de lodos activados. **Resultados:** El control de temperatura diseñado e implementado permitió garantizar condiciones adecuadas de homeostasis a los microorganismos encargados del tratamiento de agua residual. Lo anterior, se verificó a través de pruebas fisicoquímicas realizadas al efluente obtenido luego de ser tratado. **Conclusiones:** El prototipo implementado logró un efluente con mejoras del 67% aproximadamente en componentes como el DBO y del 84% en sólidos suspendidos, lo cual es significativo para el trabajo realizado, pero no es suficiente para que pueda ser destinado al consumo humano.

Palabras clave: Aguas residuales, controlador PID, laboratorio, LabView, lodos activados, temperatura.

Abstract

Objective: To design and implement a measurement and control system of temperature for a laboratory scale wastewater treatment plant prototype. **Methodology:** The work carried out consisted in the implementation on a laboratory scale wastewater treatment plant, which carried out the secondary treatment through a biological process of activated sludge. **Results:** The designed and implemented temperature control allowed to guarantee adequate conditions of homeostasis to the microorganisms in charge of the wastewater treatment. It was verified through physicochemical tests on the effluent obtained after being treated. **Conclusions:** The implemented prototype achieved an effluent with improvements of approximately 67% in components such as BOD and 84% in suspended solids, which is significant for the work carried out, but it is not enough for it to be destined for human consumption.

Keywords: Activated sludge, laboratory, LabView, PID controller, temperature, wastewater.

Como citar (IEEE): D. Ramírez-Jiménez. "Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales", *Investigación e Innovación en Ingenierías* vol. 9, n°1, 100-99, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4305>

* Producto obtenido del proyecto de investigación titulado "Diseño experimental de una planta de tratamiento de aguas residuales - PTAR a escala de laboratorio".

Introducción

La generación de aguas residuales es una actividad inherente al ser humano y su desarrollo. Algunas suelen ser producto de acciones propias de su naturaleza (elaboración de alimentos, aseo personal, actividades domésticas de limpieza, etc.) y otras, se producen a causa de la fabricación o transformación de productos a nivel industrial que suplen necesidades no esenciales y que son más parte del consumismo del ser humano.

En algunos casos las aguas residuales son transportadas mediante el alcantarillado municipal hasta las plantas de tratamiento de agua residual - PTAR donde son tratadas y dispuestas nuevamente para su uso, en otros; son simplemente vertidas a las cuencas hídricas generando mayor contaminación ya que dentro de sus componentes se encuentran sólidos suspendidos, metano, nitrógeno, fósforo, grasas y coliformes fecales [1, 2]. Colombia, por ejemplo, se enmarca en los países que optan por la segunda opción; pues la mayoría de las aguas residuales generadas son depositadas directamente a las fuentes hídricas sin ningún tipo de tratamiento previo debido a escasez de PTAR, pues al año 2018 solo el 48.22% de los municipios del país contaba con una [3]. Esta problemática se debe en parte a los altos costos de implementación de estos sistemas de tratamiento, ya que la instalación y puesta en marcha de una PTAR compacta (área de 40m²) tiene un costo superior a los \$200 millones de pesos.

Por lo anterior, y con el fin de proteger la salud pública y los diferentes ecosistemas del país, es de suma importancia implementar plantas de tratamiento de aguas residuales que permitan cumplir con la normatividad vigente respecto a los parámetros mínimos y máximos para vertimientos de agua residual en las fuentes hídricas, establecidos en la resolución 0631 de 2015 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [4]. Las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden ser implementadas a través de diferentes técnicas que varían según los componentes del agua a tratar, donde además es indispensable realizar una adecuada medición y control de variables físicas como la temperatura al interior de las PTAR para garantizar condiciones óptimas de limpieza. No obstante, los altos costos en equipos hacen que la mayoría de los procesos de tratamiento de aguas residuales se efectúen de forma manual a través de técnicos u operarios que realizan mediciones y toman datos en intervalos de tiempo preestablecidos.

La temperatura al interior de los procesos de tratamiento de aguas residuales es un parámetro de vital importancia debido a que ésta puede modificar las características del agua, altera la vida acuática, modifica la concentración de saturación en oxígeno disuelto (OD) y la velocidad de las reacciones químicas y de la actividad bacterial. Para actividades biológicas y desarrollo de la actividad bacterial, la temperatura óptima oscila de 20°C a 35°C, por encima de estos valores la digestión aeróbica y la nitrificación se suspenden y cuando se encuentran por debajo del mencionado rango de operación, la digestión metanogénica es muy lenta y las bacterias autotróficas nitrificantes dejan de operar [1].

En adición a los anterior, se planteó una estrategia a través del diseño de un sistema de medición y control de temperatura que permitiera mantener una operación dentro de los niveles óptimos descritos anteriormente y en el cual se pudiera obtener información de la planta en tiempo real. Este tipo de mediciones son de suma importancia ya que se puede conocer en cualquier momento el estado de la temperatura y controlarla casi de manera instantánea, permitiendo optimizar la calidad del agua a partir de mediciones más confiables y eficientes.

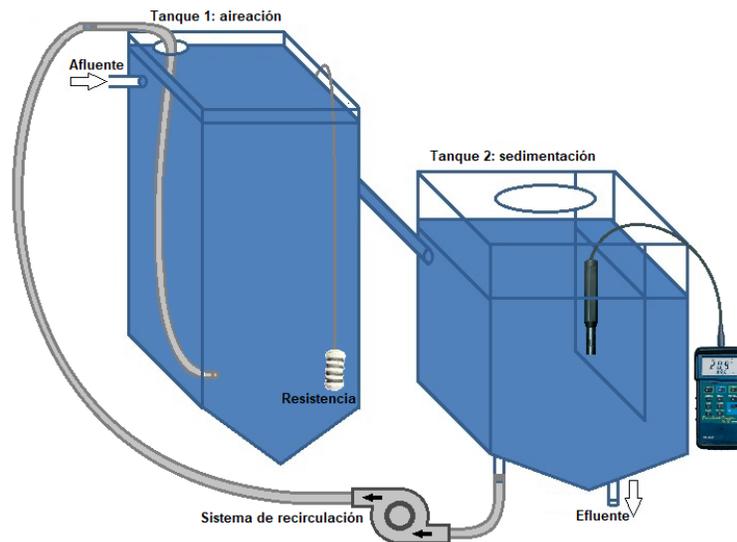
Metodología

Materiales

Prototipo de PTAR

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó el prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales - PPTAR que se presenta en la Figura 1. El PPTAR consta de dos tanques de almacenamiento; el tanque 1 (aireación) recibe y almacena el agua a tratar a través del canal de acceso de afluente, mientras que el tanque 2 (sedimentación) es donde se encuentran los microorganismos que se encargan de realizar el tratamiento del agua residual para posteriormente obtener un efluente más limpio. El volumen aproximado de los tanques utilizados es de 5.1 litros. Adicionalmente, el sistema implementado cuenta con un sistema de recirculación de lodo, un sensor de temperatura y una resistencia calefactora.

Figura 1. Prototipo de PTAR utilizada



Fuente: Elaboración propia

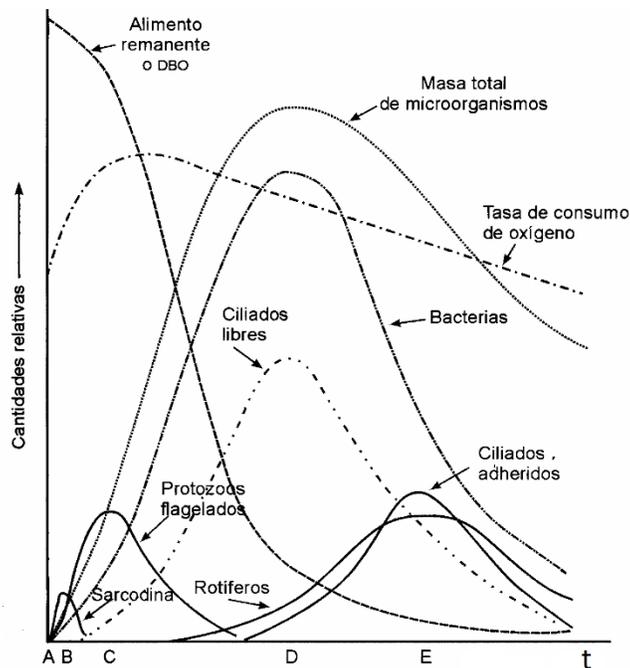
Lodos activados

El proceso de lodos activados consiste en un proceso biológico aerobio mediante el cual los microorganismos se encargan de realizar una depuración del agua cargadas o contaminadas para regresarla a su estado natural. Los lodos activados se basan en el contacto de aguas residuales con floc biológico previamente formado en un tanque de aireación y su proceso se desarrolló en Inglaterra en por los ingenieros Edward Arden y William T. Lockett el año 1914 [1, 5, 6]. Los lodos activados están constituidos por una masa floculante de microorganismos, material orgánico y materiales inorgánicos que tienen la característica de poseer una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, y pueden considerarse un universo acuático; ya que están colonizados en su mayoría por microorganismos muy variados entre los que se destacan bacterias, hongos, protozoos, metazoos, entre otros [1, 7, 8].

Las bacterias constituyen el grupo más significativo de microorganismos en el proceso de lodos activados ya que son las que ayudan al proceso de estabilización del material orgánico del agua residual y contribuyen a la formación de nuevo floc biológico [1].

Los lodos activados hacen parte de un proceso biológico aerobio (necesitan OD para vivir o desarrollarse), en el cual se deben garantizar nutrientes idóneos, eliminar las sustancias tóxicas y brindar condiciones ideales de temperatura, para que los microorganismos alcancen su número máximo durante la etapa de tratamiento [1, 9]. El desarrollo de los microorganismos bajo las condiciones óptimas de temperatura mencionadas en función del tiempo (de aireación) o la edad de los mismos, se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de predominio relativo para lodos activados



Fuente: [1]

El proceso se inicia en el punto A cuando se introducen aguas residuales frescas al proceso y se combinan con el sistema de aireación. En este punto los microorganismos empiezan a formarse, pero ninguno predomina. En el punto B, los organismos primitivos (sacordina) alcanzan su pico máximo. Este microorganismo existe en relación a la cantidad de alimento; es decir, si la cantidad de alimento es alto, existen sacordina en gran número y viceversa. En el punto C los microorganismos que alcanzan su pico máximo son los protozoos flagelados. A diferencia de las sacordina, los protozoos son mucho más activos y consumen alimentos en una cantidad mayor. En el punto D, se alcanza la zona de operación convencional del proceso de lodos activados. Además, se logra el mayor crecimiento de ciliados libres y bacterias, los cuales a diferencia de los protozoos flagelados, consumen alimentos en menor cantidad. Finalmente, en el punto E el alimento disponible no es el suficiente para mantener la población microbial y por ende empiezan a morir. En este punto de crecimiento predominan ciliados adheridos y los rotíferos debido a que estos empiezan a consumir a otros microorganismos [1, 9].

Sensor de temperatura

La medición de temperatura para el sistema propuesto se realizó a través del sensor 407510 de la marca EXTECH Instruments, el cual permite realizar medidas de oxígeno (disuelto y en aire) y temperatura tanto en °C como en °F. El sensor consta de un termistor encapsulado y debidamente aislado para trabajo bajo ambientes húmedos. Adicionalmente, el sensor cuenta con características que incluyen una interfaz serial bajo el estándar RS-232, retención de datos y registros de valores mínimos, máximos y promedio. Adicionalmente, el sensor empleado es de tipo industrial y dispone de un depósito de solución electrolítica que permite al mismo funcionar dentro de los parámetros normales de medida, minimizando así; el error en la toma de datos a través de lecturas confiables dentro de su rango de operación. Lo anterior, permite también que el sensor no pierda su calibración rápidamente lo que asegura tiempos de operación por periodos prolongados.

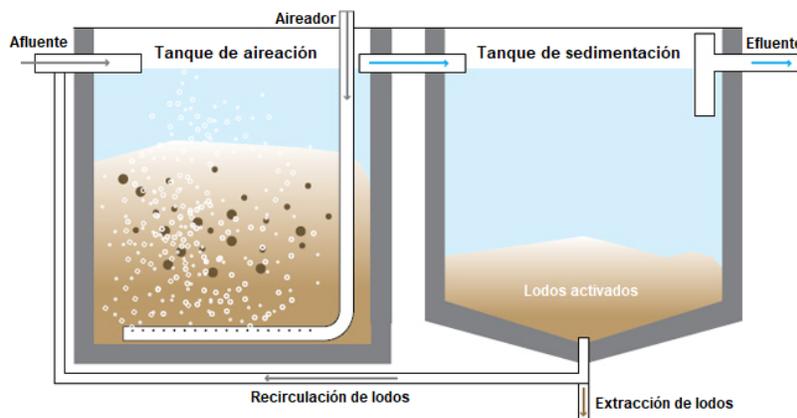
Métodos

Sistemas de lodos activados

De acuerdo con [7, 9, 10], existen tres (3) etapas en el tratamiento de aguas residuales: tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado, las cuales pueden llevarse a cabo mediante tres (3) métodos: físico, químico y biológico. El sistema de lodos activados hace parte del método biológico y por lo general se emplea en el tratamiento secundario, debido a que los efluentes del tratamiento primario contienen comúnmente altas cantidades de material orgánico [9].

Un sistema convencional de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales, se puede observar en la Figura 3 y consta de un tanque de aireación, un tanque de sedimentación y un sistema de recirculación de lodos [5].

Figura. 3. Sistema convencional de lodos activados



Fuente: Elaboración propia

El afluente utilizado en el desarrollo de la investigación, consistió en agua residual no tratada; es decir, que no se le realizó previamente el tratamiento primario donde se lleva a cabo la remoción de sólidos suspendidos y DBO [11]. En el sistema implementado, los lodos recirculados sirven como simiente y junto con el afluente, ingresan al tanque de aireación para ser mezclados a través del aireador mecánico de forma continua en todo el tanque.

Los microorganismos se encargan de estabilizar aerobiamente la materia orgánica presente en el tanque de aireación y posteriormente pasan al tanque de sedimentación para que el floc biológico pueda ser separado del agua residual, generando un efluente más claro y de bajo contenido orgánico. Por último, el exceso de lodos activados es extraído y enviado al sistema de disposición de los mismos [5, 6, 7, 12].

Sistemas de aireación

El proceso de aireación en los reactores o tanques de lodos activados es de gran importancia para el tratamiento de aguas residuales ya que cumple con tres funciones esenciales: suministrar oxígeno a los microorganismos, garantizar que los microorganismos se encuentren en suspensión y mantener el contacto entre los residuos generados y los lodos activados [1, 6, 7].

De acuerdo a la literatura, para la aireación de lodos activados existen las siguientes técnicas:

- Sistema convencional con aireación escalonada.
- Aireación de mezcla completa.
- Proceso de Kraus.
- Proceso de tasa alta.
- Proceso de estabilización y contacto.
- Sistema de aireación prolongada.
- Proceso de oxígeno puro.

Para el caso particular de esta investigación, se utilizó la técnica de aireación prolongada. Esta técnica realiza una mezcla completa entre el agua a tratar y los microorganismos ya que usualmente los tiempos de retención oscilan entre 0.5 y 24 horas. Adicionalmente, es la técnica aplicable a plantas de tratamiento de aguas residuales pequeñas que proveen a pequeñas comunidades o instituciones aisladas y cuyos caudales son inferiores a 400 m³/d. Otra ventaja de la aireación prolongada es la disposición de lodos, puesto que el mismo se digeriría de manera aerobia dentro de un proceso de autodigestión en la fase endógena ayudando a la reducción del exceso de lodo [1, 6].

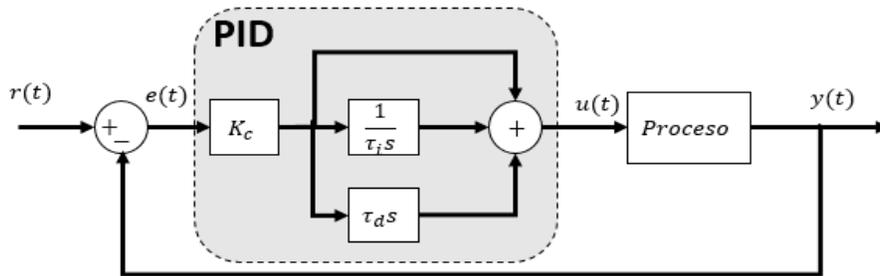
Medición de temperatura

Para conocer el comportamiento de la temperatura al interior del prototipo de PTAR, se realizó un proceso de caracterización sobre el sistema propuesto en la figura 1 y el cual consistió en calentar el afluente presente en el tanque 1 y ver el efecto generado en el tanque 2. Este procedimiento se realizó cada día de por medio durante una semana con toma de datos en intervalos de dos (2) minutos. El proceso de caracterización inició con la temperatura ambiente del afluente, puesto que en [1, 8, 13], se explica que las altas temperaturas en los reactores de procesos biológicos, puede alterar el desarrollo de la actividad bacteriana y, por ende, se recomienda un valor entre 20°C y 35°C.

Controlador clásico

Como controlador clásico, se eligió un controlador Proporcional - Integral - Derivativo (PID). Lo anterior, obedece a que al menos el 50% de los controladores que se usan a nivel industrial son de este tipo gracias a las características que ofrecen; por ejemplo, gran variedad de técnicas de sintonización, múltiples estructuras internas del controlador y fácil aplicación en gran parte de los sistemas existentes [14]. La estructura elegida para el diseño y la implementación del controlador PID, se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Estructura general para el controlador PID



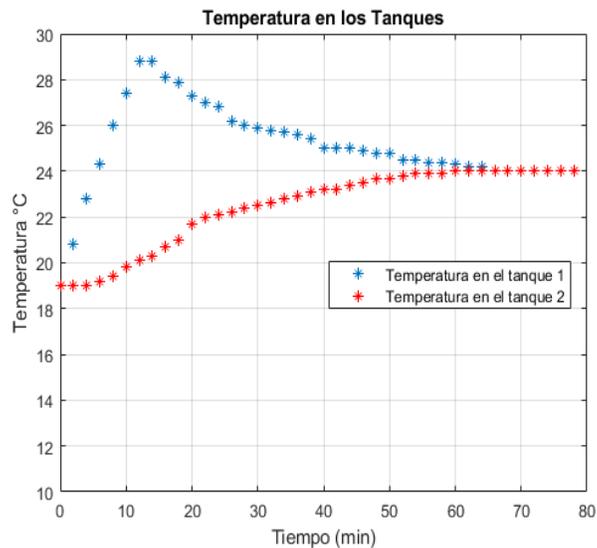
Fuente: [14]

Resultados y discusión

Temperatura del sistema

La dinámica de la variable temperatura al interior del sistema propuesto, se obtuvo con el promedio de las muestras tomadas durante el tiempo de caracterización y para lo cual se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 5.

Figura 5. Dinámica de la temperatura al interior del PPTAR



Fuente: elaboración propia

La dinámica del sistema es proporcionada a través del tanque 1, puesto que es allí donde se realiza el proceso de lodos activados como parte del tratamiento secundario. Lo anterior, implica además que debe hacerse seguimiento a la temperatura en el tanque 2, puesto que el proceso implementado involucra una recirculación de lodos.

En la figura 5 se puede observar que la temperatura al interior del tanque 1, presentó un comportamiento similar a la respuesta transitoria de un sistema de segundo orden, por lo que su descripción matemática se hizo a través de una función de transferencia siguiendo los procedimientos de Ogata [14], Dorf y Bishop [15] y Kuo [16].

La función de transferencia estándar para un sistema de segundo orden se presenta a continuación:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{Wn^2}{s^2 + 2\zeta Wn s + Wn^2} \quad (1)$$

Donde:

Wn es la frecuencia natural no amortiguada del sistema.

ζ es el factor de amortiguamiento del sistema.

Los valores de ζ y Wn , se obtuvieron a partir del sobreimpulso (Mp) del 20% y un tiempo de establecimiento (ts) de 3120 segundos presentados en la respuesta transitoria del sistema de la figura 5 tal y como se muestra a continuación:

$$\zeta = \frac{(\ln(Mp))^2}{\pi^2 + (\ln(Mp))^2} \quad (2)$$

$$Wn = \frac{4}{\zeta \cdot ts} \quad (3)$$

En la ecuación (3) se usó el criterio de 2% para el tiempo de establecimiento, con el fin de tener una mayor precisión en la respuesta del sistema. El valor de obtenido para ζ es próximo a 0.5, con lo que el sistema presenta una respuesta subamortiguada consecuente con este tipo de sistemas debido a que la variable temperatura es una variable que varía en forma lenta respecto a otras que pueden tener una dinámica mucho más rápida. Finalmente, la función de transferencia obtenida para el sistema propuesto es:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{0.0000079073}{s^2 + 0.002564s + 0.0000079073} \quad (4)$$

Diseño del controlador PID

El controlador PID se diseñó siguiendo el diagrama de bloques presentado en la Figura 4, el cual corresponde a un sistema de control en lazo cerrado. La ventaja de los sistemas de control en lazo cerrado respecto a los de lazo abierto, radica en que ayudan a minimizar el error de estado estable presentado por variaciones inapropiadas de las condiciones de la planta o por el desgaste de componentes mecánicos dentro de la misma y como consecuencia, contribuye a que la salida del sistema siga la referencia o set point establecido [14, 16].

Para obtener la función de transferencia del controlador PID, se utilizó la herramienta Sisotool de Matlab para el análisis de sistemas lineales y sintonización de controladores [17]. El controlador diseñado se basó en un criterio del 15% para sobreimpulso máximo y un tiempo de establecimiento aproximado del 10% del valor inicial; es decir, 312 segundos. Con base a los valores mencionados para M_p y t_s , y siguiendo los pasos mencionados en [17, 18], se obtuvo la siguiente función de transferencia para el controlador PID:

$$\frac{u(t)}{e(t)} = \frac{3818S^2 + 44.16S + 0.1277}{S} \quad (5)$$

Una vez se obtuvo la función de transferencia para el controlador PID, se procedió a implementar el lazo de control descrito en el diagrama de bloques de la figura 4. Para esta implementación, se utilizaron las líneas de código que se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Implementación del controlador PID lazo cerrado

```

5 %%Función de Transferencia de la Planta
6 Tanquel_tf = tf([0.00000790734], [1 0.002564 0.00000790734]);
7
8 %%Función de Transferencia de coltrolador PID -Obtenida con Sisotool-
9 Controller = tf ([3818 44.16 0.1277], [1 0])
10
11 %%Implementación del Controlador en lazo cerrado
12 Sys_controller = feedback(series(Controller, Tanquel_tf), 1)
13
14 %%Respuestas al escalón del controlador PID y la planta
15 step(Sys_controller)
16 grid on
17 hold on
18 ylabel('Temperatura °C');
19 xlabel('Tiempo ');
20 title('Temperatura en el Tanque 1');
21 plot(60.*(temp(:,3)), temp(:,1), 'r');
```

Fuente: elaboración propia

Implementación del controlador PID

Una vez obtenida la ecuación del controlador PID, se procedió a obtener el valor de las constantes proporcional (K_p), integral (t_i) y derivativa (t_d) para poder realizar la implementación del controlador PID en el Software LabView de National Instruments.

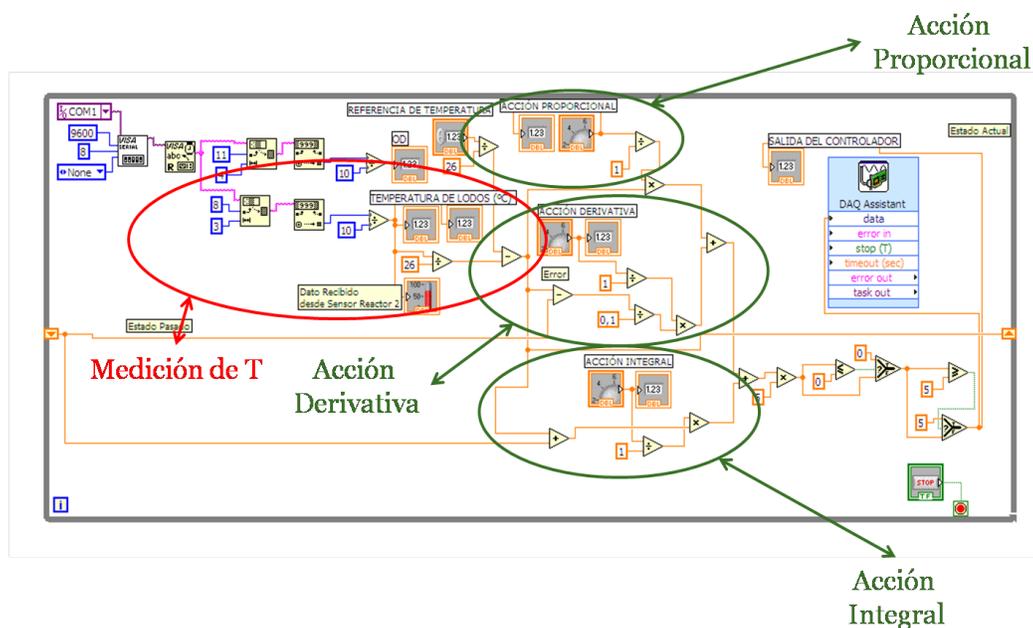
Con base a la función de transferencia para el controlador PID de la Figura 4, se obtuvieron los siguientes valores:

$$t_i = 0.1277,$$

$$t_d = 3818$$

Con los valores anteriores, se implementó en LabView el instrumento virtual presentado en la Figura 7, el cual representa el controlador PID para la temperatura al interior del tanque 1.

Figura 7. Implementación del controlador PID en LabView

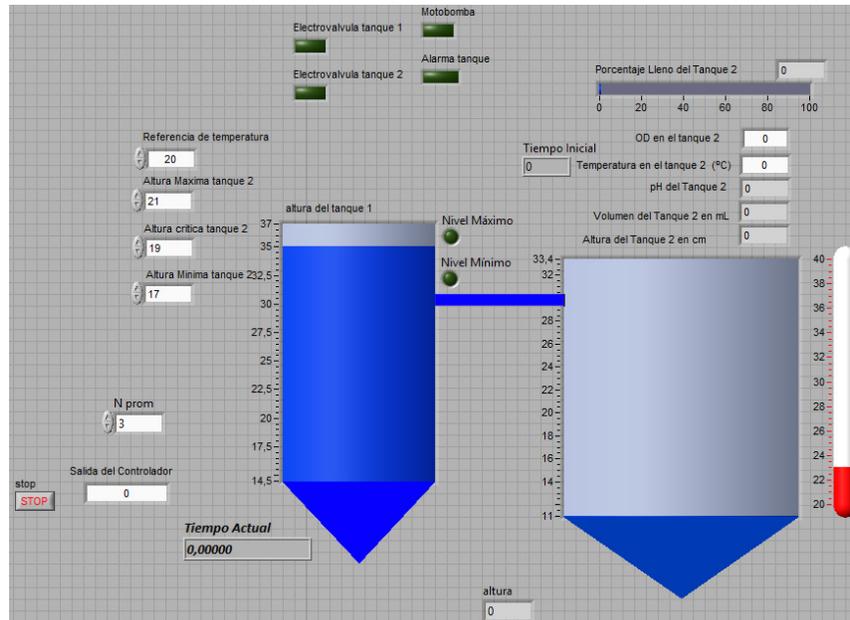


Fuente: elaboración propia

En la figura 7, se presenta la implementación realizada del controlador PID a partir de las acciones proporcional, integral y derivativa. Adicionalmente, se observa que las lecturas realizadas por el sensor de temperatura provienen directamente de una comunicación serial, lo cual representa una de las ventajas del sensor utilizado. Otra de las ventajas de usar un sensor con interfaz RS-232, es la reducción de circuitos adicionales para la lectura de datos, puesto que los datos provenientes del sensor pueden ser leídos de manera inmediata desde un computador con puerto serial.

Una vez realizada la programación del controlador PID, se desarrolló la interfaz gráfica de usuario - GUI presentada en la Figura 8.

Figura 8. Interfaz gráfica de usuario para el PPTAR implementado



Fuente: elaboración propia

Pruebas de funcionamiento

Una vez implementado el controlador PID, se realizaron pruebas de funcionamiento en el sistema propuesto con el fin de determinar las condiciones y calidad de agua que se obtenía luego del tratamiento con lodos activados. En la figura 9 se presenta el PPTAR en funcionamiento bajo las características propuestas.

Figura 9. Prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales



Fuente: elaboración propia

Con base a los resultados alcanzados para la investigación desarrollada, se logró obtener un efluente con las características fisicoquímicas que se presentan en la Tabla 1.

Por lo anterior, y con base a las características que debe poseer el agua para las diferentes actividades del ser humano según la normatividad colombiana presentada en [19, 20, 21], el tratamiento secundario realizado alcanzó una eficiencia del 67%, lo cual indica que el efluente obtenido no puede ser destinado para el consumo humano y/o doméstico, pero sí podría ser destinada al desarrollo de otras actividades realizadas por el ser humano. Es importante aclarar que el porcentaje de eficiencia alcanzado por el PPTAR, se obtiene a partir de los valores iniciales del afluente tratado (sólidos suspendidos mg/l iguales a 78, sólidos sedimentables ml/l/h de 1.3, D.Q.O de 935 y D.B.O igual a 415).

Tabla 1. Resultados fisicoquímicos y bacteriológicos del agua tratada

| ANÁLISIS FISICOQUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DE AGUAS | | |
|--|------------------------------|-----------|
| | Parámetro | Resultado |
| 1 | PH Unidades | 7.940 |
| 2 | Sólidos Suspendidos mg/l | 12 |
| 3 | Sólidos Sedimentables ml/l/h | 0.1 |
| 4 | D.Q.O mg/l O ₂ | 290 |
| 5 | D.B.O mg/l O ₂ | 138 |

Fuente: elaboración propia

Una de las posibles causas por las cuales se obtuvieron los resultados mencionados anteriormente, radica en el tamaño y las dimensiones del prototipo implementado, ya que esto afectó los tiempos de retención del proceso, se tuvo que trabajar con un caudal bajo y no se pudo aumentar la cantidad de microorganismos para el proceso de lodos activados.

El control de la variable temperatura al interior del prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales permitió garantizar condiciones adecuadas a los microorganismos encargados del tratamiento. Lo anterior, se evidencia en la eficiencia de la misma, ya que al ser una planta más pequeña en comparación con las que existen actualmente, se logró un rendimiento superior al 50%.

Conclusiones

Los resultados biológicos alcanzados para el efluente luego del tratamiento realizado por el PPTAR bajo las condiciones de temperatura proporcionadas por el controlador PID implementado, muestran una reducción de DBO cercano al 66.74%, la DQO reducida fue de 68.98%, la reducción de sólidos suspendidos alcanzada fue de 84.21% y se logró un pH de 7.94. Lo anterior, salvo el valor de pH (que se encuentra en un valor cercano a neutro) permite que el efluente obtenido pueda ser empleado en actividades agrícolas y algunas otras del sector industrial.

El controlador de temperatura implementado contribuyó a que los microorganismos presentes en el tratamiento del agua residual tuvieran condiciones de trabajo óptimas durante los tiempos de retención. Sin embargo, la respuesta del mismo ante los cambios de referencia tardaba aproximadamente 20 segundos más del tiempo estimado. Lo anterior, se generó por la disminución en los caudales de afluente y de transferencia entre el tanque de aireación y de sedimentación, ocasionada por la cantidad de lodo activado generado durante la etapa de tratamiento [22].

En las pruebas realizadas, el sistema alcanzó una eficiencia máxima del 75% y pese a que se realizaron diferentes ajustes tanto a los parámetros del controlador PID, como a los tiempos de retención y aireación, no se logró obtener un efluente con la calidad requerida para otro tipo de usos. Lo anterior, se debe en parte a que los tratamientos biológicos actuales de aguas residuales se llevan a cabo en plantas de mínimo 30m².

Agradecimientos

El autor muestra agradecimiento a la Unidad de Sistemas y Electricidad y al Centro de Investigación y Proyección Social – CIPS del INTEP, por el apoyo recibido para la realización del proyecto de investigación. Así mismo, se agradece al equipo técnico de laboratorio que apoyó el análisis del agua residual tratada. Finalmente, se brinda un agradecimiento especial a Paula Andrea Bedoya Benítez por el apoyo técnico brindado en el desarrollo de la investigación.

Referencias bibliográficas

1. J. A. Romero, *Tratamiento de Aguas Residuales: teoría y principios de diseño*, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Tercera Edición, 2010.
2. J. M. Lizarazo Becerra y M. I. Orjuela Gutiérrez, “Sistemas plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia”, R. Robledo Martínez, Proyecto de fin de carrera, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2013.
3. A. Vanegas, “Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales”, *La República*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/infraestructura/solamente-482-de-los-municipios-cuentan-con-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-2611155>. [Accedido: 9-may-2020].
4. F. Rueda, A. Molano Guarín, y L. Pramparo, “Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas para la remoción de carga orgánica en industria de bebidas no alcohólicas”, *ECI*, vol. 13, n.º 26, pp. 17-26, dic. 2019. DOI: <https://doi.org/10.31908/19098367.1150>
5. M. C. Mora Hernández y M. D. Pinilla Acero, “implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales para recirculación en un baño portátil fabricado por la empresa Quimerk LTDA”, J. C. Ramírez, Proyecto de fin de carrera, Universidad de La Salle, Bogotá, 2017.
6. J. L. Ramón Valencia, J. A. Ramón Valencia y J. O. Maldonado Bautista, “Software de simulación para el diseño de reactores de lodos activados”, *Revista colombiana de tecnologías avanzadas*, vol. 2, n.º 28, pp. 77-81, 2016. DOI: <https://doi.org/10.24054/16927257.v28.n28.2016.2468>
7. A. E. Science, *Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future*. 2017.
8. C. Chan, A. Guisasola, and J. A. Baeza, “Living on the edge: Prospects for enhanced biological phosphorus removal at low sludge retention time under different temperature scenarios”, *Chemosphere*, vol. 258, p. 127230, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127230>.
9. G. Moeller y A. C. Tomasini, “Microbiología de lodos activados”. [En línea]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/Capitulo1/5Microbiologiadelodosactivados.pdf>. Consultado: 01 de junio de 2020.

10. L. M. Medina Moreno y G. L. Romero Moreno, "Evaluación de la eficiencia de un sistema de tratamiento compacto para ARD utilizando materiales alternativos en el sistema biológico y de filtración", D. F. Bedoya, Proyecto de fin de carrera, Universidad de Cundinamarca, Facatativá, 2019.
11. D. F. Ortiz Rojas y N. Verano Gutiérrez, "Estudio de viabilidad para la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el laboratorio Bioimagen". [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13131/6/OrtizRojasDavidFelipe2018.pdf>. Consultado: 09 de junio de 2020.
12. B. Valverde Sánchez, E. Huaman Rodríguez y L. Sabino Barrero, "Tratamiento de aguas residuales a través del sistema de lodos activados en el barrio de Los Olivos – Puente Calicanto – 2014", C. M. G. Dávila Paredes, Proyecto de curso, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, 2014.
13. H. A. O. Alisawi, "Performance of wastewater treatment during variable temperature", *Appl. Water Sci.*, vol. 10, no. 4, pp. 1–6, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1171-x>.
14. K. Ogata, "Ingeniería de Control Moderna", Madrid, España: Pearson Educación, pp. 567-641, 2010.
15. R. C. Dorf y R. H. Bishop, "Sistemas de Control Moderno", Madrid, España: Pearson Educación S.A., pp. 37-128, 2005.
16. B. C. Kuo, "Sistemas de Control Automático", Iztapalapa, México D. F.: Prentice Hall Hispanoamericana S. A., pp. 361-454, 1997.
17. "Manejo de Sisotool en Matlab", Isa. [En línea]. Disponible en: http://isa.uniovi.es/wiki/isa/index.php/Manejo_de_Sisotool_en_Matlab. Consultado: 15 de junio de 2020.
18. A. Rossiter, "Using Matlab SISOTOOL 2016 part 1". [En línea]. Disponible en: <http://controleducation.group.shef.ac.uk/MATLAB/using%20matlab%20sisotool%202016%20-%20part%201.pdf>. Consultado: 15 de junio de 2020.
19. Ministerio de Agricultura de Colombia, *Uso del agua y residuos líquidos*, Decreto 1594 de junio de 1984.
20. Ministerio de la Protección Social de Colombia, *Sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano*, Decreto 1575 de mayo de 2007.
21. D. Henao - león, A. Camilo Báez - Alarcón, y J. Bethsaid Pedroza - Rojas, "Metodología para determinar la viabilidad de generación de energía eléctrica por medio del recurso eólico", *Revista Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 6, n°. 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.6.2.3108>
22. Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, *Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*, Resolución 2115 de junio de 2007.