

Prototipo de biorreactor aeróbico para el monitoreo y control del proceso de co-compostaje, a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos de plaza de mercado

Bioreactor prototype: monitoring and control for the co-composting process from organic solid waste and sewage sludge

Jesús David Zorro Millán¹, Ilber Adonayt Ruge Ruge², Gloria Lucia Camargo Millán³

¹Ingeniero Electrónico, Programa de Ingeniería Electrónica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Semillero de investigación Robótica-UPTC, Tunja, Colombia

²Magister en Ingeniería de Control Industrial, Programa de Ingeniería Electrónica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica I2E, Tunja, Colombia

³Ph.D (c) en Desarrollo Sostenible, Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigación GIGA, Tunja, Colombia
Email: ilber.ruge@uptc.edu.co

Recibido: 26/08/2018

Aceptado: 17/01/2019

Cite this article as: J. D. Zorro Millán, I. A. Ruge Ruge, G. L. Camargo Millán "Bioreactor prototype: monitoring and control for the co-composting process from organic solid waste and sewage sludge", *Prospectiva*, Vol 17, N° 1, 16-24, 2019.

RESUMEN

El artículo describe el diseño e implementación de un prototipo de biorreactor que controla temperatura y humedad, y monitorea el pH para la producción de co-compostaje usando lodos de planta de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos. El biorreactor tipo batch se desarrolla para crear un ambiente controlado con propósitos de experimentación a nivel de laboratorio e investigación en la producción de bioabonos a partir del aprovechamiento de residuos industriales y municipales. Los controladores están diseñados a partir de sistema operativo FreeRTOS e implementados en plataforma de desarrollo Arduino Mega 2560, y cuyos puntos de operación se establecen para trabajar en rangos de temperatura termofílica y variedad de rangos de humedad. Adicional, el biorreactor dispone de un sistema de comunicación para conocer el comportamiento del proceso de descomposición tanto en laboratorio como su supervisión remota en tiempo real a través de internet. Los resultados del experimento de validación muestran una baja disminución del contenido de nitrógeno del sustrato y un aumento de su pH hasta 9,87; valores fuera de rango según la norma técnica colombiana NTC 5167 Productos para la industria agrícola. Sin embargo, se evidencia rangos aceptables de calcio, aluminio, sodio y fosforo, según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos USDA.

Palabras clave: Aprovechamiento de residuos; Lodos residuales; Residuos sólidos orgánicos; Biorreactor aeróbico; Control de temperatura; Microcontrolador.

ABSTRACT

The article describes the design and implementation of a prototype bioreactor that controls temperature and humidity and monitors the pH for the production of co-composting using sewage sludge treatment plant and organic solid waste. The batch-type bioreactor is developed to create a controlled environment for experimental purposes at the laboratory level and research in the production of bioabsorbers from the use of industrial and municipal waste. The controllers are designed from the FreeRTOS operating system and implemented in the Arduino Mega 2560 development platform, and whose operation points are established to work in thermophilic temperature ranges and a variety of humidity ranges. Additionally, the bioreactor has a communication system to know the behavior of the decomposition process both in the laboratory and its remote supervision in real time through the internet. The results of the validation experiment show a low decrease in the nitrogen content of the substrate and an increase in its pH up to 9,87; values out of range according to the Colombian technical standard NTC 5167 Products for the agricultural industry. However, acceptable ranges of calcium, aluminum, sodium and phosphorus are evident, according to the Department of Agriculture of the United States USDA.

Key words: Use of waste; Sewage sludge; Organic solid waste; Aerobic bioreactor; Temperature control; Microcontroller.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población asociado con la migración de la población a las áreas urbanas y el desarrollo industrial ha llevado a una relación de consumo que resulta en problemas ambientales, sociales y económicos. Con respecto al medio ambiente, una preocupación fundamental es la falta de control y la gestión inadecuada de los residuos sólidos generados en los centros urbanos. Entre los desafíos se encuentran la gestión, el tratamiento y la eliminación adecuada de los residuos resultantes de la recolección, con énfasis en la gestión sostenible [1].

Actualmente, los residuos sólidos orgánicos de las ciudades ya no se suelen acumular en las calles sino en rellenos sanitarios en donde se descomponen de forma natural mezclados muchas veces con residuos tóxicos y no degradables, por lo que pierden su potencial para ser usados como abonos orgánicos y generan contaminación. Tal es el caso del departamento de Boyacá, en donde en la actualidad no solo existe un gran potencial para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos (RSO) de las plazas de mercado municipales, sino de los lodos producidos por plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que poseen bajos contenidos de metales pesados y se pueden aprovechar para distintas aplicaciones como el co-compostaje.

Anteriores investigaciones han señalado que las variables que mayor impacto tienen en la biodegradación de materia orgánica en compost son: la temperatura, la humedad y el pH [2-4]. La importancia de estas variables en el proceso radica en que los tipos de metabolismo y los grupos fisiológicos por medio de los cuales se lleva a cabo esta biodegradación dependen directamente de los valores de estas variables. Como lo afirma D. Turcott [5]: los productos finales de esta degradación dependerán de los tipos de metabolismo y de los grupos fisiológicos que hayan intervenido. Lo importante no es biodegradar, sino poder conducir esta biodegradación por rutas metabólicas que permitan la obtención de un producto final lo más apropiado posible, en el menor tiempo posible.

La tendencia actual en el uso de biorreactores está cambiando, ahora existe una mayor necesidad de que la tecnología de sensores se ponga al día con la innovación de la tecnología del biorreactor. Sin embargo, la industria del bioprocesamiento ha tardado en implementar la tecnología analítica, debido a los altos requisitos de los sistemas de monitoreo, y prefieren elegir métodos de detección probados y comprobados, que cada vez se están volviendo obsoletos con la aparición de reactores complejos y sofisticados [6]. P. O'Mara presenta una interesante revisión de la tecnología de sensores convencionales de la industria de bioprocesos, detalles de la próxima generación de sensores y una nueva posible dirección hacia la cual la tecnología de los sensores puede dirigirse. Esta revisión sirve de referencia para la identificación y selección de la instrumentación

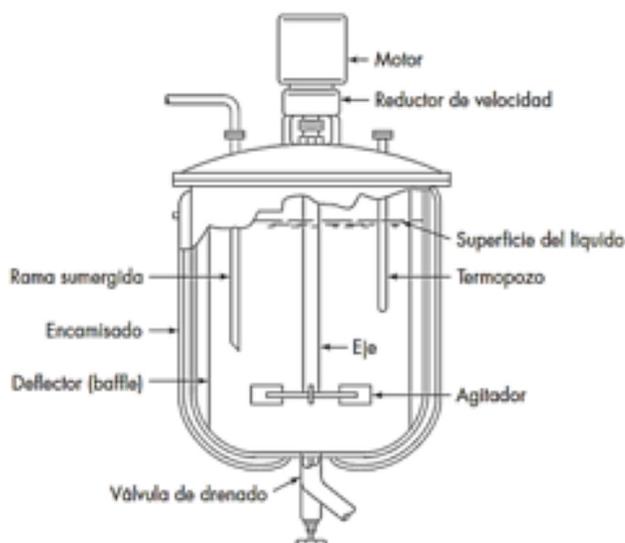
electrónica utilizada en el prototipo de biorreactor presentado en el artículo.

2. METODOLOGÍA

Para esta fase de desarrollo, no se pretende determinar rangos de operación del biorreactor, ni proporciones de la materia prima, ni procedimientos que permitan producir la mejor calidad de compost al final del proceso. El objetivo es crear una herramienta de experimentación e investigación que faciliten estos propósitos.

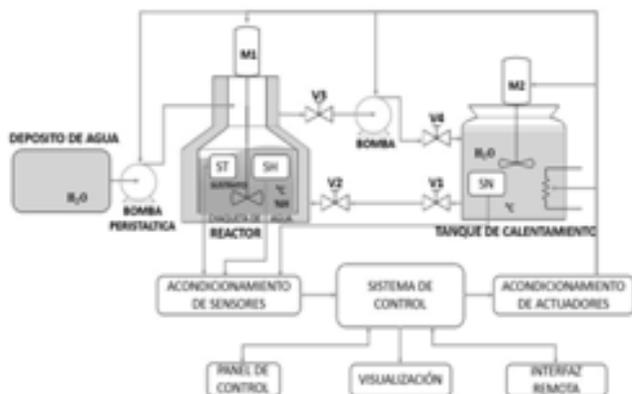
El desarrollo del biorreactor inicia con el diseño y construcción de la estructura física del prototipo, considerando los sensores y actuadores para el control de las variables de temperatura y humedad, y monitoreo de pH. El biorreactor debe controlar la temperatura en rangos mesofílicos y termofílicos (30-60°C) [7], y la humedad debe establecerse en un rango de operación de 10%-50% [2]. Existen varios tipos de reactores químicos y cada uno responde a las necesidades de una situación en particular. Los de mayor uso en la industria son los reactores discontinuos, reactores continuos, semi-continuos, tubulares, de agitación continua, de mezcla perfecta, y reactores de membrana [8]. Los reactores discontinuos o de tipo Batch, se emplean para operaciones a pequeña escala o para experimentar con procesos nuevos a escala de laboratorio; su construcción posee un grado de complejidad menor en comparación con otros tipos de reactores, además se pueden emplear para trabajar durante largos periodos de tiempo [9]. La figura 1 muestra un ejemplo de reactor tipo Batch, utilizado para la obtención de biodiesel. Este tiene un recubrimiento de agua como actuador para regular la temperatura del reactor [10], y algunas entradas para adicionar agua y controlar la humedad. Estas características son las deseadas para los propósitos del proyecto, por tanto, su configuración fue adoptada.

Figura 1. Esquema de biorreactor tipo batch encaquetado con agitación.
Figure 1. Diagram of batch bioreactor type with stirring.



Para que la temperatura se distribuya de manera uniforme en la chaqueta, se dispone de una bomba de agua para la recirculación, y un tanque de almacenamiento y calentamiento de la misma. De igual manera, se dispone de un pequeño depósito de almacenamiento para la dosificación de agua con propósitos de regulación de humedad del sustrato. Finalmente, se estableció una capacidad de depósito de reactor de 10 L suficiente para propósitos de experimentación a nivel de laboratorio. La figura 2 muestra el diagrama esquemático de la estructura del prototipo de bioreactor.

Figura 2. Estructura del prototipo de bioreactor.
Figure 2. Structure of the bioreactor prototype.



Cuatro válvulas V1 a V4 garantizan que el sistema sea modular y que cualquiera de las partes se pueda extraer de forma independiente para su mantenimiento. El flujo de agua entre la chaqueta del reactor y el tanque de calentamiento se genera por la acción de la bomba de agua caliente y es como sigue: el agua caliente sale del tanque de calentamiento hasta la chaqueta de agua del reactor atravesando las válvulas V1 y V2; el agua (más fría) de la chaqueta continúa hacia la bomba y de allí de nuevo al tanque de calentamiento, pasando por V3 y V4. De esta forma, se genera un flujo cerrado y continuo de agua que va transfiriendo por conducción la temperatura del tanque de calentamiento al reactor. Fue necesario instalar un sensor de nivel SN en el tanque de calentamiento para evitar desbordamientos de agua.

Los motores M1 y M2, impulsan un agitador para homogenizar tanto el sustrato como el agua de calefacción de la chaqueta. Esta homogenización es necesaria para acelerar el proceso de calentamiento en el reactor. Por otro lado, los sensores de temperatura ST y humedad SH están dentro del tanque del reactor y en contacto directo con los lodos a descomponer. En el tanque de calentamiento se dispuso un calefactor resistivo que permite elevar la temperatura del reactor. Finalmente, una bomba peristáltica se utiliza para dosificar la cantidad de agua que regula la humedad del sustrato, estableciendo un flujo contante de 70 mL/min.

2.1. Instrumentación electrónica del prototipo de bioreactor

Los sensores de temperatura y humedad se seleccionaron garantizando que su rango esté dentro de los valores en que

normalmente se da un proceso de compostaje satisfactorio: 30-60°C y 10-50% de humedad relativa [2]. Se requiere que la precisión de cada uno de estos permita la repetitividad de las medidas, por tanto, se fija un error probable máximo de menos de 1°C para el sensor de temperatura y de menos de 1% para el sensor de humedad relativa.

A. Sensor de temperatura

La tabla 1 muestra las principales características de algunos sensores de temperatura disponibles en el mercado.

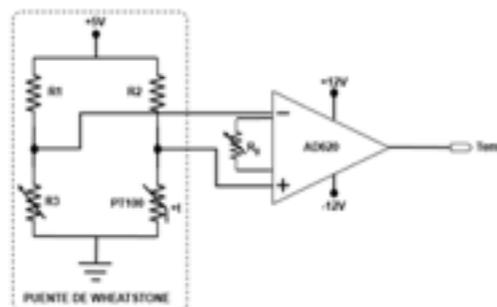
Tabla 1. Característica de sensores de temperatura disponibles en el mercado.
Table 1. Characteristics of temperature sensors available in the market.

SENSOR	CARACTERÍSTICAS	PRECIO
SHT10	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de temperatura y humedad relativa • Alimentación 5V DC • Interfaz digital: CLK y DATA • Rango de humedad: 0 - 100% • Rango de temperatura: -10 a 80 °C • Carcasa protectora 	
LM35	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor para exteriores • Sensor de temperatura • Alimentación de 4 a 20 V DC • Rango de medición: -55 a 150 °C • Encapsulado: TO-92 	\$ 65.450
DHT11	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de temperatura y humedad relativa • Alimentación: 3.3 a 5.5 V DC • Interfaz digita: modelo serial • Rango de humedad: 20 a 90% • Rango de temperatura: 0 a 50°C • Bajo consumo de potencia 	\$ 4.789
PT100	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor para exteriores • Sensor de temperatura resistivo • Rango de medición: -50 a 420°C • Protección tubular de hilo inoxidable • Cable con protección electromagnética 	\$ 7.000 \$ 40.008

De acuerdo con los requerimientos planteados para el sensor de temperatura, se escogió la RTD PT100, que además de tener un encapsulado que garantiza su operación en ambientes húmedos, presenta comportamiento lineal adecuado para instrumentar.

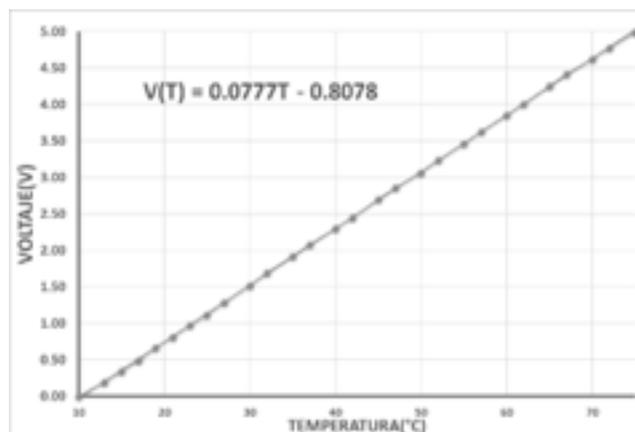
Para realizar el acondicionamiento de este sensor y garantizar una mayor precisión, se emplea un puente de Wheatstone cuya salida se amplifica por medio del amplificador operacional de instrumentación AD620; el circuito completo se observa en la figura 3. El rango de medida del sensor instrumentado se establece de 10 a 75°C, de tal forma, que se tenga un margen de medida por encima y por debajo del rango de trabajo normal de los experimentos (de 30 a 60°C).

Figura 3. Circuito de acondicionamiento para la RTD PT100.
Figure 3. Conditioning circuit for RTD PT100.



El puente se balancea de tal forma que a una temperatura de 10°C se tenga una salida de 0V. La ganancia del amplificador operacional, en cambio, se ajusta para que a una temperatura de 75°C se tengan 5V. El comportamiento y la ecuación que describen el sensor instrumentado e implementado se muestran en la figura 4.

Figura 4. Curva característica de la RTD PT100 instrumentada.
Figure 4. Characteristic curve of the instrumented PT100 RTD.



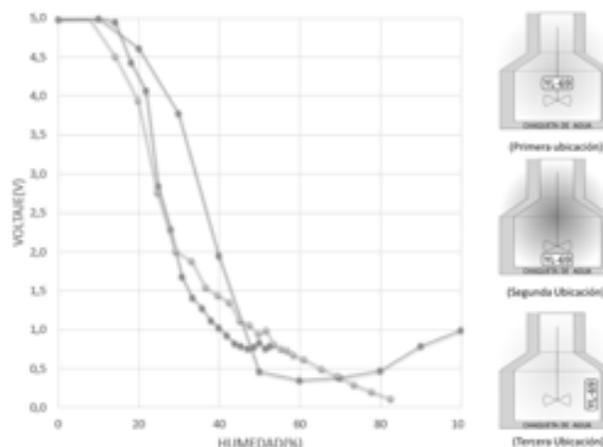
B. Sensor de humedad

Los sensores de humedad de suelos o lodos son menos comunes que sus homólogos de temperatura, su precio es mayor, y sus características de precisión y exactitud están sujetas por lo general a una previa calibración según el suelo donde se vayan a usar. Existen principalmente de tres tipos: capacitivos (incluidas las guías de onda), resistivos y nucleares.

Los sensores de tipo capacitivo son perturbados por materiales metálicos próximos al volumen que se quiere medir y dado que el material del reactor es aluminio estos sensores no son viables. Los sensores nucleares no solo tienen un gran costo, sino que, además están pensados para medidas en campos abiertos. Los sensores resistivos son los más asequibles de los tres, sin embargo, son más sensibles a las características del tipo de suelo que van a medir y por ello su previa calibración es crítica.

De acuerdo con lo anterior, se selecciona el sensor de humedad en suelos de tipo resistivo YL-69, que varía su resistencia en función de la conductividad del suelo y su salida está acondicionada de 0 a 5V. La conductividad del suelo aumenta proporcionalmente a su humedad, sin embargo, como se ha mencionado, esta relación es diferente para cada tipo de suelo. Así que primero se obtiene el comportamiento característico del sensor para el sustrato a co-compostar, en tres diferentes posiciones al interior del biorreactor, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Patronamiento del sensor YL-69 en diferentes ubicaciones en el biorreactor.
Figure 5. Patronage of the YL-69 sensor in different locations in the bioreactor.



La tabla 2 muestra el análisis estadístico para el sensor en cada una de las ubicaciones propuestas, donde se determina que la tercera ubicación es el mejor lugar para colocar el sensor. Sin embargo, posteriormente se realiza el modelo para cada una de las ubicaciones para una mejor evaluación del sensor.

Tabla 2. Probabilidad de error según ubicación de sensor YL-69.
Table 2. Probability of error according to sensor location YL-69.

Ubicación	σ promedio	Error probable promedio (%)
1a	0,060	0,8086
2a	0,032	0,1997
3a	0,029	0,1803

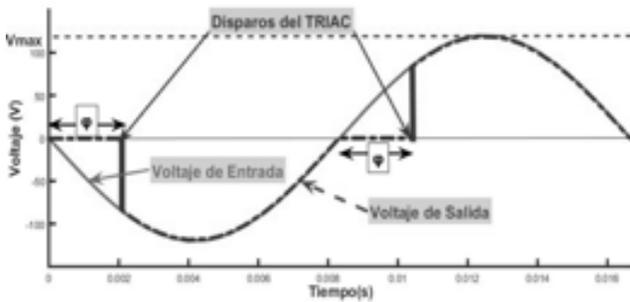
C. Acondicionamiento de actuadores

Es importante hacer una distinción en los actuadores mencionados anteriormente (bombas, válvulas, motores y calentador) se distinguen dos tipos: los proporcionales (bomba peristáltica y calefactor), que se usan para controlar las variables del proceso; y, los on/off cuyo funcionamiento, aunque vital para el proceso, no permite controlar proporcionalmente las variables de este (motores y bomba de agua caliente).

Los motores se activan por medio de un transistor en corte y saturación a modo de driver de corriente, mientras que, la bomba de agua caliente se controla activando un TRIAC a modo de switch.

En cuanto a los actuadores proporcionales, el calefactor es el responsable de elevar la temperatura del tanque de calentamiento de forma proporcional. Para lograr esto, se utiliza un corte de fase proporcional que permite la variación gradual de la potencia que se le entrega al calefactor. Este circuito se sincroniza con la frecuencia de la red eléctrica, y dispara un TRIAC a un ángulo (ϕ) determinado, variando el voltaje efectivo y por tanto, la potencia entregada al calefactor (ver figura 6).

Figura 6. Señales de voltaje entrada/salida del circuito corte de fase.
Figure 6. Signals of input /output voltage of the phase cut circuit.

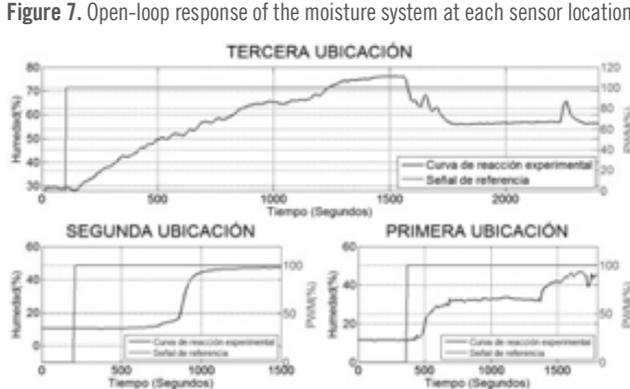


D. Sistema de control

El sistema de control se plantea en base al uso de microcontrolador, el cual debe tener módulo de comunicación serial RS-232, conversor analógico-digital ADC, modulación de ancho de pulso PWM y compatibilidad para desarrollo de algoritmo con Sistema Operativo en Tiempo Real RTOS. Este último aspecto, se considera importante para garantizar que los parámetros de diseño de los controladores se cumplan de manera eficiente, dado que el microcontrolador además de controlar deberá realizar tareas de comunicación, visualización, entre otros. La plataforma de desarrollo seleccionada es la Arduino Mega 2560 y el sistema operativo FreeRTOS.

Controlador de humedad: para determinar el modelo del sistema se realiza un experimento en cada ubicación del sensor (ver figura 5), este consiste en la aplicación de una señal PWM del 0% hasta el 100% a la bomba peristáltica, en un sustrato de humedad inicial de 11% para las primeras dos ubicaciones y de 30% para la tercera, y observar el comportamiento de la humedad durante el experimento. La figura 7 muestra la respuesta a lazo abierto del sistema de humedad para cada ubicación.

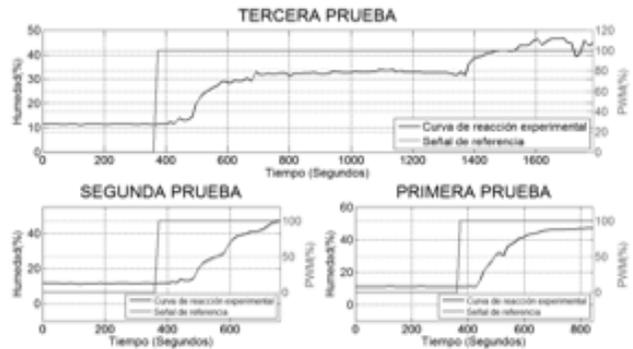
Figura 7. Respuesta en lazo abierto del sistema de humedad en cada ubicación del sensor.
Figure 7. Open-loop response of the moisture system at each sensor location.



Adicionalmente, el experimento para obtener el modelo de humedad se realiza tres veces en cada ubicación, para obtener resultados más significativos. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 8, donde se observan las tres pruebas realizadas en la primera ubicación, en cada prueba el comportamiento del sistema es distinto bajo las mismas condiciones iniciales; con un comportamiento de primer orden. Adicionalmente,

en todas las pruebas se obtiene una saturación alrededor del 45%, mientras que, el tiempo de establecimiento es de cerca de 300 min, exceptuando la tercera prueba en donde el sensor se satura inicialmente en 33% hasta que luego se homogeneiza por completo el sustrato y llega al valor esperado de saturación en 45%.

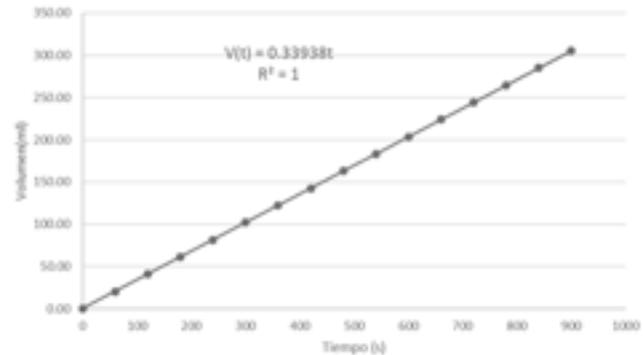
Figura 8. Pruebas realizadas en la primera ubicación.
Figure 8. Tests performed at the first location.



De acuerdo con los datos mostrados anteriormente, se determina que la lectura de humedad del sensor tiene una gran dependencia de su ubicación, de la activación del motor de volteo, y del contacto del sensor con la mezcla del sustrato, por lo cual no es posible emplear un sensor de humedad resistivo confiable en la estructura de biorreactor. Con base a esto, se escoge un sistema de control a lazo abierto para la variable de humedad.

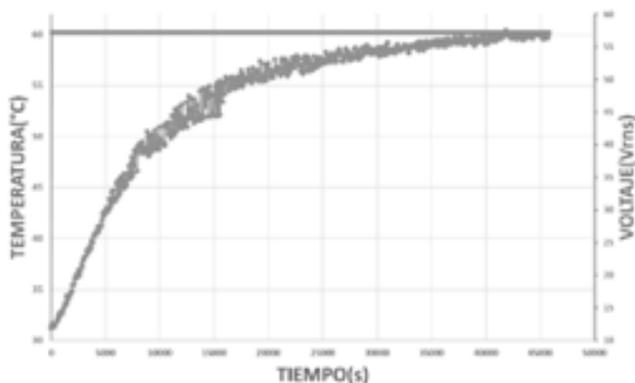
Se establece que, el sistema de control a lazo abierto de humedad calcule el tiempo en segundos que la bomba peristáltica debe encenderse para agregar el agua necesaria, con el propósito del conseguir el porcentaje humedad introducido por el usuario, de acuerdo con el caudal entregado por la bomba peristáltica (ver figura 9).

Figura 9. Caracterización de caudal de la bomba peristáltica.
Figure 9. Flow characterization of the peristaltic pump.



Controlador de temperatura: para determinar el modelo de temperatura se aplica una señal de tipo escalón a la entrada del sistema de humedad de tal forma que la respuesta abarque por completo el rango de operación requerido (30 a 60°C). El comportamiento del sistema ante este tipo de escalón se muestra en la figura 10.

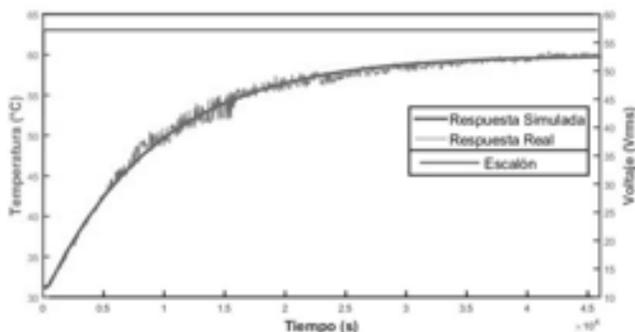
Figura 10. Curva de reacción del sistema de temperatura.
Figure 10. Reaction curve of the temperature system



La función de transferencia se calcula con base en la ganancia y constante de tiempo τ , obtenidas de la curva de reacción; cuyo resultado se muestra en la ecuación (1), además, se adiciona un tiempo muerto de 400 segundos que tarda el sistema en responder. En la figura 11 se muestra la validación de este modelo empleando el software Simulink®.

$$T(s) = \frac{0.635}{9250s + 1} e^{(-400s)} \quad (1)$$

Figura 11. Validación del modelo de temperatura.
Figure 11. Validation of the temperature model.



Debido a que el modelo de temperatura obtenido presenta un comportamiento lineal, se emplea una estructura básica de control, mostrada en la figura 12.

Figura 12. Estructura del sistema realimentado para el control de temperatura.
Figure 12. Structure of the feedback system for temperature control.



Los parámetros de diseño para el controlador se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de diseño para el controlador de temperatura.
Table 3. Design parameters for the temperature controller.

Parámetro	Rango	Descripción
Error en estado estacionario	<1,5%	Salida del sistema lo más cercana a la referencia.
Máximo sobre pico	<1,3%	Dado que no se dispone de sistema de enfriamiento, se desea que no haya sobre picos
Tiempo de establecimiento	3800s < t _s < 5400s	Cambios agresivos de temperatura pueden afectar la vida bacteria del compostaje

Usando el método de Ziegler-Nichols para sintonización de controladores PID, se calculan las constantes para cada tipo de controlador, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Constantes obtenidas por sintonización Ziegler-Nichols.
Table 4. Constants obtained by Ziegler-Nichols tuning.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	14,68	∞	0
PI	9,78	934,21	0
PID	19,41	414,93	2575,87

Al realizar la simulación de cada uno de los controladores empleando el entorno de Simulink®, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 5, donde se observa que los controladores PI y PID cumplen con los parámetros de diseños propuestos, sin embargo, el PI al tener un menor error en estado estacionario y al ser más sencillo de implementar, se escoge como el controlador a implementar en el prototipo.

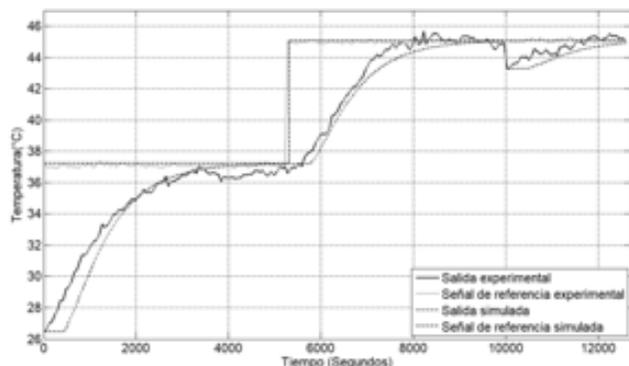
La figura 13 muestra la señal de salida simulada y experimental del controlador PI de temperatura, de acuerdo con la referencia dada, donde la señal experimental varía con relación a la señal simulada en un valor de 0,57°C en promedio, y la máxima diferencia que se encuentra entre la dos es de 2,5°C a los 480 segundos de haber empezado el experimento. De acuerdo con los parámetros de diseño, se observa que experimentalmente presenta un tiempo de establecimiento de 3820 segundos, presentando una diferencia del 5,5% con base a los 4000 segundos del tiempo de establecimiento simulado.

Tabla 5. Comparación de las respuestas obtenidas de cada controlador.
Table 5. Comparison of the results obtained from each controller.

Parámetro	Controlador		
	P	PI	PID
Estable	Si	Si	Si
Soporta perturbaciones	Si	Si	Si
Implementable	Si	Si	SI
Tiempo de establecimiento(s)	2300	4000	4000
Error en estado estacionario (%)	2,68	0,06	0,5
Sobre-pico (%)	1,22	0	0

Además, experimentalmente presenta un sobrepico de 1,1%, y un error en estado estacionario de 1,37%, valores que se encuentran dentro del rango aceptable de los parámetros de diseño escogidos para el controlador. Por último, se crea una perturbación a la salida del sistema a los 10000 segundos, aplicando agua al interior del bioreactor hasta bajar la temperatura 1,8°C y como se observa en la figura 13, el controlador corrige satisfactoriamente la acción de la perturbación.

Figura 13. Salida del controlador PI de temperatura.
Figure 13. PI temperature controller output.



E. Interface de comunicación remota

Para la implementación de la interfaz remota del prototipo se escoge la plataforma de IoT Ubidots, que provee los servicios de almacenamiento de datos, visualización y control de los dispositivos o “cosas” conectadas a ella.

Primero, en la plataforma Ubidots se crean las variables y la interfaz de usuario necesario para el control del biorreactor de forma remota con el investigador y para la visualización de la temperatura y humedad actual.

Por último, se procede a la programación de los algoritmos que permitirán la interacción entre la interfaz remota y el sistema de control. Para esto Ubidots ofrece una API (Application Program Interface) que soporta los métodos del protocolo HTTP: GET, POST, PUT y DELETE, de forma directa o mediante el uso de librerías creadas para algunas plataformas de desarrollo como Arduino.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para validar el biorreactor en el proceso de co-compostaje se plantea un experimento, donde se utiliza 300 gramos de sustrato a co-compostar, conformado 70% por de RSO de plaza de mercado, y 30% de lodos de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR). El experimento tiene una duración de 35 días, con una temperatura constante de 45°C y una humedad del 40%.

Para conocer la composición fisicoquímica inicial del sustrato, se realiza la caracterización a través del laboratorio de suelos de la UPTC, y el laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), teniendo en cuenta la norma NTC 5167 de 2004, y los rangos recomendados por los anteriores laboratorios. La tabla 6 muestra los resultados y rangos aceptables para los distintos parámetros del análisis fisicoquímico realizado al iniciar el experimento de producción de co-compostaje.

De acuerdo con la tabla 6, el sustrato se encuentra dentro de la tendencia para materiales orgánicos comercializados en el país, especialmente por su alto contenido de fósforo. Sin embargo, este debe ser estabilizado si se quiere utilizar como

enmienda orgánica, según la recomendación realizada por el laboratorio de suelo de la UPTC.

Tabla 6. Caracterización fisicoquímica del sustrato inicial.
Table 6. Physicochemical characterization of the initial substrate.

PARAMETRO	UNIDADES	VALOR	RANGO
pH	Unidades	5,3	4-9*
Humedad	%	40	<15*
Carbono orgánico	%	21,11	>5 y <15*
Nitrógeno	%	2,2	0,26-0,5**
Carbono/Nitrógeno	-	9,59	Tipo A: 10-25 Tipo B: 10-40***
Fósforo	ppm	616	20-40****
Potasio	Meq/100g	2,26	0,2-0,4****
Aluminio	Meq/100g	0,60	-
Aluminio	%	3,05	<15****
Calcio	Meq/100g	2,65	3-6****
Magnesio	Meq/100g	2,44	1,5-2,5****
Sodio	Meq/100g	1,87	0-1****
Sodio	%	19,04	<7****
Conductividad eléctrica	dS/m	8,31	0-2****
Calcio/Magnesio	Meq/100g	1,09	2-4****
Calcio/Potasio	Meq/100g	1,17	12-18****
Magnesio/Potasio	Meq/100g	1,08	6-8****
Potasio/Magnesio	Meq/100g	0,93	0,2-0,3****
Calcio+	Meq/100g	2,25	12-20****
Magnesio/Potasio	Meq/100g	2,25	12-20****
Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo	Meq/100g	9,82	10-20****

*NTC 5167 de 2004, **Díguer, ***Metcalf y Eddy, ****USDA.

Finalizado el proceso de producción de co-compostaje, se realiza nuevamente la caracterización fisicoquímica en los mismos laboratorios (ver tabla 7), para compararlos con los resultados obtenidos en la tabla 6, y con los rangos establecidos para determinar la estabilización del sustrato.

Tabla 7. Caracterización fisicoquímica del sustrato co-compostado.
Table 7. Physicochemical characterization of the co-composted substrate.

PARAMETRO	UNIDADES	VALOR	RANGO
pH	Unidades	9,81	4-9*
Humedad	%	10	<15*
Carbono orgánico	%	20,23	>5 y <15*
Nitrógeno	%	3,3	0,26-0,5**
Carbono/Nitrógeno	-	6,13	Tipo A: 10-25 Tipo B: 10-40****
Fósforo	ppm	503	20-40****
Potasio	Meq/100g	49,71	0,2-0,4****
Aluminio	Meq/100g	0,00	-
Aluminio	%	0,00	<15****
Calcio	Meq/100g	4,14	3-6****
Magnesio	Meq/100g	0,21	1,5-2,5****
Sodio	Meq/100g	5,06	0-1****
pH	Unidades	9,81	4-9*
Humedad	%	10	<15*
Carbono orgánico	%	20,23	>5 y <15*
Nitrógeno	%	3,3	0,26-0,5**
Carbono/Nitrógeno	-	6,13	Tipo A: 10-25 Tipo B: 10-40****
Fósforo	ppm	503	20-40****
Potasio	Meq/100g	49,71	0,2-0,4****
Aluminio	Meq/100g	0,00	-
Aluminio	%	0,00	<15****
Calcio	Meq/100g	4,14	3-6****
Magnesio	Meq/100g	0,21	1,5-2,5****
Sodio	Meq/100g	5,06	0-1****

Los datos de la tabla 7 indican que el pH aumentó hasta un valor de 9,81 unidades, mayor al valor máximo de 9 unidades recomendado por la NTC 5167. Por otro lado, el valor de carbono orgánico (20,23%) aunque disminuyó con relación al valor inicial (21,11%), sigue estando alto en relación a la norma (entre 5% y 15%), al igual que el porcentaje de nitrógeno final (3,3%), debido a que, aunque aumentó en relación al valor obtenido inicialmente (2,2%), este sigue estando fuera del rango establecido por Dágner, y debido a los anteriores valores, la relación C/N disminuyó considerablemente a un valor de 6,13, alejándose más del rango establecido por Metcalf y Eddy.

Según el análisis de los resultados finales realizados por la ingeniera Gloria Camargo del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en un proceso de producción de compost se tiende a disminuir el nitrógeno total del sustrato. Sin embargo, al no alcanzar temperaturas superiores a 45°C, no hubo pérdida de nitrógeno por volatilización en forma de amoníaco y, al contrario, se subió el porcentaje de nitrógeno en el suelo. En cuanto al pH, se observa que supera el rango recomendado por la NTC 5167 por 0,81 unidades, debido a que el volteo del sustrato no se logró realizar adecuadamente, creando una capa en la superficie que disminuye la actividad aeróbica de los microorganismos.

Finalmente, el prototipo a nivel estructural y funcional cumple con características básicas para ser utilizado a nivel de laboratorio, para experimentar con diferentes composiciones de sustrato y diferentes puntos de operación de temperatura y humedad. Lo anterior, considerando que, a nivel investigativo, este tipo de experimentos en ambiente controlado, pueden arrojar resultados orientados al establecimiento de condiciones adecuadas para la obtención de bioabonos óptimos.

4. CONCLUSIONES

Los controladores PI y PID diseñados cumplen con un error en estado estacionario menor a 1,5%, un sobre pico menor a 1,3%, y un tiempo de establecimiento entre 3800 s y 5400 s. Sin embargo, el controlador PI al tener un error en estado estacionario 0,44% por debajo del PID y al ser más sencillo de implementar, se escoge como el controlador usado en el prototipo. Al implementar el controlador PI, la salida de temperatura experimental varía con relación a la salida simulada en un valor de $\pm 0,57^\circ\text{C}$ en promedio, y la máxima diferencia que se encuentra entre la dos es de $2,5^\circ\text{C}$. De acuerdo con los parámetros de diseño, se observa que experimentalmente presenta un tiempo de establecimiento de 3820 s, presentando una diferencia del 5,5% con base a los 4000 s del tiempo de establecimiento simulado. Además, experimentalmente presenta un sobre-pico de 1,1%, y un error en estado estacionario de 1,37%, valores que se encuentran dentro del rango aceptable de los parámetros de diseño escogidos para el controlador. Por otro lado, el uso de un sistema operativo en tiempo real (RTOS) hace posible el cumplimiento estricto del tiempo de muestreo de 60 s del controlador PI, al mismo

tiempo que se ejecutan las tareas de comunicación con la plataforma Ubidots, visualización del estado de la temperatura y humedad actual en la pantalla LCD, la ejecución del sistema de control a lazo abierto para humedad.

La temperatura de 45°C propuesta para el experimento de producción de co-compost, no es lo suficientemente alta para reducir el nitrógeno total del sustrato, y en consecuencia se produce un aumento del mismo hasta alcanzar un valor de 3,3%. Adicionalmente, el pH se incrementa hasta un valor de 9,87 unidades, fuera del rango establecido por la NTC 5167 de 2004, debido a la realización de un volteo ineficiente. Sin embargo, elementos como el calcio, aluminio y sodio se encuentran dentro de los niveles permitidos por la USDA, y se obtiene un co-compost rico en fósforo y potasio. De acuerdo con lo anterior, el co-compost producido no se logra estabilizar por completo.

REFERENCIAS

- [1] A. Melare, S. Montenegro, K. Facelli, V. Casadei, "Technologies and decision support systems to aid solid waste management: a systematic review", *Waste Management*, 59, 567-584, 2017.
- [2] M. Awasthi, K. Pandey, A.K Khan, J. Bundela, "Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting", *Bioresource Technology*, 168, 214-221, 2014.
- [3] S. Shatir, S. Hassan, Y. Wang, S. Hu, S. Su, J. Xiang, "Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations", *Renewable and sustainable energy reviews*, 80, 888-913, 2017.
- [4] E. Oviedo, L. Marmolejo, P. Torres, "Evaluation of the Addition of Wood Ash to Control the pH of Substrates in Municipal Biowaste Composting", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15, 469-478, 2014.
- [5] D. Turcott, A. Lopez, M. Cuartas, A. Garcia, "Using indicators as a tool to evaluate municipal solid waste management: A critical review", *Waste Management*, 80, 51-63, 2018.
- [6] P. O'Mara, A. Farrell, J. Bones, K. Twomey, "Staying alive! Sensors used for monitoring cell health in bioreactors", *Talanta*, 176, 130-139, 2018.
- [7] N. Jin, W. Li, Z. Shou, H. Yuan, Z. Lou, N. Zhu, Ch. Cai, "Comparison of effects of ferric nitrate additions in thermophilic, mesophilic and psychrophilic aerobic digestion for sewage sludge", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 67, 346-354, 2016.
- [8] G. Jaramillo, L. Zapata (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Monografía Especialización en Gestión Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
- [9] C. Coronel (2014). Diseño y construcción de un reactor tipo Batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK, Trabajo de Pregrado, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Internacional SEK.
- [10] N. Lombeida (2015). Diseño de un reactor tipo Batch para la obtención de biodiesel a partir de aceite de ricino (*Ricinus communis*). Trabajo de Pregrado, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial, Escuela Politécnica Nacional.