

Diseño del control en puntos críticos del proceso y redes industriales de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en Quala (Tocancipá)

Control design in critical points of the process as well as industrial networks of the industrial treatment plant of waste water located in Quala (Tocancipá)

Yohan Steven Borda Medina*

Resumen

La operación en la industria requiere supervisión y organización de diferentes áreas de trabajo con un mismo fin que es la obtención de eficiencia positiva con el objetivo de no generar sobrecostos; hoy en día al implementar procesos modernos con sistemas automatizados aparecen nuevas variables a controlar con el fin de mantener bajo control el desempeño del sistema, lo que genera que los modelos de mantenimiento se tengan que actualizar para cubrir los vacíos técnicos y administrativos. El artículo se enfoca en la incidencia de los sistemas de control sobre la eficiencia de los procesos al ser desarrollados empíricamente sin fundamentos, lo que dificulta la manipulación de la información para el mejoramiento del desempeño de los procesos.

Palabras clave: *sistemas de control, eficiencia, modelos matemáticos, documentación industrial, mecánica de fluidos.*

Abstract

One of the main objectives in the industry is to obtain positive efficiency in order to not generate overruns, that's why the operation in the industry requires supervision and organization in different areas of work. Nowadays when implementing modern processes with automated systems some new variables appear to keep under control the performance of the system, generating an updating in the models of maintenance with the purpose of filling both technical and administrative gaps. This paper focuses in the incidence of the control systems on efficiency of the processes when they are empirically developed without any foundations, causing difficulty on the handling of the information for the improvement in the performance of processes.

Key words: *control systems, efficiency, mathematical models, industrial documentation, fluid mechanics.*

* Estudiante de Ingeniería Mecatrónica, XI semestre, Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Bogotá, yohan_steven@hotmail.com.

1. Introducción

En virtud del crecimiento del centro productivo de Quala (Tocancipa) fue necesario implementar una PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales) con el fin de disminuir costos de disposición de residuos. Debido a que la compañía siempre debe estar en la capacidad de tener el control sobre los procesos para garantizar la calidad y rendimiento de estos, se realizó una revisión del alcance punto a punto de las dos áreas responsables de la PTAR, que son operaciones y mantenimiento, donde se evidenciaron diferentes inconvenientes que generaban sobrecostos y por ello comprometían la eficiencia; por ende se establecieron tareas y responsables para eliminar todos los problemas que existían.

Uno de los inconvenientes de mantenimiento era de especial preocupación debido a que el alcance de corrección era limitado por la falta de información y experticia en el tema; esto obligaba a mantenimientos correctivos realizados por soporte externo, que generaba una dependencia hacia un contratista. Después de un análisis en búsqueda del núcleo del inconveniente se concluyó que se trataba del programa que controla la planta, ya que generaba costos tales como ajustes de la programación de 545.700 COP por día y tratamiento de agua residual con un proveedor de servicios externo por 16.200.000 COP por día, en total \$16.745.700 COP por día, un costo que genera un impacto directo a la rentabilidad de los productos de la compañía.

Al seguir profundizando en el análisis se encontró que existían tres puntos de la planta con precios, críticos en la eficiencia; y al entender que las características del agua cambian constantemente debido al ingreso de nuevos procesos productivos, se descuidó el ajuste del programa para que la planta asimilara los cambios.

Después de haber entendido el problema de mantenimiento se encontró que a la hora de ejercer algún ajuste en el sistema no existía un instru-

mento que pudiera guiar al equipo para realizarlo correctamente, lo que generaba que el control perdiera sus propiedades.

Además de la preocupación del programa, se definió que era necesario evaluar periféricos que afecten el desempeño del programa, por lo que se estableció realizar el diseño de mecánica de fluidos en la zona, con el fin de asegurar que la característica del flujo sea la adecuada.

Los puntos críticos, distribuidos en todo el proceso, afectan de diferente manera la eficiencia debido a que se manejan diferentes mecanismos de filtrado, que con el tiempo se obstruyen por residuos, lo que ocasiona pérdidas de caudal y presión. Por tal razón que se requería un control que asegurara que estos parámetros no varían; inicialmente en el proceso se encuentra un filtrado por un sistema MBR (Modular Biological Reactor) que extrae el 85 % de residuos sólidos del agua, para el cual se deben garantizar entre 8 y 9 m³/h; por ello se implementó un primer control. En secuencia en el proceso hay un subsistema de ultrafiltración (osmosis inversa) con un módulo de filtrado que extrae los residuos biológicos por medio de una presión de 130 PSI, que garantiza que la presión osmótica permita permear de 5 a 6 m³/h de agua, para ello se implementó un segundo control; y paralelo al filtrado de agua se maneja un sistema centralizado de lodo que acumula todo el extraído en el proceso para prepararlo y compactarlo a un mínimo de humedad por medio de un equipo de lonas que elimina la humedad excesiva a través de un suministro continuo de lodo garantizando 130 PSI, para lo cual se requirió la implementación de un tercer control. A partir de lo anterior se puede afirmar que si uno de los controles pierde asertividad, afecta directamente la eficiencia de la planta motivo por el que era necesario monitorizar y realizar ajustes de acuerdo con el comportamiento de la planta permanentemente; pero para realizar acciones correctivas no había información suficiente.

¿Cómo mejorar la eficiencia de la PTAR para disminuir sobrecostos a la compañía?

La estructura de la planta está constituida como se puede ver en la figura 1, donde se indican los puntos críticos del sistema.

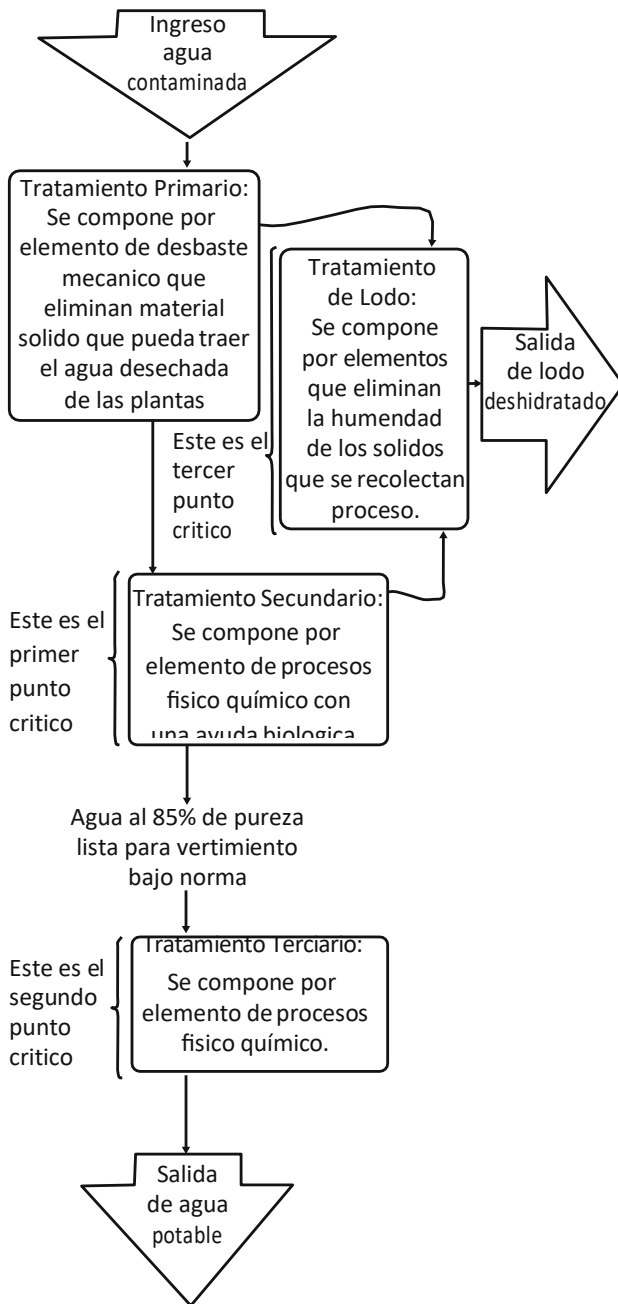


Figura 1. Etapas del proceso.
Fuente: autor

2. Metodología

La identificación se realizó a través de Matlab, el módulo de identificación que utiliza el método de regresión lineal generando una función representativa del sistema que busca un error mínimo a través del método de mínimos cuadrados y así calcular el nivel de correlación entre los datos reales y la función representativa.

El diseño del control de los puntos específicos consistió en identificar variables e instrumentación entre PLC y actuadores, encargados del procesamiento y regulación, respectivamente. El diseño específico se realizó a través de dos métodos, gráfico y algebraico. Al final, para obtener la certeza del correcto funcionamiento del control, se realizó el montaje del sistema en la unidad de simulación de Matlab, llamada Simulink. Después de este montaje virtual se monitorizó únicamente el control, para revisar los rangos de frecuencia con el fin de verificar que no se exija energía sobredimensionada para los equipos del sistema. Para lograr definir cuál de los dos métodos era el más efectivo se utilizó el método de la integral del error cuadrático, que consiste en elevar el error al cuadrado e integrarlo para obtener todo el error del espectro del sistema y así ver cuál es el menor error.

3. Resultados

El diseño de los sistemas de control está constituido por diferentes pasos, desde la toma de datos en el sistema hasta la verificación del controlador diseñado. Para tomar los datos se utilizó el ²¹ *software* de Rockwell que maneja los PLC Allen Bradley, todo el procedimiento de adquisición se realizó con la planta en operación normal. Para la identificación se utilizó el módulo *ident* de Matlab que maneja la identificación por una regresión matemática tipo ARX a través de los mínimos cuadrados. En el diseño del control se optó por dos métodos con el fin de verificar el funcionamiento y definir cuál es el método más didáctico para la implementación a nivel técnico. Finalmen-

te, se realizó la simulación del sistema de control en Simulink para de verificar los diferentes parámetros.

Identificación de la función de transferencia

Para la etapa del MBR se realizó una medición de caudal a la salida de las membranas, que a su vez es la succión de una bomba centrífuga controlada por un variador de frecuencia. Se definió que la variable de proceso era el caudal y la variable de control la frecuencia, donde se tomaron los datos con un *setpoint* de 5 m³/h con el fin de observar la dimensión del sobrepico, mostrada en la ilustración 3. Al realizar el análisis de datos se obtuvo un factor de correlación del 75,13 % con una función de transferencia de segundo orden, superando el umbral de aceptación. Sin embargo, se hizo un análisis con retardo a la señal que dio como resultado un coeficiente de 75,17 % por lo tanto, se estableció una función de transferencia sin retardo con las siguientes características:

$$F(S) = \frac{0,32382}{(1 + 29,1835S)(1 + 7,3638S)}$$

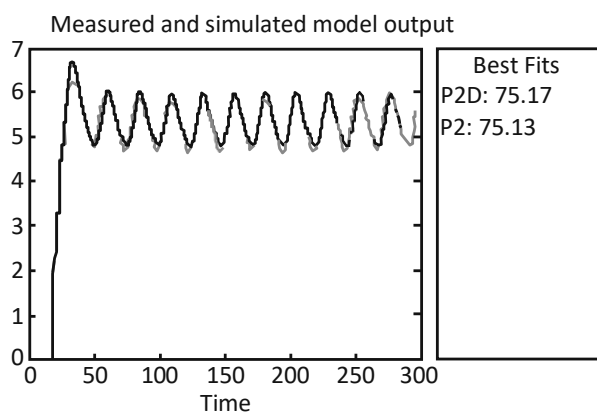


Figura 2. Coeficiente de correlación etapa de filtración tanque MBR.

Fuente: autor

Diseño del controlador

Al obtener las funciones de transferencia que representan la planta se continuó con el diseño del controlador basado en una estructura de retroali-

mentación que funciona con una señal de ingreso en una variable de la planta; es modificada por el controlador para generar la salida corregida y al tiempo realizar una medición que se compara con la entrada para determinar el error.

El diseño de los controladores se realizó de dos métodos: el primero fue el gráfico, que nos brinda la posibilidad de buscar controles de manera proporcional, integrativa, derivativa y proporcional integrativa derivativa; el segundo fue por el método algebraico, tiene la ventaja de establecer constantes sin límite de grado dado que se puede ajustar la cantidad de constantes que se necesiten. De estas dos maneras se garantiza tener bajo control los parámetros clave como tiempo de estabilización, sobrepico y tiempo de sobrepico, vitales a la hora de dimensionar el control que se necesita.

Método gráfico

Para el método gráfico se declararon las funciones de transferencia en Matlab específicamente en el Workspace, y se ejecutó una herramienta del *software* llamada Sisotool, en la cual se puede cargar el controlador de acuerdo con la planta y la respuesta que se requiera. Para ello se cargó la función de transferencia ya declarada en Matlab a la herramienta donde posteriormente se declaró el controlador para ejecutar la gráfica de respuesta simulada, a la cual se le establecieron los parámetros de respuesta tales como sobrepico, tiempo de estabilización y tiempo de sobrepico. Por último, se modificaron los polos que se ven en la ventana Root Locus hasta ver la curva del sistema dentro de los parámetros de diseño.

En el controlador del sistema MBR por el método gráfico se corroboró que debido a las dimensiones y características de la bomba, el mejor tiempo de estabilización fue de 90 segundos, buscando que el sobrepico no fuese mayor al 10 %. Teniendo en cuenta que para un turno de 24 horas de operación la demanda de agua en el reactor está por debajo de la capacidad de filtración, y además

el caudal sigue siendo progresivo a medida que se estabiliza el sistema, no es significativo que el tiempo de estabilización esté en 90 segundos; para cumplir dichos parámetros se implementó un sistema PID.

$$C = 6,23117 + \frac{0,16841}{S} + 55,57S$$

Método algebraico

Para todas las etapas se llevó a cabo el análisis buscando la respuesta que cumpliera con el tiempo de estabilización y el mínimo en el sobrepico. Para realizar el control fue necesario integrar todo el sistema (control (C) y planta (G)) en una sola función de transferencia; la forma de hacerlo fue haciendo un procedimiento algebraico establecido por la siguiente función:

$$\frac{Y}{R} = \frac{C * G}{1 + C * G}$$

Al realizar la integración se tomó el denominador y se ordenó, para realizar el método de igualación, para ello se realizó el cálculo de los polos teniendo en cuenta los tiempos de muestreo y consumo de energía necesarios para obtener la eficiencia requerida. Para calcular los polos se tomó la función de transferencia del punto crítico analizado y se igualó el denominador a 0. Para obtener los polos se dividió un valor unitario en el Tao (T) y así compararlos con la función de transferencia del control implementado en la planta e igualar con los datos del denominador de la función integrada.

El diseño del control para el sistema MBR necesitó de un controlador más robusto, debido a que la planta estaba compuesta por un sistema de 2 orden. A diferencia del método gráfico, el método algebraico permite una mayor libertad en la cantidad de constantes y polos que comanden el control, es por ello que para aprovechar dicha ventaja se diseñó un control que se sale del estándar dado que el PID nos da tres constantes y el planteado específicamente para este género cin-

co constantes, lo que brinda mejor precisión en el sistema. Al igual que el primer punto crítico, se conformó una función de transferencia a través del control propuesto y la planta, como se ve a continuación:

$$C = \frac{S^3 + K_2 S^2 + K_1 S + K_0}{S(S^2 + K_3 S + K_4)}$$

$$G = \frac{K}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)}$$

$$\frac{Y}{R} = \frac{K(S^3 + K_2 S^2 + K_1 S + K_0)}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)S(S^2 + K_3 S + K_4) + K(S^3 + K_2 S^2 + K_1 S + K_0)}$$

Al igual que en el primer punto crítico se tomó el denominador y se igualó con el modelo de una ecuación modelo de quinto grado.

$$\begin{aligned} & S^5 + \left(\frac{T_1 T_2 K_3 + T_1 + T_2}{T_1 T_2} \right) S^4 + \left(\frac{T_1 T_2 K_4 + T_1 K_3 + T_2 K_3 + 1 + K}{T_1 T_2} \right) S^3 \\ & + \left(\frac{T_1 K_4 + T_2 K_4 + K_3 + K_1 K}{T_1 T_2} \right) S^2 + \left(\frac{K_4 + K_1 K}{T_1 T_2} \right) S + K K_0 \\ & = S^5 + \frac{\beta_4 S^4}{\beta_5} + \frac{\beta_3 S^3}{\beta_5} + \frac{\beta_2 S^2}{\beta_5} + \frac{\beta_1 S}{\beta_5} + \frac{\beta_0}{\beta_5} \end{aligned}$$

Se definieron los polos que tendría el sistema a partir de los dos polos dominantes que arrojó el sistema identificado, tomando los tao (T) asumiendo que la relación del polo con el tao es $S = -1/T$. Entendiendo que para el diseño del controlador se necesitaban cinco, se tomó el tiempo de estabilización deseado y se dividió de igual manera en 4 para obtener el T. Se procedió a definir el polo con la relación y para definir los dos polos faltantes se tomó uno de los polos del sistema identificado y el del tiempo de estabilización deseado y se multiplicó por 7, con el fin de alejarlos de los polos dominantes. Después de definir los polos se igualaron con el sistema para despejar las constantes y definir el controlador.

$$(S + P_1)(S + P_2)(S + P_3)(S + P_4)(S + P_5) = 0$$

$$(S + 0,0342)(S + 0,1357)(S + 0,0444)(S + 0,3108) \\ (S + 0,9499) = 0$$

Igualando con la ecuación modelo:

$$S^5 + 1,475S^4 + 0,57757S^3 + 0,078811S^2 + 0,003843S \\ + 0,0000607799$$

$$= S^5 + \frac{\beta_4 S^4}{\beta_5} + \frac{\beta_3 S^3}{\beta_5} + \frac{\beta_2 S^2}{\beta_5} + \frac{\beta_1 S}{\beta_5} + \frac{\beta_0}{\beta_5}$$

Igualando con el sistema

$$1,475 = K_3 + 0,17 \quad K_3 = 1,305$$

$$0,57757 = K_4 + 0,17K_3 + 0,0061 \quad K_4 = 0,34962$$

$$0,078811 = 0,17K_4 + \frac{K_3}{219,9} + 0,0015K_2 \quad K_2 = 8,96$$

$$0,003843 = \frac{K}{214,9} + 0,0015K_1 \quad K_1 = 1,478$$

$$0,0000607799 = 0,0015K_0 \quad K_0 = 0,0405199$$

Por lo tanto, el controlador es:

$$C = \frac{S^3 + 8,96S^2 + 1,478S + 0,0405199}{S(S^2 + 1,305S + 0,34962)}$$

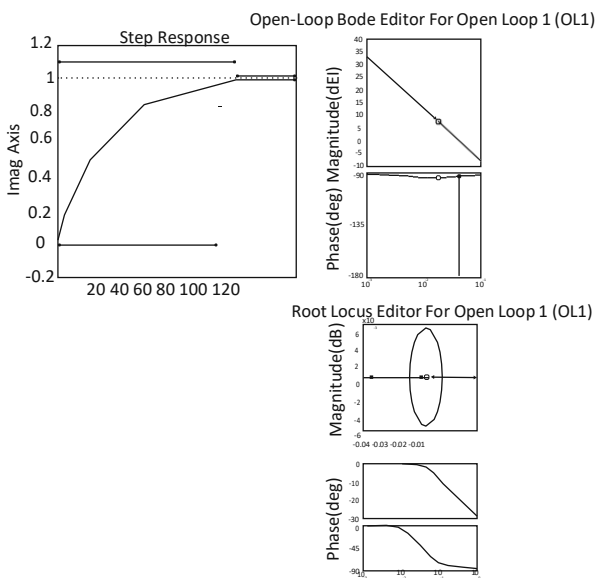


Figura 3. Método gráfico segundo punto crítico.

Fuente: autor

Rango del control

Es el intervalo donde se manifiesta la exigencia de energía para estar dentro de los parámetros de diseño. Cuando se trata de sistemas de bobinas, como motores y algunos sistemas de bombeo el rango se establece en frecuencia. Por ende, los tres puntos se controlan a través de la frecuencia comandada por variadores donde se limitan hasta 60 Hz debido a que bajo este parámetro están diseñadas las bombas.

Es necesario revisar el rango de control obtenido dado que el tiempo de estabilización es proporcional a la cantidad de energía exigida; es por ello que para definir la estabilización del sistema hay que tener en cuenta la capacidad de respuesta de los elementos del sistema. Se realizó tanto la revisión de los rangos del control punto a punto como la comparación del resultado obtenido frente al estado inicial, evidenciando la diferencia del diseño frente a los datos tomados. Al analizar el rango de control del sistema MBR se pudo observar que el método algebraico consume menos energía.

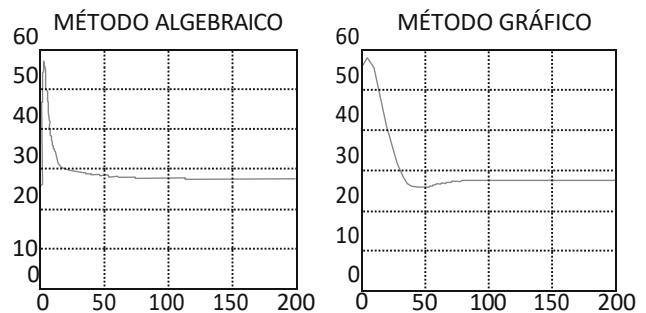


Figura 4. Rango de control segundo punto crítico.

Fuente: autor

Índice del error cuadrático

Es uno de los métodos para evaluar la dimensión de error en el tiempo del controlador a partir de una elevación del error al cuadrado, debido a que el comportamiento de la función puede ser negativo y se requiere analizar el error bajo la curva. Es necesario realizar una integración para obtener la cantidad del error bajo la curva. Para el proyecto en específico este índice se analizó con el fin de

comparar los dos métodos de diseño del control en cada punto crítico, y lograr determinar cuál de los

diseños fue más eficiente. Para realizar el proceso se aprovechó la herramienta Simulink de Matlab, que ofrece la posibilidad de simular el sistema de control y observar el comportamiento a partir de un análisis en un tiempo determinado. Para el segundo punto crítico al igual que para el primero, se analiza la respuesta del sistema en el MBR.

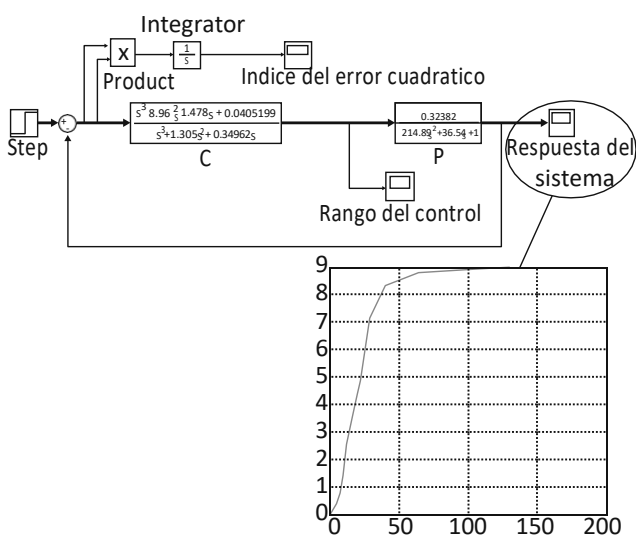


Figura 5. Respuesta del control del segundo crítico por el método gráfico.

Fuente: autor

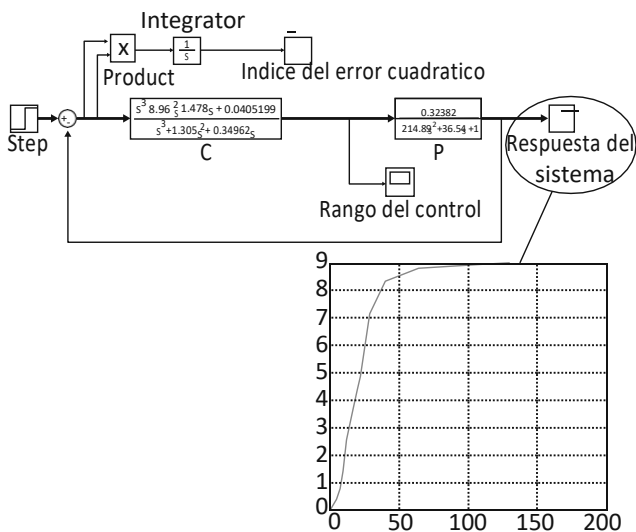


Figura 6. Respuesta del control del segundo punto crítico por el método algebraico.

Fuente: autor

Siguiendo el procedimiento después de comprobar las respuestas del sistema de acuerdo con el diseño, se procedió a realizar el análisis del índice de error.

4. Conclusiones

Después de fundamentar el control para la succión de las membranas modulares, se obtuvo un flujo constante que garantiza que la presión en las membranas no varíe drásticamente e impide que las membranas se desgasten, permeen agua con DQO alto y se disminuya la calidad de agua para vertimiento, con el peligro de que se violen las normas.

Al desarrollar el diseño de un sistema de control desde la obtención del modelo matemático, se obtiene la ventaja de una visión global de todo el punto crítico, permitiendo realizar cualquier cambio y así manipular los parámetros con fundamentos en cualquier punto del proceso, desde cambiar un equipo hasta la variación de las características del agua, con el fin de proporcionar una solución efectiva con tiempos ideales para la operación sin afectar el comportamiento de la eficiencia del proceso.

El beneficio de poseer la información necesaria para entender cómo funciona y se diseña el sistema de control en los puntos críticos brinda la ventaja de supervisar funciones sobre las que no se tenía alcance por los vacíos técnicos que existían además de lograr que la información perdure en el tiempo para la capacitación de personal futuro. Al obtener un herramienta paso a paso del proceso se solucionan dudas puntuales.

5. Referencias bibliográficas

Aguas de Colombia. (1 de noviembre de 2012). Aguas de Colombia. Recuperado el 15 de marzo de 2015, de <http://www.aguacol.com/>

Grantham, W. (1998). *Sistemas de control moderno: análisis y diseño*. México: Limusa.

Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*. México: Prentice Hall.

Rigola L., Miguel. (1989). *Tratamiento de aguas industriales*. Barcelona, España: Marcombo, S. A.