

# RoboComposta: prototipo de compostera semi-automatizada para educación ambiental

**RESUMEN:** El incremento de los residuos orgánicos domésticos y su disposición inadecuada en rellenos sanitarios genera emisiones de gases de efecto invernadero, lixiviados contaminantes y saturación de vertederos. El compostaje surge como una alternativa sostenible para transformar estos residuos en abono, aunque su implementación doméstica presenta barreras de espacio, desconocimiento y ausencia de monitoreo de variables críticas. En este trabajo se presenta RoboComposta, un prototipo de compostera semi-automatizada orientado a la educación ambiental. El sistema se basa en un microcontrolador Arduino UNO, que integra sensores de temperatura y humedad, además de un sistema de aireación mediante ventilador y bomba peristáltica para ajuste de humedad. La arquitectura incluye indicadores visuales y una interfaz básica de retroalimentación para el usuario. El desarrollo corresponde a una validación preliminar de concepto, en la cual se verificó el funcionamiento del sistema electrónico, la lectura de sensores y la respuesta de los actuadores mediante pruebas de laboratorio. El prototipo constituye una plataforma base para el desarrollo de composteras educativas de bajo costo. Como trabajo futuro se plantea la validación experimental con residuos orgánicos reales y la evaluación de usabilidad con usuarios en contextos educativos.

**PALABRAS CLAVE:** Arduino, Compostaje doméstico, Educación ambiental, Prototipo, Sensor de humedad, Sensor de temperatura.



## Colaboración

Diego Rafael Hernández Ruiz; Mariam Andrade San Martín; Noreni Casagnon Rodríguez; Alan Antonio Rico Barragán; Humberto Raymundo González Moreno, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

**ABSTRACT:** The increase in domestic organic waste and its improper disposal in landfills generates greenhouse gas emissions, polluting leachates, and landfill saturation. Composting emerges as a sustainable alternative to transform this waste into fertilizer, although its domestic implementation presents barriers of space, lack of knowledge, and absence of monitoring of critical variables. This paper presents RoboComposta, a semi-automated composting prototype aimed at environmental education. The system is based on an Arduino UNO microcontroller, which integrates temperature and humidity sensors, as well as an aeration system using a fan and peristaltic pump for humidity adjustment. The architecture includes visual indicators and a basic feedback interface for the user. The development corresponds to a preliminary concept validation, in which the operation of the electronic system, sensor readings, and actuator response were verified through laboratory tests. The prototype constitutes a base platform for the development of low-cost educational composters. Future work includes experimental validation with real organic waste and usability evaluation with users in educational contexts.

**KEYWORDS:** Arduino, Home composting, Environmental education, Prototype, Humidity sensor, Temperature sensor.

## INTRODUCCIÓN

La gestión inadecuada de los residuos orgánicos sigue siendo uno de los problemas ambientales más relevantes, pues su acumulación en vertederos incrementa la producción de lixiviados, emisiones de metano y pérdida de recursos que podrían reintegrarse a los sistemas productivos. Diversos estudios destacan que el compostaje constituye una estrategia eficaz y sostenible para reducir esta carga ambiental, ya que transforma los desechos biodegradables en productos útiles como abono orgánico [1]. Además, esta práctica ha demostrado ser una alternativa viable incluso en espacios limitados, siempre que se cuente con condiciones adecuadas de temperatura, humedad y oxigenación [2][3][4].

Más allá de los beneficios ecológicos, el compostaje tiene un valor educativo significativo. La participación de los niños en actividades ambientales fomenta la construcción de hábitos responsables y favorece la conciencia ecológica desde edades tempranas, especialmente cuando se trabaja mediante proyectos prácticos y experiencias directas con la naturaleza [5]. Adicionalmente, estudios han documentado que, a través de actividades guiadas, los niños pueden identificar materiales compostables y comprender el impacto del manejo adecuado de los recursos naturales [6].

En el caso de los adultos mayores, la literatura señala que este sector suele enfrentar barreras sistemáticas, falta de información y exclusión en temas ambientales, aunque en general muestran una actitud favorable hacia el cuidado del entorno [7]. Esta brecha evidencia la importancia de diseñar herramientas accesibles, intuitivas y adaptadas a sus capacidades, que faciliten su participación en actividades sostenibles.

Desde el ámbito del diseño tecnológico, el prototipado sostenible permite evaluar la relación entre funcionalidad, impacto ambiental y aprendizaje, asegurando coherencia entre la intención educativa y la solución creada [8]. Por su parte, la incorporación de metodologías de prototipado adaptadas a contextos con recursos limitados favorece el desarrollo de dispositivos accesibles, replicables y adecuados para distintas realidades [9]. Asimismo, el uso de modelos digitales desde las primeras etapas del diseño facilita visualizar el sistema, optimizar el espacio y prever la integración estructural y electrónica del prototipo [10].

La revisión bibliográfica que sustenta este proyecto se construyó a partir de una búsqueda encaminada a tres ejes temáticos, los cuales fueron, compostaje doméstico y sus variables críticas, educación ambiental enfocada en niños y adultos mayores, y diseño e integración de prototipos. Los documentos consultados provienen principalmente de repositorios institucionales, revistas de acceso abierto y plataformas especializadas en ingeniería y ciencias ambientales, tales como ScienceDirect, Helion, Sustainability, IntechOpen, Procedia CIRP, BMC Geriatrics, Development Engineering, así como tesis universitarias disponibles en repositorios. Esta variedad de fuentes permitió englobar diversas perspectivas. Una cantidad considerable de los artículos pertenece a investigaciones que se encuentran en bases de datos reconocidas y que abordan aspectos técnicos del compostaje, incluyendo la influencia de variables como la temperatura, humedad, aireación, entre otras. Otra parte relevante corresponde a literatura educativa y social, la cual explora la alfabetización ambiental infantil y las barreras cognitivas

o tecnológicas que enfrentan los adultos mayores al involucrarse en proyectos ambientales. Finalmente, el tercer grupo está constituido por estudios sobre prototipado, diseño ergonómico, integración electrónica y metodologías para desarrollar dispositivos accesibles en contextos de recursos limitados. Este fraccionamiento permitió comprender el problema desde un enfoque integral y no únicamente técnico. En recapitulación, la revisión bibliográfica se caracteriza por una combinación equilibrada de investigaciones recientes, estudios clásicos del compostaje, literatura sobre sostenibilidad educativa y trabajos sobre ingeniería de prototipos. Este enfoque híbrido fortalece la idea de RoboComposta, pues demuestra que la automatización de procesos, acompañada de una interfaz amigable y pedagógica, responde directamente a vacíos detectados en la literatura: falta de soluciones domésticas accesibles, ausencia de dispositivos diseñados específicamente para niños y adultos mayores, y escaso aprovechamiento del compostaje como herramienta formativa y comunitaria.

En este marco, RoboComposta surge como una propuesta que integra educación ambiental, accesibilidad y tecnología, mediante un prototipo de compostera inteligente que automatiza procesos como la medición de temperatura, humedad y aireación. El proyecto busca fomentar la participación activa en la gestión de residuos orgánicos, aprovechando un enfoque didáctico, interactivo y apoyado en principios de sostenibilidad y diseño ergonómico.

En los últimos años se han desarrollado diferentes sistemas de compostaje asistido mediante sensores y tecnologías de monitoreo. Algunos estudios integran sensores de temperatura, humedad y pH para supervisar el proceso de degradación orgánica, mientras que otros incorporan plataformas IoT para el seguimiento remoto de las condiciones del compostaje. Asimismo, existen composteras eléctricas y sistemas automatizados que incluyen ventilación, mezclado y control de humedad para mejorar la eficiencia del proceso. No obstante, gran parte de estas soluciones se orientan a aplicaciones industriales o domésticas de mayor costo, con menor énfasis en su utilización como herramienta educativa [11][12][13][14]. En este contexto, el desarrollo de prototipos de bajo costo que permitan introducir conceptos de economía circular y valorización de residuos en entornos educativos representa una oportunidad relevante para la formación ambiental.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El desarrollo del prototipo RoboComposta se realizó en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla (Misantla, Veracruz, México), donde se efectuaron las actividades de diseño CAD, ensamble electrónico, pruebas de funcionamiento y calibración de senso-

res. Las actividades se llevaron a cabo en condiciones controladas, sin uso de material orgánico real.

El compostaje es un proceso biológico controlado donde los microorganismos descomponen y estabilizan materia orgánica bajo condiciones aeróbicas. Se eligió este método por su eficiencia y por la posibilidad de automatizar las variables críticas del proceso, las cuales a continuación se mencionan [15].

El sistema desarrollado regula tres variables esenciales:

- Temperatura
- Humedad
- Aireación

La literatura indica que estas son determinantes para la correcta descomposición, la actividad microbiana y la calidad del compost, aunque existe otras variables que también son de importancia como el Ph, la cual está siendo considerada para trabajos futuros [2][16].

El desarrollo del prototipo siguió los lineamientos de la ingeniería de prototipos, entendida como un proceso iterativo de diseño, construcción, verificación y validación, aunque es importante hacer mención que hasta el momento el prototipo se encuentra en la parte de verificación, teniendo pendiente la validación del mismo en entornos reales [17]. Este enfoque permitió adaptar el sistema a las características físicas, cognitivas y educativas pensando específicamente en el enfoque educativo ya que es el objetivo principal de este prototipo.

El proceso comenzó con la definición de los requerimientos del usuario, priorizando la facilidad de uso, la seguridad, la retroalimentación visual y auditiva, así como criterios de ergonomía y accesibilidad. Con base en estos lineamientos establecidos se elaboró el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 1, el cual representara la lógica operacional del sistema completo desde que se cargan los residuos orgánicos hasta que se obtiene el abono, además de bocetos preliminares que sirvieron como guía para el posterior modelado tridimensional del prototipo en el software CAD.

El prototipo fue modelado en el software SolidWorks, generando una estructura tridimensional que incluyó:

- El contenedor de compostaje,
- La base para Arduino UNO,
- Alojamiento para LCD, botones e indicadores, una maceta.

El modelado permitió anticipar interferencias, optimizar dimensiones y verificar la ergonomía del sistema [10], respecto a la integración temprana de modelos digitales. Asimismo, el diseño consideró criterios de inclusión

y accesibilidad, criterio importante en el desarrollo de prototipos educativos [18].

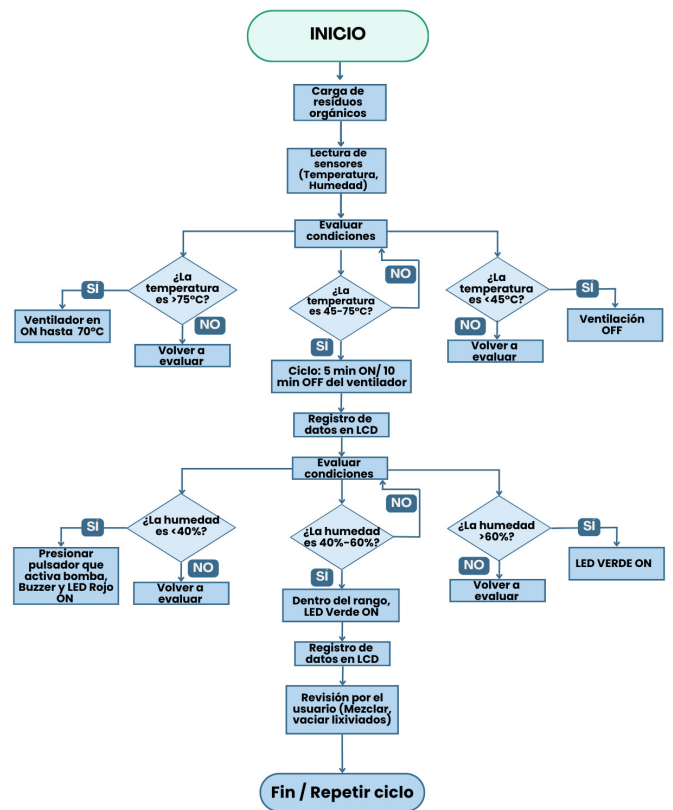


Figura 1. Diagrama de flujo de la lógica operacional del sistema.

Fuente: elaboración propia.

En la fase de integración electrónica se empleó un microcontrolador Arduino UNO como unidad central de control, un sensor de temperatura DS18B20 impermeable para medir la temperatura en el núcleo de la mezcla orgánica, y un sensor capacitivo de humedad V2.0 para estimar el contenido de agua en el sustrato. El sistema de actuación incluyó un ventilador de 12 V para aireación, una bomba peristáltica de 12 V para la adición de agua, focos LED rojo y verde como indicadores visuales, un pulsador de 22 mm para control manual y un módulo DFPlayer Mini con bocina de 3 W para reproducir mensajes de audio educativos.

La alimentación se realizó mediante una fuente de 12 Volts y 5 Amperes y un eliminador 127 Volts AC a 5 Volts DC para suministrar energía al Arduino y los componentes. Los actuadores de 12 V se controlaron a través de MOSFET canal N IRLZ44N con diodos flyback 1N4007 para protección. La pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C se utilizó para mostrar en tiempo real los valores de temperatura y humedad registrados, cabe destacar que todo el conexionado está localizado en la cabeza de RoboComposta, como si fuera el cerebro del mismo.

Se elaboró una lista de materiales además de las tablas de conexión de cada componente del circuito, definiendo la asignación de pines analógicos y digitales que van a ser utilizados en el microcontrolador Arduino para cada sensor, actuador e interfaz. Y posterior a ello se construyó un diagrama de conexiones general, que sirvió como guía para el conexionado y verificación de la integridad eléctrica del sistema. En la Figura 2 se muestra el circuito antes de ser montado en el prototipo, realizándole pruebas en el protoboard.

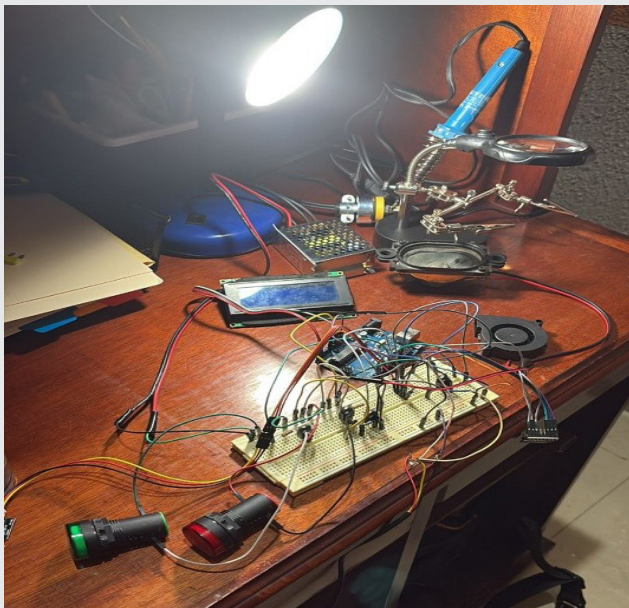


Figura 2. Elaboración del circuito.  
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se realizó la calibración preliminar de los sensores. El DS18B20 se comparó con un pirómetro infrarrojo de referencia en tres rangos de temperatura aproximados: ambiente (~27 °C), templado (~48 °C) y caliente (~55 °C), en la Tabla 1 se pueden observar los resultados obtenidos.

Tabla 1. Comparación entre lecturas del sensor DS18B20 y un pirómetro en tres vasos con agua.

Vaso	DS18B20 (°C)	Pirómetro (°C)	Diferencia (°C)
1	26.5	27.1	≈-0.6
2	49.1	48.4	≈+0.7
3	55.8	55.1	≈+0.7

Fuente: Elaboración propia.

Para el sensor de humedad capacitivo se emplearon tres niveles de tierra como sustrato (poco húmedo ≈25 %, medio ≈50 % y saturado ≈100 %), registrando el voltaje y el valor analógico a la salida para construir una curva de referencia valor análogo-humedad y definir umbrales de activación de la bomba, en la Tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos. Es importante mencionar que esta calibración

se utilizó únicamente como aproximación preliminar para la interpretación de las lecturas del sensor dentro del prototipo, sin considerarse una validación metrológica del sistema en condiciones reales de compostaje.

Tabla 2. Registro inicial para la calibración del sensor capacitivo V2.0.

Humedad (%)	Voltaje (V)	Lectura analógica
25	2.62	537
50	2.54	520
100	1.98	405

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 podemos observar cómo se tomó la lectura de humedad con el sensor capacitivo v2.0.

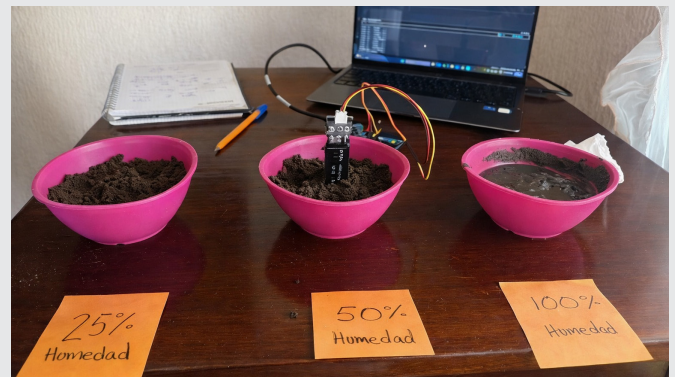


Figura 3. Registro de lectura de humedad con el sensor capacitivo V2.0.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se implementó el código de control en la plataforma Arduino IDE, integrando la lectura periódica de sensores, comparación con rangos de referencia reportados en la literatura para procesos de compostaje (temperatura 55–65 °C y humedad 45–65 %), activación del ventilador y la bomba, encendido de indicadores LED y despliegue de información en la LCD, así como la reproducción de mensajes de alerta mediante el DFPlayer Mini y se procedió a montar todo en el prototipo.

Es importante señalar que, en esta etapa, no se realizaron pruebas con material orgánico real, por lo que el nivel de madurez tecnológica se considera TRL 3, enfocado a la validación experimental del concepto y del funcionamiento interno del prototipo.

Cabe mencionar que la metodología del proyecto no solo contempló la integración electrónica y el prototipo físico, sino también criterios de diseño orientados a facilitar su uso en contextos educativos. Por ello se

consideraron aspectos como accesibilidad, ergonomía y claridad visual de la interfaz, con el objetivo de desarrollar un dispositivo comprensible y seguro para usuarios no especializados. Asimismo, se tomaron en cuenta factores ambientales locales, como la disponibilidad de materiales, las condiciones de humedad y temperatura en interiores, y la posibilidad de utilizar la basura orgánica que comúnmente se genera en casa para futuras pruebas.

Por otro lado, el hecho de tomar en cuenta un enfoque de prototipado iterativo permitió corregir detalles estructurales y mejorar la distribución interna de la cámara de compostaje y los componentes externos antes de realizar lo que fue el ensamblaje final. Del mismo modo, la selección de sensores de bajo costo y módulos ampliamente documentados, tales como el sensor DS18B20 (temperatura) y el sensor capacitivo V2.0 (humedad), corresponde al objetivo con enfoque educativo de crear una herramienta que pueda ser replicada por estudiantes, docentes o comunidades con limitaciones económicas. Por consiguiente, la metodología se centró principalmente en la integración del sistema electrónico, el ensamblaje del prototipo y la verificación funcional del hardware y la lógica de control.

## RESULTADOS

### Diseño y modelado CAD

El modelado en SolidWorks permitió obtener una representación tridimensional del prototipo RoboComposta Kids & Senior, donde se definieron la geometría del contenedor de compostaje, la disposición del sistema de ventilación, el espacio para una maceta superior y las ubicaciones para Arduino, pantalla LCD, focos e interruptor. Las vistas explosionadas y planos derivados del modelo CAD facilitaron la fabricación y el montaje físico, reduciendo tiempos de ajuste y retrabajo. En la Figura 4 se muestra el resultado del diseño CAD.

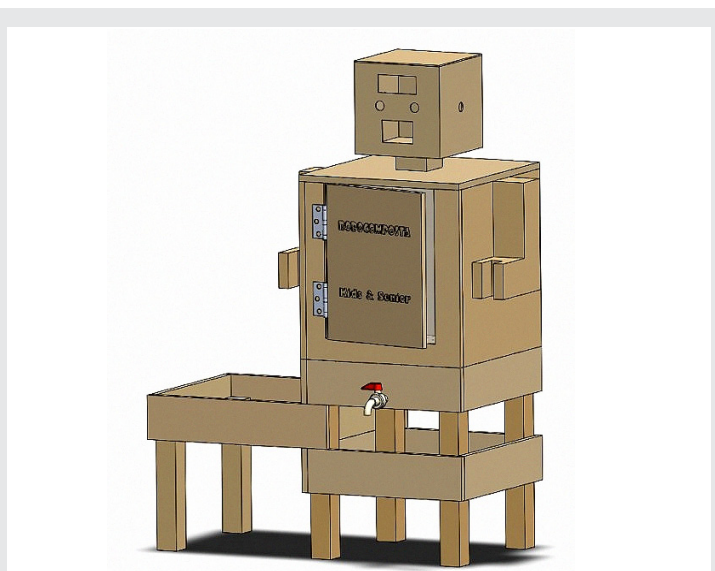


Figura 4. Diseño CAD elaborado en el software SolidWorks. Fuente: elaboración propia.

### Ensamble físico y electrónico

Con base en el diseño CAD y los componentes eléctricos y electrónicos, se construyó el prototipo físico, el cual se muestra en la Figura 5, utilizando madera, un material común en la región para la estructura y componentes electrónicos de bajo costo. Se ensamblaron el sensor de temperatura, el sensor de humedad, ventilador, bomba peristáltica, indicadores luminosos, pulsador y módulo DFPlayer Mini. Durante las pruebas en laboratorio, sin presencia de residuos orgánicos, se verificó la lectura preliminar de los sensores y la respuesta a los cambios simulados en temperatura y humedad. El encendido y apagado del ventilador, la activación de la bomba de agua, el cambio de estado de los LED rojo y verde, y la reproducción de mensajes de audio se ejecutaron conforme a las condiciones programadas en el diagrama de flujo.



Figura 5. Prototipo de RoboComposta Kids & Senior. Fuente: elaboración propia.

### Calibración de sensores

Para evaluar el funcionamiento básico de los sensores utilizados en el prototipo, se realizaron pruebas preliminares de verificación en laboratorio. En el caso del sensor de temperatura DS18B20, las lecturas obtenidas fueron comparadas con mediciones realizadas mediante un termómetro infrarrojo comercial en recipientes con agua a diferentes temperaturas. Las mediciones mostraron variaciones del orden de  $\pm 0.7$  °C entre ambos dispositivos, lo cual se consideró suficiente para

finés de monitoreo educativo dentro del rango típico de temperatura asociado a procesos de compostaje.

Para el sensor capacitivo de humedad del suelo V2.0 se realizaron pruebas exploratorias utilizando tierra como medio de referencia, observando la respuesta del sensor ante diferentes condiciones de humedad. Estas pruebas permitieron identificar rangos aproximados de lectura asociados a condiciones secas, intermedias y húmedas del sustrato, los cuales fueron utilizados como referencia para definir un umbral de activación del sistema de riego automático.

Es importante señalar que estas pruebas corresponden únicamente a una verificación preliminar del comportamiento de los sensores dentro del prototipo. No constituyen una calibración metrológica formal ni una validación exhaustiva para matrices heterogéneas como la composta. Una calibración más robusta requeriría experimentos con mayor número de puntos de medición y condiciones controladas, lo cual se plantea como trabajo futuro en etapas posteriores del desarrollo.

#### Validación de la lógica de control

El sistema lógico implementado en Arduino fue evaluado mediante pruebas de funcionamiento en laboratorio, simulando variaciones en las lecturas de los sensores de temperatura y humedad. Durante estas pruebas, la pantalla LCD mostró en tiempo real los valores registrados por los sensores, permitiendo observar el comportamiento del sistema.

Asimismo, se verificó la activación de los actuadores programados en el algoritmo de control. El ventilador, la bomba peristáltica, los indicadores LED y el sistema de audio cambiaron de estado de acuerdo con los umbrales de referencia definidos en el programa.

Las pruebas realizadas permitieron comprobar la comunicación entre sensores, microcontrolador y actuadores, así como la ejecución correcta de la secuencia de control implementada. Estos resultados confirman la integración funcional del sistema electrónico y del algoritmo de control dentro del prototipo antes de su evaluación con residuos orgánicos reales.

Es importante señalar que las pruebas realizadas corresponden a una validación preliminar del sistema electrónico y de control. No se realizaron experimentos con residuos orgánicos reales ni evaluaciones del proceso biológico de compostaje. Por lo tanto, los resultados presentados deben interpretarse como una verificación funcional del prototipo y no como una validación completa del desempeño del compostaje doméstico.

#### CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo RoboComposta permitió integrar un sistema de monitoreo y control básico para una compostera semi-automatizada orientada a fines

educativos. El proceso de diseño incluyó el modelado CAD de la estructura, la integración electrónica basada en un microcontrolador Arduino y la incorporación de sensores de temperatura y humedad junto con actuadores para ventilación y riego. Las pruebas realizadas en laboratorio permitieron verificar la comunicación entre sensores, microcontrolador y actuadores, así como el funcionamiento del algoritmo de control implementado. Estos resultados confirman la integración funcional del sistema electrónico y la viabilidad técnica del concepto propuesto.

No obstante, el trabajo presenta limitaciones propias de una validación preliminar de prototipo. En particular, no se realizaron experimentos con residuos orgánicos reales ni evaluaciones del proceso biológico de compostaje, por lo que no es posible aún demostrar el desempeño del sistema en condiciones domésticas reales. En consecuencia, el desarrollo actual corresponde a una validación inicial del concepto tecnológico, ubicada en un nivel de madurez tecnológica TRL 3. Como trabajo futuro se plantea la realización de experimentos con material orgánico real, así como la incorporación de sensores adicionales que permitan monitorear variables relevantes del proceso de compostaje, como el pH u otros indicadores biológicos, con el fin de avanzar hacia etapas posteriores de validación del sistema.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] Niekraś, L., Rombel-Bryzek, A., & Moliszewska, E. B. (2024). *Home Composting - Rules, Conditions, New Solutions. Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology*, 29(1-2), 95-110. <https://doi.org/10.2478/cdem-2024-0007>.

[2] Smith, S. R., & Jasim, S. (2009). *Small-scale home composting of biodegradable household waste: overview of key results from a 3-year research programme in West London. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 27(10), 941-950. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103828>.

[3] Yang, Z., Muhayodin, F., Larsen, O. C., Miao, H., Xue, B., & Rotter, V. S. (2021). *A Review of Composting Process Models of Organic Solid Waste with a Focus on the Fates of C, N, P, and K. Processes*, 9(3), 473. <https://doi.org/10.3390/pr9030473>.

[4] Dharnaik, A. S., & Pol, P. (2024). *A Review on Composting of Organic Solid Waste. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1326(1), 012130. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012130>.

[5] Maria Munoz Millet, O. (2023). *Composting in our Primary School. In Organic Fertilizers - New Advances and Applications [Working Tit-*

- le]. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001875>.
- [6] Abdul Rahman, N., Mohd Yusop, N., & Awang, R. (2021). The effect of project on children attitude toward environmental balance. *Hungarian Educational Research Journal*, 11(4), 426–439. <https://doi.org/10.1556/063.2021.00021>.
- [7] Wang, Y., Wu, Z., Duan, L., Liu, S., Chen, R., Sun, T., Wang, J., Zhou, J., Wang, H., & Huang, P. (2024). Digital exclusion and cognitive impairment in older people: findings from five longitudinal studies. *BMC Geriatrics*, 24(1), 406. <https://doi.org/10.1186/s12877-024-05026-w>.
- [8] Soomro, S. A., Casakin, H., & Georgiev, G. v. (2021). Sustainable Design and Prototyping Using Digital Fabrication Tools for Education. *Sustainability*, 13(3), 1196. <https://doi.org/10.3390/su13031196>.
- [9] Chou, S., & Austin-Breneman, J. (2018). Prototyping methods and constraints for small-to-medium sized enterprises in East Africa. *Development Engineering*, 3, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2018.05.002>.
- [10] Kim, D. Y. (2019). A Design Methodology Using Prototyping Based on the Digital-Physical Models in the Architectural Design Process. *Sustainability*, 11(16), 4416. <https://doi.org/10.3390/su11164416>.
- [11] Elalami, M., Baskoun, Y., Zahra Beraich, F., Arouch, M., Taouzari, M., & Qanadli, S. D. (2019). Design and Test of the Smart Composter Controlled by Sensors. 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 1–6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC48032.2019.9078197>.
- [12] Hairol, Y. F. S. B. M. M., Mahmud, A., Jiziat, N. L. M., Aziz, A. A., & Yaacob, S. (2025). Energy-Efficient Smart Composting IoT System for Sustainable Food Waste Management. 2025 Multimedia University Engineering Conference (MECON), 1–6. <https://doi.org/10.1109/MECON67253.2025.11276898>.
- [13] Kumaresan, M., Khanchana, K., & Anbarasu, M. (2024). A Review on Organic Composting Technology by using Different Microorganisms. *Ecology, Environment and Conservation*, 30(Suppl), S503–S512. <https://doi.org/10.53550/EEC.2024.v30i04s.082>.
- [14] Manea, E. E., Bumbac, C., Dinu, L. R., Bumbac, M., & Nicolescu, C. M. (2024). Composting as a Sustainable Solution for Organic Solid Waste Management: Current Practices and Potential Improvements. *Sustainability*, 16(15), 6329. <https://doi.org/10.3390/su16156329>.
- [15] Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Johir, M. A. H. (2016). Sustainable Operation of Composting in Solid Waste Management. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.022>.
- [16] Escamilla-García, P., Ángeles Tovar, L. C., Perez Soto, F., & Rivera, G. (2024). Los Residuos Sólidos Urbanos, afectaciones ambientales y sociales: Una revisión crítica. *M+A Revista Electrónica de Medioambiente*, 25, 29–51.
- [17] Elverum, C. W., Welo, T., & Tronvoll, S. (2016). Prototyping in New Product Development: Strategy Considerations. *Procedia CIRP*, 50, 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.010>.
- [18] Török, J., & Duplákóvá, D. (2025). Integrated Practical Framework for Multidisciplinary Prototype Design and Manufacturing Process. *Processes*, 13(2), 454. <https://doi.org/10.3390/pr13020454>.

