

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 SOLIDOS ORGÁNICOS DE PLAZA DE MERCADO

DAVID ALEJANDRO CHAPARRO MONTENEGRO

JESÚS DAVID ZORRO MILLÁN

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
TUNJA
2017**

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 SOLIDOS ORGÁNICOS DE PLAZA DE MERCADO

DAVID ALEJANDRO CHAPARRO MONTENEGRO

JESÚS DAVID ZORRO MILLÁN

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Director del Proyecto
Ing. MSc ILBER ADONAYT RUGE**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
TUNJA
2017**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 11 de agosto de 2017

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación.

Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen.

Dedico este proyecto a mi Dios y Señor quien sostiene mi vida y la vida de todos los que me rodean, a El sea para siempre la Gloria. Agradezco también a mi familia, a mis padres, Luis y Marta, y a mi hermana Lina a quienes nunca terminaré de agradecer su inmenso amor y apoyo en todo momento de mi vida.

David Chaparro

Dedicado este trabajo a mis padres, Isaías y Myriam, que por su esfuerzo, apoyo y dedicación he podido cumplir mis objetivos y sueños, a mis hermanos, Miguel y Ángela, que han sido mis ejemplos a seguir y mi motivación en los proyectos de vida.

Jesús David Zorro Millán

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros padres y hermanos, por darnos la sabiduría para emprender los retos y proyectos a los que nos enfrentamos cada día, y por el esfuerzo y apoyo para ayudarnos a cumplir nuestros sueños.

Al ingeniero Ilber Adonayt Ruge, y a la ingeniera Gloria Lucia Camargo Millán, por asumir este reto con nosotros y asesorarnos en cada paso para la realización del proyecto.

A los ingenieros de la escuela de ingeniería electrónica: Orlando Fernández Naranjo, Oscar Fernando Vera, Jairo Alonso Mesa Lara, Edward Wilder Caro Ánzola, Josie Esteban Rodríguez, por acompañarnos en nuestro proceso de formación como ingenieros; y especialmente a los ingenieros Oscar Hernández y Fabián Jiménez, por aclarar las dudas que tuvimos en cada una de sus áreas de experiencia en el transcurso de la carrera, y en el desarrollo de este proyecto.

A Jairo Pacheco Ruano y Cesar Andrés Castañeda, por la colaboración prestada en los laboratorios de ingeniería electrónica de la UPTC. Así como a Julián Camilo Contreras Álvarez y Ligia Tarazona, por la asesoría y ayuda dada en el manejo de instrumentos y procesos realizados en el laboratorio de ingeniería ambiental.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
JUSTIFICACIÓN.....	19
OBJETIVOS	21
1. MARCO TEÓRICO.....	22
1.1 COMPOSTAJE Y CO-COMPOSTAJE.....	22
1.2 PRODUCCIÓN DE COMPOST USANDO UN BIORREACTOR	27
1.3 SISTEMAS DE CONTROL EN BIORREACTORES.....	29
1.4 SISTEMAS OPERATIVOS EN TIEMPO REAL (RTOS).....	32
1.5 EL INTERNET DE LAS COSAS (IoT)	36
2. DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE BIORREACTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE CO-COMPOSTAJE	38
2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA FÍSICA Y DISEÑO GENERAL DEL BIORREACTOR AEROBICO	39
2.2 INSTRUMENTACIÓN PARA LA PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE CO-COMPOSTAJE	42
2.2.1 Selección de los sensores de temperatura, humedad y nivel.....	42
2.2.2 Circuito de acondicionamiento para sensor PT100 y YL-69.....	44
2.2.3 Acondicionamiento de actuadores.	52
2.3 SISTEMA DE CONTROL.....	57
2.3.1 Controlador de humedad.	60
2.3.2 Controlador de temperatura.	62
2.4 INTERFAZ REMOTA.....	72
3. EXPERIMENTO PARA PRODUCCIÓN DE CO-COMPOST	77
3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUSTRATO PARA EL PROCESO DE CO-COMPOSTAJE.....	78
3.2 DESEMPEÑO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN EL BIORREACTOR DURANTE EL PROCESO DE CO-COMPOSTAJE.....	79
3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUSTRATO DEL PROCESO DE CO-COMPOSTAJE.....	81

4. LOGROS	84
4.1 CONVOCATORIA CEDEC 001-2015	84
4.2 DOCUMENTAL REALIZADO POR EDUMEDIOS UPTC.....	84
4.3 PONENCIA EN XII CONGRESO INTERNACIONAL ELECTRONICA Y TECNOLOGIAS DE AVANZADA	85
4.4 CONFERENCIA Y SEMINARIO SOBRE LA GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS	85
5. CONCLUSIONES	86
6. RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFIA	88
ANEXOS	91

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Etapas el proceso de co-compostaje.	24
Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del proceso de compostaje.	25
Tabla 3. Características de los RTOS más usados.	35
Tabla 4. Sensores de temperatura disponibles en el mercado.	43
Tabla 5. Comparación de la precisión de las diferentes ubicaciones del sensor de humedad YL-69 dentro del biorreactor.	49
Tabla 6. Tareas que implementan la aplicación del software de procesamiento. ...	59
Tabla 7. Pines necesarios para la implementación del sistema de control.	60
Tabla 8. Parámetros de diseño del controlador PID.	67
Tabla 9. Constantes obtenidas por Ziegler-Nichols.	68
Tabla 10. Comparación de parámetros obtenidos mediante Ziegler-Nichols.	68
Tabla 11. Constantes obtenidas por sintonización empleando Simulink®.	68
Tabla 12. Comparación de parámetros obtenidos mediante sintonización en Simulink®.	69
Tabla 13. Comparación de proveedores de servicios de IoT	73
Tabla 14. Variables creadas en Ubidots	74
Tabla 15. Caracterización fisicoquímica del sustrato inicial.	78
Tabla 16. Comparación de la humedad medida por el método de secado antes y después del experimento.	80
Tabla 17. Caracterización fisicoquímica del sustrato co-compostado.	81

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Temperatura durante el proceso de compostaje en diferentes pilas.	23
Figura 2. Cambios de pH en pilas de compostaje en días.	26
Figura 3. Relación C/N durante el proceso de compostaje.	27
Figura 4. Tipos de biorreactores.	29
Figura 5. Sistema de control a lazo abierto para temperatura en un biorreactor. ...	30
Figura 6. Estructura de control PID para temperatura en un biorreactor aeróbico.	31
Figura 7. Diagrama de bloques de controlador PID discretizado.	32
Figura 8. Estados de las Tareas y sus transiciones. Vista simplificada (derecha) vista completa (izquierda).	34
Figura 9. Transiciones entre dos tareas con diferente prioridad.	34
Figura 10. Esquema de comunicación entre los elementos que componen una aplicación de IoT	37
Figura 11. Concepto general de las funciones que debe desempeñar el prototipo de biorreactor.	38
Figura 12. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).	41
Figura 13. Soporte físico del prototipo de biorreactor. Derecha: con panel abierto, Izquierda: con el biorreactor, tanques y bombas.	42
Figura 14. Diagrama de bloques del acondicionamiento de sensores.	44
Figura 15. Circuito de acondicionamiento del sensor RTD PT100.	45
Figura 16. Sensor YL-69 y acondicionamiento YL-38.	48
Figura 17. Pruebas para determinar ubicación del sensor dentro del biorreactor. ..	49
Figura 18. Diagrama de flujo implementado en PIC16F873A.	52
Figura 19. Diagrama de bloques del acondicionamiento de actuadores.	53
Figura 20. Circuito de driver DC para manejar bomba peristáltica, motor de agitación y motor de volteo.	53
Figura 21. Diagrama esquemático del circuito de corte de fase.	55
Figura 22. Algoritmo del PIC16F88 para el control de fase.	56
Figura 23. Disposición de los elementos del panel. Arriba: diseño, abajo: implementación.	57
Figura 24. Funciones que realiza el sistema de control.	58
Figura 25. Respuesta en lazo abierto del sistema de humedad.	61
Figura 26. Curva característica de temperatura respecto a PWM.	63
Figura 27. Curva característica Temperatura vs Voltaje RMS en zona de trabajo.	63
Figura 28. Respuesta a lazo abierto del sistema de temperatura.	64

Figura 29. Comparación del modelo obtenido con la curva de reacción experimental.	65
Figura 30. Validación del modelo de temperatura ajustado.....	66
Figura 31. Estructura del sistema realimentado para el control de temperatura. ...	66
Figura 32. Recta tangente a la curva en el punto de mayor pendiente.	67
Figura 33. Salida del controlador PI de temperatura.	70
Figura 34. Señal de control del controlador PI.	71
Figura 35. Señal de error del controlador PI.	72
Figura 36. Tablero en Ubidots para la interacción remota con el prototipo.....	74
Figura 37. Algoritmo implementado por la tarea de envío de datos a Ubidots.....	75
Figura 38. Algoritmo implementado por la tarea de recepción de datos a Ubidots.	76
Figura 39. Residuos de plaza de mercado después de secar.....	77
Figura 40. Comportamiento de la temperatura durante el experimento de producción de co-compostaje. Izquierda: variable y referencia. Derecha: desviación promedio de la referencia.	80
Figura 41. Comparación de la salida del sensor YL-69 con la humedad calculada por el controlador a lazo abierto.....	81

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Análisis estadístico de los acondicionamientos de sensores.....	91
ANEXO B. Circuitos esquemáticos.....	95
ANEXO C. Diagrama de flujo de cada tarea del sistema de control.....	98
ANEXO D. Diagrama de bloques empleado en Simulink® para la evaluación de cada tipo de controlador.....	102

RESUMEN

El presente documento expone la construcción de un prototipo de biorreactor aeróbico para supervisar y controlar, a nivel experimental, el proceso de co-compostaje de lodos residuales y residuos sólidos. El prototipo controla las variables de temperatura y humedad, con el fin de facilitar la experimentación orientada a mejorar la calidad del bio-abono que se obtiene del proceso de co-compostaje. Este trabajo se desarrolla como parte de la actividad de investigación del semillero de Robótica UPTC en el grupo de investigación I²E, adscrito al Programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en conjunto con el Grupo de Investigación en Geomática y Ambiente (GIGA), adscrito al Programa de Ingeniería Ambiental.

En cumplimiento del objetivo de este proyecto, se ha construido un biorreactor que permite controlar las variables de temperatura y humedad en el proceso experimental de co-compostaje para la producción de bioabono. El proceso es aplicable a residuos sólidos de plaza de mercado y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales del departamento de Boyacá. Para lograr el control de la temperatura se usa un biorreactor enchaquetado tipo batch, en conjunto con un sensor RTD PT100, y un sistema de recirculación y calentamiento proporcional de agua. Para el control de la humedad se usa una bomba peristáltica que agrega agua al biorreactor desde un depósito, y el sensor resistivo YL-69 para capturar los valores de humedad. Como sistema de control digital, se emplea la plataforma de desarrollo Arduino Mega 2560, usando el sistema operativo en tiempo real FreeRTOS para cumplir con las demandas de tiempo que requiere la aplicación. Además, se emplea la plataforma Ubidots como interfaz remota para el control y monitoreo de la temperatura y humedad, y la manipulación de agitadores del prototipo.

Se implementa un controlador PI para temperatura, caracterizado por tener un error en estado estacionario, un sobrepico y un tiempo de establecimiento acordes a los parámetros de diseño establecidos. Además, se realiza un sistema de control a lazo abierto para humedad, debido a que la medición del sensor YL-69 varía dependiendo el contacto que tenga con el sustrato, el cambio de la conductividad eléctrica del mismo durante el proceso de co-compostaje, y la temperatura al interior de biorreactor. Por último, se realiza un experimento de producción de co-compostaje a una temperatura de 45°C y una humedad del 40% durante 35 días, en el cual no se logra obtener un co-compost totalmente estabilizado, debido a la formación de una capa en la superficie del sustrato, que evita la actividad aeróbica de los microorganismos.

INTRODUCCIÓN

El empleo de los residuos sólidos en la agricultura no es cosa nueva. Desde tiempos remotos los desperdicios de los animales mezclados con materia vegetal fueron usados normalmente en los campos colombianos. Como por sí solos no resultaban suficientes, los campesinos aprovecharon los residuos procedentes de las ciudades, especie de compost fermentado en las calles. De este modo se aliviaba al mismo tiempo, el problema que para las ciudades suponían las basuras, causa de numerosas enfermedades y epidemias¹.

En la actualidad dicha situación ha cambiado muy poco, 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^{2,3,4}. 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 Liang⁵ “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

¹ LÓPEZ, Macías. El compostaje y su proceso histórico. En: Compostaje de residuos orgánicos. Cali: Universidad del Valle, 2002 1-3 p. ISBN 958-67-0187-5.

² AWASTHI, Mukesh, *et al.* Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. En: Bioresource Technology. September, 2014. vol. 168, p. 214-221.

³ LIANG, C, *et al.* The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. En: Bioresource Technology. Enero, 2003. vol. 86, no. 2, p.131.

⁴ OVIEDO, Edgar, *et al.* Evaluation of the Addition of Wood Ash to Control the pH of Substrates in Municipal Biowaste Composting. En: Ingeniería investigación y tecnología, vol. 15, p. 469-478.

⁵ Colomer, F. y Gallardo, A. En: Tratamiento y gestión de residuos sólidos. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. ISBN 9788483630716

biodegradación por rutas metabólicas que permitan la obtención de un producto final más apropiado, en el menor tiempo posible”.

En la ciudad de Tunja ya se han llevado a cabo experimentos para producir compostaje, con resultados no tan satisfactorios a causa de la falta de control de las variables del proceso, en especial de la temperatura y humedad⁶. Con el fin de hacer un aporte a la solución de este problema, mediante la presente investigación se ha construido un prototipo para controlar y estudiar el impacto de la temperatura y humedad en el proceso de co-compostaje. Para alcanzar este objetivo, en primer lugar, se realizó el diseño y la construcción de la estructura física del prototipo, para lo cual, se decidió previamente el uso de un biorreactor y se seleccionaron los actuadores que permiten el control de las variables antes referidas. En segundo lugar, se llevó a cabo la instrumentación del prototipo. Para esto, se instalaron y acondicionaron los sensores que mejor ajuste mostraron a los requerimientos del proceso, y se diseñaron los circuitos para interactuar con los actuadores del mismo. En tercer lugar, se generaron los modelos matemáticos de las variables de investigación. En cuarto lugar, se diseñaron y evaluaron los controladores correspondientes a cada variable, con base en los modelos obtenidos. En quinto lugar, se evalúan los controladores de temperatura y humedad, verificando el cumplimiento de los requerimientos del proceso planteados en tiempo de diseño. En sexto lugar, se crea una interfaz web de usuario, para supervisar de manera remota cada variable. Finalmente, se realizó un experimento de producción de co-compost, durante 30 días continuos para establecer el desempeño del prototipo durante el proceso de co-compostaje.

⁶ ESTUPIÑAN, Sandra. Factibilidad técnico-económica y ambiental para estabilización de lodos de la PTAR de Nobsa. Trabajo de grado Magíster en ingeniería ambiental. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de ingeniería. Escuela de posgrados de ingeniería, 2015. 110 p.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial se han realizado varias investigaciones acerca del compostaje con la finalidad de mejorar la calidad del producto para ser utilizados en la agricultura como fertilizantes o recuperadores de suelos. Un ejemplo es el estudio realizado por la Universidad Rani Durgavati en India, en el cual utilizan diferentes volúmenes de fracciones orgánicas de residuos sólidos urbanos para efectuar el proceso de compostaje; en este experimento se resalta la importancia de la temperatura en el proceso como indicador de la transformación del sustrato en el proceso de compostaje en tiempo real, eso debido a que los cambios de temperatura permiten conocer la actividad microbiana a lo largo del proceso, al igual que determinar la estabilidad del material orgánico⁷. Además, como se expone en el estudio realizado por la Universidad de Georgia, donde se realiza un experimento de compostaje utilizando lodos de tratamiento de aguas residuales municipales con seis temperaturas y cinco contenidos de humedad diferentes, con el objetivo de determinar la relación entre estas variables con la actividad microbiana en el compostaje; se prueba que el contenido de humedad es un factor dominante que impacta en la actividad microbiana aeróbica de la mezcla de compostaje. La mejor respuesta en la actividad microbiana se da con contenidos de humedad mayores al 50%. El estudio concluye que el contenido de humedad en el proceso de compostaje es una variable que se debe controlar para tener mayor actividad microbiana y obtener resultados significativos en menor tiempo⁸. Otros trabajos donde se observa la importancia de las variables de temperatura y humedad en el proceso de compostaje fueron realizados en Portugal⁹, India¹⁰, y Colombia¹¹.

A nivel nacional, en el Jardín Botánico de la Universidad de Caldas en Manizales, se realizó un ensayo demostrativo para la obtención de compost con base en residuos urbanos bajo las condiciones climáticas locales. El experimento tuvo una duración de cinco meses para obtener abono a la intemperie. En contraste, el autor realizó el mismo experimento bajo cubierta de invernadero, donde el tiempo promedio para la obtención de abono fue de cincuenta y cinco días. Por lo anterior, concluye que la lluvia en las pilas de compost a la intemperie permite una biodegradación incontrolada y la lixiviación de los nutrientes, pues esta condición

⁷ AWASTHI. Op. cit., p. 221.

⁸ LIANG. Op. cit., p. 136.

⁹ ALVARENGA, Paula *et al.* Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *En: Waste Management*. Junio, 2015, vol. 40 no. 3. p. 44-52.

¹⁰ AWASTHI, Mukesh, *et al.* Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic. *En: Bioresource Technology*. Abril, 2015, vol. 182. p. 200-207.

¹¹ OVIEDO, Edgar, *et al.* Op. cit., p. 469-478.

climática interfiere en los tres factores de mayor incidencia en la biodegradación, lo cuales son la temperatura, la humedad, y la oxigenación¹². Los resultados mostrados en esta investigación muestran la importancia de generar el proceso de producción de compostaje en ambientes controlados.

De las investigaciones anteriores se observa que la temperatura y humedad son dos de las variables más importantes en el proceso de compostaje, pues afectan directamente el tiempo de biodegradación y la calidad del producto final, y se da la necesidad de un ambiente controlado en el cual estos factores tengan los valores deseados para realizar el proceso de compostaje adecuado.

Este trabajo se realiza dentro del marco del proyecto de investigación Evaluación del proceso de co-compostaje de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales y de residuos sólidos orgánicos de plaza de mercado e implementación del prototipo a nivel piloto para el control de la obtención de bioabono del grupo GIGA en la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UPTC.

¹² CASTILLO, Carlos. Elaboración de compost en Manzales a partir de residuos orgánicos urbanos. En: Lunazul. Agosto, 2006. p. 1-5.

JUSTIFICACIÓN

En el siglo XIX, especialmente en Francia, se empleó un compost, bastante imperfecto, con el que se obtuvieron excelentes resultados en el tratamiento de las nuevas tierras puestas en explotación. Posteriormente, se realizó el primer desarrollo significativo del compostaje, como proceso sistematizado, el cual tuvo lugar en India en 1925, y luego fue introducido en Europa y Estados Unidos en 1948. El objetivo principal fue la puesta a punto de un sistema sanitario de eliminación de residuos, siendo el objetivo secundario la utilización del compostaje resultante. Para 1969 existían en el mundo unas 2600 plantas de compost de las cuales 2500, de pequeño tamaño, se encontraban en India. En Estados Unidos funcionaban 18 de estas plantas, 13 en Australia, 9 en Alemania y 4 en España. Los tamaños de las plantas van desde 20 a 1000 t/día, si bien el tamaño más frecuente y rentable oscila entre las 100 y 300 t/día. Por otro lado, en Estados Unidos, cuando el compostaje estaba en su auge, solo el 1% de los residuos sólidos urbanos se transformaban en compost. Mientras que, en Europa, la fracción de residuos compostados no llega al 2%. No obstante, el país que va en cabeza en plantas de compostaje es Holanda, ya que, en 1969, el 17% de las basuras eran tratadas por este procedimiento¹³.

En el departamento de Boyacá se han realizado estudios, que demuestran que los lodos de PTAR poseen bajos contenidos de metales pesados, y junto con los residuos sólidos generados en las plazas de mercado, se pueden aprovechar para distintas aplicaciones. En la producción de alimento animal, por ejemplo, se requiere que el producto se consuma en el menor tiempo posible dado su alto contenido de humedad, además, es necesaria una correcta planificación que considere los tipos de productos, cantidad y periodos de tiempo en que se consumirá el alimento¹⁴. Otra aplicación que reutiliza los desechos de planta de tratamiento de aguas residuales y los residuos de plaza de mercado es el compostaje, un proceso natural y bioxidativo, donde intervienen diferentes microorganismos aerobios que requieren una humedad y temperatura adecuada. Una última aplicación que emplea estos desechos es el llamado lombricultivo, en el cual se utiliza una especie doméstica de lombriz, como una herramienta de trabajo para reciclar todo tipo de materia orgánica y producir humus, carne y harina de lombriz. La lombricultura es un negocio de expansión que tiene gran potencial para recuperar suelos en zonas rurales¹⁵. De todas las aplicaciones anteriormente descritas, el compostaje aerobio es el proceso

¹³ LÓPEZ. Op. cit., p. 1-3.

¹⁴ VALDERRAMA, Martha. Factibilidad de aprovechamiento de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá). Trabajo de grado Magíster en desarrollo sostenible y medio ambiente. Manizales. Universidad de Manizales. Facultad de ciencias contables económicas y administrativas. 2013. 74 p.

¹⁵ JARAMILLO, Gladys y ZAPATA, Lilibiana. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Trabajo de grado Especialista en gestión ambiental. Medellín. Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería. Posgrados de ambiental. 2008. 116 p.

biológico utilizado con más frecuencia para la conversión de la fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), a un material húmico estable conocido como compost. El proceso se efectúa mediante la fermentación controlada (control de temperatura, humedad y aireación), de la fracción orgánica de los RSU por poblaciones de microorganismos aerobios (bacterias, hongos, y actinomicetos).

El proceso de compostaje se puede definir como una descomposición biológica aerobia que ocurre bajo condiciones controladas, mediante la cual la materia orgánica heterogénea se transforma en un producto homogéneo conocido como "compost". La calidad de este compost es variable y depende principalmente del tipo de materia orgánica utilizada, la presencia de aditivos, la técnica de compostaje y el tiempo de duración del proceso. Se pueden utilizar diferentes aditivos para facilitar y/o acelerar el proceso de compostaje, entre ellos los preparados biodinámicos, hechos con milenrama, manzanilla, ortiga, roble, diente de león y valeriana, todas ellas, plantas medicinales que actúan activando la actividad de los microorganismos y acelerando los procesos de descomposición, favoreciendo la digestión de los materiales orgánicos brutos y los procesos de formación de humus. El fin último del uso de aditivos es mejorar la calidad final del compost¹⁶.

Con base a lo anterior, se hace necesario crear un ambiente que permita controlar las características de temperatura y humedad del proceso de co-compostaje usando residuos sólidos orgánicos y lodos de planta de tratamiento de aguas residuales, para proveer así una herramienta para el estudio de este proceso y aportar al desarrollo de sistemas destinados al aprovechamiento de estos residuos de la región. Sin embargo, la presente investigación, no busca establecer rangos de las variables de temperatura y humedad, ni proporciones de la materia prima, ni procedimientos que permitan producir una mejor calidad de compost al final del proceso, sino, proveer una herramienta para que este tipo de investigaciones se puedan realizar.

¹⁶ AVENDAÑO, Daniella. El proceso de compostaje. Trabajo de grado Ingeniero agrónomo. Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de agronomía e ingeniería forestal. Departamento de fruticultura y enología, 2003. 38 p.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Construir un prototipo de biorreactor aeróbico para el control de temperatura y humedad del proceso de co-compostaje, para tratar lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos de plaza de mercado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Construir el prototipo de planta piloto para la producción de co-compostaje a partir de los residuos sólidos orgánicos y lodos de plantas de aguas residuales.
- Seleccionar, acondicionar, e instalar los sensores de temperatura y humedad en planta piloto.
- Diseñar e implementar una estrategia de control para las variables de temperatura y humedad en el proceso de producción de co-compostaje.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario para el control y supervisión del proceso.
- Realizar un experimento de producción de co-compostaje bajo ambiente controlado.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hace una reseña de los elementos teóricos que han dado la fundamentación para la realización de la presente investigación. Es decir, los principios teóricos relacionados con: el proceso de compostaje, la producción de compost mediante un biorreactor, los sistemas de control en biorreactores, los sistemas operativos de tiempo real (RTOS) y el Internet de las cosas (IoT).

1.1 COMPOSTAJE Y CO-COMPOSTAJE

El compostaje es una biotécnica que favorece el control de los procesos biológicos de degradación de la materia orgánica. Esta biodegradación es consecuencia de la actividad de los microorganismos que crecen y se reproducen en los materiales orgánicos en descomposición. La consecuencia final de estas actividades vitales es la transformación de los materiales orgánicos originales en otras formas químicas. Los productos finales de esta degradación, denominados compost, dependerán de los tipos de metabolismo y de los grupos fisiológicos que vayan interviniendo. Es por estas razones, se busca ejercer un control del ambiente enfocado a favorecer el predominio de determinados metabolismos, y en consecuencia, a determinados grupos fisiológicos. 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 posible¹⁷.

Cuando el proceso de compostaje involucra más de un tipo de materia prima, se le conoce con el nombre de co-compostaje, esta combinación produce mejores y más rápidos resultados. Sin embargo, dado que ambos procesos son muy similares, la teoría, métodos y resultados del compostaje se usan como soporte para la mayoría de investigaciones de co-compostaje^{18,19,20,21}. Al producto final de este último se le llama co-compost.

El proceso de co-compostaje cuenta con cuatro etapas: una etapa inicial de crecimiento, donde empieza a aumentar la población de microorganismos, que

¹⁷ COLOMER, Francisco y GALLARDO, Antonio. Tratamiento y gestión de residuos sólidos. España, Universidad politécnica de Valencia, 2007. 328 p. ISBN 9788483630716

¹⁸ ALVARENGA. Op. cit., p. 52.

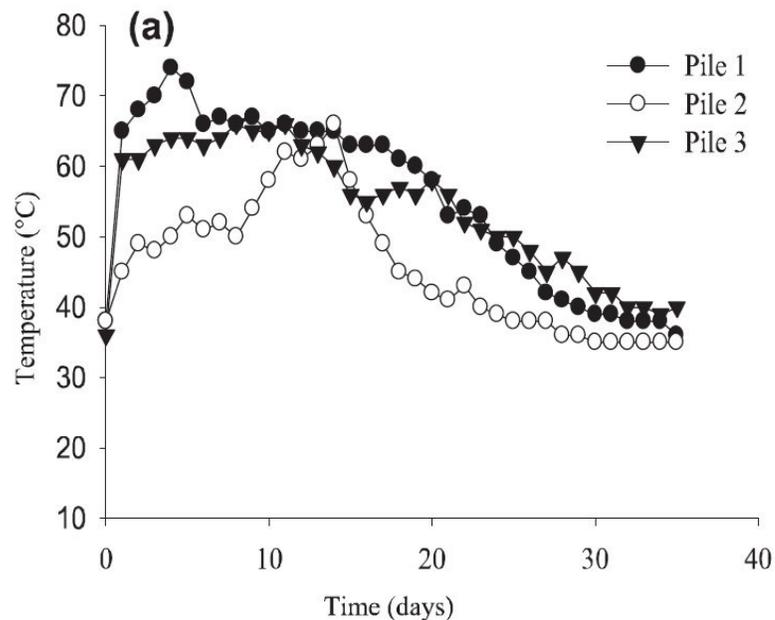
¹⁹ AWASTHI, Mukesh, *et al.* Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic. Op. cit., p. 207.

²⁰ OVIEDO, Edgar, *et al.* Op. cit., p 478.

²¹ OBENG, Letitia y WRIGHT, Frederick. Integrated resource recovery the co-composting of domestic solid and human waste. Washington D.C, 1954. 118 p. ISBN 0821308947

realizan procesos de nitrificación y oxidación de compuestos. Durante la siguiente etapa, denominada mesofílica 1. Luego, en la etapa de higienización o termófila, se crean bacterias termófilas que degradan fuentes complejas de carbono, como la celulosa y la lignina. Por último, en la etapa mesofílica 2 se continúa la degradación de polímeros como la celosa, y aparecen hongos a simple vista. Los factores ambientales y orgánicos que influyen en cada etapa del proceso de descomposición de los RSU son: la temperatura, el contenido de humedad, el pH, el tamaño de partículas, y la relación carbono nitrógeno (C/N). En general, la temperatura en sistemas aeróbicos puede mantenerse entre los rangos mesofílicos (30 a 38°C) y termofílicos (55 a 60°C)²². La Figura 1 muestra el comportamiento típico de la temperatura en el proceso de compostaje para diferentes RSU ubicados en tres pilas diferentes²³.

Figura 1. Temperatura durante el proceso de compostaje en diferentes pilas.



Fuente: AWASTHI, Mukesh, *et al.* Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic. *En*: Bioresource Technology, vol. 188, India. 2015.p. 202.

²² TCHOBANOBLOUS, George, *et al.* Gestión integral de residuos sólidos. Traducido por Iñaki Tejero. España: McGraw-Hill, 1994. 1120 p. ISBN 9788448118303.

²³ AWASTHI, Mukesh, *et al.* Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic. *Op. cit.*, p. 206.

Por otro lado, la Tabla 1 muestra cada una de las etapas del proceso de compostaje, y el efecto que tiene la temperatura sobre la actividad bacteriana en cada una de ellas.

Tabla 1. Etapas el proceso de co-compostaje.

ETAPA	TEMPERATURA (°C)	CARACTERISTICAS
CRECIMIENTO	15-20 (Ambiente)	La duración de esta etapa depende de la temperatura. Y tarda entre 24 y 72 horas.
MESOFÍLICA 1	10-40	La participación de hongos se da al inicio de esta etapa, y al final del proceso, en áreas muy específicas de las pilas de compostaje; incrementando paulatinamente la temperatura.
TERMOFÍLICA	40-75	Se eliminan todos los mesófilos patógenos, hongos, esporas, semillas y elementos biológicos indeseados. Como ésta etapa es de gran interés para la higienización del material, es conveniente su prolongación hasta el agotamiento de nutrientes.
MESOFÍLICA 2	10-40	Se desarrollan nuevamente los microorganismos mesofílicos que utilizarán como nutrientes los materiales más resistentes a la biodegradación, tales como la celulosa y lignina restante en las pilas. A esta etapa se le conoce generalmente como etapa de maduración. En estos momentos se dice que el material se presenta estable biológicamente y se da por culminado el proceso

Fuente: TCHOBANOLOUS, George, *et al.* Gestión integral de residuos sólidos. p. 771.

El contenido de humedad se puede ajustar mediante la mezcla de los componentes en el proceso de compostaje o mediante la adición de agua. El contenido de

humedad óptimo para el compostaje aerobio está en el rango del 50 al 60%, y cuando el contenido de humedad cae por debajo del 40%, se reduce la velocidad de fermentación. Por el contrario, si hay un exceso de agua, se puede desplazar el aire necesario para la actividad bacteriana, dando paso a una descomposición anaeróbica. La Tabla 2 muestra los parámetros fisicoquímicos de los sustratos utilizados en el proceso de compostaje durante el experimento realizado por Awasthi en India, en la cual se aprecia que el contenido de humedad no excede el 43%.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del proceso de compostaje.

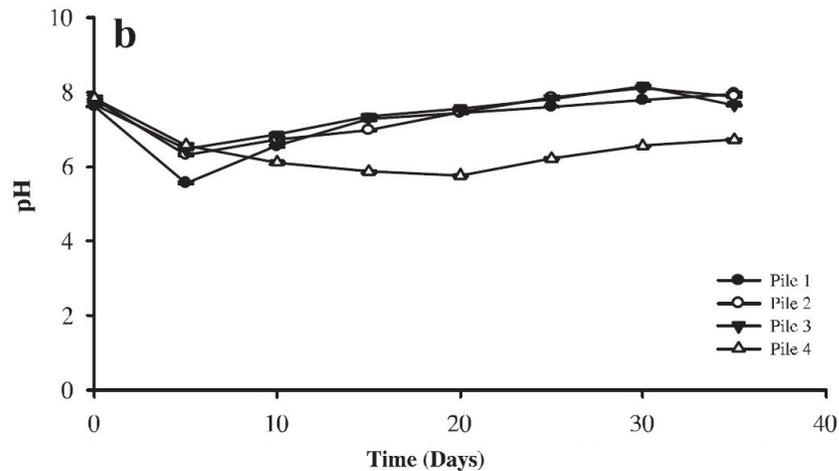
PARAMETERS	PILE 1	PILE 2	PILE 3	PILE 4	FAI (2007)	TIMECC (2002), CCME (2005)
Moisture content (%)	37±0.7	39±0.3	35±0.4	43±0.7	35-55	35-45
pH	7.95±0.02	7.89±0.04	7.65±0.02	6.72±0.05	6.5-8.5	5.5-8.5
Electrical conductivity (mS cm ⁻¹)	3.48±0.02	3.35±0.04	3.46±0.03	2.42±0.02	2-6	>4
Total organic carbon (%)	25.35±1.34	26.72±0.70	28.56±1.15	33.78±1.53	>16	-
Total organic matter (%)	24.38±1.23	25.46±0.41	24.63±1.95	32.49±2.70	>30	<40
Total phosphorus (%)	0.82±0.01	0.76±0.04	0.87±0.02	0.61±0.02	0.4-1.1	-
TKN (%)	1.48±0.14	1.52±0.06	1.46±0.10	1.29±0.08	1.0-3.0	-
C: N ratio	17.12±1.21	17.52±2.42	19.47±1.07	26.18±1.16	<25	<25
Sodium (%)	2.4±0.33	2.7±0.21	3.1±0.45	1.8±0.18	NA	>4
Potassium (%)	1.4±0.25	1.3±0.43	1.6±0.06	1.1±0.03	0.6-1.7	>4
Copper (mg/kg)	87.16±2.95	72.8±3.55	104.6±1.29	78.3±2.74	<300	<400
Cadmium (mg/kg)	1.5±0.34	NA	0.9±0.12	1.4±0.05	<5	<3
Zinc (mg/kg)	132.0±2.14	146.0±3.21	81.27±2.43	127.0±3.62	<1000	<700
Nickel (mg/kg)	21.4±0.31	14.6±0.06	18.2±0.42	27.4±0.16	<50	<62
Lead (mg/kg)	19.2±0.27	22.1±0.48	13.7±0.21	19.6±0.36	<100	<150
Chromium (mg/kg)	27.8±1.78	23.1±2.25	11.3±0.85	25.3±1.42	<50	<210

Fuente: AWASTHI, Mukesh, *et al.* Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. *En: Bioresource Technology*. September, 2014. vol. 168, p. 220.

Así mismo, el pH juega un papel crucial en el proceso de compostaje, pues es un parámetro importante para evaluar el ambiente microbiano y la estabilización de los residuos. El valor de pH, al igual que la temperatura, varía con el tiempo durante el proceso de compostaje. El pH inicial de la fracción orgánica de los RSU está normalmente entre 5 y 7 según George²⁴. Si el grado de aireación no es adecuado, se producirán condiciones anaerobias, donde el pH caerá hasta aproximadamente 4-5, y como consecuencia el proceso de compostaje se retrasará. En el experimento hecho por Awasthi, se realiza el seguimiento de pH en cada una de las pilas a través del tiempo, como se muestra en la Figura 2, donde se aprecia que el pH, como lo dicta la teoría, se ubica normalmente entre 5 y 7.

²⁴ TCHOBANOBLOUS, George, *et al.* Op. cit., p. 775.

Figura 2. Cambios de pH en pilas de compostaje en días.



Fuente: AWASTHI, Mukesh, *et al.* Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. En: Bioresource Technology. September, 2014. vol. 168, p. 217.

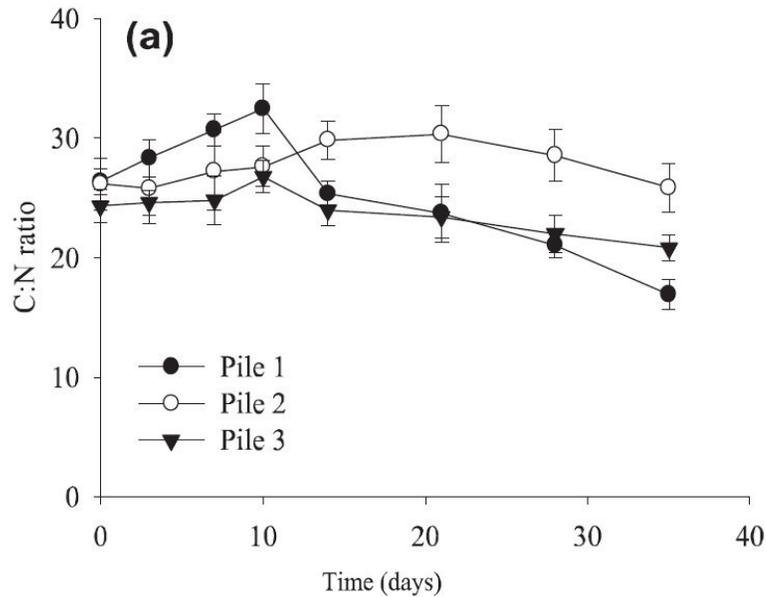
Por otro lado, la mayoría de los materiales que conforman los RSU son de forma irregular, y su tamaño se suele reducir mediante la trituración de los materiales orgánicos, para incrementar la velocidad de las reacciones bioquímicas durante el proceso de compostaje aerobio, lo recomendable es que el tamaño de los RSU se encuentre entre 25 mm y 27 mm²⁵.

Por último, la relación C/N es el factor más importante que afecta la actividad microbial, donde el rango óptimo para la mayoría de los RSU está entre 1 y 25, dado que en valores superiores de este rango, los microorganismos no tienen suficiente nitrógeno y utilizan todo el que se produce del suelo para su desarrollo, mientras que en valores comprendidos entre 15 y 25, los microorganismos tienen aproximadamente la cantidad de nitrógeno que necesitan, de modo que tampoco hay liberación de nitrógeno. Solo cuando la relación C/N es inferior a 15 se produce liberación de nitrógeno²⁶. La Figura 3 muestra la relación C/N del experimento realizado por Awasthi, durante el proceso de compostaje, y se aprecia que la relación C/N va descendiendo generando gradualmente liberación de nitrógeno, necesario para aumentar la actividad microbial en las pilas.

²⁵ Ibid., p. 777.

²⁶ Ibid., p. 778.

Figura 3. Relación C/N durante el proceso de compostaje.



Fuente: AWASTHI, Mukesh, *et al.* Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic. *En: Bioresource Technology*, vol. 188, India. 2015.p. 206.

A nivel nacional, la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 del 2004: Productos para la industria agrícola, determina un rango aceptable para pH entre 4 y 9, y una humedad no mayor al 15%; además, establece los límites de metales pesados, niveles de patógenos, carga microbiana, entre otros. Por otra parte, el Decreto 1287 del 10 de Julio de 2014 determina los criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Adicionalmente, el decreto categoriza los biosólidos para su posterior uso, en relación con la cantidad de metales pesados que posee (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Mb, Ni, Pb, Se, Zn), y a las propiedades microbiológicas de la misma (Coliformes fecales, Huevos de Helminto Viables, *Salmonella sp.* y Virus Entéricos), y establece las alternativas de uso de los biosólidos y las restricciones según la categoría²⁷.

1.2 PRODUCCIÓN DE COMPOST USANDO UN BIORREACTOR

Los tres métodos principales utilizados para monitorear la temperatura, el pH, la humedad, relación C/N y el tamaño de partículas durante el proceso de compostaje son: hilera, pila estática aireada, y en biorreactor. Aunque estos procesos difieren principalmente en el método utilizado para airear los residuos sólidos, los principios

²⁷ ESTUPIÑAN, Sandra. Op. cit., p. 34.

biológicos siguen siendo los mismos, y cuando se diseñan y se operan correctamente, todos producen un compost de similar calidad en aproximadamente el mismo periodo de tiempo²⁸.

Un biorreactor es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones biológicas. Dicha unidad está constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y está gobernado por un algoritmo de control²⁹.

Existen varios tipos de biorreactores, los cuales tienen diferentes aplicaciones y se pueden resumir en tres tipos: el biorreactor discontinuo o tipo batch, el biorreactor perfectamente agitado o Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), y biorreactor flujo pistón o Plug Flow Reactor (PFR), cada uno es utilizado para diferentes productos y aplicaciones dependiendo de cuál sea el caso.

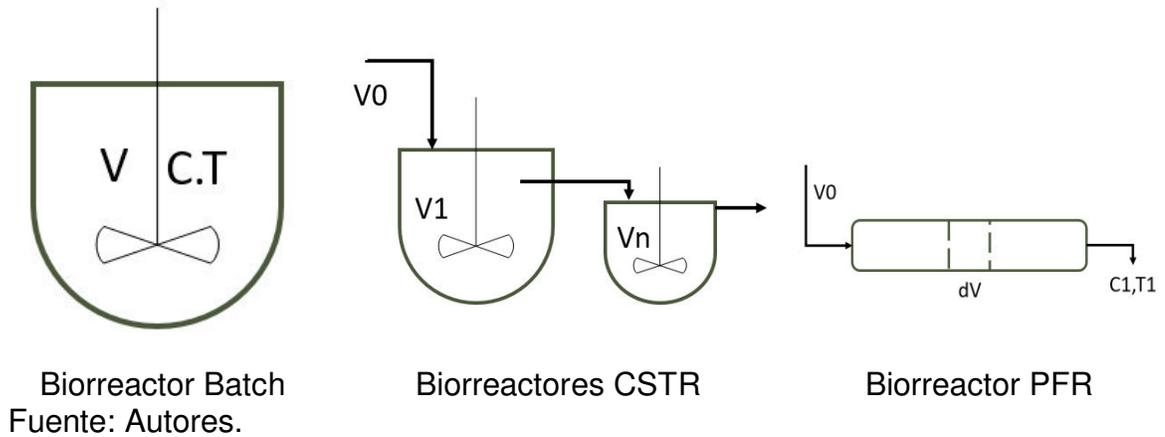
Los biorreactores CSTR operan con flujos continuos y son utilizados cuando se tiene una demanda de producto constante y a gran escala, además son diseñados para operar en grandes periodos de tiempo sin tener que parar su operación. Mientras que los biorreactores tipo PFR son usados comúnmente en gases y cuando se realizan reacciones que requieran un catalizador heterogéneo. Por último, los biorreactores Batch se emplean para operaciones a pequeña escala, para experimentar con procesos nuevos a nivel de laboratorio, y para fabricar productos costosos o de difícil elaboración, además, su construcción tiene un grado de complejidad menor en comparación con los otros tipos de biorreactores³⁰. La Figura 4 muestra los diferentes tipos de biorreactores descritos.

²⁸ TCHOBANOBLOUS, George, *et al.* Op. cit., p. 776.

²⁹ LOPEZ, Patricio. Implementación de un sistema de control de temperatura para el calentamiento de un tanque de alimentación continua mediante un PLC. Trabajo Ingeniero en Electrónica y Control. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2009. 19 p.

³⁰ LEVENSPIEL, Octave. Interpretación de los datos obtenidos en un reactor intermitente. En: Ingeniería de las Reacciones Químicas. 3 ed. México: John Wiley, 2004, p 38-40.

Figura 4. Tipos de biorreactores.



La homogenización de todos los materiales asegura que los procesos biológicos ocurran de forma uniforme en el interior del biorreactor, con base a lo anterior el mezclado se convierte en una operación importante para el proceso de compostaje; para lo cual se emplea un impulsor o agitador, provocando que los contenidos del biorreactor circulen a través del tanque y eventualmente regresen al mismo.

1.3 SISTEMAS DE CONTROL EN BIORREACTORES

Un ambiente controlado se crea a partir de sistemas de control electrónico, empleando señales eléctricas que interactúan con los actuadores del biorreactor, de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

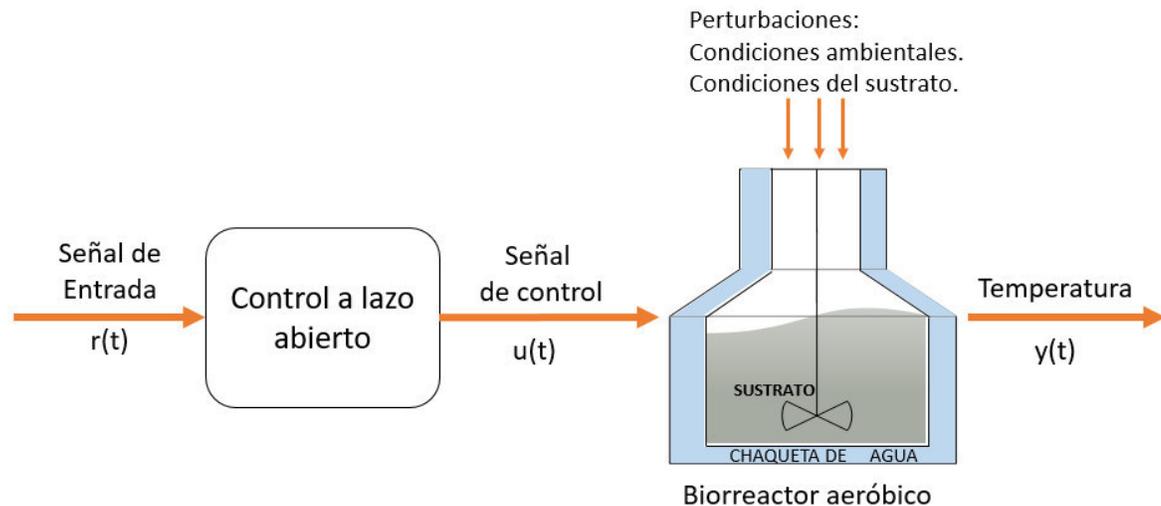
Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados teóricamente verdaderos³¹.

Los biorreactores se controlan a través de sistemas a lazo abierto y a lazo cerrado. En los sistemas de control a lazo abierto no se mide la salida, ni se realimenta para compararla con la entrada. En otras palabras, la salida del biorreactor no tiene ningún efecto en la acción de control y al no tener realimentación, a cada señal de entrada le corresponde una señal de control fija determinada por el sistema de control. Además, ante la presencia de perturbaciones, el sistema de control por lo

³¹ GARCIA, Juan. Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas. España. 2014. ISBN 84-607-9304-4

general no realiza la tarea deseada³². La Figura 5 muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de temperatura a lazo abierto para un biorreactor aeróbico tipo batch.

Figura 5. Sistema de control a lazo abierto para temperatura en un biorreactor.



Fuente: Autores.

Este tipo de controladores se suele implementar en biorreactores que no es factible leer la salida, o donde no se puede obtener un modelo determinístico apropiado, o se presentan ambas situaciones. Presentan desventajas en su desempeño ante perturbaciones o desgaste de los elementos del sistema, por lo que deben ser calibrados con cierta frecuencia; sin embargo, permiten cierto control en variables que no son críticas o que no necesitan un comportamiento estricto ante perturbaciones.

En contraste, en un sistema de control en lazo cerrado se alimenta al controlador con la señal de error, que es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida del biorreactor, con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentada para reducir el error del sistema³³.

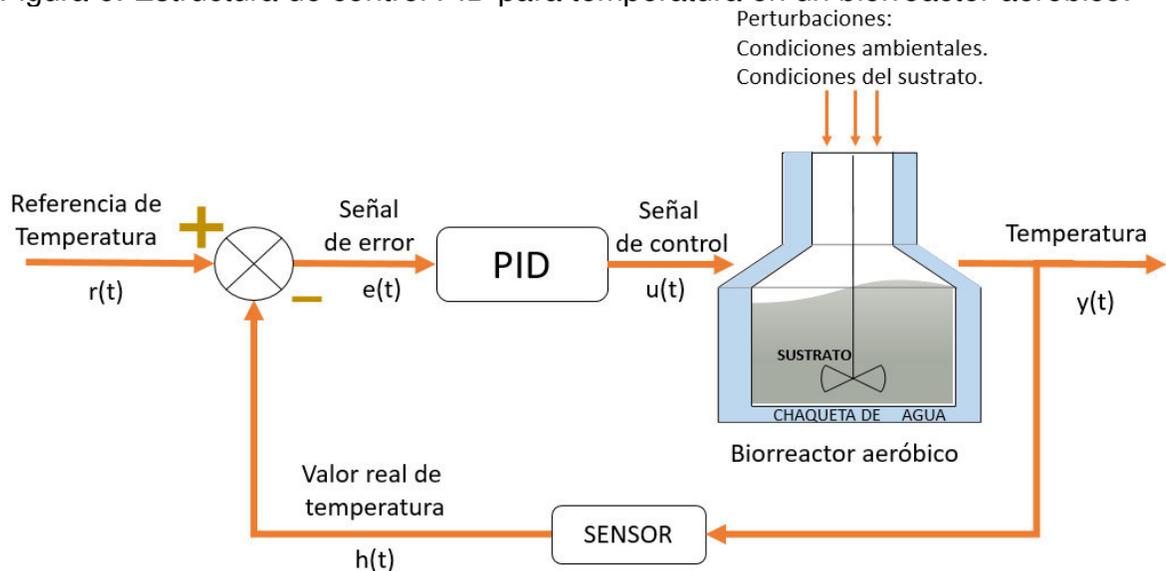
Un ejemplo de sistemas de control en lazo cerrado es el controlador Proporcional, Integrativo y Derivativo (PID), el cual es el algoritmo de control más común empleado en sistemas realimentados. La estructura del control PID empleado en un

³² OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. 5ed. España: Pearson Education, 2010. p. 8.

³³ Ibid., p. 7.

bioreactor se observa en la Figura 6, donde la señal de error es la diferencia entre la señal de referencia y la señal enviada por el sensor, que ingresa al bloque del controlador y produce una señal de control al proceso, por lo tanto la salida del sistema tiende al valor de referencia, y es insensible a las perturbaciones generadas por las condiciones ambientales y por las condiciones del sustrato, o por variaciones internas debido a la alteración de algún dispositivo. Sin embargo, la estabilidad del sistema es un factor crítico cuando se diseña el controlador, dado que la corrección del error puede generar oscilaciones en la salida de bioreactor.

Figura 6. Estructura de control PID para temperatura en un bioreactor aeróbico.



Fuente: Autores.

Además, para diseñar un controlador PID se debe tener en cuenta que este es una suma de tres términos: el término K_p (que es proporcional al error), el término K_i (que es proporcional a la integral del error y asegura que el error en estado estacionario se haga cero) y el término K_d (que es proporcional a la derivada del error y permite predecir el error futuro)³⁴.

Asimismo, para implementar un controlador en un procesador digital se debe discretizar su función de transferencia³⁵. Existen varios métodos para realizar este

³⁴ ASTRÖM, Karl J. y HÄGGLUND, Tore. Control PID avanzado. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2009.p. 67.

³⁵ Ibid., p. 29.

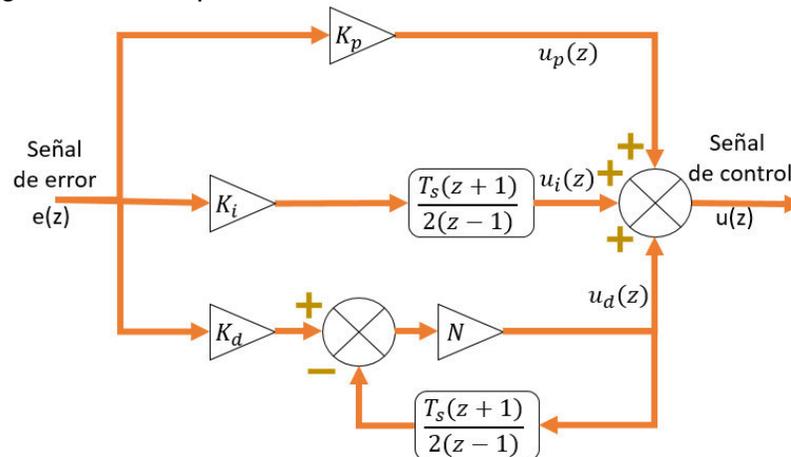
proceso, uno de ellos es utilizando la aproximación de *Tustin*, obteniendo la función de transferencia discretizada vista en la Ecuación 1.

$$G_{cd}(z) = K_p + K_i \frac{T_s(z+1)}{2(z-1)} + K_d \frac{N}{1 + N \frac{T_s(z+1)}{2(z-1)}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde T_s es el periodo de muestreo.

La Figura 7 muestra el diagrama de bloques que representa un controlador PID discretizado, teniendo en cuenta la Ecuación 1.

Figura 7. Diagrama de bloques de controlador PID discretizado.



Fuente: Autores.

1.4 SISTEMAS OPERATIVOS EN TIEMPO REAL (RTOS)

Uno de los factores críticos para el correcto funcionamiento de un controlador es el cumplimiento estricto del periodo de muestreo para el que fue diseñado. En algoritmos secuenciales este periodo se suele garantizar por medio de interrupciones, retardos o temporizadores programados en sistemas microcontrolados, en los que se obtienen buenos resultados cuando el sistema está dedicado solamente a esta tarea, o cuando las otras tareas que implementa no demandan gran tiempo de procesamiento. Sin embargo, cuando la aplicación es más compleja y deben atenderse varias tareas de forma simultánea con demandas de tiempo estrictas, diseñar un algoritmo que respete el tiempo de muestreo de los controladores puede ser una tarea difícil. En estos casos, la aplicación se puede implementar usando un sistema operativo en tiempo real (Real Time Operative

System RTOS), que permite la ejecución de varios algoritmos de forma independiente ³⁶³⁷ dividiendo el tiempo de procesamiento en cierto número de procesos o tareas, cada uno de los cuales es predecible y conocido con antelación³⁸.

Existen varios algoritmos por medio de los cuales se logra esta funcionalidad, conocidos como algoritmos de scheduling. Uno de los algoritmos de scheduling más usados es el algoritmo round robin preferente basado en prioridad, en el cual el RTOS administra el tiempo y los recursos de hardware entre las diferentes tareas, dando siempre prelación a la tarea que tiene mayor prioridad o a la tarea que más ha esperado cuando varias tareas comparten la misma prioridad. De esta forma, solo una tarea puede encontrarse en el estado de *en ejecución* mientras las demás se encuentran en el estado de *en no ejecución*³⁹. Este último estado, se subdivide en: a) el estado de *bloqueo*, cuando una tarea espera algún evento temporal o de sincronización, b) el estado de suspensión, cuando una tarea no está disponible por una directriz explícita del software, y c) el estado de preparada, cuando una tarea está esperando que el administrador o scheduler la seleccione para su ejecución. En la Figura 8 se muestran los diferentes estados de una tarea y sus relaciones.

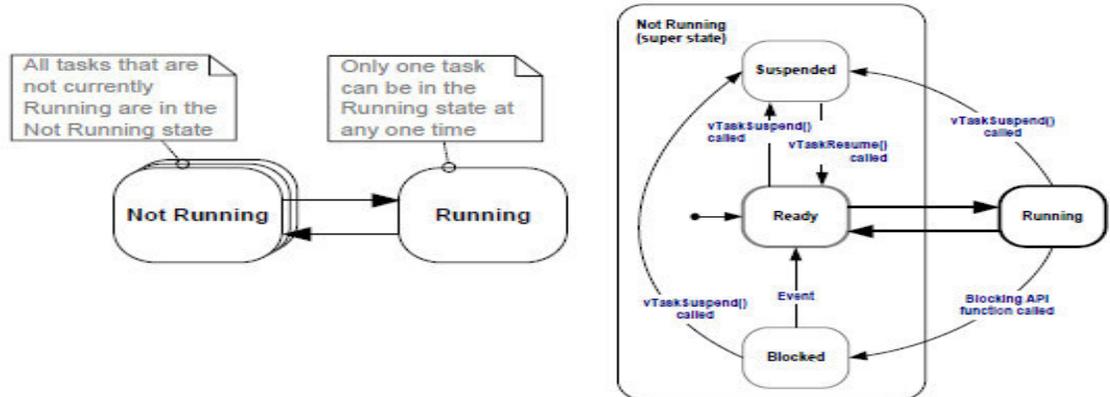
³⁶ KANG G, Real-Time Computing: A new Discipline of Computer Science and Engineering. En: Proceeding of the IEEE, January 1994, vol. 82, no. 1, pp. 6-24.

³⁷ CHIBIOS, RTOS Concepts [online], [cited 6 June 2017]. Available from internet: <URL: http://www.chibios.org/dokuwiki/doku.php?id=chibios:articles:rtos_concepts

³⁸ Ibid. Tanemabum, p.164

³⁹ BARRY, Richard. Mastering the FreeRTOS™ Real Time Kernel. A Hands-On Tutorial Guide. [online] Ed. Prerelease 161204 Available from internet at: < http://www.freertos.org/Documentation/161204_Mastering_the_FreeRTOS_Real_Time_Kernel-A_Hands-On_Tutorial_Guide.pdf>. p.46.

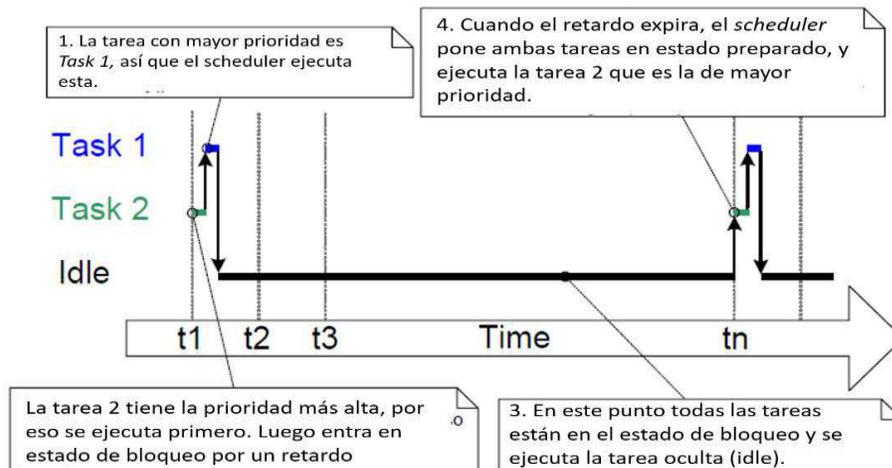
Figura 8. Estados de las *Tareas* y sus transiciones. Vista simplificada (derecha) vista completa (izquierda).



Fuente: BARRY, Richard. Mastering the FreeRTOS™ Real Time Kernel. A Hands-On Tutorial Guide. [online] Ed. Prerelease 161204 p.47.

Cada tarea se ejecuta de forma independiente a las demás, en su propio contexto y sin ser afectada por las demás, o por el scheduler del RTOS⁴⁰, el cual decide que tarea deberá ejecutarse en función del estado y prioridad de las diferentes tareas que componen la aplicación. La Figura 9 muestra como el scheduler prioriza una tarea de mayor prioridad que pasa al estado de preparada cuando una segunda tarea de menor prioridad se encuentra en ejecución.

Figura 9. Transiciones entre dos tareas con diferente prioridad.



Fuente: Los autores.

⁴⁰ FreeRTOS. Op. cit. Characteristics of a Task

Dado que las tareas se ejecutan de forma independiente, cuando dos o más tareas necesitan comunicarse, se emplea una cola de trabajo que es un espacio de memoria en el que se guardan variables de un tipo y tamaño previamente fijado, y donde las tareas pueden depositar y extraer de allí información cuando se encuentran en ejecución.

Cuando una tarea debe usar de forma exclusiva un recurso de hardware por cierto periodo de tiempo. Se usa una técnica conocida como Mutex (MUTual EXclusion), en la cual para usar a un recurso de hardware se debe tener un token de acceso. Las tareas pueden requerir dicho token solo si no está ocupado por otra tarea, y liberan el token cuando han terminado de usar el hardware. De esta forma, solo una tarea tiene derecho a usar el hardware, mientras las demás permanecen en estado de bloqueo esperando que el token sea liberado.

Existen varios RTOS en el mercado, diferenciados principalmente por el algoritmo de scheduling que implementan, el tipo de licencia bajo la que se distribuyen y las plataformas que soportan. En la tabla 10 se muestran las características de algunos de los RTOS con mayor número de usuarios.

Tabla 3. Características de los RTOS más usados.

RTOS	LICENSE	SCHEDULING ALGORITHM	PLATFORMS	MEMORY ALLOCATION
VxWorks	Proprietary	Preemptive and Round Robin Scheduling	ARM, IA-32, Intel 64, MIPS, PowerPC, SH-4, StrongARM, xScale	Best Fit Algorithm
QNX	Proprietary	Priority-Preemptive Scheduling	IA-32, MIPS, PowerPC, SH-4, ARM, StrongARM, xScale	Strict Memory Protection by Memory Management Unit
eCos	Modified GNU GPL	Bitmap Scheduler and Multiple-Priority, Queue-Based Scheduler	Arm-xScale-Cortex-M, 680x0-ColdFire, fr30, FR-V, IA-32, MIPS, MN10300, OpenRISC, PowerPC, SPARC, SuperH	Memory Pool Based Dynamic Memory Allocation
RTLinux	GNU GPL	FIFO, Earliest Deadline First Scheduler	Alpha, ARC, ARM, AVR32, Blackfin, C6x, ETRAX CRIS, M32R, m68k, META, Microblaze, MIPS, MN103, NIOS II, OpenRISC, SPARC, x86	Uses Regular Linux Memory Management Provisions No Real Time Allocation
WinCE	Proprietary	Priority-Based Time-Slice Algorithm	ARM, MIPS, SH-4, x86	Large Memory Mapper File Support
FreeRTOS	Modified GPL License	Priority Based Round Robin Scheduling	ARM(ARM7, ARM9, Cortex-M3, Cortex-M4, Cortex-A), Atmel AVR, AVR32, HCS12, MicroBlaze, Cortus(APSI, APS3, APS3R, APS5, FPF3, FPS6, FPS8), MSP430, PIC, Renesas H8/S, SuperH, RX, x86, 8052, Coldfire, V850, 78k0R, Fujitsu MB91460 series, Fujitsu MB96340 series, Nios II, Cortex-R4, TMS570, RM4x	Primitive Allocate and Free Algorithms with Memory Coalescence

Fuente: Fuente: JAPE, Sagar, et al. Comparison of Contemporary Real Time Operating Systems, p. 418.

1.5 EL INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

Es común encontrar en los sistemas de control tanto una interfaz humano-máquina (HMI por sus siglas en el inglés) como un sistema de registro de datos, por medio de los cuales un usuario puede interactuar con el sistema de control, fijando puntos de operación (set-points), visualizando datos históricos, etc. Ambas funcionalidades suelen ser implementadas usando sistemas locales donde el usuario debe estar presente para interactuar con el sistema. Sin embargo, en aplicaciones de larga duración o de difícil acceso, es necesario contar además con un medio de interacción remoto que permita realizar tareas de monitoreo, ajustes de control y toma de decisiones. Para suplir este tipo de funcionalidad en ambientes industriales se han usado típicamente los sistemas centralizados SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) o descentralizados DCS (Distributed Control System), sin embargo, en ambientes de laboratorio dichos sistemas sobredimensionan las necesidades de la aplicación, y no son accesibles desde el internet.

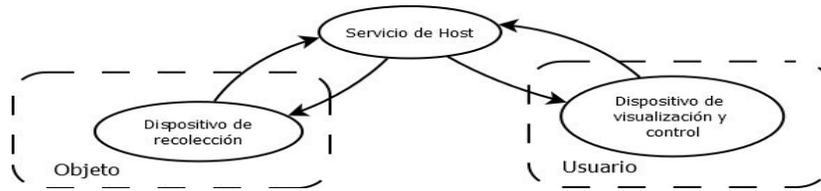
Por otro lado, el IoT (Internet of Things), ha sido un campo de innovación y desarrollo exponencial en la última década que permite conectar al internet objetos físicos con software, sensores, actuadores y conectividad de red, haciendo posible la medición, monitoreo y control remotos de los objetos a través de la ya existente infraestructura de red global (internet).⁴¹ Solucionando el problema del acceso remoto, el registro de los datos y considerando el tamaño de la aplicación.

Un sistema de monitoreo remoto basado en IoT debe contar con 3 elementos indispensables: el primero, el *dispositivo de recolección* de datos, el cual recibe los datos de los diferentes sensores del objeto y los envía al *servicio de host*, encargado de almacenar la información; por último, el *dispositivo de visualización y control*, permite a un usuario acceder a la información almacenada, y hacer tareas de manipulación de la información para propósitos de visualización o de control⁴². La Figura 10 muestra la relación entre estos tres elementos, donde se puede ver que el servicio de host además de almacenar los datos es efectivamente un puente entre el usuario y el objeto.

⁴¹ página web. ITU-T <http://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>. Consultada enero 2016. Citado por: LEON, Juan. Desarrollo de un dispositivo prototipo para medición de parámetros de corrosión utilizando monitoreo remoto-inalámbrico. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Tunja, Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Electrónica.

⁴² LEON, Juan. Desarrollo de un dispositivo prototipo para medición de parámetros de corrosión utilizando monitoreo remoto-inalámbrico. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Tunja, Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Electrónica. p. 60.

Figura 10. Esquema de comunicación entre los elementos que componen una aplicación de IoT



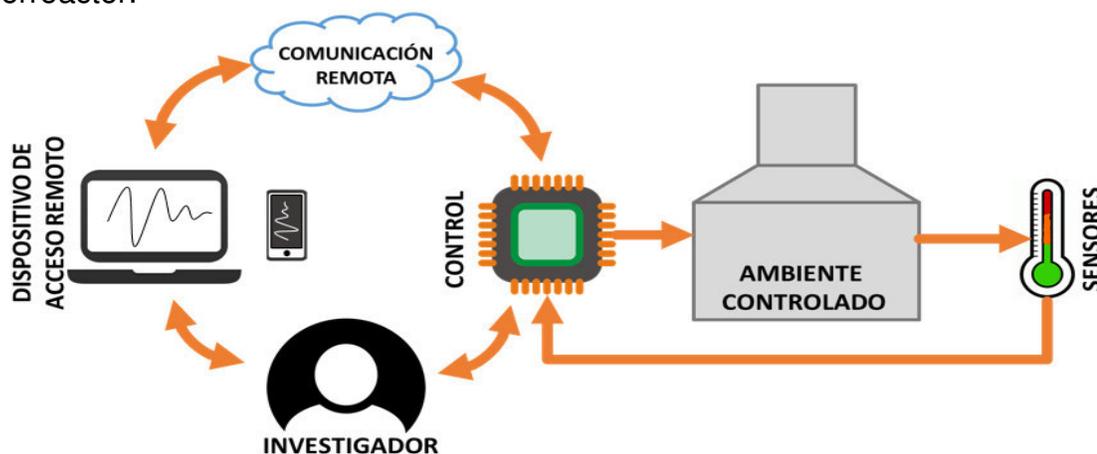
Fuente: Los Autores.

2. DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE BIORREACTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE CO-COMPOSTAJE

En el planteamiento del problema se ha expresado la necesidad de investigar cómo controlar la temperatura y la humedad en el proceso de co-compostaje, debido a que estas variables inciden en el tiempo de biodegradación y la calidad del producto final del co-compostaje. Con el fin de aportar la resolución de este problema, en esta investigación se ha construido un prototipo de biorreactor para realizar experimentos en un ambiente que facilita el control de la temperatura y humedad.

Para lograr lo antes expuesto, se inicia con el análisis de los rangos de operación que debe tener el sistema. Según Tchobanobloous⁴³ y Awasthi⁴⁴ un adecuado proceso de co-compostaje debe tener una temperatura entre 20 y 75°C (etapas mesofílicas y termofílicas), y una humedad relativa mayor a 40% y menor que 60%. Para esto, se deben contar con sensores y actuadores que permitan ejercer el monitoreo y manipulación del experimento, utilizando un sistema digital de control y una plataforma de comunicación remota para realizar la supervisión del experimento, dado a la larga duración de este tipo de procesos⁴⁵. En la Figura 11 se ilustran estas funciones.

Figura 11. Concepto general de las funciones que debe desempeñar el prototipo de biorreactor.



Fuente: Autores.

Para lograr la funcionalidad señalada, el prototipo se ha desarrollado en cinco etapas: a) establecimiento, determinación y dimensionamiento de los elementos físicos para el funcionamiento de los dos sistemas de control: el de temperatura y el

⁴³ TCHOBANOBLOUS, George, *et al.* Op. cit., p. 775.

⁴⁴ AWASTHI, M, *et al.* Op. cit., p. 207.

⁴⁵ TCHOBANOBLOUS, George, *et al.* Op. cit., p. 778

de humedad. b) elección y acondicionamiento de los sensores para el monitoreo y los actuadores para la manipulación y posterior control de ambas variables. c), obtención experimental de las funciones de transferencia que definen el comportamiento de cada variable. d) diseño, implementación y evaluación de las estrategias para el control de la temperatura y la humedad del proceso de co-compostaje. e) desarrollo de la interfaz remota, la cual utiliza una conexión ethernet para almacenar los datos en un servidor y ser visualizados por medio de una página web, con el propósito de supervisar y controlar el proceso de co-compostaje en cualquier momento y lugar.

2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA FÍSICA Y DISEÑO GENERAL DEL BIORREACTOR AEROBICO

Para la implementación del ambiente controlado mostrado en la Figura 11, se selecciona un biorreactor tipo batch, usado comúnmente en laboratorios porque el bajo volumen con el que trabaja es ideal para la experimentación a nivel de laboratorio, y por la simplicidad de su construcción en comparación con otros tipos de biorreactores. Los otros métodos usados para la producción de co-compostaje, como la pila y la hilera, están enfocados en maximizar el volumen de producción y no en el estudio del proceso. El volumen de trabajo del biorreactor debe ser de al menos 2L, según la recomendación de la ingeniera Gloria Camargo del grupo de investigación GIGA de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia sede Tunja. Sin embargo, teniendo en cuenta que parte del volumen está ocupado por sensores y otros elementos, se selecciona un volumen de 3L. Adicionalmente, se necesita un mezclador para homogeneizar la temperatura y humedad del sustrato al interior del biorreactor. Para esto se utiliza un agitador de hélice propulsado por un motor de 12kg y 100RPM que en conjunto generan el torque suficiente para mezclar el sustrato.

Una vez se selecciona y dimensiona el biorreactor, se procede a escoger el método para la manipulación de la temperatura dentro del reactor. En biorreactores, esto usualmente se consigue por medio de una chaqueta o de un núcleo de calentamiento, en ambos casos se hace circular agua a través del elemento, transfiriendo o absorbiendo calor del sustrato dentro del biorreactor. Sin embargo, dado al clima frío de la ciudad de Tunja, el enfriamiento se da de forma natural por la disipación del calor en el ambiente, por lo que solo es necesario un sistema para calentar el sustrato. La ventaja de la chaqueta sobre el núcleo de calentamiento, radica en la facilidad de su construcción y en una mayor área de contacto con el sustrato, logrando así una temperatura más homogénea. Se determina entonces, el uso de la chaqueta para la aplicación, fijando su volumen a un máximo de 2L para así evitar pérdidas excesivas de calor en el ambiente. Por otra parte, La fabricación del biorreactor enchaquetado se realiza empleado dos cantinas metálicas: una de

5L y otra de 3L, colocando la más pequeña dentro de la más grande, y formando así la chaqueta alrededor del biorreactor. Se escogieron cantinas por economía y fácil acceso en el mercado departamental, en comparación con reactores hechos a la medida.

Para calentar el agua de esta chaqueta se establece un sistema de recirculación y de calentamiento, donde el agua se calienta en un tanque por medio de una resistencia calefactora y luego se bombea hacia la chaqueta, y un conducto adicional permite que el agua retorne al tanque de calentamiento, generando un flujo constante de agua caliente hacia la chaqueta. El bombeo del agua se realiza con la bomba marca EVANS® BP120W15-090 usada para la recirculación de agua caliente en hogares, y funciona con agua a una temperatura de hasta 60°C, acorde al rango de operación bajo el cual funcionara el biorreactor. Para evitar el calor que aporta la bomba al sistema de recirculación tras largos periodos de operación, se limita al 30% la potencia entregada, mediante un sistema de corte de fase de la señal senoidal eléctrica de alimentación (véase sección 2.2.4). Adicionalmente, el tanque de calentamiento dispone de un agitador de hélice propulsado por un motor-reductor de 500RPM, velocidad suficiente para aumentar la superficie de contacto de la resistencia calefactora y el agua obteniéndose un calentamiento más rápido y homogéneo.

Por otro lado, para la manipulación de la humedad se requiere agregar agua al sustrato y para ello, se dispone de una bomba peristáltica que bombea agua desde un depósito hacia el interior del biorreactor. Según Tchobanobloous⁴⁶ y Awasthi⁴⁷, la humedad máxima recomendada para un adecuado proceso de co-compostaje debe ser de 60%, añadiendo un margen del 10% para ampliar el rango de experimentación. El prototipo debe permitir obtener hasta un 70% de humedad relativa en un suelo completamente seco, que es el peor de los casos. En cuanto a la bomba que lleva el agua al interior del biorreactor, se usa una bomba peristáltica de 200ml/min, que a diferencia de las bombas centrípetas convencionales, está diseñada para dosificar líquidos por goteo, ideal para agregar agua de forma precisa al sustrato. El depósito de agua, la bomba peristáltica y el biorreactor están unidos por una manguera siliconada, sellada en el extremo del biorreactor y perforada cada 2 cm, con el objetivo de obtener una aspersion homogénea del agua en vez de un goteo en un solo punto del sustrato.

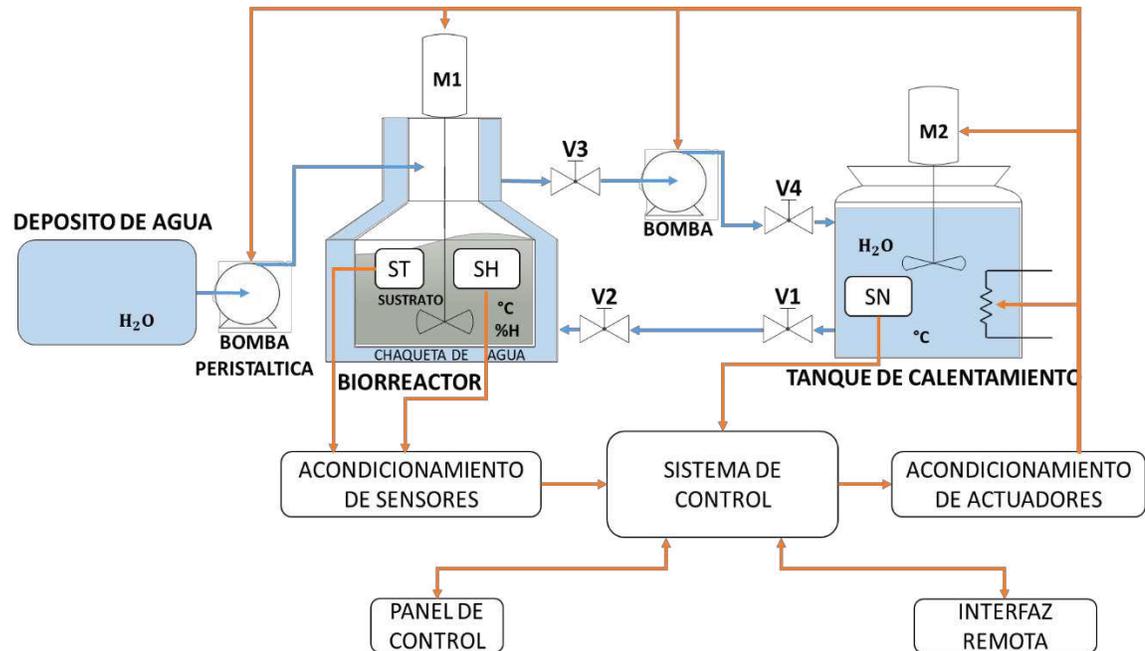
Una vez definidos todos los elementos estructurales del sistema se procede al diseño electrónico general que permite el control y supervisión del biorreactor. Para esto se propone la implementación de un sistema de control para cada variable, con la posibilidad de interacción local y remota. En la Figura 12 se muestra la

⁴⁶ TCHOBANOBLIOUS, George, *et al.* Op. cit., p. 775.

⁴⁷ AWASTHI, M, *et al.* Op. cit., p. 207.

arquitectura general del sistema con todos los elementos estructurales mencionados.

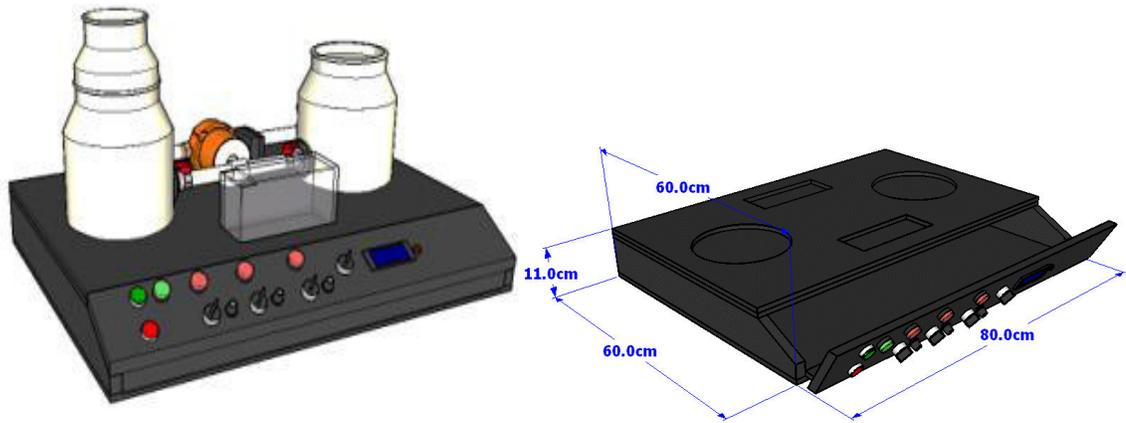
Figura 12. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).



Fuente: Autores.

Por otro lado, todos los elementos de la planta física se encuentran soportados en una estructura de madera de 60x80x11cm, y cuya arista frontal se encuentra biselada y unida con bisagras a manera de cajón. Sobre la caja se tienen los espacios para ubicar el biorreactor, el tanque de calentamiento, y el depósito agua, así como la bomba de recirculación y bomba peristáltica. En el interior se encuentra el espacio para los circuitos de control, y en los laterales las conexiones con los sensores y actuadores. Sobre el bisel frontal se encuentra el panel de control local (véase sección 2.2), como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Soporte físico del prototipo de biorreactor. Derecha: con panel abierto, izquierda: con el biorreactor, tanques y bombas.



Fuente: Autores.

2.2 INSTRUMENTACIÓN PARA LA PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE CO-COMPOSTAJE

Una vez construida la estructura física del prototipo se procede a la selección y acondicionamiento de los sensores de temperatura, humedad y nivel, y de los actuadores: la bomba peristáltica, la resistencia calefactora, la bomba de recirculación, y los motores de agitación.

2.2.1 Selección de los sensores de temperatura, humedad y nivel. Para la selección del sensor de temperatura se tienen en cuenta cuatro características: rango de medida, exactitud, tipo de empaquetado, costo, y prefiriendo siempre los sensores con comportamiento lineal. El tipo de empaquetado no debe ser susceptible a la corrosión, causada por el contacto con el sustrato. Según Tchobanobloous⁴⁸ y Awasthi⁴⁹ y teniendo en cuenta la conversación establecida con la ingeniera Gloria Camargo, directora del grupo de investigación GIGA, se determina un rango de temperatura de 30°C a 75°C, para estudiar su impacto en el proceso de producción de co-compostaje. Sin embargo, se ha disminuido el límite inferior a 10°C para poder monitorear la temperatura del sustrato considerando las temperaturas mínimas ambientales que se presentan en la ciudad de Tunja, por consiguiente, el sensor de temperatura debe ser capaz de medir en un rango de 10°C a 75°C. La Tabla 4 muestra algunos de los sensores disponibles en el mercado.

⁴⁸ TCHOBANOBLOUS, George, *et al.* Op. cit., p. 775.

⁴⁹ AWASTHI, M, *et al.* Op. cit., p. 207.

Tabla 4. Sensores de temperatura disponibles en el mercado.

SENSOR	RANGO(°C)	EXACTITUD (±°C)	EMPAQUETADO	PRECIO (\$)
SHT15	-40 - 123	0.3	Circuito integrado	13000
LM35	-55 - 150	0.5	Paquetes TO	3500
DHT22	-40 - 80	0.5	Rejilla de plástico	15000
PT100	-200 - 850	0.4	Acero Inoxidable	40000
Termocupla K	0 - 1100	1.5	Acero Inoxidable	23000
Termocupla J	0 - 750	1.5	Acero Inoxidable	64000
Termocupla T	0 - 800	0.5	Acero Inoxidable	55000

Fuente: Autores.

Los sensores SHT15, LM35 y DHT22 no poseen un empaquetado que evite la corrosión, por tanto, se descartan para la aplicación. De los sensores restantes, la PT100 presenta una exactitud de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ mayor a la exactitud de la Termocupla tipo T, y de $\pm 1.1^\circ\text{C}$ en relación con la termocupla K y J, convirtiendo a la PT100 en el sensor con la mejor exactitud. Adicionalmente, su precio es \$15000 menor al de la termocupla tipo T, por estas razones se elige el sensor PT100 para ser implementado en el prototipo.

Con relación al sensor de humedad, existen cuatro tipos de sensores para medición en suelos: los capacitivos, las guías de onda, los nucleares y los resistivos. Los sensores de tipo nuclear son bastante costosos, y están diseñados para medir humedad en un campo de 4 a 5 metros de radio, por lo que son descartados. Los sensores capacitivos y guías de onda miden la constante dieléctrica de suelo, y al ser la constante dieléctrica del agua mucho mayor a la de otros elementos, se obtiene con buena exactitud el volumen de agua contenido en el suelo⁵⁰. No obstante, este tipo de sensor es susceptible a la presencia de rocas y materiales metálicos en el campo de medición⁵¹, y dado que el material con el que está construido el biorreactor es aluminio, este tipo de sensor también es descartado para la aplicación. Por el contrario, los sensores de humedad tipo resistivos no son susceptibles a objetos metálicos cercanos, y leen un amplio rango de humedad⁵².

Con base en lo anterior, se selecciona la sonda resistiva YL-69, por ser el más accesible de los sensores resistivos en el mercado. La sonda funciona aplicando una pequeña tensión entre sus dos terminales, para pasar una corriente que

⁵⁰GUASTAVINO, Claudia, *et al.* Proyecto SDHS: Sensor De Humedad de Suelos. Uruguay. Universidad de la Republica. Facultad de ingeniera, 2009. 238 p.

⁵¹ Decagon devices, Inc. EC-5 user's manual [online]. Versión 2. Pullman, Estados Unidos Disponible en internet:< <https://dyacon.com/wp-content/uploads/2014/08/Decagon-Manual-EC-51.pdf>>.

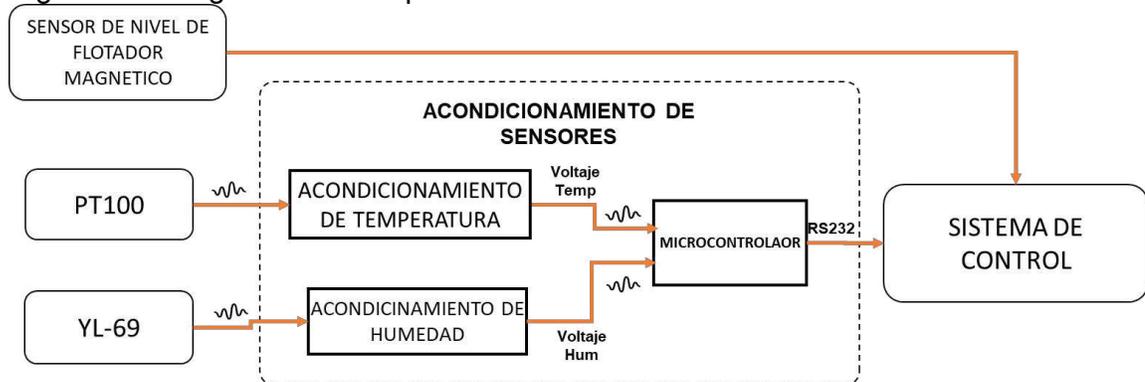
⁵²HUANG, Linya, *et al.* Agricultural Environmental Information Collection Device Based on Raspberry Pi. En: International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture IX. Noviembre, 2015, vol. 478. ISBN: 978-3-319-48356-6.

depende de la resistencia del suelo, la cual depende en gran medida de la humedad. Por lo tanto, al aumentar la humedad la corriente crece y al bajar la humedad la corriente disminuye.

Por otro lado, se requiere detener el proceso de calentamiento cuando el nivel de agua en el tanque de calentamiento no alcanza a cubrir la resistencia calefactora. Para esto, se necesita de un sensor de nivel que soporte temperaturas de hasta 75°C. De acuerdo con estas características, se escoge un sensor de flotador magnético on/off, y se emplea una resistencia de pull-down, para entregar directamente al sistema de control una señal de 5V si hay suficiente agua en el tanque, y 0V en caso contrario.

2.2.2 Circuito de acondicionamiento para sensor PT100 y YL-69. El bloque de acondicionamiento de sensores está centrado en un microcontrolador dedicado a la lectura de las salidas de los circuitos de acondicionamiento de temperatura y humedad, así como al envío de los mismos al sistema de control. Lo anterior, con el propósito de que el sistema de control se ocupe solo de las tareas de control y comunicación. La Figura 14 muestra la conexión de los circuitos de acondicionamiento con el microcontrolador.

Figura 14. Diagrama de bloques del acondicionamiento de sensores.



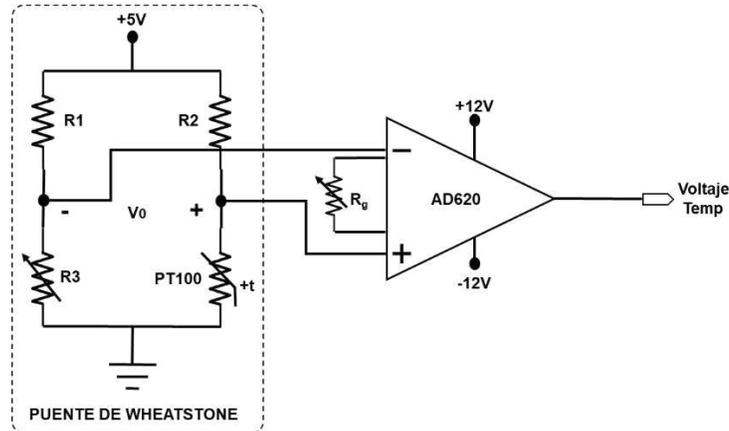
Fuente: Autores.

El circuito de acondicionamiento del sensor de temperatura PT100 se realiza empleando un puente de Wheatstone (ver Figura 15), debido a que es el circuito más simple utilizado para medir resistencias con exactitud desde fracciones de Ohms hasta varios megaohms⁵³. Luego del puente de Wheatstone, se emplea una etapa de amplificación con el propósito de tener una señal de voltaje de 0 a 5V a la

⁵³ COOPER, William y HELFRICK, Albert. Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición. Traducido por David Pérez Gutiérrez. 1 ed. México: Prentice Hall Inc., 1991. p. 103. ISBN 968 880 236 0.

salida del circuito de acondicionamiento, correspondientes a los voltajes de referencia del conversor analogo-digital (Analog to Digital Converter, ADC) del microcontrolador. Para lo cual, se utiliza el amplificador de instrumentación AD620, por su capacidad de amplificar voltajes en un rango de milivoltios, su bajo consumo de potencia y bajos niveles de ruido. Razones por las que es ampliamente utilizado en sistemas de precisión para adquisición de datos de transductores⁵⁴.

Figura 15. Circuito de acondicionamiento del sensor RTD PT100.



Fuente: Autores.

El sensor de temperatura PT100 debe medir entre un rango de 10 a 75°C, y luego de su acondicionamiento, entregar una señal de voltaje de 0 a 5V. Para lograr esto, primero se colocan resistencias de 2KΩ en R1 y R3, luego se ajusta la resistencia de balanceo del puente de Wheatstone de tal forma que se produzca una salida de 0V cuando se tienen 10°C, dando como resultado una resistencia R3 igual a 96Ω. Posteriormente, se incrementa la temperatura cada 3°C hasta 75°C, usando como patrón de medida un termómetro de alcohol, y midiendo la salida del puente en milivoltios, obteniendo así una relación lineal entre el voltaje de salida del puente y la temperatura del sensor PT100, expresada por la ecuación 2.

$$V_0(T) = 1.5715 * T - 15.886 \text{ mV} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde: V_0 es el voltaje en milivoltios,
y T la temperatura en °C

⁵⁴ Analog devices. Hoja de especificaciones del amplificador de instrumentación AD620. Disponible en internet: < <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>>

Ahora, para lograr la máxima sensibilidad del módulo ADC, se implementa una etapa de amplificación por medio del amplificador operacional AD620, cuya ganancia se calcula mediante la ecuación 3, y se implementa usando la resistencia de ganancia R_g (Ver Figura 15) calculada mediante la ecuación 4.

$$G = \frac{\text{Voltaje Temp}}{V_0} = \frac{5V - 0V}{101mV - 0mV} = 49.5 \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: G es la ganancia del amplificador.
 V_0 es el voltaje en milivoltios,

$$R_g = \frac{49.4k\Omega}{G - 1} = 1018\Omega \quad \text{Ecuación 4}^{55}$$

Dónde: R_g = la resistencia de ganancia,
y G = la ganancia del amplificador.

De esta forma, la ecuación característica del voltaje de salida en función de la temperatura de entrada queda definida por la ecuación 5.

$$\text{Voltaje Temp}(T) = 0.0777 * T - 0.807V \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde: T = temperatura en °C
Voltaje Temp = Salida en voltios en función de la temperatura.

La sensibilidad del acondicionamiento está definida por la ecuación 6, donde se relaciona la salida del acondicionamiento la entrada del mismo.

$$S_{PT100} = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{5V - 0V}{75^\circ C - 10^\circ C} = 76.92mV/^\circ C \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde: S_{PT100} = Sensibilidad de la PT100.
 ΔV = Rango de salida del acondicionamiento en voltios.
 ΔT = Rango de temperatura de la entrada al acondicionamiento.

⁵⁵ ANALOG DEVICES, Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier AD620. Norwood, MA, U.S.A., 2017., p. 12.

Para determinar si el sistema de acondicionamiento es lo suficientemente preciso, se realizaron tres pruebas para el análisis estadístico de la señal del sistema de acondicionamiento de temperatura, calculando la desviación de la media, desviación promedio, desviación estándar y varianza⁵⁶; se obtiene un error probable promedio de $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$. En consecuencia, y teniendo en cuenta que el rango de medición del sensor es de 10°C hasta 75°C , el error probable del sensor es de $\pm 0.44\%$.

Para garantizar una correcta lectura de la PT100, se requiere que la resolución del ADC en el microcontrolador sea menor a la sensibilidad del sensor, que según la ecuación 6 corresponde a $76.92\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. En la ecuación 7 se muestra el cálculo de la resolución.

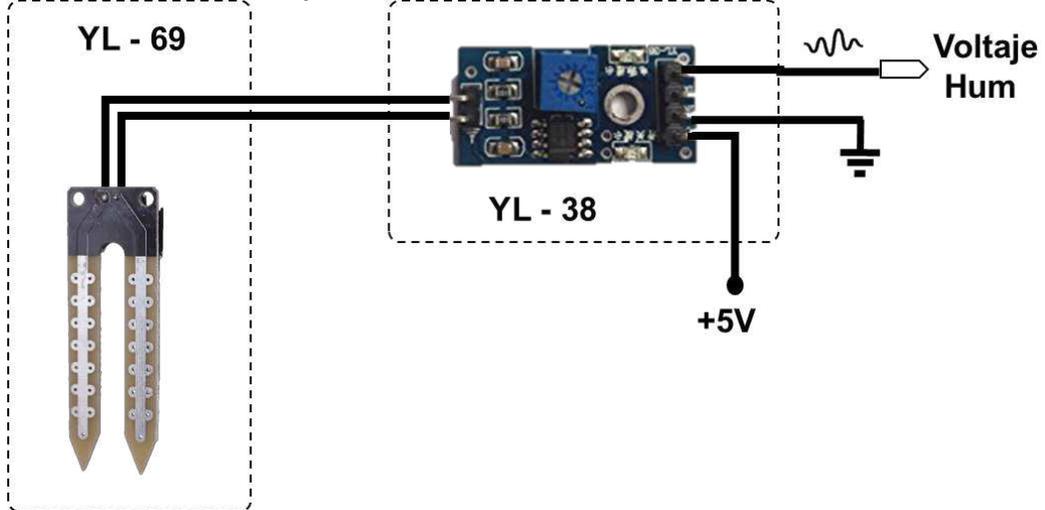
$$\text{Resolucion} = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n} = 76.92\text{ mV/bit} \quad \text{Ecuación 7}$$

Considerando que el voltaje de referencia positivo (V_{ref+}) es igual a 5V y el voltaje de referencia negativo (V_{ref-}) es igual a 0V, dado que corresponde al rango de la señal obtenida en el proceso de acondicionamiento, resolviendo para n en la ecuación 7, se tiene que $n = 6.02$. La mayoría de microcontroladores poseen módulo ADC con una resolución de 8 0 10 bits. Para la selección de dicha resolución se debe considerar también la resolución requerida por el sensor de humedad.

Ahora, para el acondicionamiento del sensor YL-69, se emplea el circuito YL-38 (ver Figura 16), construido específicamente para acondicionar la señal de corriente del sensor, y obtener a la salida del circuito una señal de voltaje de 0 a 5V, satisfaciendo el rango de voltaje que lee del módulo ADC del microcontrolador.

⁵⁶ COOPER, William y HELFRICK. Op. cit., p. 14.

Figura 16. Sensor YL-69 y acondicionamiento YL-38.



Fuente: Autores.

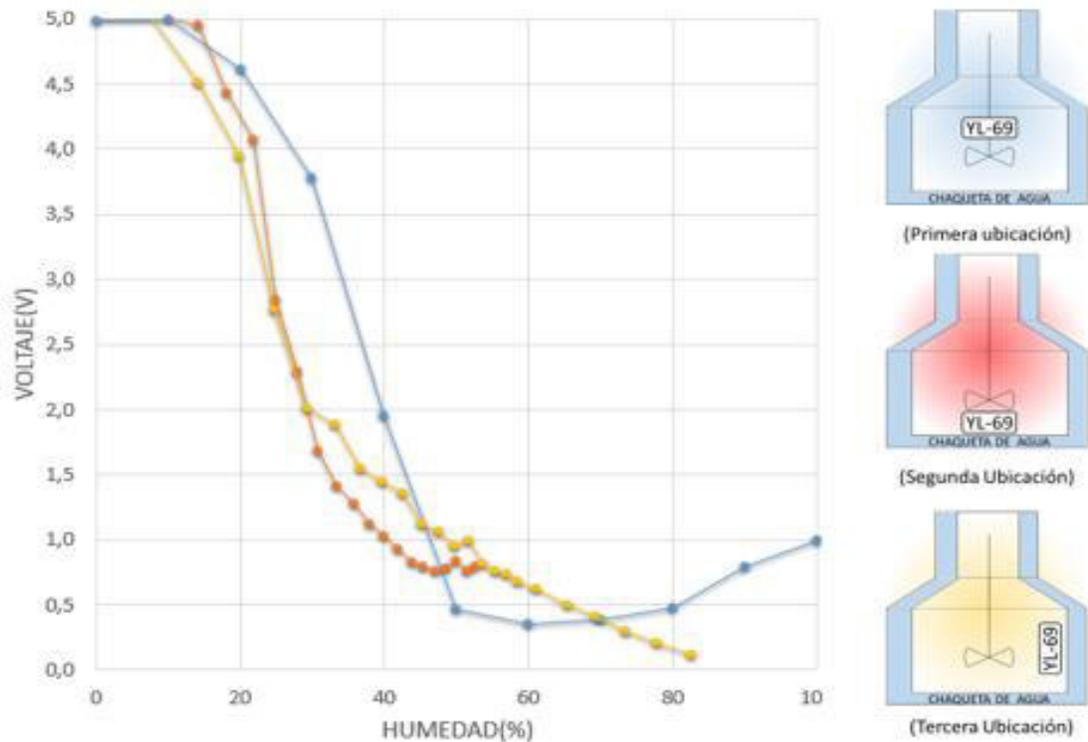
Para el patronamiento del sensor YL-69 y su módulo de acondicionamiento YL-38, se preparan varias mezclas con valores desde 0 hasta 100% de humedad, conformadas por 70% de RSO de plaza de mercado y 30% de lodos de PTAR, ya que el laboratorio de ingeniería ambiental no cuenta con un instrumento para la medición de la humedad relativa en suelos. Para realizar cada mezcla, se seca el sustrato colocándolo en una mufla a una temperatura de 105°C durante 24 horas, y se realiza el monitoreo de la humedad del sustrato utilizando la ecuación 8, hasta obtener una humedad cercana al 0%. Luego, se realizan las mezclas a diferente humedad, calculando la cantidad de agua que se debe agregar mediante la ecuación 9, y colocando el sensor en cada muestra para observar el voltaje de salida del módulo YL-38 ante cada porcentaje de humedad. Este patronamiento se realiza tres veces y colocando el sensor en tres diferentes ubicaciones dentro del biorreactor (ver Figura 17), con el objetivo de evaluar la mejor ubicación.

$$\text{Humedad Relativa (\%)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso final}} * 100\% \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\text{Cantidad de agua (g)} = \frac{\text{Humedad Relativa} * P_s}{100\%} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde: P_s = Peso del sustrato seco en gramos.

Figura 17. Pruebas para determinar ubicación del sensor dentro del biorreactor.



Fuente: Autores.

Para determinar la ubicación con el menor error probable, se realiza el análisis estadístico de cada posición, teniendo en cuenta la desviación de la media, la desviación promedio y la varianza. La Tabla 5 muestra la desviación estándar promedio y el error probable promedio en cada ubicación.

Tabla 5. Comparación de la precisión de las diferentes ubicaciones del sensor de humedad YL-69 dentro del biorreactor.

UBICACIÓN	DESVIACION ESTANDAR PROMEDIO (V)	ERROR PROBABLE PROMEDIO (%)
1 ^a	0.060	±0.8086
2 ^a	0.032	±0.1997
3 ^a	0.029	±0.1803

Fuente: Autores.

Los datos de la Tabla 5 indican que la posición con el menor error probable promedio es la tercera, con un valor de $\pm 0.1803\%$, por lo cual se escoge esta ubicación para colocar el sensor al interior del biorreactor. Por otro lado, el análisis estadístico completo de los sensores de temperatura y humedad, donde se muestra la desviación media, estándar, y varianza, se encuentra en el ANEXO A

Con relación a la tercera ubicación, la zona lineal se encuentra desde 30% hasta 80%, en donde su comportamiento se describe por medio de la ecuación 10.

$$\text{Voltaje Hum}(H) = -0.0337 * H + 2.732V \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde: H = Humedad en %

La sensibilidad del acondicionamiento está definida por la ecuación 11, donde se relaciona la salida del acondicionamiento con la entrada del mismo.

$$S_{YL-69} = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{5V - 0V}{80\% - 30\%} = 100mV/\%HR \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde: S = Sensibilidad.

ΔV = Rango de salida del acondicionamiento en voltios.

ΔT = Rango de temperatura de la entrada al acondicionamiento.

Para garantizar una correcta lectura del sensor YL-69, se requiere que la resolución del ADC en el microcontrolador sea menor a la sensibilidad del sensor, que según la ecuación 11 corresponde a $100mV/\%HR$. En la ecuación 12 se muestra el cálculo de la resolución del módulo ADC en función del número de bits que se requieren para el cumplimiento de la especificación.

$$\text{Resolucion} = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n} = 100mV/bit \quad \text{Ecuación 12}$$

Considerando que el voltaje de referencia positivo (V_{ref+}) se estableció a 5V y el voltaje de referencia negativo (V_{ref-}) a 0V para el sensor de temperatura, y de igual forma corresponde al rango de la señal obtenida en el proceso de acondicionamiento del sensor de humedad, resolviendo para n en la ecuación 12, se tiene que $n = 5.64$. Considerando que la resolución para el sensor de temperatura debe ser de al menos 6 y para el sensor de humedad al menos 5.64, una resolución de 8 es adecuada. Por otro lado, el microcontrolador requerido también debe contar con dos pines de entrada análogos, para recibir las señales de voltaje de los circuitos de acondicionamiento de temperatura y humedad, y una interfaz serial RS232 para enviar los mismos al sistema de control. Se escoge este protocolo de comunicación considerando que la razón de cambio de las variables físicas de temperatura y humedad son lentas, por tanto, para una configuración de 38400

baudios, el tiempo de transmisión de un dato de 8 bits es de $208 \mu s$, como se muestra en la ecuación 13. Además, su implementación es más sencilla que la de otros protocolos como I²C, SPI y USB. Por los criterios anteriores en términos de resolución, número de pines análogos y protocolo de comunicación, se selecciona el microcontrolador PIC16F873A, el cual dispone de cinco canales analógicos (AN0-AN4) con un módulo de conversión ADC a 10 bits, y un módulo de comunicación USART compatible con el protocolo de comunicación RS232 configurable hasta 64500 baudios.

$$T = \frac{\text{Número de bits}}{\text{velocidad de transmisión}} = \frac{8 \text{ bits}}{38400 \text{ bits/s}} = 208 \mu s \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde: T = Tiempo de transmisión.

En el microcontrolador se realizan los procesos de escalización de las variables de temperatura y humedad para enviarlos al sistema de control. Las ecuaciones de escalización se obtienen a partir de las ecuaciones de temperatura y humedad dadas en la ecuación 5 y ecuación 10, y considerando la ecuación de resolución de conversor ADC dada en la ecuación 12, se obtienen las ecuaciones de escalización dadas en la ecuación 14 y ecuación 15.

$$T = 12.87 * \frac{5}{255} \text{ Dato Temp} + 10.38 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$H = 29.673 * \frac{5}{255} \text{ Dato Hum} - 81.062 \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde: T = Temperatura en °C.

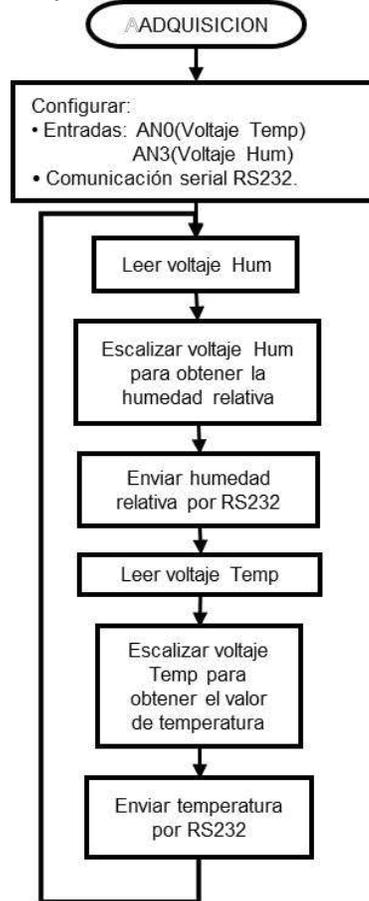
H = Humedad en %.

Dato Temp = Lectura de *Voltaje Temp* por el ADC.

Dato Hum = Lectura de *Voltaje Hum* por el ADC.

La Figura 18 muestra el diagrama de flujo desarrollado en el microcontrolador para el proceso de lectura, escalización y envío de datos al sistema de control.

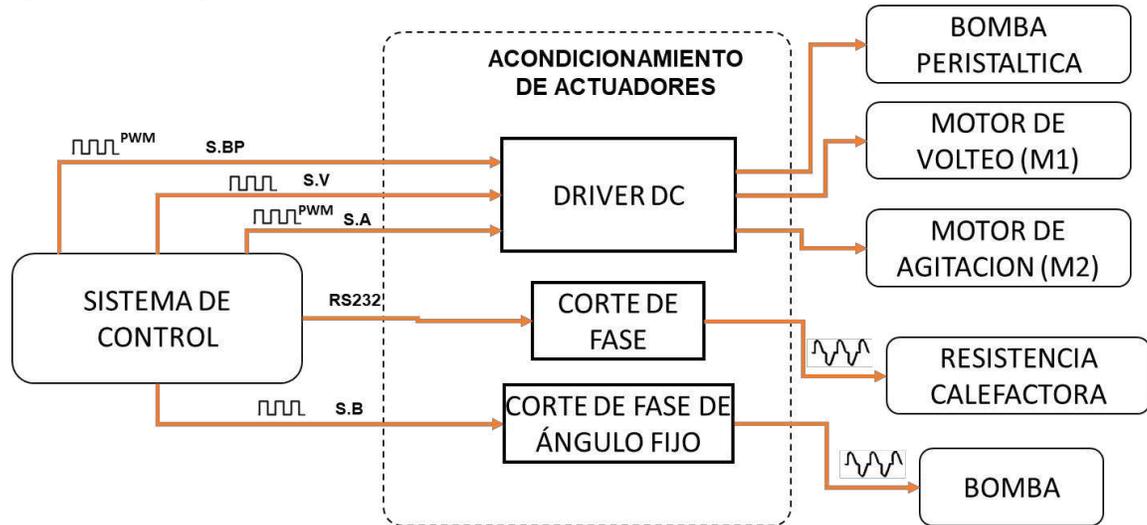
Figura 18. Diagrama de flujo implementado en PIC16F873A.



Fuente: Autores.

2.2.3 Acondicionamiento de actuadores. El acondicionamiento de actuadores está conformado por tres bloques principales que se encargan de acondicionar las señales provenientes del sistema de control, como se muestra en la Figura 19, un driver DC manipula la bomba peristáltica que se encarga de agregar el agua necesaria para ajustar la humedad al interior del biorreactor, así como el motor de volteo encargado de homogenizar el sustrato y el motor de agitación encargado de homogenizar la temperatura en el tanque de calentamiento de agua. Se usa un corte de fase para variar la potencia entregada a la resistencia calefactora, con el propósito de controlar la temperatura en el biorreactor, y de igual forma se utiliza un corte de fase para la bomba de recirculación de agua y evitar su calentamiento por uso extendido, para lo cual se establece un voltaje de 36V_{rms}.

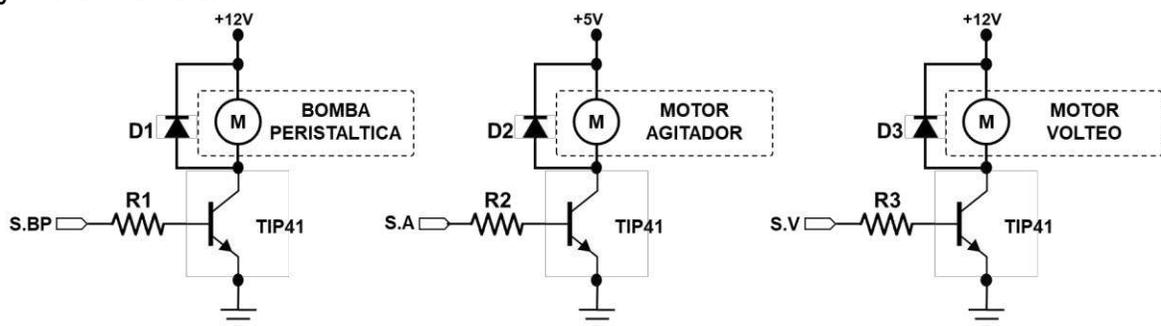
Figura 19. Diagrama de bloques del acondicionamiento de actuadores.



Fuente: Autores.

La bomba peristáltica, el motor de volteo y el motor de agitación, son motores de corriente continua que no consumen más de 2A a plena carga, sin embargo, en el arranque pueden generar picos de corriente de hasta 5A. Con base a lo anterior, el bloque driver DC es conformado por tres transistores TIP41 en configuración de emisor común, uno para cada actuador de corriente continua, considerando que la corriente de colector máxima que tolera este transistor es de 6A, suficiente para soportar la corriente que consume cada actuador, como se muestra en la Figura 20. Por otra parte, los transistores que operan los motores de la bomba peristáltica y del motor de agitación, son activados por una señal de ancho de pulso modulado (Pulse Width Modulation PWM), con la que se logra una variación de su velocidad, y el motor de volteo se activa o desactiva dependiendo del estado de la señal entregada por el sistema de control.

Figura 20. Circuito de driver DC para manejar bomba peristáltica, motor de agitación y motor de volteo.



Fuente: Autores.

Por otro lado, para la implementación del corte de fase que varía la potencia de la resistencia calefactora se diseñó un módulo dedicado exclusivamente a esta tarea con el objetivo de aliviar la carga del sistema de control, al igual que el sistema dedicado a la interpretación de sensores. Para su construcción se requieren tres partes:

a) Detector de cruce por cero: para sincronizar el sistema de corte de fase con la red eléctrica. Este genera un tren de pulsos de 5V y 60Hz que inician con cada cruce por cero de la red eléctrica. Para esto, primero se rectifica dicha señal usando un puente rectificador, luego, se restringe su amplitud a 5V por medio de un diodo zener cuya corriente se limita por medio de la resistencia $R1$, después, se activa un opto-transistor 4N25 limitando la corriente del diodo led con la resistencia $R2$, y por último, se obtiene el tren de pulsos aislado de la red eléctrica a la salida del opto-transistor cuyo colector está conectado a 5V y cuyo emisor está conectado a tierra con una resistencia de pull-down $R3$.

b) Circuito de potencia: que regula el paso de la corriente a través de la resistencia calefactora. El circuito de potencia se diseña teniendo en cuenta la máxima corriente efectiva que circula por la resistencia. Dado que el valor de resistencia es de 13Ω , a $120V_{rms}$ esta corriente es de $9,23A_{rms}$, por lo que se escoge un TRIAC BTA12 que soporta hasta $12A_{RMS}$ y 300V de pico inverso. Para su activación se usa un opto-TRIAC MOC3022 que aísla la red eléctrica del circuito digital, limitando la corriente en el gate del TRIAC BTA12 por medio de $R5$ y la corriente en el diodo led por medio de $R4$.

c) Microcontrolador: encargado de recibir un dato entero de 8 bits del sistema de control, a través de la interfaz RS232, y una señal de sincronización proveniente del detector de cruce por cero. A partir de estos datos, el microcontrolador calcula el tiempo que debe esperar para que al activar el TRIAC de la interfaz de potencia, se produzca un voltaje efectivo proporcional al dato entero recibido del sistema de control. Como microcontrolador se selecciona un PIC16F88, que cumple y no sobrepasa los requisitos de cantidad de pines, y disponibilidad de UART necesaria para realizar la comunicación RS232 con el sistema de control. Para el cálculo del retardo que se debe esperar desde la recepción del pulso de cruce por cero hasta la activación del TRIAC para producir el voltaje efectivo indicado por el sistema de control, se usa la ecuación 16, obtenida de forma experimental, en donde se relaciona el ángulo de disparo del TRIAC con el voltaje efectivo obtenido sobre la carga, y la ecuación 17, que relaciona el tiempo equivalente al ángulo de disparo del TRIAC, en función a la frecuencia de la red eléctrica.

$$\alpha(V) = 0.0002V^3 - 0.0281V^2 + 2.5828V + 6.4225$$

$$R^2 = 0.9982$$

Ecuación 16

Dónde: α = el ángulo en grados requerido,
 V = el voltaje efectivo requerido.

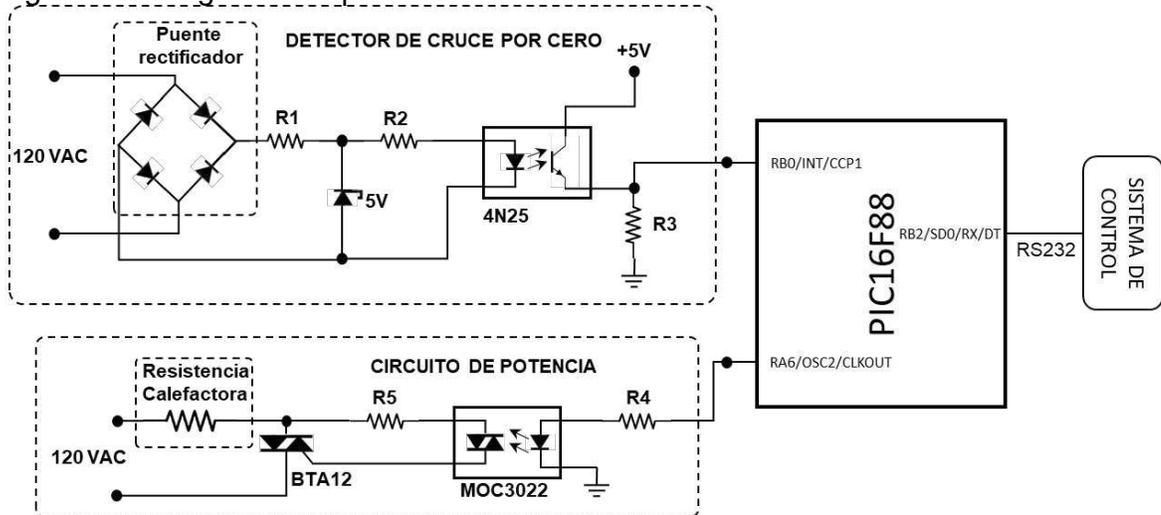
$$t(\alpha) = \frac{1}{2f} * \frac{\alpha}{180} * 1000 \text{ ms}$$

Ecuación 17

Dónde: t = el tiempo de retardo en ms,
 α = el ángulo en grados requerido,
 f = la frecuencia en Hz de la red eléctrica.

En la Figura 21 se muestra el diagrama esquemático con la agrupación de cada una de las partes del corte de fase, y los elementos seleccionados para su implementación.

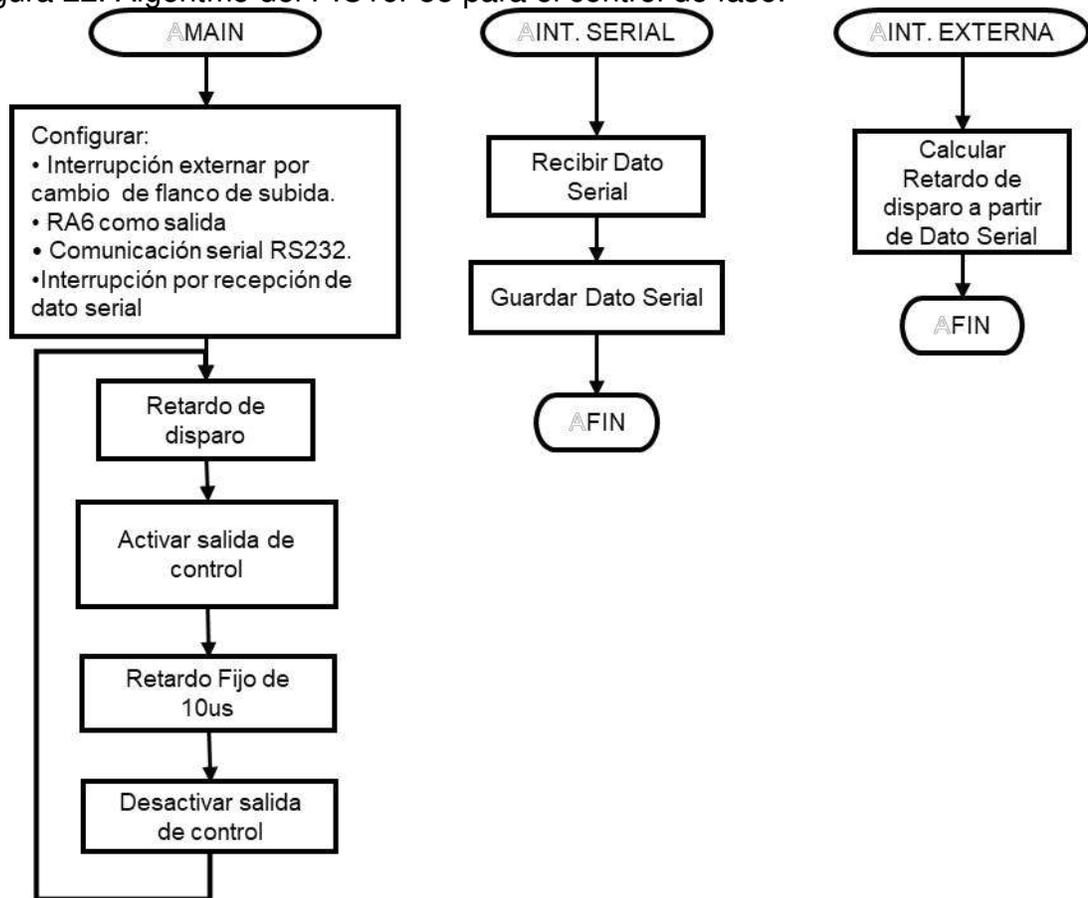
Figura 21. Diagrama esquemático del circuito de corte de fase.



Fuente: Autores.

El microcontrolador PIC16F88 recibe un dato serial de 8 bits acotado de 0 a 120, equivalente al voltaje a obtener en la resistencia calefactora, con el cual se calcula el pulso enviado al circuito de potencia. La Figura 22 muestra el algoritmo implementado en el microcontrolador PIC16F88.

Figura 22. Algoritmo del PIC16F88 para el control de fase.



Fuente: Autores.

Por último, la activación de la bomba de circulación de agua se realiza a través de un corte de fase, como el utilizado para la resistencia calefactora (ver Figura 21). Sin embargo, este corte de fase no se comunica a través de una interfaz serial RS232, sino recibe una señal digital del sistema de control que activa la generación de pulsos del PIC16F88, entregando siempre el 30% del voltaje de la red eléctrica, es decir $36V_{rms}$, con el objetivo de evitar el calentamiento progresivo que la bomba produce en el agua recirculada tras largos periodos de uso, y que afecta el desempeño del control de temperatura. El ANEXO B muestra los circuitos esquemáticos realizados para la conexión y disposición de cada dispositivo electrónico, involucrado en el monitoreo y control del biorreactor para el proceso de co-compostaje.

2.3 SISTEMA DE CONTROL

Luego de la instrumentación, se construye un panel de control donde el investigador puede interactuar con los actuadores y controles del prototipo, así como visualizar la temperatura y humedad en tiempo real. Este panel, está compuesto por tres secciones: una sección de arranque y parada del experimento, una sección para cada variable compuesta por: una perilla con las funciones de apagado, modo manual y automático, una perilla para graduar la referencia de temperatura y humedad, o nivel de energía entregado a la resistencia calefactora, a la bomba peristáltica y al motor de agitación del tanque de calentamiento. Además, el panel de control posee un indicador luminoso de encendido sobre cada par de perillas, y una pantalla de cristal líquido (Liquid Crystal Display, LCD) para visualizar el estado de la temperatura y humedad actuales, al igual que la referencia de temperatura y humedad, y el porcentaje de energía entregado a los actuadores proporcionales. La Figura 23 se muestra el panel con la distribución los elementos mencionados.

Figura 23. Disposición de los elementos del panel. Arriba: diseño, abajo: implementación.

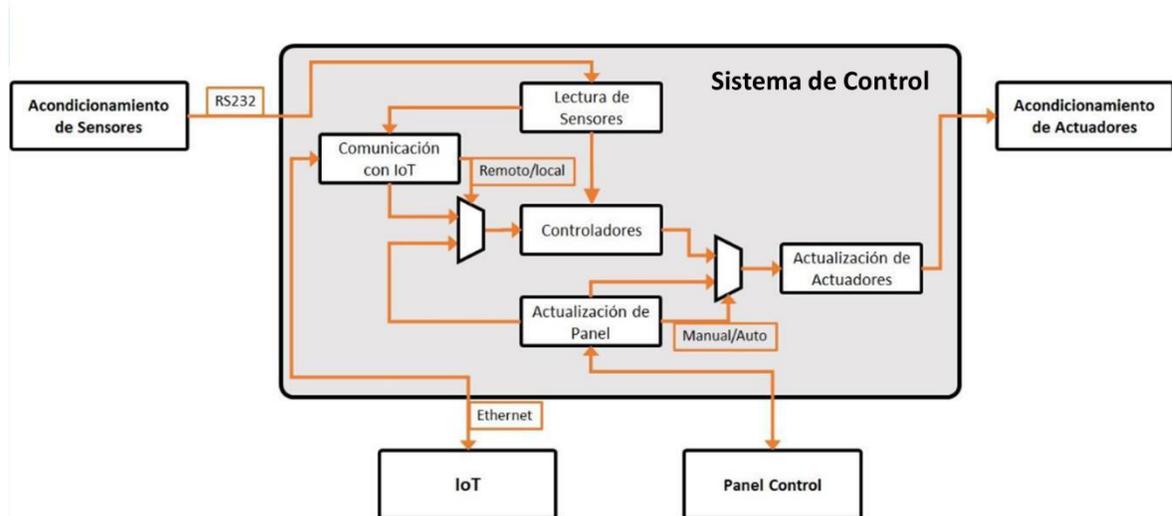


Fuente: Autores.

Posteriormente, se procede a la implementación del sistema de control, que calcula las acciones de control para cada actuador a partir de la lectura de los sensores, y de las referencias introducidos por el investigador desde el panel de control, o desde la interfaz remota. Para esto, el sistema de control debe realizar otras cuatro funciones, como se muestra en la Figura 24: a) Se debe leer la interfaz serial de donde se reciben los datos de los sensores, que se visualizan en la interfaz remota

y panel de control local, y con los que se calcula la acción de control de cada variable. b) Se debe leer y actualizar el panel de control de donde se reciben las interacciones de un investigador, y se muestra el estado actual de la temperatura y humedad. c) Se deben enviar los datos de temperatura, humedad, estado de los motores y bomba peristáltica a la plataforma de IoT, y recibir las interacciones del investigador desde allí, priorizando siempre los datos remotos sobre los locales cuando exista una conexión exitosa con la plataforma de IoT. Por último, d) se deben actualizar las señales de control para los actuadores del prototipo usando la acción de control calculada por los controladores, o de forma manual, el porcentaje de energía desde el panel de control local.

Figura 24. Funciones que realiza el sistema de control.



Fuente: Autores.

Para realizar estas funciones, se implementan 7 tareas, como se muestran en la Tabla 6, agrupadas por función, y donde se muestra la prioridad y periodo de ejecución de cada una. El periodo de las tareas que calculan las acciones de control está establecido por el diseño de cada controlador (ver secciones 2.4.1 y 2.4.2), el periodo de las tareas que realizan la comunicación con la plataforma de IoT está limitado por el tiempo que demora en subir y bajar datos de la misma, el periodo de la tarea de lectura sensores es el mismo que el de envío, la tarea de actualización de actuadores se ejecuta cada vez que el estado de alguno de ellos cambia a manera de interrupción.

Tabla 6. Tareas que implementan la aplicación del software de procesamiento.

NOMBRE DE TAREA	FUNCIÓN	PRIORIDAD	PERIODO (S)
tScreenUpdater	Actualización del panel	1	0.1
tActuatorsUpdater	Actualización de actuadores	1	-
tSensorsUpdater	Lectura de sensores	1	0.2
tTemperatureController	Calculo de señal de control de temperatura y humedad	2	60
tHumidityController		2	5
tUbidotsSender	Envío y recepción de datos a plataforma IoT	1	30
tUbidotsReceiver		1	5

Fuente: Autores.

En la programación secuencial tradicional solo se puede ejecutar una tarea a la vez, y solo se ejecuta la siguiente si la anterior ya ha finalizado, por tanto cada tarea debe esperar la ejecución de todas las anteriores. Este problema se acentúa cuando las tareas tienen que esperar eventos externos para finalizar su ejecución. Por tanto, para garantizar las demandas de tiempo de las tareas que debe desempeñar el sistema de control, se deben ejecutar independientemente. Esto se consigue por medio del kernel de un RTOS que conmuta el tiempo de procesamiento entre tareas, ejecutando la de mayor prioridad disponible, y suspendiendo las de menor prioridad o que aún no se deban ejecutar. Para esto, al final cada tarea se programa un tiempo de suspensión que, cuando dos tareas tienen igual prioridad y ambas están listas para ser ejecutadas, el kernel ejecuta la tarea que mayor tiempo ha esperado. En el ANEXO C se incluyen los diagramas de flujo del algoritmo que implementa cada tarea y un diagrama que muestra cómo se comunica cada una con el resto de la aplicación.

Además de la compatibilidad con un RTOS para la implementación de las tareas mencionadas, la plataforma digital que implementa el sistema de control debe cumplir con un mínimo entradas y salidas. De acuerdo con los módulos de acondicionamiento de sensores y actuadores y a las entradas del panel de control diseñados, se deben contar con 30 pines discriminados por función como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Pines necesarios para la implementación del sistema de control.

	ADC	PWM	RS232	I/O DIGITAL	TOTAL
Cantidad	3	2	2	23	30
Función	Lectura de las perillas de selección de nivel del panel local de usuario.	Variación de la velocidad de la bomba peristáltica y agitador en tanque de calentamiento.	Comunicación con módulo de interpretación de sensores y con corte de fase para resistencia calefactora.	Panel Local: 12 interruptores, 1 selector de visualización, 4 indicadores luminosos, 8 para LCD de visualización. 1 lectura de sensor de nivel. 1 para activación de volteo en biorreactor.	

Fuente: Autores.

Por último, esta plataforma debe ser compatible con un módulo de comunicación ethernet para conectar al prototipo con la interfaz remota (Ver sección 2.5). Para satisfacer todas estas características se selecciona un Arduino Mega 2560 junto con su módulo de expansión de ethernet wiznet500 y compatible con FreeRTOS, uno de los sistemas operativos en tiempo real más usados del mundo, diseñado para ser lo suficientemente liviano como para ser ejecutado en un microcontrolador⁵⁷, confiable, líder en el mercado los últimos años y descargado más de 113000 veces en el 2014 cuando soportaba hasta 35 diferentes arquitecturas; es desarrollado profesionalmente, y libre para ser incorporado en productos comerciales⁵⁸

2.3.1 Controlador de humedad. Para obtener una función de transferencia que relacione la humedad de los sustratos del biorreactor con la señal PWM entregada a la bomba peristáltica, se emplea un sustrato a una humedad inicial del 30%, para obtener la curva característica del sistema de humedad en el rango lineal del sensor YL-69. Luego, se realiza un escalón de la señal PWM entregada a la bomba peristáltica desde 0% hasta el 100%, y se activa el motor de volteo durante toda la obtención de la curva característica, para determinar el efecto que tiene el motor de volteo en la medición del sensor YL.69. La Figura 25 muestra la respuesta a lazo abierto del sistema de humedad.

⁵⁷FreeRTOS. Op. cit. What is FreeRTOS?

⁵⁸Ibid. About FreeRTOS.

Figura 25. Respuesta en lazo abierto del sistema de humedad.



Fuente: Autores.

La respuesta del sistema de humedad tiene un tiempo muerto de 60 segundos, despreciable en proporción al tiempo total en el que se estabiliza el sistema. Además, se observa que el sistema de humedad posee un comportamiento de primer orden, estabilizándose alrededor de los 1500 segundos, en una humedad relativa cercana al 76%. Sin embargo, después de 1500 segundos, se desactiva el motor de volteo para observar el efecto del mismo en el sistema. En ese instante, se obtiene una caída del valor de humedad medido por el sensor, hasta llegar a una humedad de 55% aproximadamente. Con base a lo anterior, se determina que el motor de volteo del biorreactor influye en gran medida en el contacto que posee el sustrato a co-compostar con el sensor de humedad, afectando su medición.

Se establece que no es posible emplear un sensor de humedad resistivo confiable en la estructura de biorreactor, para obtener una función de transferencia que relacione la humedad del sustrato con la señal PWM de la bomba peristáltica. Además, para poder emplear sensores de tipo capacitivo, inmunes a las variables descritas anteriormente, como el EC-5 o el VH400, es necesario reconstruir el biorreactor con materiales no metálicos que no interfieran en su medición. Por esta razón, se escoge un sistema de control a lazo abierto para la variable de humedad, sin embargo, se deja instrumentado e instalado el sensor de humedad en la tercera ubicación, con el propósito de observar su medición durante el experimento de producción de co-compostaje.

El sistema de control a lazo abierto de humedad calcula el tiempo en segundos, que la bomba peristáltica debe energizarse para agregar el agua necesaria, con el propósito de conseguir el porcentaje de humedad introducido por el usuario, de acuerdo con el caudal entregado por la bomba peristáltica descrito en la ecuación 18.

$$Volumen(t) = 0,33938 * t \quad \text{Ecuación 18}$$

Dónde: *Volumen* = Volumen de agua en ml.
t = Tiempo en segundos.

Por lo cual, se debe considerar que la humedad relativa (%) de cualquier sustrato es el cociente de la cantidad de agua y la cantidad de sustrato seco (ecuación 21). Vale aclarar que dado que la densidad del agua es de $1 \left(\frac{g}{cm^3}\right) = 1 \left(\frac{g}{ml}\right)$ a temperatura ambiente, se ha considerado que $1g = 1ml$ en los cálculos que siguen.

$$Humedad(\%) = \frac{AguaTotal}{SustratoSeco + AguaTotal} * 100 \quad \text{Ecuación 19}$$

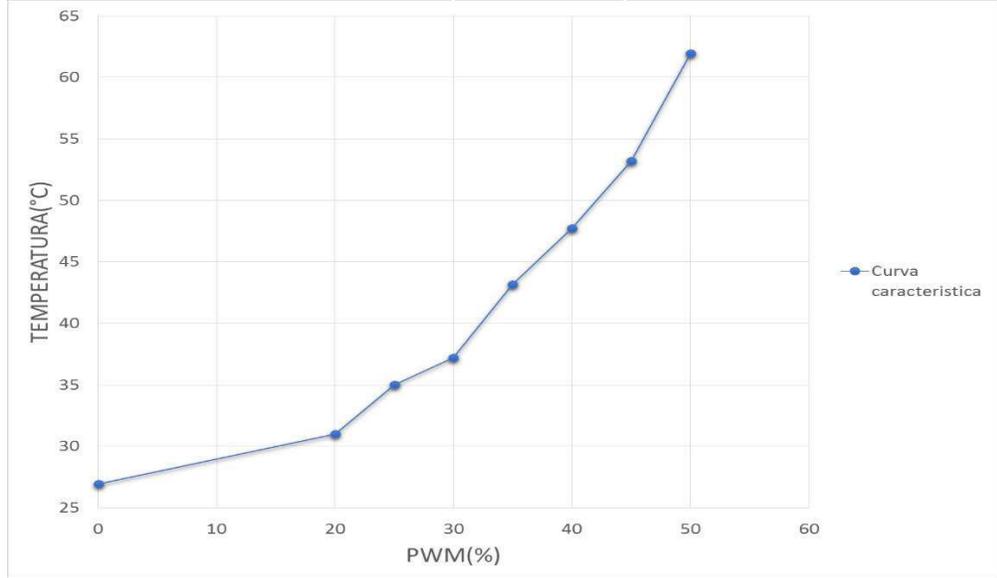
De esta relación se puede obtener la cantidad de agua presente en un sustrato húmedo (ecuación 20). Si el suelo no está totalmente seco, como es el caso de muchos de los experimentos a realizar en el prototipo, se puede obtener la cantidad de agua que es necesario adicionar teniendo en cuenta la cantidad de agua presente (ecuación 21).

$$AguaTotal(ml) = \frac{Humedad(\%) * SustratoSeco}{100 - Humedad(\%)} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$AguaAAdicionar(ml) = \frac{HumedadDeseada(\%) * SustratoSeco}{100 - HumedadDeseada(\%)} - AguaPresente \quad \text{Ecuación 21}$$

2.3.2 Controlador de temperatura. Con el fin de obtener una relación lineal con la temperatura en el rango de trabajo (entre 30°C hasta 60°C), se observa su comportamiento respecto a la señal PWM entregada al corte de fase, y respecto al voltaje RMS entregado por el mismo. La Figura 26 muestra que la temperatura no se comporta linealmente al aumento de la señal PWM enviada al corte de fase.

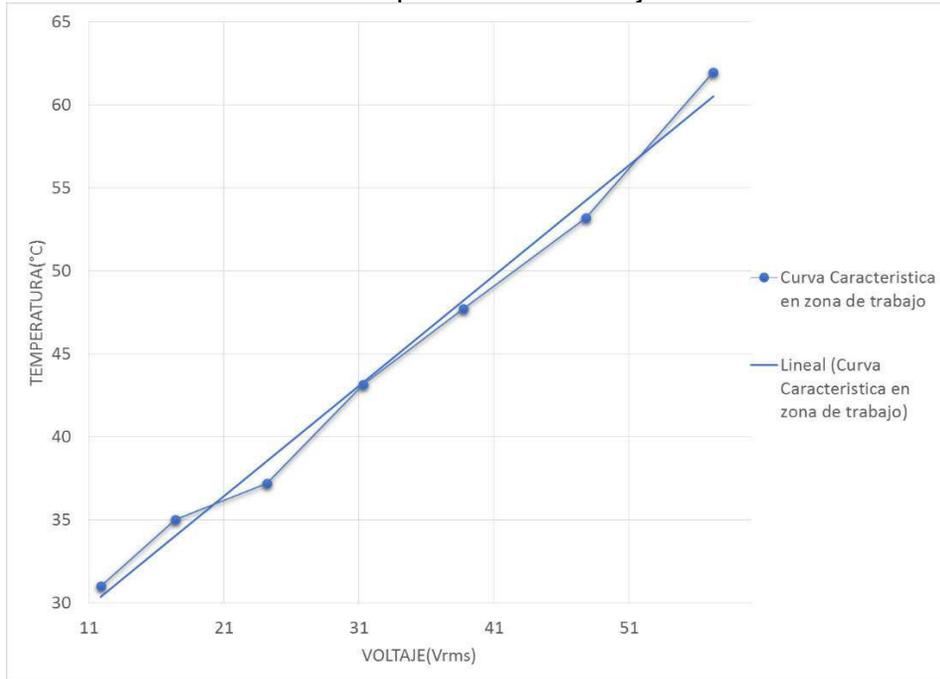
Figura 26. Curva característica de temperatura respecto a PWM.



Fuente: Autores.

En contraste, en la Figura 27 se observa que la temperatura aumenta linealmente con respecto al voltaje RMS entregado por el corte de fase, por esta razón, se realiza el modelo de temperatura con estas dos variables.

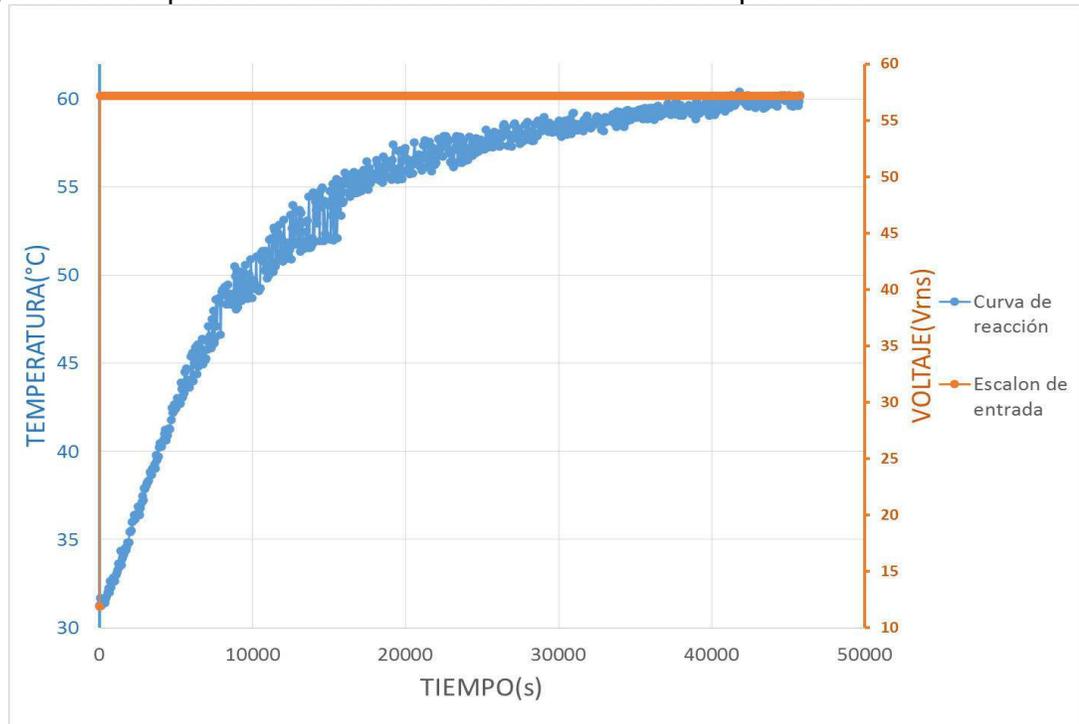
Figura 27. Curva característica Temperatura vs Voltaje RMS en zona de trabajo.



Fuente: Autores.

Para determinar el modelo de temperatura, se aplica un escalón de voltaje RMS, iniciando desde $11.90V_{RMS}$ hasta $57.20V_{RMS}$, y se observa el cambio de temperatura con un tiempo de muestreo de un minuto. La Figura 28 muestra la respuesta a lazo abierto obtenida.

Figura 28. Respuesta a lazo abierto del sistema de temperatura.



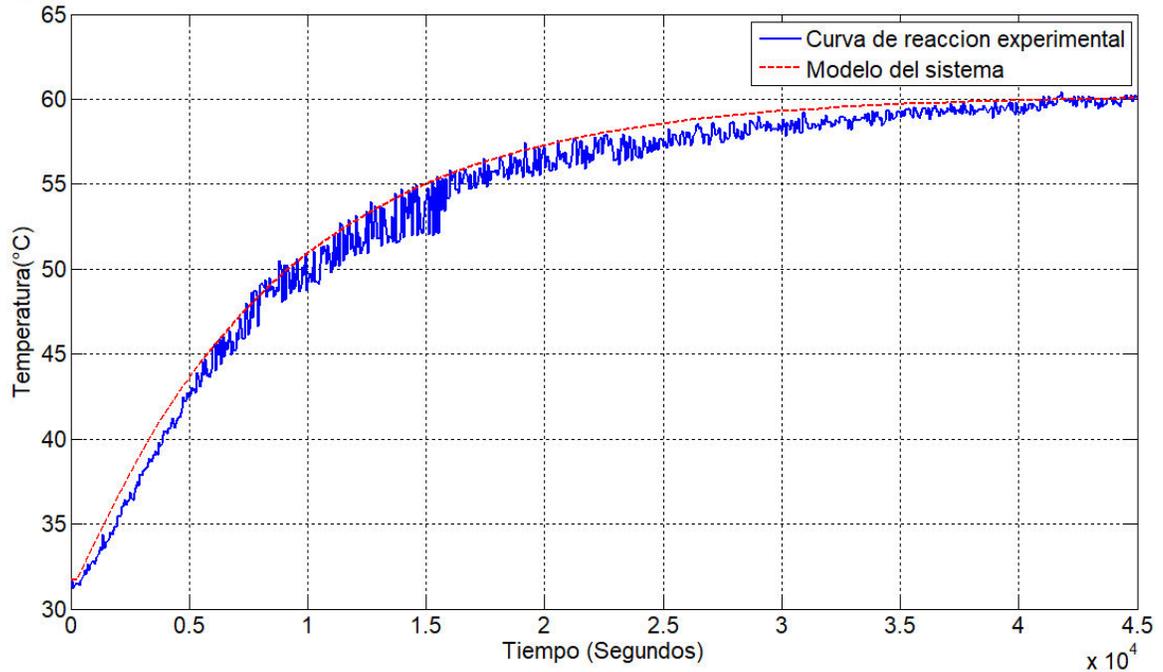
Fuente: Autores.

Al realizar los cálculos para la aproximación matemática, se obtiene el modelo de primer orden con tiempo muerto mostrado en la ecuación 22.

$$G_{(s)} = \frac{\text{Temperatura}}{\text{VoltajeRMS}} = \frac{0.6339e^{-400s}}{9600s + 1} \quad \text{Ecuación 22}$$

Comparando el modelo obtenido matemáticamente y los datos experimentales mediante el software MATLAB® (ver Figura 29), se obtiene que el modelo posee una desviación promedio de $\pm 1,36^{\circ}\text{C}$ con relación a los datos obtenidos, aunque se aproxima muy bien al comportamiento del sistema, es posible ajustarlo un poco más para obtener una desviación promedio menor.

Figura 29. Comparación del modelo obtenido con la curva de reacción experimental.



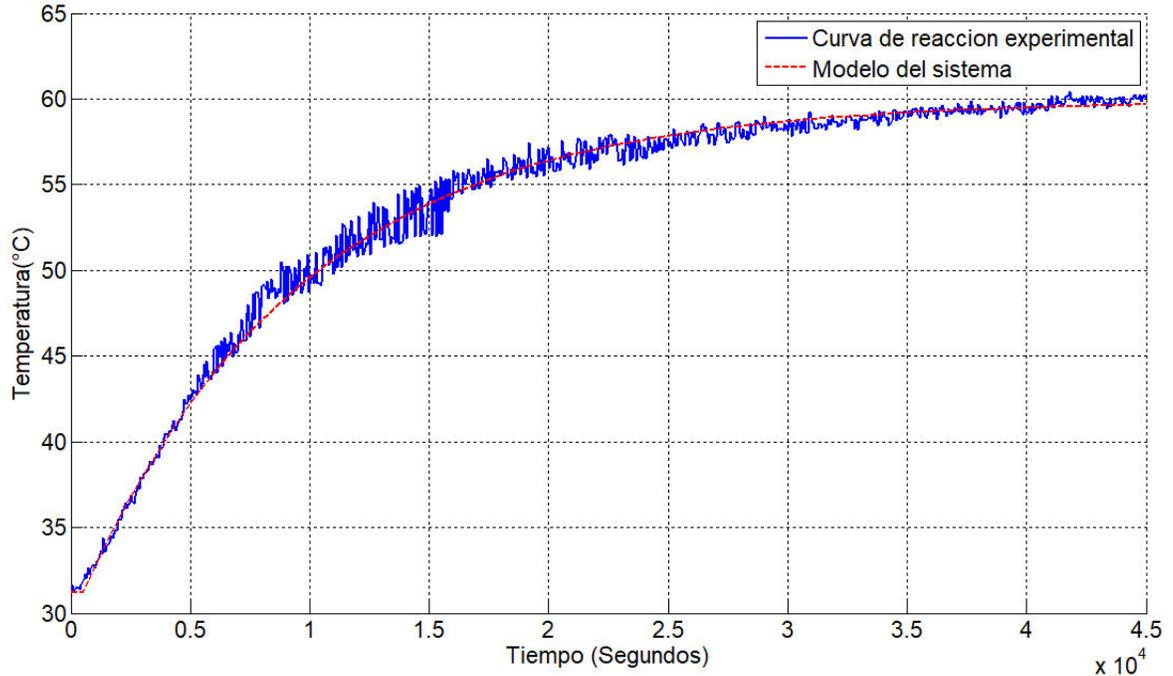
Fuente: Autores.

Aleatoriamente se ajustaron los valores obtenidos en los cálculos del modelo de temperatura de la ecuación 22, hasta obtener el modelo descrito en la ecuación 23.

$$G_{(s)} = \frac{\text{Temperatura}}{\text{VoltajeRMS}} = \frac{0.635e^{-400s}}{9250s + 1} \quad \text{Ecuación 23}$$

La Figura 30 muestra el comportamiento de la función de transferencia de la ecuación 23, comparada con la respuesta real del sistema de temperatura. Al calcular la desviación promedio de la función de transferencia, se obtiene un valor de $\pm 0,469^\circ\text{C}$, mejorando aproximadamente 3 veces en relación con la función de transferencia descrita en la ecuación 22.

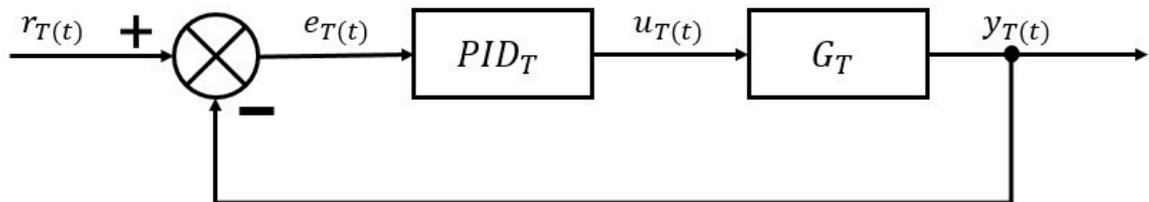
Figura 30. Validación del modelo de temperatura ajustado.



Fuente: Autores.

Debido a que el modelo de temperatura obtenido presenta un comportamiento lineal, se emplea una estructura básica de control, mostrada en la Figura 31, en la cual la función de transferencia G_T corresponde a la ecuación 23. Además, teniendo en cuenta la constante de tiempo de la función de transferencia de temperatura y el criterio de Nyquist, se escoge un periodo de muestreo de 60 segundos.

Figura 31. Estructura del sistema realimentado para el control de temperatura.



Fuente: Autores.

Donde: $r_T(t)$ = Señal de referencia de temperatura.

$e_T(t)$ = Señal de error de control.

$u_T(t)$ = Acción de control (Voltaje en resistencia calefactora).

$y_T(t)$ = Salida de la planta (Temperatura).

Posteriormente, se establecen los parámetros de diseño del controlador, los cuales son mostrados en la Tabla 8, junto con las razones por las que se escogieron.

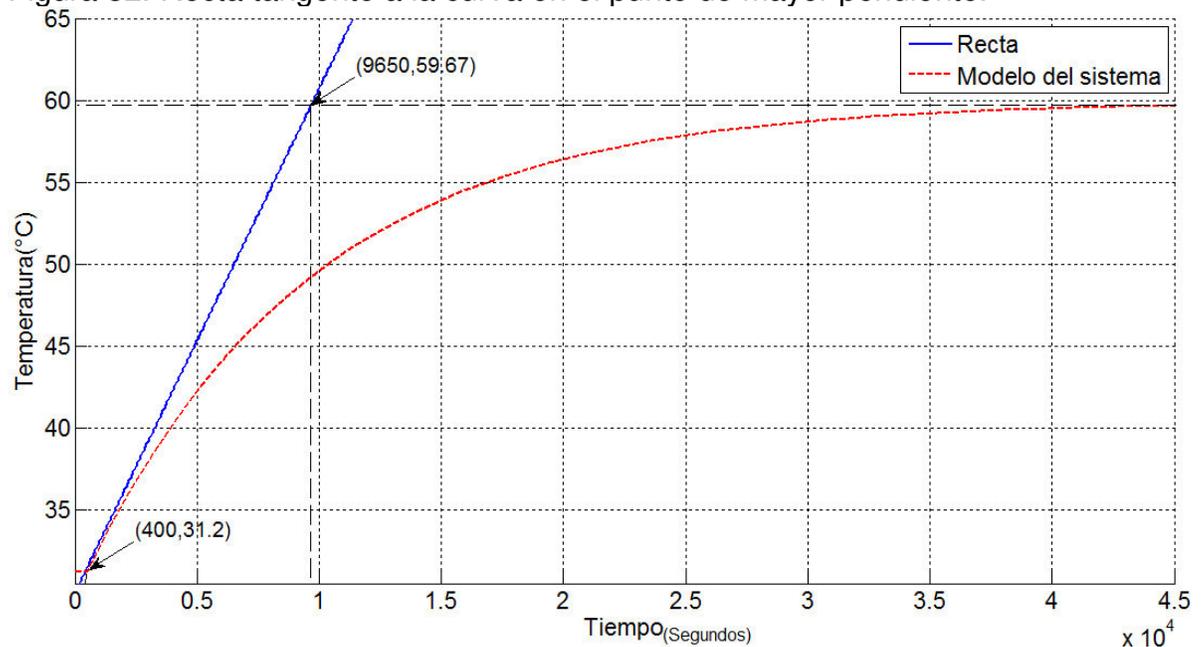
Tabla 8. Parámetros de diseño del controlador PID.

PARAMETRO	RANGO	RAZÓN
Error en estado estacionario	<1,5%	Salida del sistema lo más cercana a la referencia.
Máximo sobre-pico	<1,3%	Falta de un dispositivo de enfriamiento.
Tiempo de establecimiento	$3800s < T_s < 5400s$	Cambios agresivos de temperatura pueden afectar la vida bacteriana.

Fuente: Autores.

Luego, se calculan los parámetros de tiempo muerto L y constante de tiempo T , de acuerdo con la recta tangente en el punto de mayor pendiente del modelo obtenido (ver Figura 32). Dando como resultado un tiempo muerto de 400 segundos, y una constante de tiempo igual a 9250 segundos.

Figura 32. Recta tangente a la curva en el punto de mayor pendiente.



Fuente: Autores.

Con base a los valores obtenidos, se determinan las constantes para cada tipo de controlador mostradas en la Tabla 9, según el criterio de curva de reacción de Ziegler-Nichols.

Tabla 9. Constantes obtenidas por Ziegler-Nichols.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	23.12	∞	0
PI	20.81	1333.33	0
PID	27.75	800	200

Fuente: Autores.

Seguidamente, se realiza la simulación en Simulink® de cada tipo de controlador, como se muestra en la Tabla 10 y, como se puede apreciar, ninguno de los controladores diseñados cumple con los parámetros de diseño propuestos (ver Tabla 8).

Tabla 10. Comparación de parámetros obtenidos mediante Ziegler-Nichols.

PARAMETRO	CONTROLADOR		
	P	PI	PID
Estable	Si	Si	Si
Soporta perturbaciones	Si	Si	Si
Implementable	Si	Si	SI
Tiempo de establecimiento(s)	3200	3500	3700
Error en estado estacionario (%)	2.2	1.1	0.5
Sobre-pico (%)	2.7	2.1	3.8

Fuente: Autores.

Debido a lo anterior, se realiza una sintonización empleando el bloque PID de la librería Simulink®. La Tabla 11 muestra las constantes obtenidas mediante esta sintonización.

Tabla 11. Constantes obtenidas por sintonización empleando Simulink®.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	14.64	∞	0
PI	9.78	934.21	0
PID	19.41	414.93	2575.87

Fuente: Autores.

Al realizar nuevamente la simulación de cada uno de los controladores empleando el entorno de Simulink®, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 12, donde se observa que los controladores PI y PID cumplen con un error en estado estacionario menor a 1,5%, un sobre pico menor a 1,3%, y un tiempo de establecimiento entre 3800s y 5400s. 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. El ANEXO D presenta la simulación de cada uno de los controladores de temperatura propuestos en el entorno de Simulink®.

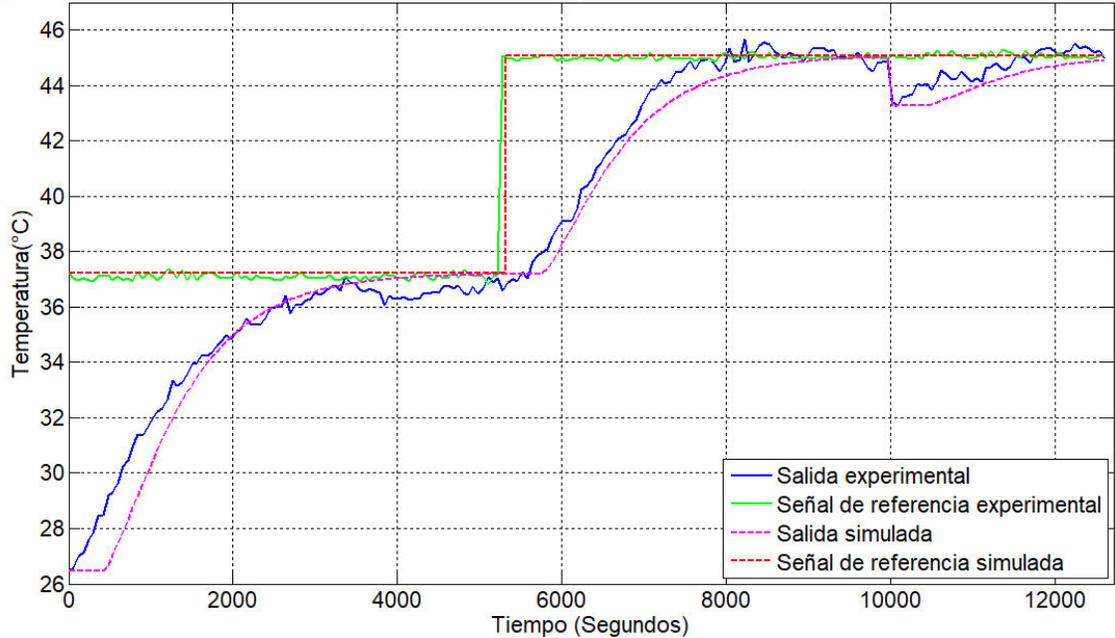
Tabla 12. Comparación de parámetros obtenidos mediante sintonización en Simulink®.

PARAMETRO	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

Fuente: Autores.

Una vez implementado el controlador de temperatura en el sistema, se realiza la validación del mismo. La Figura 33 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 las 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. 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 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 33, el controlador corrige satisfactoriamente la acción de la perturbación.

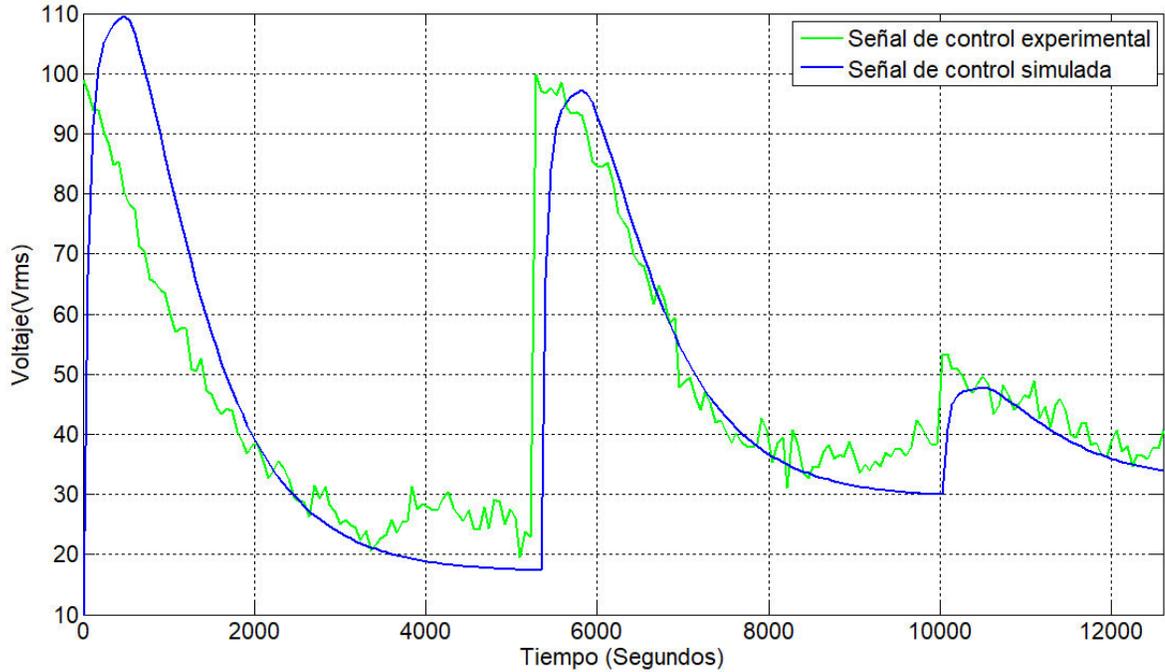
Figura 33. Salida del controlador PI de temperatura.



Fuente: Autores.

Por otro lado, la Figura 34 muestra la señal simulada de control en Simulink®, y la misma señal obtenida experimentalmente, las cuales se encuentran entre los límites de voltaje que puede entregar el sistema de corte de fase ($0 V_{rms} - 120 V_{rms}$). Así mismo, al comparar las señales entre sí, se encuentra una diferencia promedio de $7,59 V_{rms}$, equivalente a una desviación promedio del 6,32%, mayormente causado por el ruido presente en la señal de control experimental.

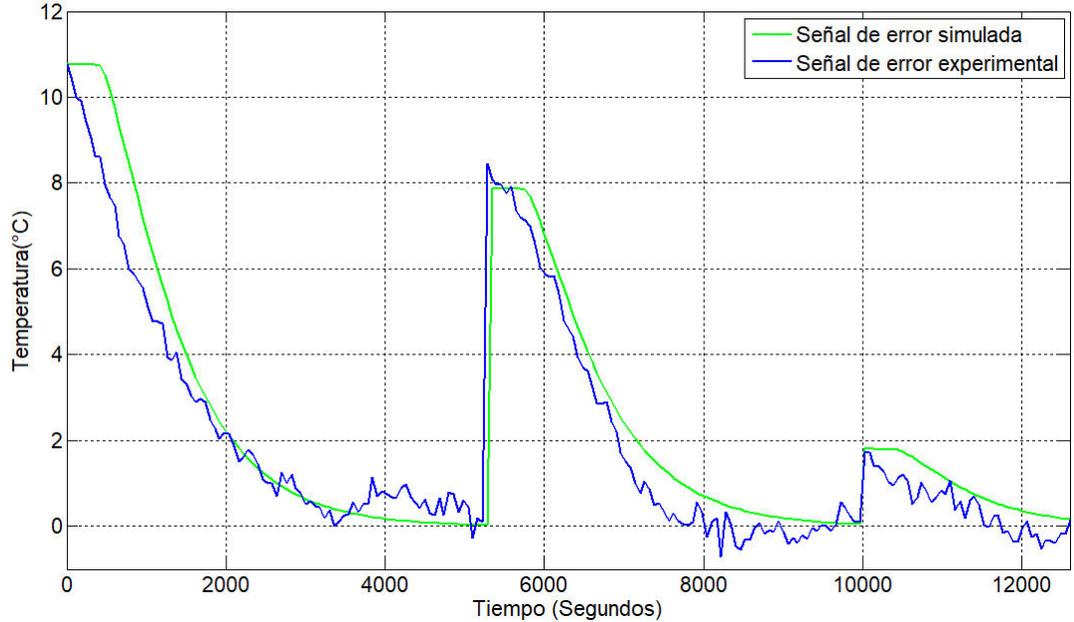
Figura 34. Señal de control del controlador PI.



Fuente: Autores.

En cuanto a la señal de error, tanto simulada como experimental (ver Figura 35), se observa una diferencia promedio entre ellas de $0,67^{\circ}\text{C}$, mayormente causada por el ruido presente en el sistema. La mayor diferencia entre la señal de error experimental y simulada es de $2,58^{\circ}\text{C}$ encontrada a los 660 segundos, debido a que experimentalmente en esa etapa del experimento, la señal de salida no presenta un tiempo muerto considerable.

Figura 35. Señal de error del controlador PI.



Fuente: Autores.

Con base a los datos experimentales obtenidos del controlador se determina que, a pesar del ruido existente en el sistema el controlador cumple con los parámetros de diseño establecidos. Además, se observa que tanto en la simulación como en la fase experimental se obtiene un comportamiento similar del sistema, por lo cual se puede establecer que el modelo obtenido para temperatura y el diseño del controlador PI se realizaron satisfactoriamente.

2.4 INTERFAZ REMOTA

Los experimentos de co-compostaje tienen un tiempo de duración de 20 a 90 días⁵⁹, en los que es necesario conocer el estado y comportamiento del proceso para la supervisión y toma de decisiones mediante una interfaz de usuario. Sin embargo, dada la larga duración del experimento, no basta con una interfaz local, sino que es pertinente el uso de una interfaz remota que facilite a un investigador el acceso a los controles del prototipo, y a los datos del comportamiento del experimento desde cualquier lugar y momento. Típicamente, esta funcionalidad se suplía por medio de sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) o DCS (Decentralized Control System) en aplicaciones industriales, no obstante, este tipo de sistemas sobredimensionan las aplicaciones de laboratorio por sus costos de implementación y capacidades técnicas. Por otro lado, las plataformas de IoT permiten un desarrollo

⁵⁹ TCHOBANOULOUS, George, *et al.* Op. cit., p. 778

progresivo y a la medida para aplicaciones tanto industriales como de experimentación. Existen varias compañías a nivel mundial que ofrecen el servicio de hosting para el desarrollo de aplicaciones basadas en IoT, algunas también ofrecen los servicios de interpretación de datos y de alertas por correo electrónico⁶⁰. Algunas de las plataformas de IoT más importantes se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Comparación de proveedores de servicios de IoT

NOMBRE	TIPO API	COSTO	CARACTERÍSTICAS	PÁGINA WEB
SensorCloud	Open Data API	25.000 Tr/Mo: gratis 100.000 Tr/mo:\$35/Mo	Alertas por Email, Math engine	http://sensorcloud.com/
Hostinger	PHP MySQL API	2Gb: Gratis	N/A	http://www.hostinger.com/
ThingSpeak	JSON XML API	Sin información.	Integración con Matlab	http://www.thingSpeak.com/
Autodesk Control	Rest API	\$1000/Mo Infinito, máximo 500 elementos.	Alertas, Integración MS Visio	http://www.seecontrol.com/
Ubidots	Rest API	500.000 Tr/mo: gratis	Alertas, Math engine, buen soporte librerías.	http://ubidots.com/

Fuente: LEON, Juan. Desarrollo de un dispositivo prototipo para medición de parámetros de corrosión utilizando monitoreo remoto-inalámbrico. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Tunja, Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Electrónica. p.62.

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 esta. El servicio está ubicado en Boston y desarrollado desde el AtomHouse de Medellín y Bogotá, Colombia. Ubidots sobresale dentro de las diferentes plataformas existentes por su gran soporte de librerías para un buen número de plataformas de desarrollo tanto de hardware, y la mayor cantidad de transferencias por mes de forma gratuita.⁶¹

El primer paso para la implementación de la interfaz es la creación del dispositivo y sus variables en Ubidots, se crean 11 variables con su rango y unidad, que corresponden a las 9 del panel local, más dos adicionales para el control de la humedad, como se muestra en la Tabla 14.

⁶⁰ LEON, Juan. Op. cit., p. 62.

⁶¹ Ibid., p. 62.

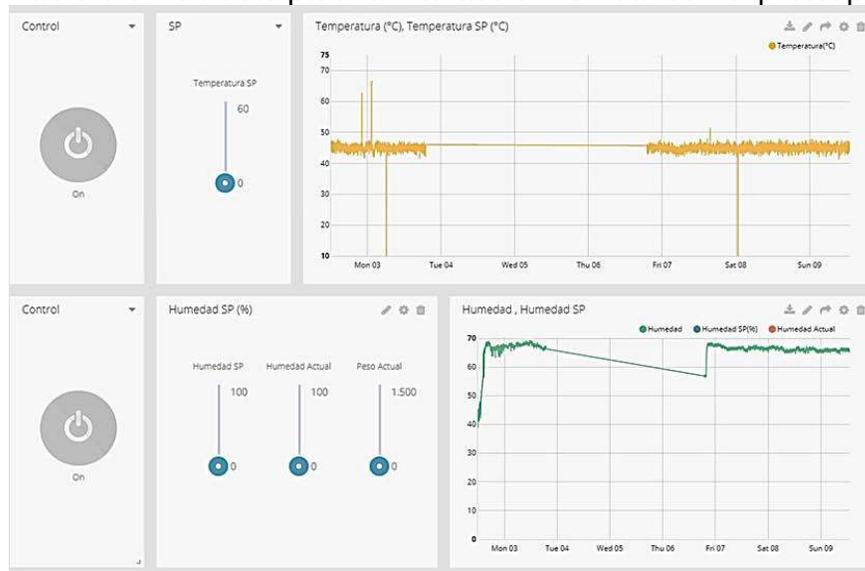
Tabla 14. Variables creadas en Ubidots

Variable	Rango	Unidad
Temperatura	10-75	°C
Controlar Temperatura	0-1	Booleano
Set-point Temperatura	30-60	°C
Humedad	0-99	%
Masa Actual	0-2	kg
Humedad Actual	0-70	%
Controlar Humedad	0-1	Booleano
Set-point Humedad	0-70	%
Agitar	0-1	0-1
Velocidad Agitación	0-100	%
Volteo	0-1	Booleano

Fuente: Autores.

Luego, se procede a crear un tablero con los controles y visualizadores de las variables del dispositivo usando tres filas (ver Figura 36), la primera fila permite fijar el valor de referencia, activar el control y visualizar el comportamiento de la temperatura. Por último, la tercera fila permite establecer la humedad deseada, el peso del sustrato y la cantidad de agua inicial del mismo, así como ver su comportamiento histórico.

Figura 36. Tablero en Ubidots para la interacción remota con el prototipo.

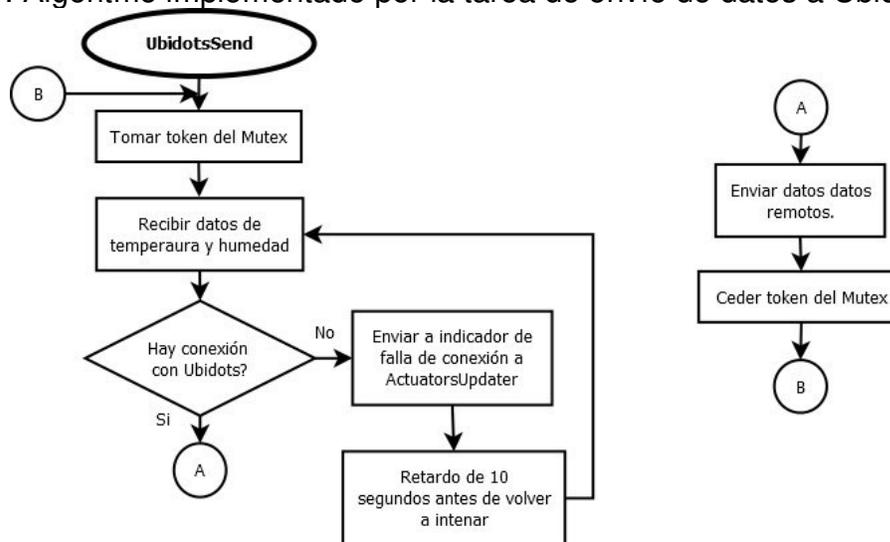


Fuente: Autores.

Posteriormente, se procede a la programación de los algoritmos que permitirán la interacción entre la interfaz remota y el dispositivo. 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. Estas librerías, permiten al dispositivo conectado, entre otras cosas, enviar y recibir datos de las variables a Ubidots usando un sistema de tokens o claves, un token para cada dispositivo asociado a la plataforma y un token por variable asociada a ese dispositivo. Para cualquier interacción, el dispositivo debe autenticarse haciendo una petición HTTP con el token del dispositivo, y en otra petición especificar el token de la variable a la que quiere hacer referencia. Para enviar datos, esta última petición debe incluir el valor del dato que se quiere enviar, y para recibir datos, el número de datos que se quieren recibir.

Para la interacción con Ubidots se usan dos tareas de igual prioridad en el RTOS, que usan el controlador de ethernet W5000, UbidotsSender para enviar datos, y UbidotsReceiver para recibirlos. Sin embargo, para evitar conflictos por el uso intercalado e interrumpido del controlador de ethernet entre estas dos tareas se usa un mutex, cada tarea solicita el mutex al inicio de su ejecución y lo libera cuando ha terminado. Adicionalmente, cada tarea valida la conexión con Ubidots antes de intentar enviar o recibir datos de la plataforma, si no encuentran una conexión exitosa esperan 10 segundos antes de intentar de nuevo. En las Figuras 37 y 38 se muestran respectivamente los algoritmos de la tarea que envía y de la que recibe datos.

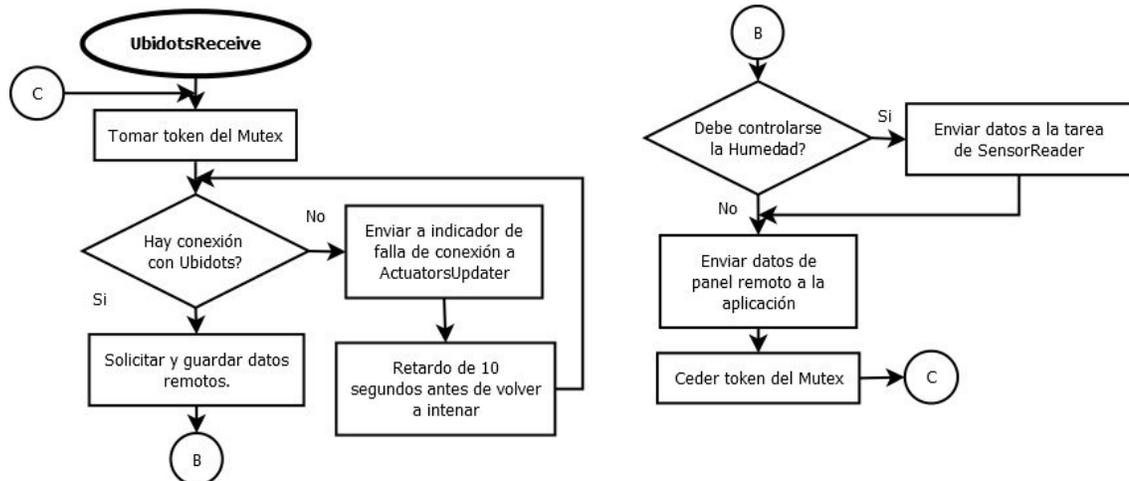
Figura 37. Algoritmo implementado por la tarea de envío de datos a Ubidots.



Fuente: Autores.

Luego de que la tarea de recepción de datos UbidotsReceive valida la conexión con la plataforma y adquiere los datos, envía los datos correspondientes al controlador de humedad, si dicho controlador está activado, con el propósito de interrumpir el funcionamiento de la bomba peristáltica si el controlador de humedad se ha detenido por el investigador desde la plataforma. El resto de los datos provenientes de la plataforma son enviados a las tareas correspondientes a través de la tarea de actualización del panel ScreenUpdater.

Figura 38. Algoritmo implementado por la tarea de recepción de datos a Ubidots.



Fuente: Autores.

3. EXPERIMENTO PARA PRODUCCIÓN DE CO-COMPOST

Para validar el biorreactor en el proceso de co-compostaje se plantea un experimento, donde se utiliza 1.5 Kg de sustrato a co-compostar, conformado por 1050 gramos de RSO de plaza de mercado, y 450 gramos de lodos de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), lo que es una relación del 70% de RSO y 30% de lodos de PTAR. Los RSO están compuestos por partes iguales de cáscaras de frutas y verduras, así como de algunos tubérculos.

Luego se procede a la trituration y eliminación el agua existente tanto en los RSO como en los lodos de PTAR, con el propósito de que el sustrato tenga una textura homogénea y un nivel de humedad cercano al 0%. El proceso de secado se efectúa mediante una mufla del laboratorio de ingeniería ambiental de la UPTC, donde se calientan por separado las dos partes del sustrato (RSO y lodos) a una temperatura de 55°C por 72 horas. La Figura 39 muestra la disposición que se usó para el secado de una parte de los RSO.

Figura 39. Residuos de plaza de mercado después de secar.



Fuente: Autores.

Una vez secas ambas partes del sustrato, se mezclan los RSO con los lodos de PTAR. Del sustrato resultante se utilizan 540 gramos para realizar los estudios fisicoquímicos iniciales, y 300 gramos para el experimento de producción de co-compost. En el biorreactor se agrega agua por medio del controlador de humedad hasta alcanzar una humedad relativa del 40% alcanzando un peso total de 420

gramos. Así mismo, se emplea el controlador de temperatura para fijar una temperatura de referencia de 45°C durante los 35 días del experimento.

En el transcurso del experimento se realiza la supervisión y el monitoreo de las variables de temperatura y humedad tanto de forma local como de forma remota, almacenando el estado de todas las variables del proceso en la plataforma de IoT Ubidots. Cada una de las variables se almacena con un periodo de 30 segundos para obtener el comportamiento en tiempo real de la temperatura y humedad.

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUSTRATO PARA EL PROCESO DE CO-COMPOSTAJE

Para conocer la composición fisicoquímica inicial del sustrato, se realiza la caracterización a través del laboratorio de suelos de la UPTC, y del laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), teniendo en cuenta la norma NTC 5167 de 2004, y los rangos recomendados por Dáguer⁶², Metcalf y Eddy⁶³, y el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (United States Department of Agriculture, USDA), debido a que son los rangos en los que se basa el laboratorio de suelo de la UPTC. La Tabla 15 muestra los resultados y rangos aceptables para los distintos parámetros del análisis fisicoquímico realizado al iniciar el experimento de producción de co-compostaje.

Tabla 15. Caracterización fisicoquímica del sustrato inicial.

PARÁMETRO	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***
Fosforo	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****

⁶² DÁGUER, Gian Paolo. Gestión de biosólidos en Colombia. En: Congreso Internacional de ACODAL Sociedad, Ambiente y Futuro (46: 29-31, octubre: Cali, Valle). Memorias. Bogotá D.C. 2003. 7 p.

⁶³ TORRES, Patricia, *et al.* Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. En: Revista Facultad Nacional de Agronomía- Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Junio, 2008, vol. 61, no. 1, p. 4432-4444.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR	RANGO
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 + Magnesio/Potasio	Meq/100g	2,25	12-20****
Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo	Meq/100g	9,82	10-20****

*NTC 5167 de 2004, **Dágner, ***Metcalf y Eddy, ****USDA.
Fuente: Autores.

Los datos de la Tabla 15 indican que el sustrato presenta: una textura orgánica, un alto contenido de fósforo (616 ppm) y potasio (2,26 meq/100g), baja Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo (CICE) de 9,82 meq/100g, deficiencias en calcio (2,65 meq/100g), un alto contenido de sodio (1,87 meq/100g o 19,04%), y posee un valor aceptable de aluminio (0,6 meq/100g o 3,05%) y magnesio (2,44 meq/100g).

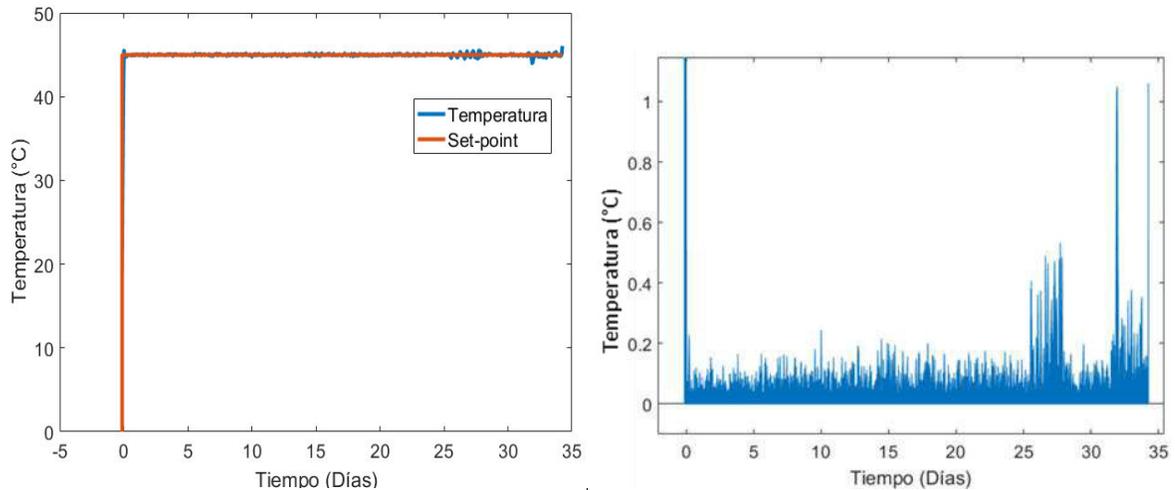
Con relación al pH, el sustrato presenta un valor de 5,3, ubicado en el rango recomendado (4 –9) para su uso como abono orgánico según la NTC 5167 de 2004, aproximado al neutro o ligeramente básico. En cuanto a la humedad, muestra un valor de 40%, por lo que se debe pasar a un proceso de secado para obtener una humedad menor al 15%, dictada por la NTC 5167 de 2004. Además, el valor de carbono orgánico (21,11%) es extremadamente alto según el rango recomendado (mayor de 5 y menor de 15%) en la NTC 5167 de 2004. Por otro lado, el contenido de Nitrógeno Total presente (2,2%) es mayor respecto al rango para Colombia (0,26 – 0,5 %) establecido por Dágner. Respecto a la relación C/N, su valor de 9,59 lo coloca por debajo del rango establecido por Metcalf y Eddy. De acuerdo con lo anterior, 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.

3.2 DESEMPEÑO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN EL BIORREACTOR DURANTE EL PROCESO DE CO-COMPOSTAJE

En la Figura 40 se observa el comportamiento de la temperatura en el experimento. desde el inicio del proceso, a 16°C pasando por su establecimiento el set-point de 45°C, y hasta la culminación del proceso a los 35 días. Durante este tiempo se

presentan dos fallas eléctricas en el lugar donde funciona el prototipo, la primera a los 27 días y la segunda a los 32 días como se observa en la Figura 40, en los que se produce una caída de menos de 2°C, mientras que el promedio de la desviación de la referencia para la totalidad de la duración del experimento es de 0.9°C.

Figura 40. Comportamiento de la temperatura durante el experimento de producción de co-compostaje. Izquierda: variable y referencia. Derecha: desviación promedio de la referencia.



Fuente: Autores.

Por otro lado, el set-point de humedad se establece en 40%, usando el controlador a lazo abierto y comprobando su desempeño midiendo la humedad por medio del método de secado antes y después del experimento como se muestra en la Tabla 16, donde se observa que el agua se mantuvo constante con un cambio de apenas 1.2% al momento de la finalización del experimento, con lo que se valida el adecuado funcionamiento del controlador a lazo abierto para esta aplicación.

Tabla 16. Comparación de la humedad medida por el método de secado antes y después del experimento.

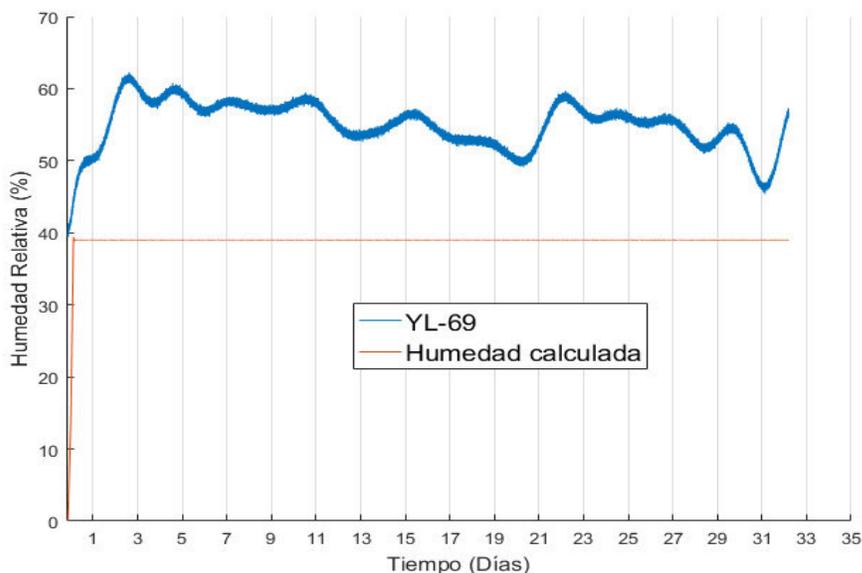
	ANTES	DESPUÉS	CAMBIO DE HUMEDAD	ERROR (%)
Humedad	39.80%	38.60%	1.20%	3.01%

Fuente: Autores.

La lectura del sensor YL-69 se muestra en la Figura 41, en donde se observa que en el primer día el sensor mide un porcentaje de humedad semejante al presente en el biorreactor y que luego su comportamiento varía considerablemente, llegando a tener un error máximo de hasta 23% de humedad relativa cuando se compara con la humedad calculada por el controlador de humedad a lazo abierto. Esta variación

se puede atribuir a la variación de la resistividad del suelo causada por los cambios bioquímicos del sustrato, y al efecto que tiene la temperatura sobre el mismo.

Figura 41. Comparación de la salida del sensor YL-69 con la humedad calculada por el controlador a lazo abierto.



Fuente: Autores.

3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUSTRATO DEL PROCESO DE CO-COMPOSTAJE

Finalizado el proceso de producción de co-compostaje, se realiza nuevamente la caracterización fisicoquímica en los mismos laboratorios, para compararlos con los resultados obtenidos en la Tabla 15, y con los rangos establecidos para determinar la estabilización del sustrato. La Tabla 17 muestra los parámetros fisicoquímicos obtenidos al finalizar el proceso de co-compostaje.

Tabla 17. Caracterización fisicoquímica del sustrato co-compostado.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR	RANGO
pH	Unidades	9,81	4-9*
Humedad	%	38,6	<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***
Fosforo	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****
PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR	RANGO
Magnesio	Meq/100g	0,21	1,5-2,5****
Sodio	Meq/100g	5,06	0-1****
Sodio	%	7,91	<7****
Conductividad eléctrica	dS/m	10,02	0-2****
Calcio/Magnesio	Meq/100g	19,71	2-4***
Calcio/Potasio	Meq/100g	0,08	12-18****
Magnesio/Potasio	Meq/100g	0,00	6-8****
Potasio/Magnesio	Meq/100g	236,71	0.2-0.3****
Calcio + Magnesio/Potasio	Meq/100g	0,09	12-20****
Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo	Meq/100g	64	10-20****

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

Fuente: Autores.

Los datos de la Tabla 17 muestran que el contenido de fósforo disminuyó hasta un valor de 503 ppm, y el contenido de potasio aumento hasta un valor de 49,71 Meq/100g, convirtiéndolo en un co-compost rico en fósforo y potasio. Además, el aluminio se redujo en su totalidad y el calcio aumento (4,14) hasta estar dentro del rango establecido por la USDA, no obstante, el magnesio disminuyo a un valor de 0,21 Meq/100g encontrándose debajo de los valores establecidos en la USDA. En cuanto al contenido de sodio, se observa una disminución favorable en un valor del 7,91%, cercano al rango permitido por el departamento de agricultura de Estados Unidos (menor al 7%).

Por otro lado, el pH aumentó hasta un valor de 9,81 unidades, mayor al valor máximo de 9 unidades recomendado por la NTC 5167. En cuanto a la humedad, se observa una disminución del 1%, por lo cual se debe realizar un proceso de secado para obtener un nivel de humedad adecuado según el rango impuesto en la NTC 5167 (menor al 15%). Por otro lado, el valor de carbono orgánico (20,23%) aunque disminuyo 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 disminuyo considerablemente a un valor de 6,13, alejándose más del rango establecido por Metcalf y Eddy.

Con relación a la conductividad eléctrica del sustrato, se observa un aumento de 1.71 dS/m, lo cual indica que la conductividad eléctrica del sustrato varía durante el proceso de co-compostaje, y en consecuencia, no se puede emplear un sensor resistivo para medir la humedad del suelo.

Según el análisis de los resultados finales realizados por la ingeniera Gloria Camargo, en un proceso de producción de compost se tiende a disminuir el nitrógeno total del sustrato⁶⁴. 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 se creó una capa en la superficie que disminuye la actividad aeróbica de los microorganismos, en vista que las hélices del motor de volteo no logran cubrir el sustrato en su totalidad. Por otro lado, al comparar los datos de la Tabla 16 con los resultados obtenidos por Estupiñán⁶⁵ al finalizar el experimento de producción de co-compost al medio ambiente, se observa que el porcentaje de carbono orgánico es 3 veces mayor al obtenido por ella, y el porcentaje de nitrógeno es 7 veces mayor empleando el biorreactor, con lo cual se puede afirmar que se obtiene un co-compost más rico en carbono y nitrógeno controlando la temperatura y humedad del sustrato en el biorreactor batch, aunque no se logró una estabilización completa del sustrato.

Por último, la ingeniera Gloria Camargo recomienda mezclar el co-compost con suelo para emplearlo como enmienda orgánica, y enriquecer el suelo con carbono y nitrógeno, al mismo tiempo que se disminuye su pH, o se puede mezclar con algún fertilizante no orgánico, para no aumentar la cantidad de carbono orgánico y nitrógeno. Adicionalmente, la ingeniera Gloria recomienda emplear un tercer material como pasto, viruta, paja o estiércol fresco⁶⁶, para obtener un co-compost más estable.

⁶⁴ MENDOZA, Manuel y VIGÍL, Jairo. Evaluación físico – química y microbiológica de cuatro niveles de lodos ordinarios en la elaboración de compost. Tesis de grado Ingeniero Agrónomo. Universidad de El Salvador, Facultad de ciencias agronómicas, El Salvador. Octubre, 2012. 157 p.

⁶⁵ ESTUPIÑÁN, Op. cit., p. 73.

⁶⁶ Ibid., p. 39.

4. LOGROS

Dada la proyección y aporte tecnológico y ambiental de la investigación, el proyecto ha contado con importantes reconocimientos y logros: Fue merecedor de una convocatoria de la Facultad de Ingeniería para la financiación de proyectos de investigación de carácter interdisciplinario, fue escogido para el primer episodio de una serie de documentales editados por Edumedios UPTC con el objetivo de divulgar la investigación realizada en las diferentes facultades de la Universidad, fue presentado en la modalidad de ponencia en el Congreso Internacional de Electrónica y Tecnologías de Avanzada (CIETA) que se realiza la Universidad de Pamplona, y fue expuesto en la modalidad de conferencia en el seminario de gestión integral de residuos sólidos en Ibagué. A continuación, se explican cada uno de estos logros.

4.1 CONVOCATORIA CEDEC 001-2015

El Centro de Investigación y Extensión de la Facultad de Ingeniería CEDEC, tiene como objetivo gestionar en la facultad de ingeniería las actividades de los procesos misionales de Investigación y Extensión de la universidad. Para esto, se ocupa de difundir y promover las actividades de investigación y extensión en la comunidad académica de la facultad.

En el primer semestre del año 2015 el CEDEC generó la convocatoria 001-2015, cuyo propósito fue apoyar las mejores investigaciones interdisciplinarias de la Facultad de Ingeniería mediante el patrocinio con un monto de hasta 10 millones de pesos para los materiales requeridos. El presente proyecto fue merecedor de esta convocatoria dado el uso de hace de la ingeniería electrónica en la solución de problemas propios de área de la ingeniería ambiental, desarrollado en conjunto entre los grupos de investigación GIGA (Grupo de Investigación en Geomática y Medio Ambiente) e I²E (Investigación en Ingeniería Electrónica). Fue una de las 10 investigaciones ganadoras de esta convocatoria. Sin embargo, inconvenientes a la hora de ejecutar el presupuesto del proyecto, y poca claridad del proceso de compra de los materiales, no hizo posible la utilización de esta financiación mismo dentro del proyecto.

4.2 DOCUMENTAL REALIZADO POR EDUMEDIOS UPTC

Edumedios UPTC dentro de su función de promover y promocionar la investigación dentro y fuera de la universidad, realizó una serie de documentales titulada: Pensamiento crítico UPTC, que está constituido por una serie episodios con una

duración no mayor a 12 minutos. En estos se exponen los trabajos e investigaciones realizadas en algunos de los grupos de investigación de Universidad, describiendo el impacto de la investigación, el papel de los investigadores involucrados, el surgimiento y proceso de desarrollo de la investigación, así como la experiencia ganada y el aporte científico generado.

El documental se encuentra publicado en el canal de Youtube de Edumedios UPTC (link al video: https://youtu.be/_x5znUZeqjc), fue transmitido a través del canal Universitario ZOOM, y del canal regional Tele Santiago.

4.3 PONENCIA EN XII CONGRESO INTERNACIONAL ELECTRÓNICA Y TECNOLOGÍAS DE AVANZADA

El Congreso Internacional "Electrónica y Tecnologías de Avanzada" CIETA es un punto de encuentro en Colombia para investigadores, profesionales y estudiantes interesados en los últimos avances científicos en el campo de la ingeniería electrónica, sistemas, telecomunicaciones, eléctrica, y mecatrónica. El objetivo primordial del congreso es focalizar el desarrollo científico y tecnológico en un evento de carácter internacional, y dar a conocer los últimos avances tecnológicos desarrollados por corporaciones y universidades nacionales y extranjeras.

En relación con el proyecto, se creó un artículo, el cual fue aceptado en modalidad de ponencia para el XII Congreso Internacional "Electrónica Y Tecnologías de Avanzada", realizado en Pamplona, Santander, del 10 al 12 de mayo de 2017.

4.4 CONFERENCIA EN SEMINARIO SOBRE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS

En el marco del Proyecto de Cooperación Sur- Sur denominado "Intercambio de experiencias exitosas para el fortalecimiento de las capacidades locales en el manejo integrado de residuos sólidos en el sur de Tolima (Colombia) y el Ayuntamiento de Cuautla (México)", liderado por la Universidad de Ibagué y la Gobernación de Tolima, se realizó el Seminario llamado "Gestión integral de residuos sólidos", el día 3 de agosto en la Universidad de Ibagué. En el cual se dictó una conferencia a cargo del ingeniero Ilber Adonayt Ruge Ruge, titulada "Automatización y control aplicado a procesos de compostaje de residuos sólidos orgánicos", y basada en el desarrollo realizado para el control de las variables de temperatura y humedad en un biorreactor aeróbico orientado al proceso de co-compostaje.

5. CONCLUSIONES

- El sensor de humedad YL-69 no es un sensor confiable para la realización de un sistema de control a lazo cerrado, debido a que su modo de operación se basa en la transferencia de corriente entre sus dos electrodos, para calcular la resistividad del suelo y en consecuencia la humedad. Sin embargo, la resistividad del suelo no solo depende de la cantidad de agua, como lo demuestra el experimento de producción de co-compostaje, en donde la biodegradación de los componentes del sustrato causa un aumento de 1.71 dS/m de la conductividad eléctrica. Además, se observa que la temperatura es otro factor que altera la conductividad eléctrica del suelo, en vista que un cambio de 16°C a 45°C genera que la medición del sensor de humedad YL-69 varíe desde un 40% al 60%. Debido a lo anterior, se realiza un sistema de control a lazo abierto para la variable de humedad.
- El controlador PI para el control de temperatura cumple con los parámetros de diseño, debido a que presenta un sobrepico de 1,1%, un error en estado estacionario de 1,37% y un tiempo de establecimiento de 3820 segundos. Además, la salida de sistema experimental posee una desviación con relación a la simulación de $\pm 0,57^{\circ}\text{C}$ en promedio, y una desviación con relación a la referencia de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Estos resultados se deben a la implementación de un sistema operativo en tiempo real, que hace posible el cumplimiento estricto del tiempo de muestreo de 60 segundos del controlador PI, sin interferir con las otras tareas que debe ejecutar el sistema de control.
- El experimento de producción de co-compostaje no logró obtener un co-compost adecuado, ya que el pH se incrementó hasta un valor de 9,87 unidades, fuera del rango establecido por la NTC 5167 de 2004, por la falta de un adecuado sistema de volteo, debido a que la hélice del motor no cubrió en su totalidad el sustrato, provocando la creación de una capa en la superficie impidiendo que los microorganismos realizar el intercambio de aire necesario.

6. RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos relacionados con el tema, sería aconsejable crear la planta con materiales no metalados, con el objetivo de poder usar sensores de humedad capacitivos o de guías de onda, y así realizar un control de humedad a lazo cerrado. Además, de emplear un biorreactor más sofisticado que no posea zonas muertas para una buena homogenización del agua y se logre extraer e ingresar los residuos de una forma más cómoda para el operario.
- Con el objetivo de hacer un panel de control más flexible y ahorrar recursos de hardware y dispositivos electrónicos, sería una buena opción la implementación de una pantalla táctil, o de botones con el que se pudiera navegar e interactuar con un menú de usuario, en lugar de emplear interruptores y botones para una tarea específica.
- Una posible mejora de la planta piloto sería la utilización de un módulo Wifi para el control del prototipo de forma remota, ya que no necesitaría estar conectado de forma directa a un router, y permitiría una manipulación más sencilla del prototipo.
- Para futuros experimentos, se recomienda el uso de un tercer material como como pasto, viruta, paja o estiércol fresco, que ayude a una mejor estabilización del producto final del proceso de co-compostaje.

BIBLIOGRAFÍA

ALVARENGA, Paula *et al.* Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. En: Waste Management. Junio, 2015, vol. 40 no. 3. p. 44-52.

ASTRÖM, Karl J. y HÄGGLUND, Tore. Control PID avanzado. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2009.p. 67.

AVENDAÑO, Daniella. El proceso de compostaje. Trabajo de grado Ingeniero agrónomo. Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de agronomía e ingeniería forestal. Departamento de fruticultura y enología, 2003. 38 p.

AWASTHI, Mukesh, *et al.* Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic. En: Bioresource Technology. Abril, 2015, vol. 182. p. 200-207.

AWASTHI, Mukesh, *et al.* Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. En: Bioresource Technology. September 2014. vol. 168, p. 214-221.

BARRY, Richard. Mastering the FreeRTOS™ Real Time Kernel. A Hands-On Tutorial Guide. [online] Ed. Prerelease 161204 Available from internet at: <http://www.freertos.org/Documentation/161204_Mastering_the_FreeRTOS_Real_Time_Kernel-A_Hands-On_Tutorial_Guide.pdf>. p.46.

CASTILLO, Carlos. Elaboración de compost en Manzales a partir de residuos orgánicos urbanos. En: Lunazul. Agosto, 2006. p. 1-5.

CHIBIOS, RTOS Concepts [online], [cited 6 June 2017]. Available from internet: URL:<http://www.chibios.org/dokuwiki/doku.php?id=chibios:articles:rtos_concepts>

COLOMER, Francisco y GALLARDO, Antonio. Tratamiento y gestión de residuos sólidos. España, Universidad politécnica de Valencia, 2007. 328 p. ISBN 9788483630716.

COOPER, William y HELFRICK, Albert. Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición. Traducido por David Pérez Gutiérrez. 1 ed. México: Prentice Hall Inc., 1991. 461 p. ISBN 968 880 236 0.

DÁGUER, Gian Paolo. Gestión de biosólidos en Colombia. En: Congreso Internacional de ACODAL Sociedad, Ambiente y Futuro (46: 29-31, octubre: Cali, Valle). Memorias. Bogotá D.C. 2003. 7 p.

ESTUPIÑAN, Sandra. Factibilidad técnico-económica y ambiental para estabilización de lodos de la PTAR de Nobsa. Trabajo de grado Magíster en ingeniería ambiental. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de ingeniería. Escuela de posgrados de ingeniería, 2015. 110 p.

GARCIA, Juan. Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas. España. 2014. ISBN 84-607-9304-4.

JARAMILLO, Gladys y ZAPATA, Liliana. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Trabajo de grado Especialista en gestión ambiental. Medellín. Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería. Posgrados de ambiental. 2008. 116 p.

KANG G, Real-Time Computing: A new Discipline of Computer Science and Engineering. En: Proceeding of the IEEE, January 1994, vol. 82, no. 1, pp. 6-24.

LEON, Juan. Desarrollo de un dispositivo prototipo para medición de parámetros de corrosión utilizando monitoreo remoto-inalámbrico. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Tunja, Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Electrónica. p. 60-62.

LEVENSPIEL, Octave. Interpretación de los datos obtenidos en un reactor intermitente. En: Ingeniería de las Reacciones Químicas. 3 ed. México: John Wiley, 2004, p 38-40.

LIANG, C, *et al.* The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. En: Bioresource Technology. Enero, 2003. vol. 86, no. 2, p.131-136.

LÓPEZ, Macías. El compostaje y su proceso histórico. En: Compostaje de residuos orgánicos. Cali: Universidad del Valle, 2002. p. 1-3. ISBN 958-67-0187-5.

LOPEZ, Patricio. Implementación de un sistema de control de temperatura para el calentamiento de un tanque de alimentación continua mediante un PLC. Trabajo Ingeniero en Electrónica y Control. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2009. 19 p.

MENDOZA, Manuel y VIGÍL, Jairo. Evaluación físico – química y microbiológica de cuatro niveles de lodos ordinarios en la elaboración de compost. Tesis de grado Ingeniero Agrónomo. Universidad de el Salvador, Facultad de ciencias agronómicas, El Salvador. Octubre, 2012. 157 p.

OBENG, Letitia y WRIGHT, Frederick. Integrated resource recovery the co-composting of domestic solid and human waste. Washington D.C, 1954. 118 p. ISBN 0821308947.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. 5ed. España: Pearson Education, 2010. p. 8.

OVIEDO, Edgar, *et al.* Evaluation of the Addition of Wood Ash to Control the pH of Substrates in Municipal Biowaste Composting. En: Ingeniería investigación y tecnología, vol. 15, p. 469-478.

TCHOBANOBLOUS, George, *et al.* Gestión integral de residuos sólidos. Traducido por Iñaki Tejero. España: McGraw-Hill, 1994. 1120 p. ISBN 9788448118303.

TORRES, Patricia, *et al.* Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. En: Revista Facultad Nacional de Agronomía- Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Junio, 2008, vol. 61, no. 1, p. 4432-4444.

VALDERRAMA, Martha. Factibilidad de aprovechamiento de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá). Trabajo de grado Magíster en desarrollo sostenible y medio ambiente. Manizales. Universidad de Manizales. Facultad de ciencias contables económicas y administrativas. 2013. 74 p.

ANEXO A. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS ACONDICIONAMIENTOS DE SENSORES

ANALISIS ESTADISTICO DE TEMPERATURA

Temperatura (°C)	SALIDA DE PUENTE DE WHEATSTONE							
	Desviación de la media (mV)				Desviación promedio (mV)	Desviación estándar (mV)	Varianza (mV ²)	Error probable (mV)
	Primera toma	Segunda toma	Tercera toma	Cuarta Toma				
10	0,075	-0,025	-0,025	-0,025	0,04	0,05	0,00	0,03
13	0,225	-0,175	0,025	-0,075	0,13	0,17	0,03	0,12
15	0,05	-0,15	0,15	-0,05	0,10	0,13	0,02	0,09
17	0,25	-0,25	-0,05	0,05	0,15	0,21	0,04	0,14
19	0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,10	0,12	0,01	0,08
21	0,175	-0,325	-0,125	0,275	0,23	0,28	0,08	0,19
23	0,2	-0,3	-0,1	0,2	0,20	0,24	0,06	0,17
25	0,325	-0,275	0,025	-0,075	0,18	0,25	0,06	0,17
27	0,425	-0,175	0,025	-0,275	0,23	0,31	0,10	0,21
30	0,225	-0,275	0,025	0,025	0,14	0,21	0,04	0,14
32	0,225	-0,275	-0,175	0,225	0,23	0,26	0,07	0,18
35	0,25	-0,25	-0,05	0,05	0,15	0,21	0,04	0,14
37	0,35	-0,15	-0,05	-0,15	0,18	0,24	0,06	0,16
40	0,25	-0,15	-0,05	-0,05	0,13	0,17	0,03	0,12
42	0,3	-0,2	0	-0,1	0,15	0,22	0,05	0,15
45	0,2	-0,3	-0,1	0,2	0,20	0,24	0,06	0,17
47	0,225	-0,275	-0,075	0,125	0,17	0,22	0,05	0,15
50	0,125	-0,375	-0,075	0,325	0,23	0,30	0,09	0,20
52	0,25	-0,25	-0,05	0,05	0,15	0,21	0,04	0,14
55	0,25	-0,25	-0,05	0,05	0,15	0,21	0,04	0,14
57	0,275	-0,225	-0,025	-0,025	0,14	0,21	0,04	0,14
60	0,15	-0,35	-0,05	0,25	0,20	0,26	0,07	0,18
62	0,225	-0,275	0,025	0,025	0,14	0,21	0,04	0,14
65	0,2	-0,3	0	0,1	0,15	0,22	0,05	0,15
67	0,175	-0,325	-0,025	0,175	0,18	0,24	0,06	0,16
70	0,275	-0,225	-0,125	0,075	0,18	0,22	0,05	0,15
72	0,25	-0,25	-0,05	0,05	0,15	0,21	0,04	0,14
75	0,475	-0,025	-0,125	-0,325	0,24	0,34	0,12	0,23

Temperatura (°C)	SALIDA ACONDICIONAMIENTO							
	Desviación de la media (V)			Desviación promedio (V)	Desviación estándar (V)	Varianza(V ²)	Error probable (V)	Error probable (°C)
	Primera toma	Segunda toma	Tercera toma					
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,000	0,00
13	-0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00013	0,008	0,10
15	-0,01	-0,01	0,02	0,01	0,02	0,00037	0,013	0,17
17	0,00	-0,02	0,02	0,01	0,02	0,00046	0,015	0,19
19	0,00	-0,03	0,03	0,02	0,03	0,00084	0,020	0,25
21	-0,01	-0,03	0,04	0,03	0,04	0,00160	0,027	0,35
23	-0,01	-0,03	0,04	0,02	0,03	0,00115	0,023	0,30
25	-0,01	-0,02	0,03	0,02	0,03	0,00079	0,019	0,25
27	0,00	-0,02	0,02	0,01	0,02	0,00038	0,013	0,17
30	-0,01	-0,02	0,03	0,02	0,02	0,00051	0,015	0,20
32	-0,01	-0,04	0,04	0,03	0,04	0,00163	0,027	0,35
35	-0,01	-0,02	0,03	0,02	0,03	0,00083	0,019	0,25
37	0,00	-0,01	0,02	0,01	0,02	0,00023	0,010	0,13
40	-0,01	-0,01	0,03	0,02	0,02	0,00053	0,016	0,20
42	-0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00040	0,013	0,18
45	-0,04	0,01	0,04	0,03	0,04	0,00163	0,027	0,35
47	-0,03	-0,01	0,04	0,03	0,04	0,00130	0,024	0,32
50	-0,04	0,00	0,03	0,02	0,04	0,00123	0,024	0,31
52	-0,04	0,00	0,04	0,03	0,04	0,00160	0,027	0,35
55	-0,04	0,00	0,03	0,02	0,04	0,00123	0,024	0,31
57	-0,04	0,00	0,03	0,02	0,04	0,00123	0,024	0,31
60	-0,04	0,00	0,03	0,02	0,04	0,00123	0,024	0,31
62	-0,04	0,01	0,03	0,03	0,04	0,00130	0,024	0,32
65	-0,05	0,02	0,02	0,03	0,04	0,00163	0,027	0,35
67	-0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,00190	0,029	0,38
70	-0,04	0,01	0,02	0,02	0,03	0,00103	0,022	0,28
72	-0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,00120	0,023	0,30
75	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00003	0,004	0,05

ANALISIS ESTADISTICO DE HUMEDAD

Primera ubicación.

HUMEDAD (%)	Desviación de la media(V)			Desviación promedio (V)	Desviación estandar(V)	Varianza (V)	Error probable(V)	Error probable (%)
	PRIMERA TOMA	SEGUNDA TOMA	TERCERA TOMA					
0	0,020	0,020	-0,040	0,027	0,035	0,0012	0,023	0,467
10	0,007	0,007	-0,013	0,009	0,012	0,0001	0,008	0,156
20	-0,070	0,150	-0,080	0,100	0,130	0,0169	0,088	1,754
30	0,103	-0,097	-0,007	0,069	0,100	0,0100	0,068	1,351
40	-0,150	0,050	0,100	0,100	0,132	0,0175	0,089	1,785
50	-0,013	0,017	-0,003	0,011	0,015	0,0002	0,010	0,206
60	-0,007	0,003	0,003	0,004	0,006	0,0000	0,004	0,078
70	-0,030	-0,030	0,060	0,040	0,052	0,0027	0,035	0,701
80	0,007	-0,033	0,027	0,022	0,031	0,0009	0,021	0,412
90	-0,107	0,083	0,023	0,071	0,097	0,0094	0,066	1,310
100	0,000	-0,050	0,050	0,033	0,050	0,0025	0,034	0,675

Segunda ubicación.

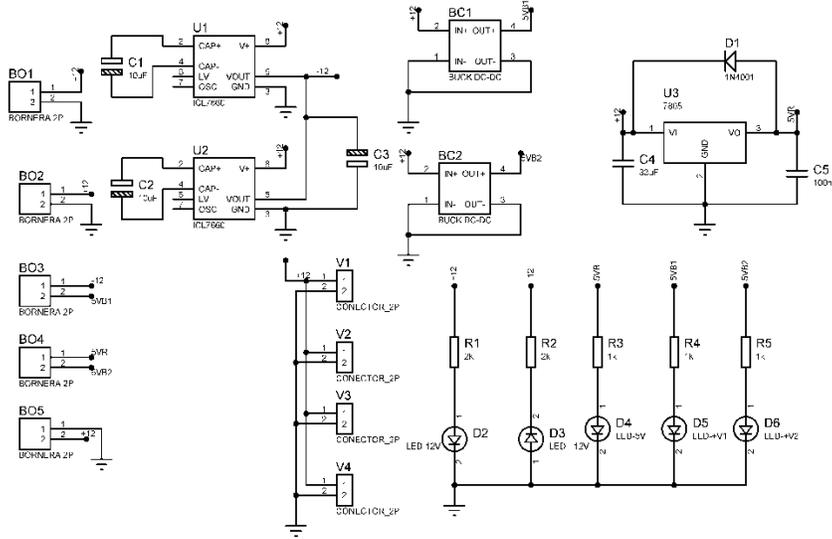
HUMEDAD (%)	Desviación de la media(V)			Desviación promedio (V)	Desviación estandar(V)	Varianza(V ²)	Error probable(V)	Error probable (%)
	Primera prueba	Segunda prueba	Tercera prueba					
0,00	-0,01	0,00	0,02	0,011	0,015	0,00023	0,0103	0,0947
5,26	0,00	0,03	-0,02	0,018	0,025	0,00063	0,0170	0,1560
10,00	0,02	0,00	-0,01	0,011	0,015	0,00023	0,0103	0,0947
14,29	0,01	0,00	-0,02	0,011	0,015	0,00023	0,0103	0,0947
18,18	0,03	0,01	-0,03	0,022	0,031	0,00093	0,0206	0,1894
21,74	0,01	-0,01	0,00	0,007	0,010	0,00010	0,0067	0,0620
25,00	-0,02	-0,01	0,04	0,024	0,032	0,00103	0,0217	0,1993
28,00	-0,09	-0,06	0,15	0,100	0,131	0,01710	0,0882	0,8106
30,77	-0,03	0,03	-0,01	0,022	0,031	0,00093	0,0206	0,1894
33,33	-0,02	-0,01	0,02	0,016	0,021	0,00043	0,0140	0,1290
35,71	0,00	0,02	-0,02	0,013	0,020	0,00040	0,0135	0,1240
37,93	0,02	0,04	-0,07	0,044	0,059	0,00343	0,0395	0,3632
40,00	-0,02	0,03	0,00	0,018	0,025	0,00063	0,0170	0,1560
41,94	-0,01	0,00	0,02	0,011	0,015	0,00023	0,0103	0,0947
43,75	-0,01	0,00	0,01	0,007	0,010	0,00010	0,0067	0,0620
45,45	0,00	0,01	-0,02	0,011	0,015	0,00023	0,0103	0,0947
47,06	0,01	-0,04	0,02	0,024	0,032	0,00103	0,0217	0,1993
48,57	0,05	0,00	-0,06	0,038	0,055	0,00303	0,0371	0,3414
50,00	-0,02	-0,03	0,04	0,029	0,038	0,00143	0,0255	0,2347
51,35	-0,02	-0,01	0,04	0,024	0,032	0,00103	0,0217	0,1993
52,63	0,03	0,02	-0,06	0,038	0,049	0,00243	0,0333	0,3058

Tercera ubicación.

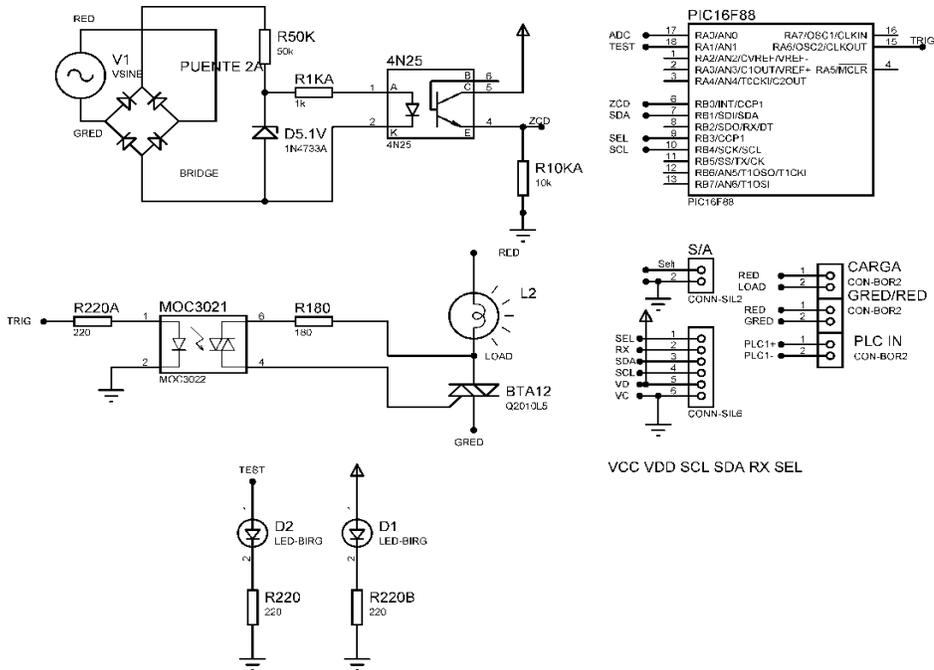
HUMEDAD (%)	Desviación de la media(V)			Desviación promedio (V)	Desviación estándar(V)	Varianza(V ²)	Error probable(V)	Error probable (%)
	Primera prueba	Segunda prueba	Tercera prueba					
0,00	0,02	0,00	-0,01	0,011	0,015	0,00023	0,0103	0,0947
7,61	0,00	0,01	-0,01	0,007	0,010	0,00010	0,0067	0,0620
14,14	-0,01	0,02	-0,02	0,016	0,021	0,00043	0,0140	0,1290
19,82	-0,01	0,00	0,01	0,007	0,010	0,00010	0,0067	0,0620
24,78	0,03	0,04	-0,07	0,047	0,061	0,00370	0,0410	0,3770
29,17	-0,01	-0,05	0,06	0,040	0,056	0,00310	0,0376	0,3451
33,08	-0,06	0,01	0,05	0,040	0,056	0,00310	0,0376	0,3451
36,57	-0,04	0,00	0,05	0,031	0,045	0,00203	0,0304	0,2795
39,72	-0,05	0,00	0,04	0,031	0,045	0,00203	0,0304	0,2795
42,57	-0,06	0,01	0,05	0,040	0,056	0,00310	0,0376	0,3451
45,17	-0,02	0,01	0,02	0,016	0,021	0,00043	0,0140	0,1290
47,54	-0,01	0,01	0,01	0,009	0,012	0,00013	0,0078	0,0716
49,71	-0,01	0,00	0,01	0,007	0,010	0,00010	0,0067	0,0620
51,71	-0,01	0,00	0,02	0,011	0,015	0,00023	0,0103	0,0947
53,56	-0,01	0,00	0,01	0,007	0,010	0,00010	0,0067	0,0620
55,27	-0,03	0,00	0,03	0,020	0,030	0,00090	0,0202	0,1860
56,86	-0,02	0,01	0,02	0,016	0,021	0,00043	0,0140	0,1290
58,34	0,01	0,02	-0,03	0,020	0,026	0,00070	0,0178	0,1640
61,00	0,01	-0,02	0,00	0,011	0,015	0,00023	0,0103	0,0947
65,30	0,02	-0,02	0,01	0,016	0,021	0,00043	0,0140	0,1290
69,20	0,02	-0,03	0,01	0,020	0,026	0,00070	0,0178	0,1640
73,40	0,01	-0,03	0,02	0,020	0,026	0,00070	0,0178	0,1640
77,80	0,05	-0,07	0,01	0,044	0,061	0,00373	0,0412	0,3787
82,50	-0,03	0,04	-0,01	0,027	0,036	0,00130	0,0243	0,2235

ANEXO B. CIRCUITOS ESQUEMATICOS

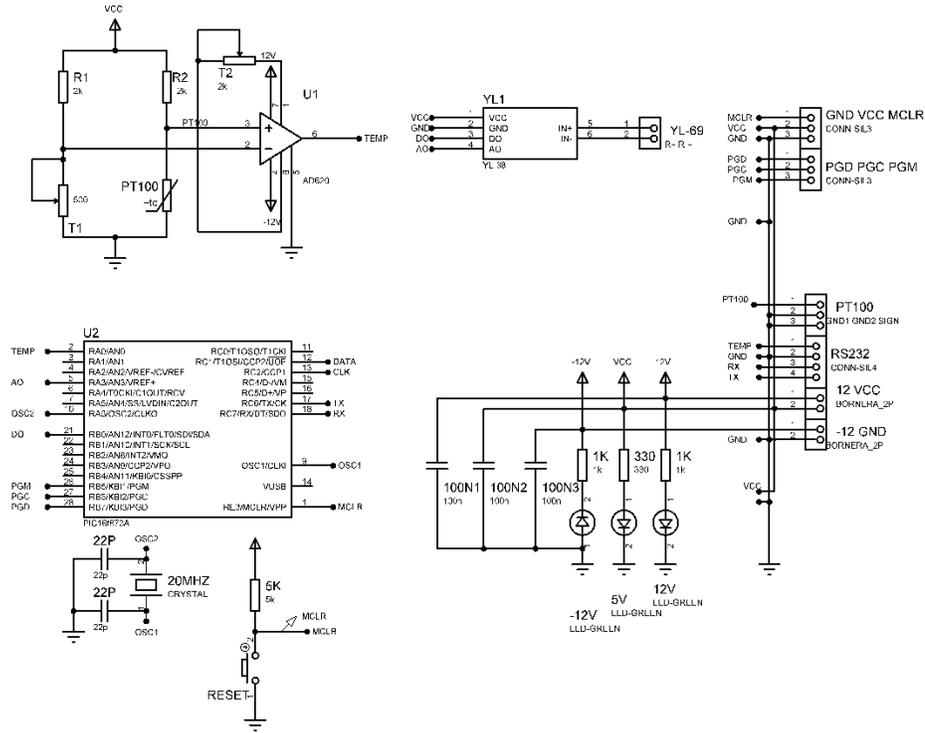
FUENTE DE ALIMENTACIÓN.



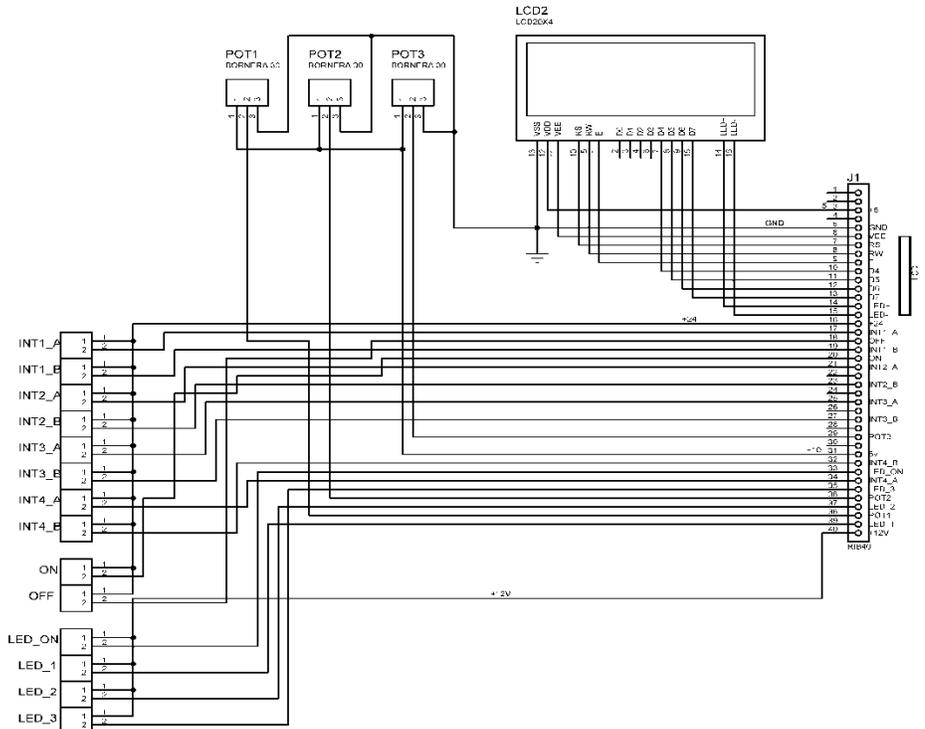
CORTE DE FASE



ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES



PANEL DE CONTROL

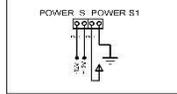


SISTEMA DE CONTROL

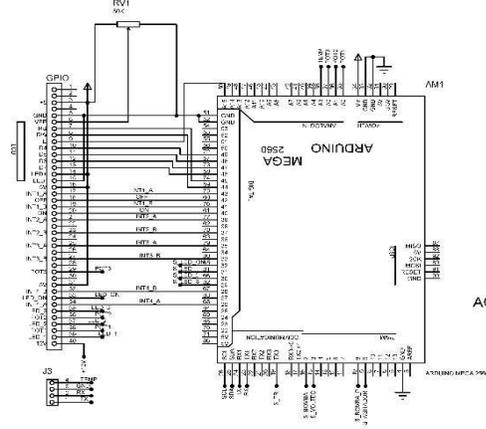
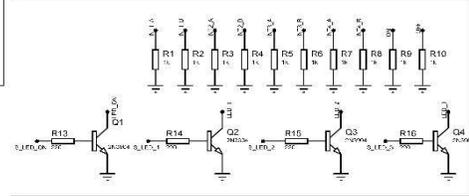
ENTRADAS DE ALIMENTACION



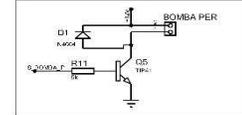
SALIDA DE ALIMENTACION A BAQUETA DE SENSORES



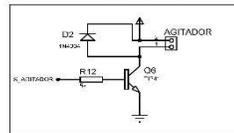
ACONDICIONAMIENTO BOTONES, SWITCHES Y LEDES



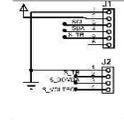
ACONDICIONAMIENTO BOMBA PERISTALTICA



ACONDICIONAMIENTO MOTOR AGITADOR

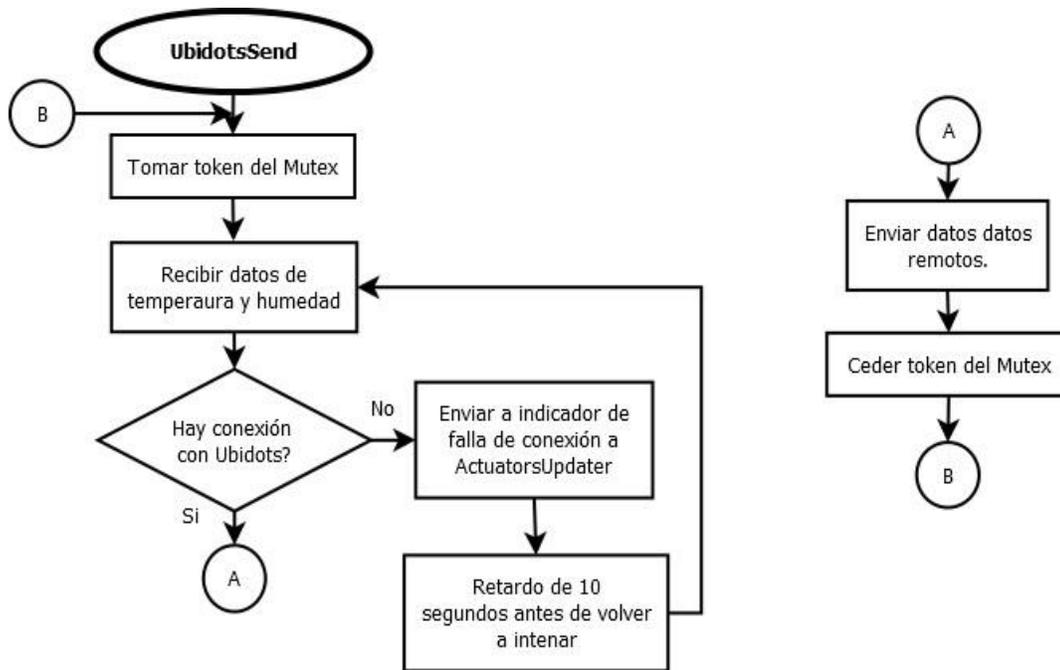
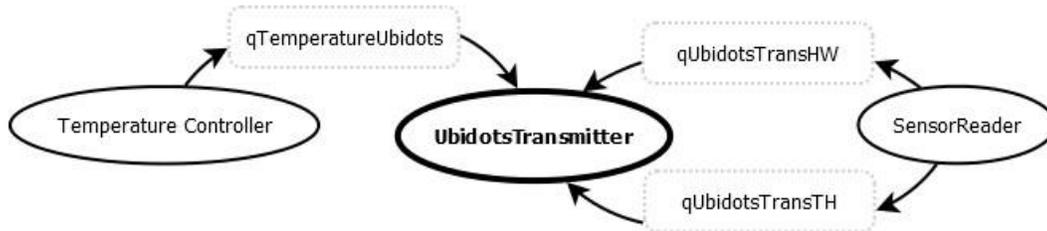


SALIDAS PARA ACTUADORES AC

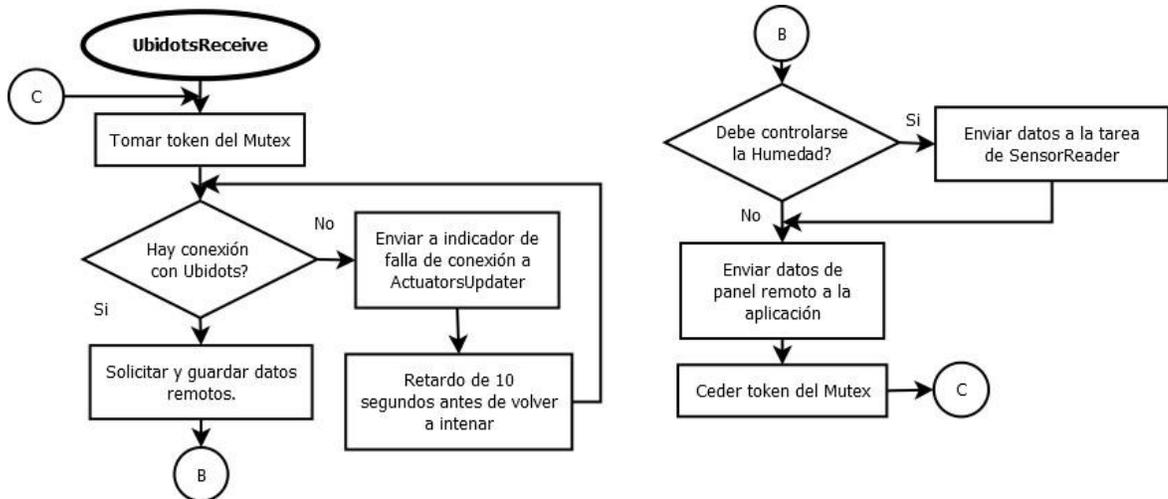
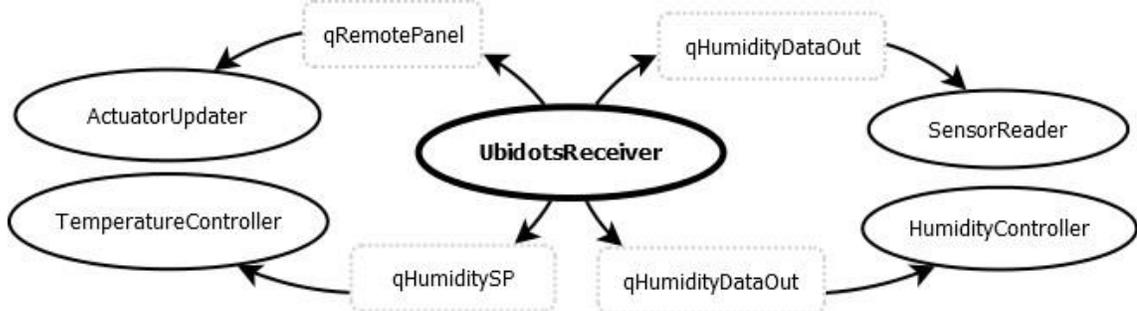


ANEXO C. DIAGRAMAS DE FLUJO DE CADA TAREA DEL SISTEMA DE CONTROL.

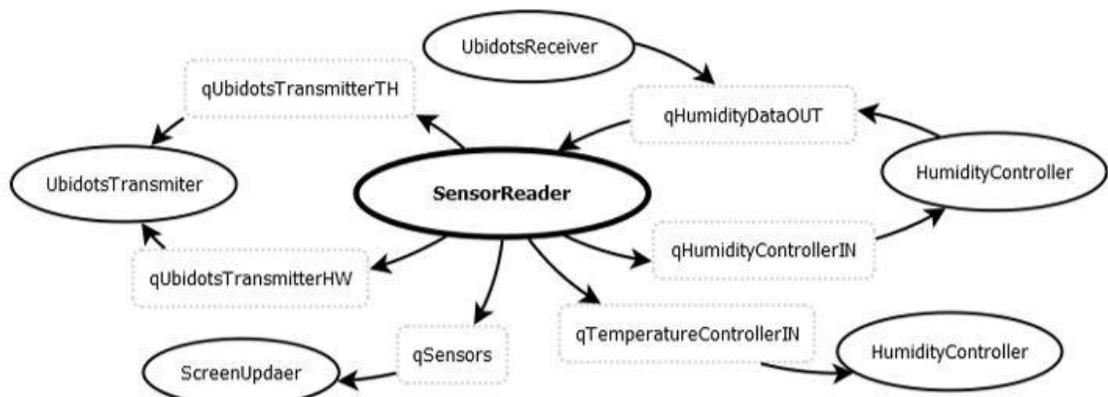
TRANSMISIÓN A PLATAFORMA UBIDOTS

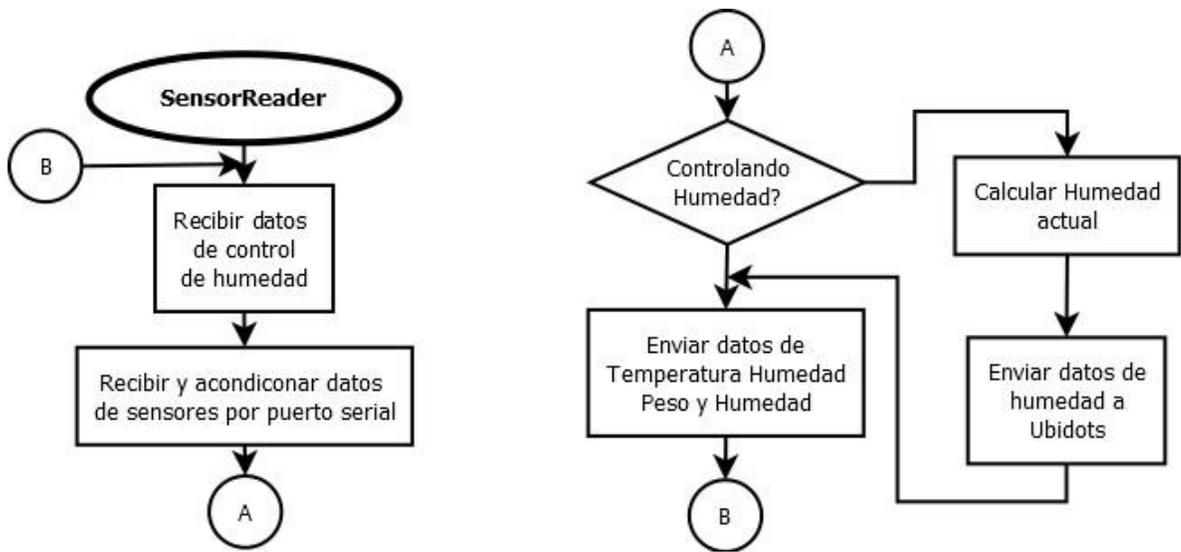


RECEPCIÓN DE DATOS DE LA PLATAFORMA UBIDOTS

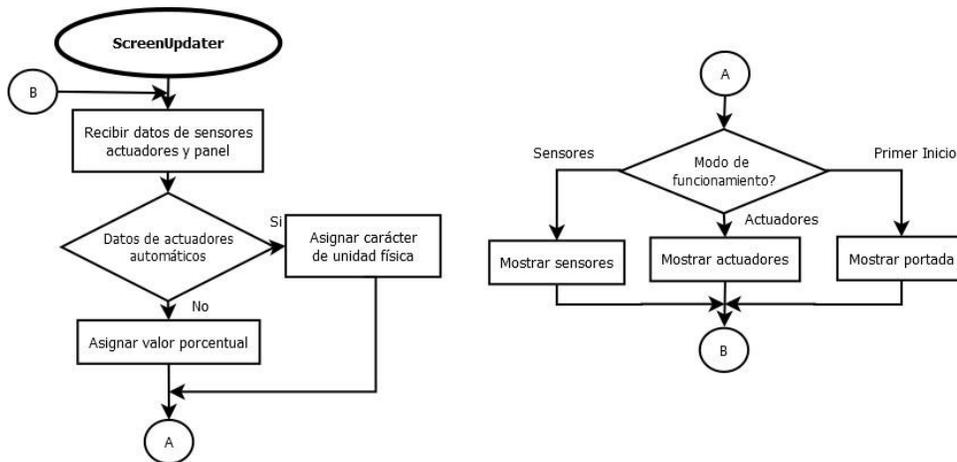
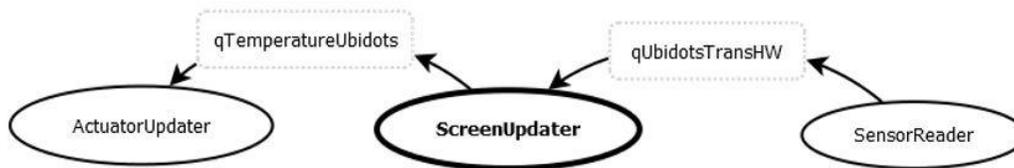


LECTURA DE SENSORES

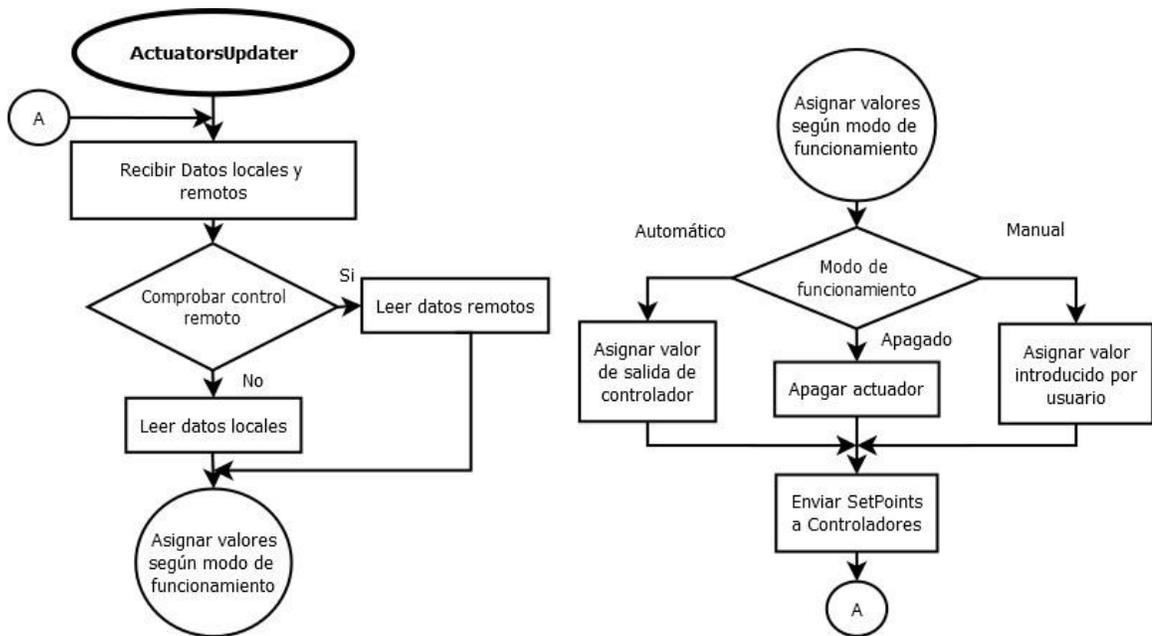
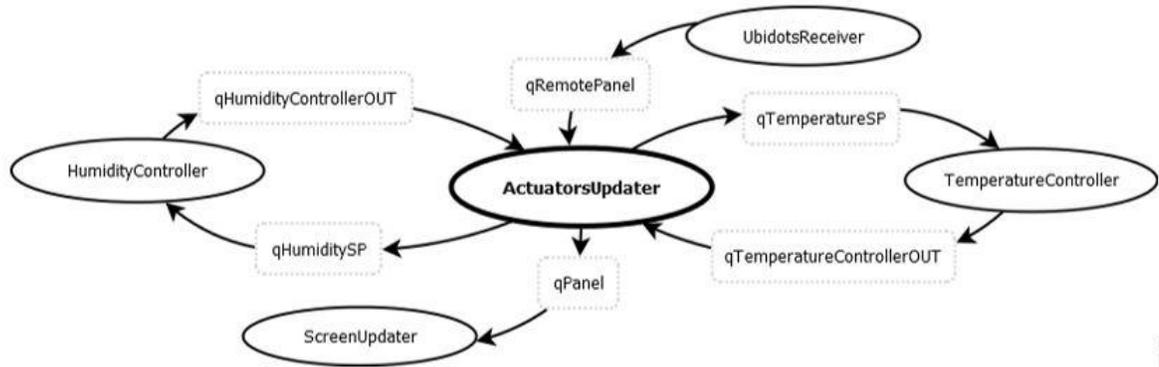




VISUALIZACIÓN EN PANTALLA LCD



ENVÍO DE SEÑALES A ACTUADORES



ANEXO D. DIAGRAMA DE BLOQUES EMPLEADO EN SIMULINK® PARA LA EVALUACION DE CADA TIPO DE CONTROLADOR.

