



## CONTROL ROBUSTO DE TEMPERATURA Y pH DE UN REACTOR ANAERÓBICO VERTICAL

Milher Fabián Tovar Rubiano, Ramón Elías Molano Cosme & Sergio Andrés Alba Lugo

Artículo recibido el 13 de enero de 2014, aprobado para publicación el 06 de junio de 2014.

### Resumen

Este artículo trata temas relacionados a la optimización de reactores anaeróbicos de flujo vertical ascendente para la remoción de materia orgánica en aguas residuales, las cuales son tratadas para la disposición en un efluente (rio, laguna o mar) con el mínimo de solutos, con la ventaja de poder aumentar la demanda química y bioquímica de oxígeno necesario para la vida. Una de las más comunes formas para tratar agua residuales es a través de reactores anaeróbicos, que consiste en la alimentación de bacterias dentro de un lodo, las cuales se encargan de digerir la materia orgánica y convertirla en gas metano. El grado de conversión de materia orgánica en gas metano o grado de remoción de materia orgánica, es la medida que determina la eficiencia del reactor. Este parámetro puede ser optimizado controlando variables críticas como la temperatura del reactor y el potencial de hidrogenación (pH) de las aguas residuales de entrada. Los actuadores son resistencias eléctricas y dosificadores de sustancias básicas o ácidas; el control de temperatura se hace dentro de un contenedor mediante radiación natural, ya el pH es controlado mediante un mezclador con velocidad constante. En este trabajo fueron modelados ambos sistemas usando una tarjeta de adquisición de datos y la herramienta de identificación de sistemas de Matlab.

**Palabras clave:** PID, sistemas, dinámicos, aguas, residuales.

## ROBUST CONTROL OF TEMPERATURE AND pH OF A VERTICAL ANAEROBIC REACTOR

### Abstract

This article addresses issues related to the optimization of anaerobic reactors of vertical flow for the removal of organic matter in wastewater, which are treated for disposal at an effluent (river, lake or sea) with the minimum of solutes and the advantage of increasing chemical and biochemical oxygen demand necessary for life. One of the most common treatments of wastewater is using anaerobic reactors, where a population of bacteria into sludge are feeding. The bacteria are responsible for digesting organic material producing methane gas. The rate of organic matter conversion to methane gas or degree of matter organic removal is the parameter measured to determine the efficiency of the reactor. This parameter can be optimized by controlling critical variables, as the temperature of the reactor and the hydrogenation potential (pH) of wastewater input. The actuators are electric resistances and dispensers of basic or acidic substances, the temperature control is performed within a container by natural radiation, and a constant speed mixer controls the pH. In this work, both systems were modeled using a data acquisition board and system identification tool of Matlab.

**Key words:** PID, system, dynamics, water, waste.

## CONTROLE ROBUSTO DA TEMPERATURA E pH DE UM REATOR ANAERÓBICO VERTICAL

### Resumo

Este artigo trata temas associados à otimização de reatores anaeróbicos de fluxo vertical ascendente para a remoção da matéria orgânica em águas residuais, as quais são tratadas para disposição num efluente (rio, lagoa ou mar) com o mínimo de solutos, com a vantagem de poder aumentar a demanda química e bioquímica de oxigênio necessário para a vida. Uma das principais formas para tratar águas residuais é por meio de reatores anaeróbicos, o qual consiste na alimentação de uma população de bactérias contidas num lodo, que se encarrega de digerir a matéria orgânica e transformá-la em gás metano. O grau de conversão da matéria orgânica em metano ou grau de remoção de matéria orgânica, é a medida que determina a eficiência do reator. Este parâmetro pode ser otimizado a través do controle de variáveis críticas como a temperatura do reator e o potencial de hidrogenação (pH) das águas residuais de entrada. Os atuadores são resistência elétrica e fornecedores de substâncias básicas ou ácidas; o controle da temperatura é feito dentro de um recipiente por meio de radiação natural, já o pH é controlado a través de uma bateadeira com velocidade constante. Neste trabalho foram modelados os dois sistemas usando um cartão de aquisição de dados e a ferramenta de identificação de sistemas de Matlab.

**Palavras-chave:** PID, sistemas, dinâmicos, águas, residuais.

## Introducción

Para minimizar los daños colaterales de la disposición final de las aguas residuales se han definido diferentes estrategias para alcanzar este objetivo, una de estas estrategias es tratar las aguas que tiene lodos activos con bacterias en un tubo vertical; estas bacterias digieren la materia orgánica y la convierte en gas metano (Romero *et al.*, 2009), el cual es fácilmente separable, este proceso se denomina tratamiento de aguas residuales por medio de un reactor anaeróbico vertical; y se define que es anaeróbico dado a que las bacterias que se encuentran en el lodo no necesitan de aire para su subsistencia. La calidad con que se mide el reactor está definido en la cantidad de materia orgánica removida, parámetro que se mide en partes por millón y la salida del reactor es un porcentaje de la materia orgánica removida.

La eficiencia del reactor depende directamente de dos factores con respecto a los procesos físico y biológico. El factor físico es la velocidad con la cual el agua residual recorre el lodo activo y llega a la salida superior del tubo del reactor y el factor biológico es la calidad de las bacterias que se encuentran en el lodo.

El factor físico se puede controlar y monitorear de tal manera que se puede determinar que si el flujo o caudal es lento, la remoción de materia orgánica es alta, la desventaja es que el proceso para tratar una cantidad considerable de aguas residuales toma demasiado tiempo; pero si el flujo o caudal es alto, entonces la cantidad de materia orgánica removida es baja, la ventaja es que el tiempo para tratar un volumen considerable de agua se minimiza. El factor biológico permite determinar que si la calidad del lodo es alta, la remoción de la materia orgánica también es alta; este factor se puede mejorar para optimizar el medio en el cual se encuentra el lodo, para esto se puede definir que para controlar el medio se puede controlar la temperatura del tubo digestor, pero también para optimizar el parámetro biológico se puede controlar la calidad del agua residual, y el hecho de que sea un agua residual que provenga de fuentes no limpias (baños, inodoros, limpieza de alimentos, cocina, entre otros) esto no implica que esta agua no tenga factores cuantificables que determinen la calidad del agua residual; uno de estos factores es el Potencial de Hidrogenación (pH) del agua residual de entrada, factor que es controlable y monitoreado para optimizar la remoción de materia orgánica (Pre tratamiento de aguas residuales).

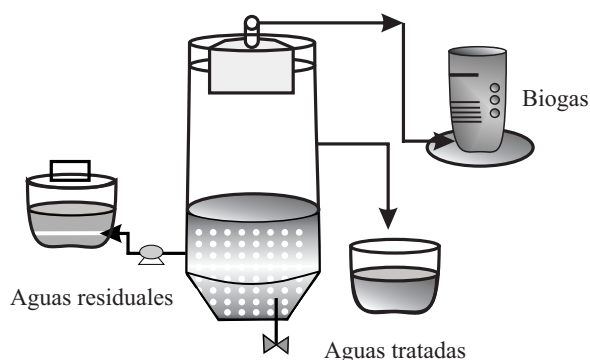
Los factores biológicos controlables y observables para la optimización del reactor anaeróbico definidos en este

trabajo son: Temperatura del tubo del reactor anaeróbico y el pH de las aguas residuales de entrada.

## Materiales y métodos

La investigación se realizó en la Universidad de la Amazonia, Campus Porvenir, cuyo objetivo es mejorar el reactor anaeróbico prototipo que se desarrolló para estudiantes del programa de Química (Figura 1), el cual tiene las siguientes características:

Flujo de entrada:  $40 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$   
Capacidad de entrada: cinco Galones (18.927 ml)  
Tipo de reactor: Anaeróbico UASB  
Dimensiones del reactor: diámetro: 12 cm, altura: 1,75 m.



**Figura 1.** Proceso de reactor anaeróbico vertical de flujo ascendente.

La calidad de las aguas residuales se encuentra en un rango de 4 a 9 en pH; los mejores resultados de remoción se encuentran en aguas residuales pH 7, esto se encuentra en dependencia del tipo de lodo y bacterias que se usan dentro del reactor anaeróbico. La temperatura de trabajo del reactor sin control es propio de condiciones andino amazónicas (27 a 34 °C); al igual que el pH, la temperatura es una variable que tiene un alto grado de incidencia sobre el proceso.

Para la identificación de los diferentes sistemas se usó además del prototipo del reactor anaeróbico una tarjeta de adquisición de datos marca National Instruments modelo USB 608; la cual se conectó con la instrumentación de los sensores y la parte de potencia de los diferentes actuadores, para terminar de extraer las funciones de transferencia que determinan el comportamiento se usa la herramienta de Matlab 2014 Ra Ident Tool.

## Resultados y discusión

Las estrategias de control definidas en este trabajo están

orientadas a la optimización de la remoción de la materia orgánica a través del control de la temperatura del tubo digestor y del pH de las aguas residuales, esto convierte a las estrategias de control como si fuera un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO); las entradas al sistema son las temperaturas y pH deseados en un tiempo de estabilización definido en la estrategia de control, y las salidas son temperaturas del tubo digestor y pH en las aguas residuales (Figura 2).

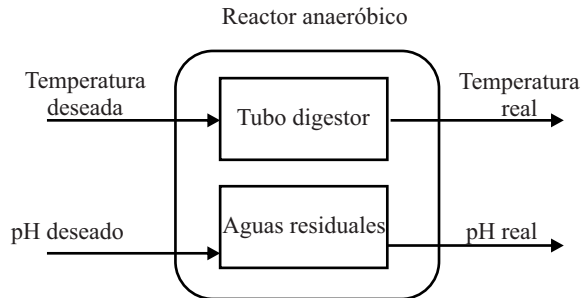


Figura 2. Sistema MIMO del reactor anaeróbico.

Si se analiza la Figura 2 se observa que a pesar de que el sistema es un MIMO las dos estrategias de control se ubican en dos lugares del reactor diferente y por lo tanto este se puede convertir en dos sistemas de una sola entrada y una sola salida (SISO) (Figura 3). Por lo tanto se puede analizar estrategias de control independiente una de la otra.

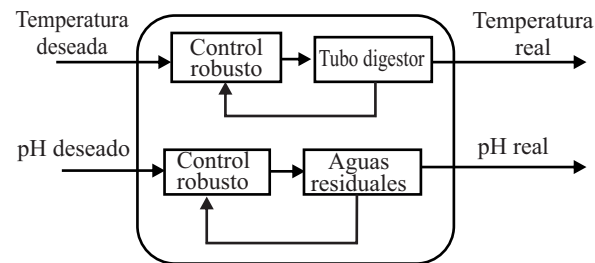


Figura 3. Sistemas SISO's del reactor anaeróbico.

### Control de temperatura con un PID

El control y monitoreo de la temperatura del tubo digestor (tubo donde se encuentra el lodo con las bacterias) se realiza a través de un control robusto, y se define que es robusto dado a que los parámetros del controlador no varían con respecto a variaciones del modelo (Inthamoussou, 2011; Torralba, 2010) (lo contrario se denomina control flexible). El control PID se denomina así porque sobre el modelo de la planta hace efectiva tres

acciones de control: acción proporcional (P), acción integral (I) y acción derivativa (D), estas acciones de control se identifican como se observa en la figura 4, pero para identificar las diferentes acciones de debe identificar primero el modelo que rige al sistema (identificación de la planta).

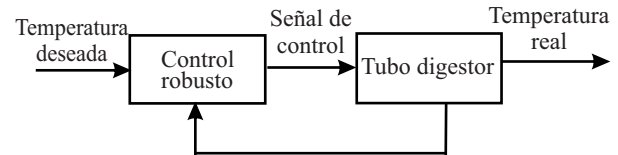


Figura 4. Definición de la señal de control en la estrategia de control robusto.

La identificación de la planta es un proceso donde se determina las ecuaciones con todos sus coeficientes numéricos que es capaz de definir el comportamiento de la máquina (tubo digestor), para este caso es una función de transferencia de un sistema térmico que generalmente contiene los siguientes términos:

$$\frac{T(s)}{E(s)} = \frac{1}{\tau s + k} \quad (1)$$

La ecuación (1) tiene los siguientes términos:

$T(s)$ : Temperatura de salida en término del dominio  $s$ .

$s$ : Variable compleja del dominio  $s$ .

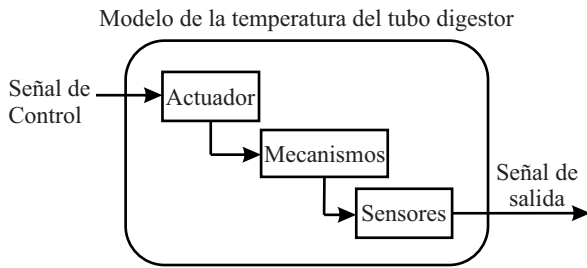
$E(s)$ : Entrada del sistema, para este caso se determina como una señal de voltaje (Voltios).

$\tau$ : Coeficientes que reúne las características térmicas del sistema.

$k$ : Coeficientes que reúnen las características del sensor y de los elementos de potencia del tubo digestor.

Si se analiza la función de transferencia en la ecuación (1) la entrada está en términos de voltios, esto es porque la señal de control se encuentra en los mismos términos dado a que proviene de un controlador netamente electrónico. Antes de realizar la identificación de la planta se debe analizar los componentes internos del modelo dado a que ayuda a tener una idea de la solución a encontrar y poder definir mejor el modelo (Figura 5). Para el caso de estudio se define que el actuador está compuesto por dos bloques, los cuales son el bloque de potencia y el bloque de elemento final de actuador (Figura 6).

El bloque final de actuador está compuesto por una resistencia eléctrica que provee de calor al mecanismo (tubo digestor), el bloque de potencia es el encargado de



**Figura 5** Diagrama de bloques del modelo de temperatura del tubo digestor.

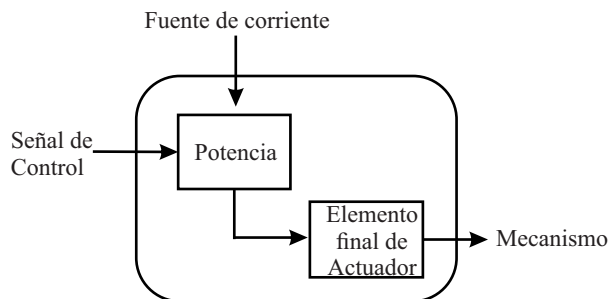
controlar la corriente proveniente de la fuente de corriente (Para este caso es corriente eléctrica en AC, 110 V, de la red eléctrica domiciliaria) por medio de una estrategia que se denomina ángulos de disparo de un TRIAC (Universidad Don Bosco, 2008) (Figura 7).

De tal manera que el bloque de potencia recibe una señal de control que se encuentra entre el rango de [0 – 5] Voltios y que representará el porcentaje de ciclo útil que se usará en el elemento final de actuador (Guarnaschelli, 2008; Rivera, 2004) (resistencia eléctrica).

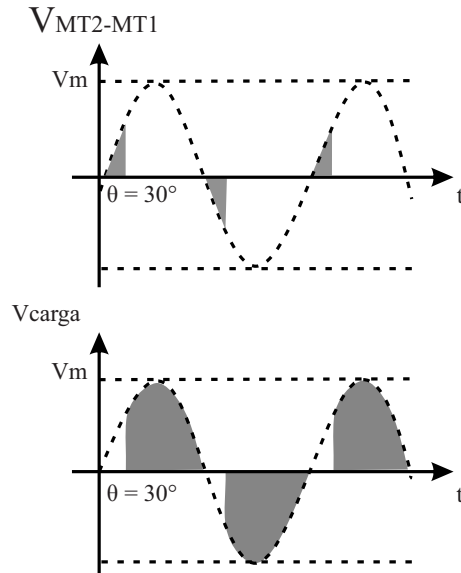
El bloque de mecanismo (Figura 5) está definido por los coeficientes que se determinarán dado a que es un sistema de transferencia térmica por radiación natural (flujo de calor de la resistencia al aire circundante al tubo digestor y que llega a este último) y transferencia térmica por convección (del lodo que se encuentra en el estado entre líquido y sólido).

El bloque de sensores está definido por un conjunto de elementos electrónicos que son capaces de convertir una variable física (Temperatura) en una variable eléctrica (Voltios) necesaria para implementar una estrategia de control robusta, este bloque incluye la parte de la instrumentación que es la que se encarga de adecuar la señal para ser interpretada por el controlador.

La instrumentación depende directamente del sensor a



**Figura 6.** Diagrama de bloques del actuador en el tubo digestor.

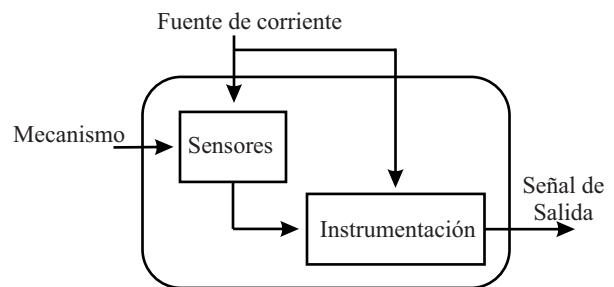


**Figura 7.** Forma de los ángulos de disparo de un TRIAC.

usar y los rangos de voltajes usados en el comparador del controlador, por lo tanto hay una variedad de sensores y una variedad amplia de circuitos de instrumentación de la señal.

Para el caso concreto se ha determinado que se usará un termistor NTC 10K (Bordóns, 2000), el cual a un cambio de temperatura se produce un cambio en la resistencia, y si se hace fluir una corriente por el termistor se obtiene una señal de voltaje que varía con respecto a la temperatura del tubo digestor (Figura 8).

El inconveniente del sensor es que no es lineal y por lo tanto se debe usar en la instrumentación una estrategia de linealización para que no afecte la estrategia de control a implementar. La identificación de la planta (modelo del tubo digestor) se realiza con el uso de una tarjeta de adquisición de datos y con ayuda de software como Matlab R2014a licenciado a la Universidad de la



**Figura 8.** Diagrama de bloques de sensores del tubo digestor.

Amazonia; la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) se conecta al PC a través de un puerto USB y se configura para que la entrada este en un rango entre 0 - 5 voltios, rango igual a la salida del modelo y que tiene relación directa con el siguiente rango de temperatura: 24 - 50° C, por lo tanto el rango inferior de 0 voltios corresponde a 24°C y el rango superior de 5 voltios corresponderá a 50°C; este rango de trabajo es el ideal para aumentar el trabajo de las bacterias para digerir la materia orgánica dentro del tubo digestor; y se ha determinado en trabajos anteriores que la mayor remoción se obtiene cuando el tubo digestor se encuentra a una temperatura de 34°C (Romero *et al.*, 2009).

La salida de la DAQ es la entrada al modelo, y es por donde se conectará la señal de control proveniente del controlador diseñado en pasos siguientes, el rango de voltaje de entrada (voltaje al circuito de potencia y que se encargará de definir el ciclo útil a usar de la señal eléctrica domiciliaria) tiene el mismo rango de salida de 0 a 5 voltios, por lo tanto se debe configurar la DAQ para que tenga este tipo de salida (Figura 9).

La aplicación de Matlab R2014a para la identificación de los sistemas se denomina System Identification Tool (Figura 10).

La función de transferencia que se espera obtener es aquella cuyo comportamiento sea críticamente

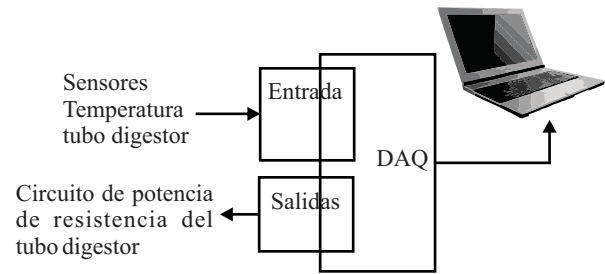


Figura 9. Conexión del modelo del tubo digestor a la DAQ.

amortiguada o sobre amortiguada con un error en estado estacionario amplio, error que el controlador electrónico eliminará después de su implementación.

La función identificada es la siguiente:

$$\frac{T(s)}{E(s)} = \frac{0,01}{s^2 + 4,8s + 0,04} \quad (2)$$

La ecuación 2 corresponde de una función de transferencia que se estabiliza alrededor de 600 segundos para una entrada de 1 voltio (34 °C), y su valor final es de 0,25 voltios de salida en el sensor (26,5 °C); es un comportamiento sobre amortiguado y lo esperado ante una entrada de tipo escalón unitario, lo que representa que el bloque de potencia le corresponde controlar un 20% del ciclo útil de la señal eléctrica domiciliaria de 110 VAC a 60 Hz (Figura 11).

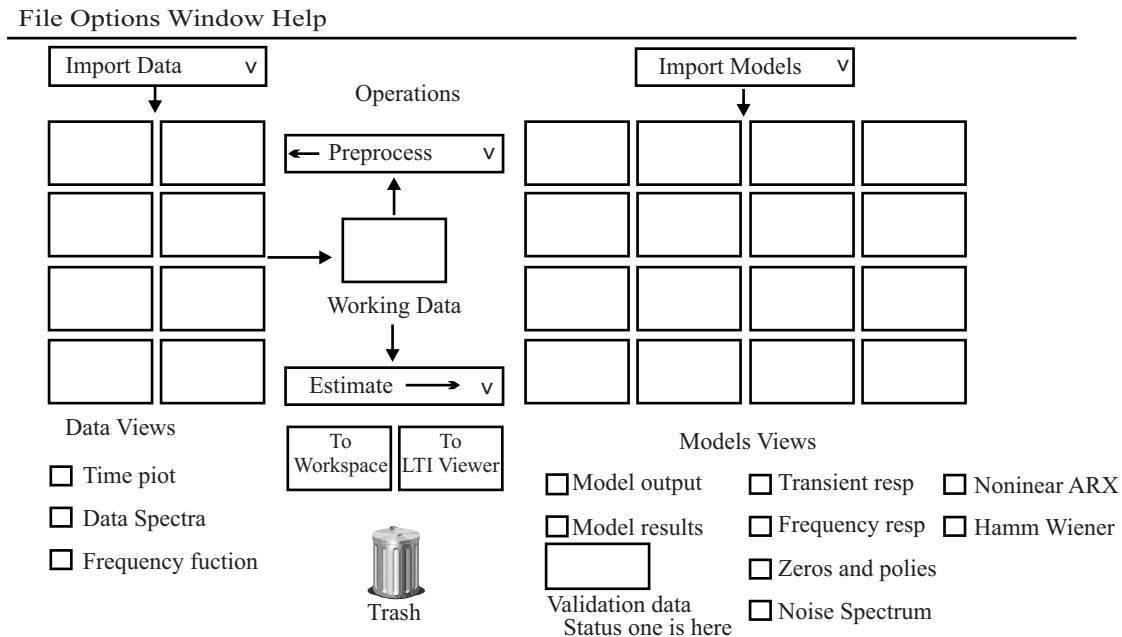
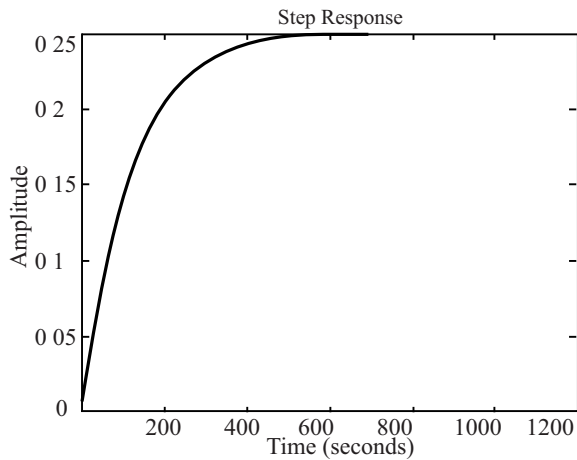
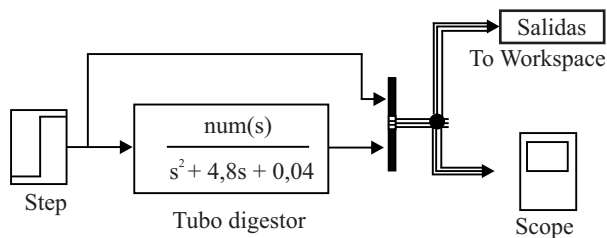


Figura 10. Herramienta de Matlab R2014a (System Identification Tool) para la identificación del modelo.



**Figura 11.** Respuesta del modelo identificado con System Identification Tool de Matlab R2014a.

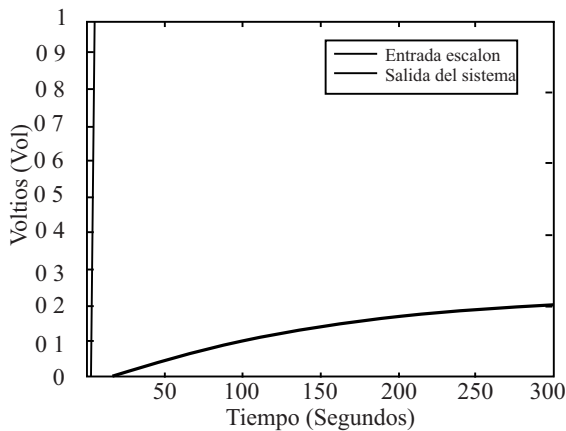
En la figura 12 se indica el uso de la aplicación de simulación de diagramas de bloques de Matlab R2014a.



**Figura 12.** Diagrama de bloques del sistema térmico en lazo abierto.

El comportamiento de entrada en comparación al de salida se observa en la figura 13.

Comportamiento del tubo digestor ante una entrada unitaria



**Figura 13.** Comportamiento de entrada vrs comportamiento de salida.

La idea de hacer control es que la salida siga a la entrada, y para este caso en concreto el error en estado estacionario es de 0,7976 Voltios.

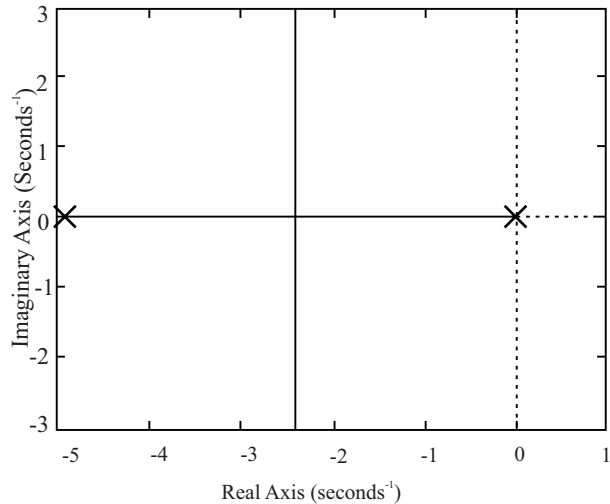
El cálculo de las diferentes acciones de control del PID se hace implementando el método de oscilación clásico de Ziegls and Nicols (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Tabla de oscilación clásico de Ziegls and Nicols.

	<b>Kp</b>	<b>Ti</b>	<b>Td</b>
<b>P</b>	0,50Kc		
<b>PI</b>	0,45Kc	Pc/2	
<b>PID</b>	0,60 Kc	0,50 Pc	Pc/8

Donde Kp es la constante de proporcionalidad del controlador, Ti es el tiempo de integración, td es tiempo derivativo, Kc es la ganancia crítica del sistema y Pc es el periodo crítico del sistema.

Para hallar la ganancia crítica del sistema se debe tener en cuenta la ubicación de los polos del sistema (Cid, 2009) (Figura 14).



**Figura 14.** Ubicación del lugar geométrico de las raíces del modelo.

Se determina que en ningún momento el lugar geométrico de las raíces pasa el eje  $jw$  (eje críticamente estable) por lo tanto si se ubica una ganancia alta siempre hay un error en estado estacionario y el sistema no oscila (Figuras 15 y 16).

Dado que no se puede hallar por método clásico la ganancia crítica se debe determinar el tiempo de

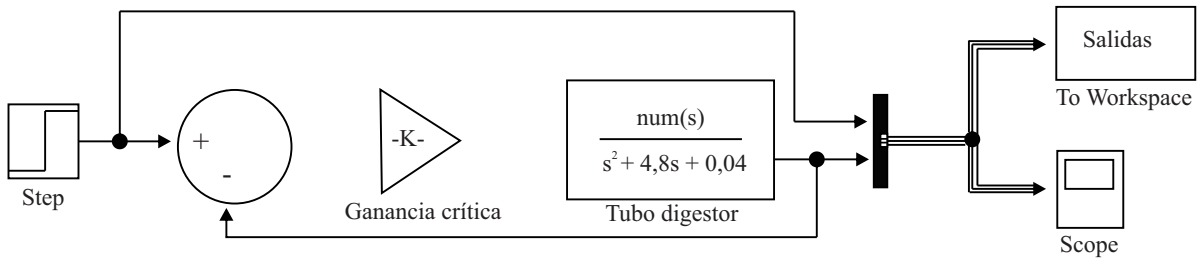


Figura 15. Diagrama de bloques retroalimentado con ganancia crítica.

integración analizando la señal de control que llega al modelo (Mazzone, 2002) (Figura 17).

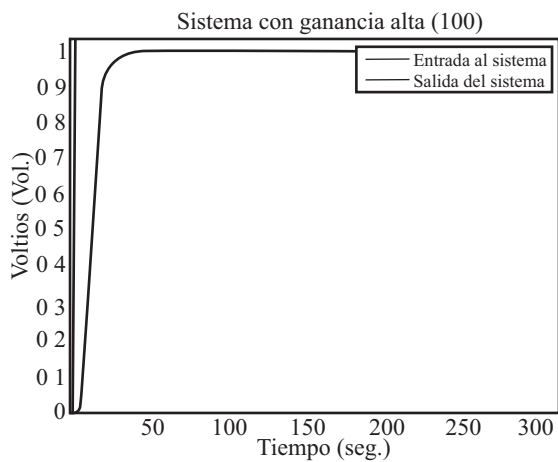


Figura 16. Comportamiento del sistema con ganancia alta.

El controlador diseñado tiene los siguientes parámetros:

- Kp (Ganancia proporcional): 28.
- Tiempo de integración: 4,16 segundos.
- Tiempo de derivación: 0,3 segundos.

Estos parámetros se obtienen al variar para obtener una

señal de control tipo trapezoidal con un tiempo inferior a 100 microsegundos de tal manera que no dañe el bloque de potencia del actuador (resistencia eléctrica) (Figura 18).

La implementación del controlador se puede realizar dentro de un micro controlador mediante ecuaciones en diferencia dentro del temporizador, para este caso se implementó en un micro controlador de la empresa Micro Chip de la familia 18 (Referencia del integrado 18f4520) el cual contiene un módulo para comunicación con PC a través de un puerto USB, de tal manera que el punto de control o seteo se puede ubicar en el PC y se pasa a la estrategia de control a través del puerto.

### Control de pH con un PID

Teniendo el diseño del controlador de temperatura se ejecuta el mismo procedimiento para el control de pH, el primer paso es definir los diagramas de bloques del modelo de planta, para esto se debe definir que actuadores son los que ejecutan una acción sobre las aguas residuales, y para este caso son dos bombas peristálticas, una que añade sustancias básicas a las aguas residuales otra que añade sustancias ácidas en caso de ser necesario, y esta necesidad está en dependencia del punto de seteo o pH deseado (Morilla, 2007) (Figura 19).

El bloque de las "Bombas peristáltica" incluye la parte

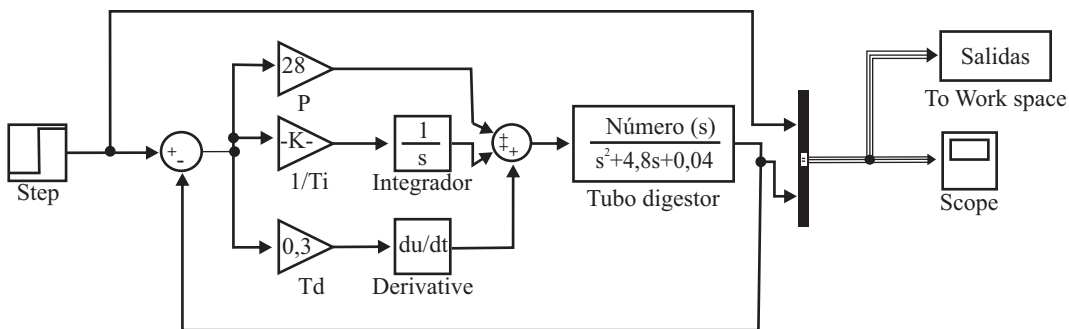


Figura 17. Diagrama de control de temperatura del tubo digestor.

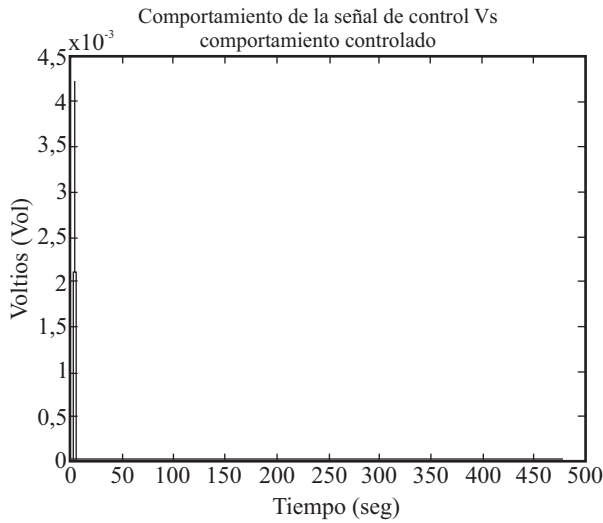


Figura 18. Señal trasciende de la señal de control usando PID.

potencia de las dos bombas (sustancias ácidas y básicas), las cuales es un seleccionador análogo mediante comparador de ventanas y una circuito controlador de modulación por ancho de pulso (PWM) (Arcos, 2011) (Figura 20), la entrada al circuito es una señal de voltaje con un rango entre [-5 5] voltios, en donde -5 voltios representa 0 pH, el 0 voltio representa el 7 en pH y 5 voltios representa 14 pH, por lo tanto el rango que representa la señal de voltaje es [0 14] pH.

El modelo en el diagrama de bloque (Figura 19) se encuentra representado por el tanque de aguas residuales y un mezclador, este último gira a una velocidad constante y cuyo funcionamiento para fines prácticos no va a ser ni monitoreada ni controlada.

La parte de Sensor de pH es de la familia Optisen pH 8100, el cual es un sensor que entrega un voltaje en micro voltios no referenciada a tierra por lo tanto es necesario una etapa de instrumentación que referencia la señal a tierra y amplifique a los rangos establecidos anteriormente (Bustos, 2008) (Figura 21).

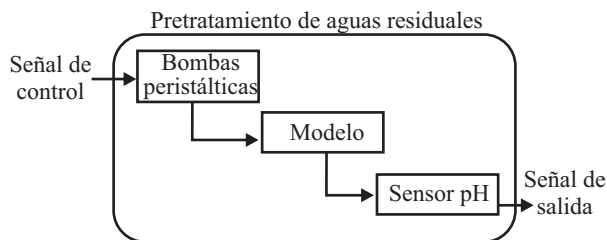


Figura 19. Diagrama de bloques del modelo de pre tratamiento de aguas residuales.

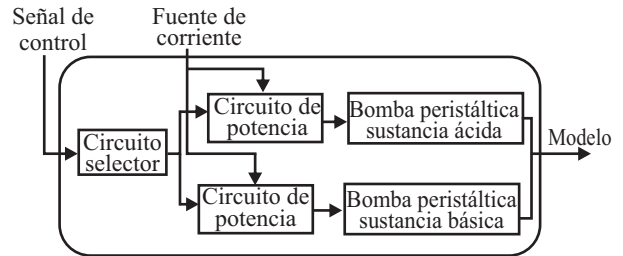


Figura 20. Diagrama de bloques de la parte de bombas peristálticas.

La identificación del sistema se realiza de la misma manera que se encontró la función de transferencia del sistema térmico del tubo digestor, usando la herramienta System Identification Tool de Matlab R2014a.

La función de transferencia hallada es la siguiente:

$$\frac{ph(s)}{E(s)} = \frac{7}{s^2 - 5s + 6} \quad (3)$$

ph(s): Define la salida de la planta en potencial de Hidrogenación.

E(s): Entrada al modelo (señal de control).

s: Se denomina variable compleja.

La función de transferencia que se espera hallar deberá ser una función que no es estable en el tiempo, dado a que a medida que se aplica una sustancia de control ácida o básica este variará hasta que la acción de control no sea nula, diferente en el caso del sistema térmico en donde se ubicaba una señal de control y este se estabilizaba; por lo tanto el control como primera medida deberá estabilizar el sistema para luego eliminar el error en estado estacionario. La figura 22 corresponde al sistema hallado.

Para este caso también se debe definir si lugar geométrico de las raíces del modelo retroalimentado pasa por el eje  $jw$  (Eje críticamente estable) (Figura 23).

Para el diseño del controlador se debe tener en cuenta que se requiere que el sistema responda relativamente rápido, dado a que entre menor tiempo dure este proceso, menor

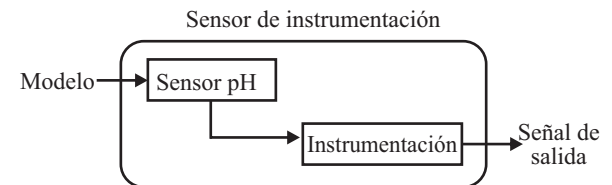
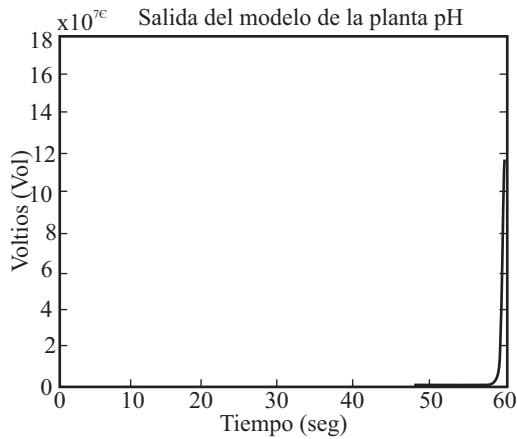


Figura 21. Diagrama de bloques de la parte de sensor e instrumentación.



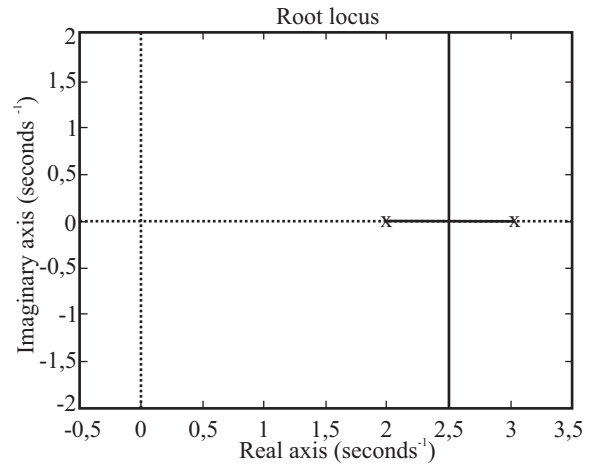


**Figura 22.** Modelo hallado con System Identification tool de Matlab R2014a.

es el tiempo del proceso total; esto determina que el comportamiento de la planta al final del controlador será de un tipo amortiguado (presencia de sobre picos), el controlador se diseña usando la herramienta de simulink de Matlab R2014a sincronizando los tiempos de integración y de derivación (Figura 24). Para este caso la acción proporcional del controlador tiene un valor 0,2 con un tiempo de integración de 1,6 segundos y un tiempo de derivación de 1,1 segundos.

El controlador se implementa en el mismo micro controlador en el que se implementó el control de temperatura pero en diferentes temporizadores, dado a que los tiempos de muestreo son diferentes ya que los tiempos de estabilización son diferentes para ambos casos, al igual que el controlador de temperatura el de pH se implementa usando ecuaciones en diferencias.

La optimización del reactor anaeróbico con respecto al mejoramiento del entorno de las bacterias es factible, mediante el monitoreo y control de la temperatura del tubo digestor y de la calidad de las aguas residuales de

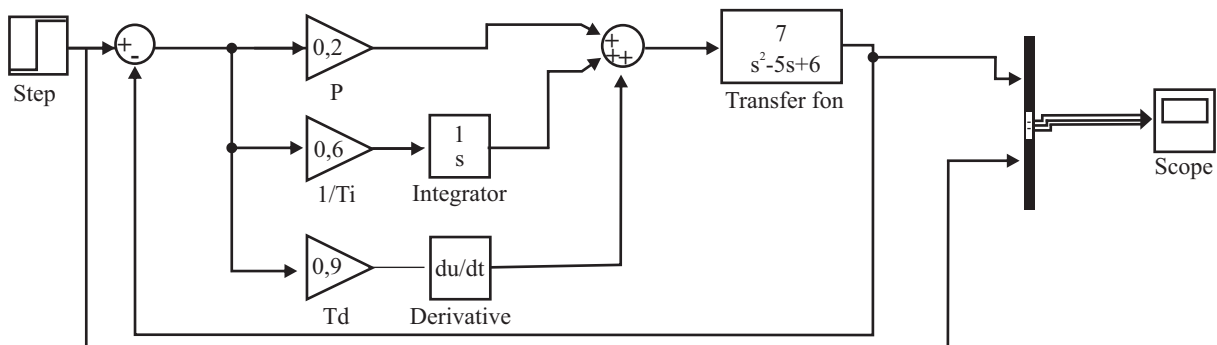


**Figura 23.** Lugar geométrico de las raíces del modelo de pre tratamiento de aguas residuales (planta pH).

entrada con respecto al pH. La optimización de los factores biológicos incrementa el porcentaje de remoción de materia orgánica de las aguas residuales hasta en un 85%, sin este cambio usando el mismo lodo se ubica en 45%.

El tiempo de estabilización de la temperatura del tubo digestor controlado se ubica en 10 minutos aproximadamente, dado a que los sistemas térmicos generalmente son lentos y más los que se encuentran definidos dentro de un fluido térmico por radiación natural y por convección. El comportamiento de la planta del tubo digestor es sobre amortiguado, por lo tanto no presenta sobre picos en la temperatura.

El tiempo de estabilización del pH de las aguas residuales es de aproximadamente 1 minuto, teniendo en cuenta que las sustancias usadas (controles ácidos y básicos) generalmente tiene un comportamiento de rápida respuesta. El comportamiento de la planta de pre tratamiento de aguas residuales (planta de pH) es un



**Figura 24.** Diagrama de bloques del controlador de pH.

comportamiento amortiguado aunque no presenta sobre picos que pasen el 2% del valor final, para este caso se presenta oscilaciones en el estado transitorio pero todas se encuentran por debajo de la entrada.

### Agradecimientos

A los ingenieros Heriberto Vargas Lozada, Freddy Antonio Verastegui González, Luis Ángel Hernández por la colaboración en la gestión de los recursos y construcción del hardware necesario para la realización de este estudio.

### Literatura citada

**Arcos (Grupo de Arquitectura y Tecnología de Computadores). 2011.** Introducción a PWM. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

**Bordóns A., C. 2000.** Departamento de Informática y Automática. Sevilla: Universidad de Sevilla.

**Bustos, A. 2008.** Nociones de Instrumentación Industrial. Consultado el 18 jun. 2014, disponible en <http://instrumentacionbustos.blogspot.com/2008/09/sensores-de-temperatura.html>.

**Cid M., J. 2009.** Notas del Curso de Control I. México D.F.: Universidad Autónoma de Puebla.

**Guarnaschelli, D. 2008.** Circuitos de disparo de tiristores para rectificadores. Santa Fe: Universidad Tecnológica Nacional.

**Inthamoussou, F. 2011.** Nociones de control robusto. Buenos aires: Universidad Nacional de La Plata.

**Mazzone, V. 2002.** Controladores PID. Buenos Aires: Universidad Nacional de Quilmes.

**Morilla G., F. 2007.** El Controlador PID. Madrid: Departamento de Informática y Automática - UNED.

**Rivera B., R. 2004.** Ingeniería en robótica industrial. México D.F: Instituto Politécnico Nacional.

**Romero A., M.; Colín C., A.; Sánchez S., E., & Ortiz H., L. 2009.** Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 25(3).

**Torralba, J. E. 2010.** Ingeniería de Control Robusto. Navarra: Universidad Pública de Navarra.

**Universidad Don Bosco. 2008.** Electrónica de potencia. Guía 4. San Salvador - Salvador: Universidad Don Bosco.

---

### Milher Fabián Tovar Rubiano

Ingeniero Mecatrónico, Esp. en Electromedicina y Gestión Tecnológica Hospitalaria. Docente Ocasional de la Universidad de La Amazonia. Grupo de Investigación en Informática, Electrónica y Comunicaciones GIECOM.

**Autor para correspondencia:**  
**E-mail: mil.tovar@udla.edu.co**

---

### Ramón Elías Molano Cosme

Estudiante de Licenciatura de Matemáticas y Física de la Universidad de la Amazonia. Grupo de Investigación en Informática, Electrónica y Comunicaciones GIECOM.

---

### Sergio Andrés Alba Lugo

Estudiante de Licenciatura de Matemáticas y Física de la Universidad de la Amazonia. Grupo de Investigación en Informática, Electrónica y Comunicaciones GIECOM.