

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE COMPOSTADOR PORTÁTIL PARA EL
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS GENERADOS EN
LA ACTIVIDAD DEL PROGRAMA DE GESTIÓN GASTRONÓMICA Y LA
CAFETERÍA DE LA CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA

LUIS GUILLERMO MUÑOZ DIAZ

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA
POPAYÁN, CAUCA

2024

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE COMPOSTADOR PORTÁTIL PARA EL
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS RESIDENCIALES

LUIS GUILLERMO MUÑOZ DIAZ

Propuesta proyecto de grado
Para optar al título de
Ingeniero Mecatrónico

Director:
M.Sc. Jhon Alexander Guerrero Narváez

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA
POPAYÁN, CAUCA
2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

Popayán-Cauca, 17 de diciembre 2024

DEDICATORIA

A mi madre, Ursulina Díaz, mi faro en la oscuridad. Tu amor incondicional ha sido mi mayor fortaleza. Recuerdo vívidamente aquellas noches en las que te desvelabas conmigo para ayudarme con mis tareas, inculcándome la importancia de la educación y el valor del esfuerzo. Tu paciencia infinita y tu sabiduría me han guiado en cada paso de mi vida.

A mi hermano Salvador Muñoz, mi confidente y mi compañero de aventuras. Gracias por tus consejos sinceros, por tus bromas que siempre me sacan una sonrisa y por estar ahí para celebrar mis triunfos y consolarme en mis fracasos. Tu apoyo incondicional me ha dado la seguridad necesaria para enfrentar cualquier desafío.

A mi hermana Luz Irene Muñoz. Tu cariño y comprensión han sido mi refugio en los momentos más difíciles. Recuerdo con especial cariño las largas charlas que teníamos donde compartíamos nuestros sueños y miedos. Tu optimismo contagioso siempre me ha llenado de esperanza.

A mi sobrina Jhanna Muñoz, mi pequeña fuente de alegría. Tu inocencia y tu energía me renuevan cada día. Gracias por tus abrazos espontáneos y tus risas que llenan mi corazón de felicidad. Tu presencia en mi vida es un regalo invaluable.

A mis tíos y tías, por sus sabios consejos y su apoyo incondicional. A mis primos, por compartir conmigo momentos inolvidables y por crear conmigo recuerdos que atesoraré por siempre. A todos ustedes, mi familia, gracias por ser mi mayor tesoro. Sin su amor y su apoyo, no hubiera sido posible alcanzar esta meta.

Este trabajo es un homenaje a todos aquellos que han creído en mí y que han contribuido a mi formación como persona. Su influencia ha sido fundamental en mi vida y siempre llevaré su amor en mi corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRAB	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE GRAFICAS	7
ANEXOS	7
INTRODUCCIÓN.....	8
JUSTIFICACIÓN	9
PLANTEAMIENTO, DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
ANTECEDENTES	13
MARCO TEÓRICO	14
OBJETIVOS	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
METODOLOGÍA	18
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE Y DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	22
Estado del arte	22
CAPÍTULO II. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	24
2.1 ETAPA 1: Modelado del sistema	24
2.1.1 Fase 1: Reconocimiento de la necesidad	24
2.1.2 Fase 2: Diseño conceptual y especificación funcional	27
2.1.3 Fase 3: Modelado matemático modular	30
2.1.4 Selección de sensores y actuadores	37
2.1.5 Modelo modular de ingeniería detallado	45
2.1.6 Diseño del sistema de control	47
2.1.7 Optimización del diseño	50
2.2 ETAPA 2: ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO	50
2.1.3 Fase 1: simulación de hardware	50
2.2.2 Fase 2: Optimización del diseño	51
2.3 ETAPA 3: IMPLEMENTACIÓN / CICLO DE VIDA	51
CAPITULO III: VALIDACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE PROTOTIPO	73
CONCLUSIONES	87
FUTURAS MEJORAS	89
ANEXOS	90
BIBLIOGRAFÍA	91

RESUMEN

Este proyecto de investigación se enfoca en el diseño y desarrollo de un prototipo mecatrónico innovador, destinado al compostaje doméstico de residuos orgánicos. El compostador portátil, concebido como una solución autónoma y eficiente, busca optimizar los procesos de compostaje mediante la integración de conocimientos en ingeniería sostenible, ambiental y edafología. El objetivo principal es desarrollar un dispositivo compacto capaz de transformar de manera autónoma los residuos orgánicos en compost de alta calidad, fomentando así la economía circular y reduciendo la huella de carbono. Además, se busca potenciar la formación de ingenieros y promover la investigación en el campo de la mecatrónica aplicada a la sostenibilidad con un análisis de las oportunidades comerciales y los recursos disponibles para escalar a diferentes soluciones y contribuir así a la construcción de un futuro más sostenible, donde la ingeniería mecatrónica sea un motor de cambio.

A través de una metodología de diseño mecatrónico centrada en la reutilización de materiales y en la optimización de procesos, se espera obtener un prototipo escalable y de bajo costo. Esta permitirá el desarrollo del compostador mediante etapas de fabricación digital (CAD/CAE/CAM), análisis de requerimientos técnicos y operativos, diseño e implementación de circuitos de control y potencia, fabricación modular personalizada, integración de componentes Hardware /Software y pruebas de campo en ambiente controlado. Este proyecto representa un paso significativo hacia la construcción de un futuro más sostenible, donde la innovación tecnológica se pone al servicio del cuidado del medio ambiente. Se prevé que genere un impacto positivo en múltiples dimensiones: promoverá la gestión sostenible de residuos orgánicos, fomentará la adopción de tecnologías limpias y la conciencia ambiental en la población, servirá como base para futuras investigaciones, fomentando el estudio de alternativas más sostenibles y amigables con el medio ambiente. Además, establecerá un punto de referencia en cuanto a metodologías de estudio, impulsando la formación de ingenieros y el desarrollo de nuevas líneas de investigación con la contribución a la creación de una economía circular, promoviendo la reutilización y el reciclaje de recursos.

ABSTRACT

This research project focuses on designing and developing an innovative mechatronic prototype for home composting of organic waste. The portable composter, conceived as an autonomous and efficient solution, seeks to optimize composting processes by integrating knowledge in sustainable engineering, environmental, and soil science. The main objective is to develop a compact device capable of autonomously transforming organic waste into high-quality compost, thus promoting the circular economy and reducing the carbon footprint. In addition, it seeks to enhance the training of engineers and promote research in mechatronics applied to sustainability by analyzing commercial opportunities and available resources to scale to different solutions and thus contribute to building a more sustainable future, where mechatronic engineering is a driver of change.

A scalable and low-cost prototype is expected to be obtained through a mechatronic design methodology focused on the reuse of materials and process optimization. This will allow the development of the composter through digital manufacturing stages (CAD/CAE/CAM), analysis of technical and operational requirements, design and implementation of control and power circuits, customized modular manufacturing, hardware/software components integration, and field tests in a controlled environment. This project represents a significant step toward building a more sustainable future where technological innovation is put at the service of environmental care. It is expected to generate a positive impact in multiple dimensions: it will promote the sustainable management of organic waste, encourage the adoption of clean technologies and environmental awareness in the population, serve as a basis for future research, and promote the study of more sustainable and environmentally friendly alternatives. In addition, it will establish a benchmark in terms of study methodologies, promote the training of engineers, develop new lines of research that contribute to creating a circular economy, and promote the reuse and recycling of resources.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de compostaje residencial. Tomada de [16].	15
Figura 2. Abono orgánico elaborado del compost. Tomada de [10].	15
Figura 3. Compostador residencial. [17].	16
Figura 4. Metodología de diseño mecatrónico (The mechatronics design process). [19].	18
Figura 5. Metodología empleada para la fabricación del prototipo de compostador de residuos orgánicos.	18
Figura 6. Boceto del prototipo de compostador de residuos orgánicos.	30
Figura 7. Tubo PVC de 6". [27]	32
Figura 8. Tubo metálico empleado para la estructura. [28].	33
Figura 9. Lámina de acero inoxidable. [29].	33
Figura 10. Acetal. [30]	34
Figura 11. Eje metálico de 5/8" de diámetro. [31].	34
Figura 12. Platina de metal de 25 mm*3 mm*6m. [32]	35
Figura 13. Tubo de PVC de 2". [33]	35
Figura 14. Rodamiento con soporte cuadrado con diámetro interno de 5/8". [34]	36
Figura 15. Bisagras para compuerta de vaciado de compost maduro. [35]	36
Figura 16. Madera MDF 9mm. [36]	37
Figura 17. Deducción de fuerza necesaria para corte de materia orgánica	38
Figura 18. Motor de 1.5 marca WEG adquirido para el compostador. [37].	39
Figura 19. Motor de la sección de mezclador.	40
Figura 20. Contactor CHINT NXC-18. [38].	41
Figura 21. Relé térmico CHINT NXR-25. [40].	41
Figura 22. Disyuntor Hyundai HGD 63M. [41].	42
Figura 23. Sensor DHT22. [42].	43
Figura 24. Microcontrolador ESP32. [43].	43
Figura 25. Pulsadores NA y NC. [44].	43
Figura 26. Pantalla OLED de 0.96". [45]	44
Figura 27. Modulo relé estado sólido de 25A. [46]	44
Figura 28. Secador de cabello. [47].	45
Figura 29. Ensamble de diseño CAD del compostador	46
Figura 30. Ensamble de diseño CAD del compostador	46
Figura 31. Conformación mecánica del compostador.	47
Figura 32. Conexión de la instrumentación de protección de los componentes electrónicos	48
Figura 33. Diagrama de flujo del funcionamiento del compostador a través del uso manual y automático	49
Figura 34. Cuchillas elaboradas con base al primer diseño.	52
Figura 35. Fabricación de sección de triturado para prueba de cuchillas	53
Figura 36. Sistema de trituración para prueba de cuchillas	53
Figura 37. Cáscara de naranja triturada por las cuchillas, pero con dificultad de corte por el diseño elaborado y diámetro de material.	54
Figura 38. Diseño final de las cuchillas encargadas de la primera sección en la fase de trituración.	54
Figura 39. Diseño final de las cuchillas encargadas de la segunda fase en la sección de trituración.	55
Figura 40. Diseño de cuchilla encargada de expulsión de la materia orgánica triturada..	55
Figura 41. Diseño final de los soportes encargados la distribución y sujeción de los mecanismos que conforman la sección de trituración	56

Figura 42. Ensamble entre soporte y mallas	57
Figura 43. Bujes soldados sobre las cuchillas y sujetos sobre el eje de rotación	57
Figura 44. Estructura en proceso de fabricación	58
Figura 45. Mecanismo interno se la sección de trituración con su diseño final	59
Figura 46. Trituración sin falencia por el sistema de cuchillas y sin falencias de depósito en las mallas.....	59
Figura 47. Corte de aspas de lámina de acero inoxidable	60
Figura 48. Aspas de la sección de mezclado	60
Figura 49. sección de mezclado ensamblado	61
Figura 50. Sujeción de eje de rotación y rodamientos de base cuadrado a tapa de PVC	61
Figura 51. Impresión 3D que va adjunta a la sección de trituración para encaminar la materia orgánica triturada	62
Figura 52. Impresión 3D que va adjunta a la sección de mezclado para dar soporte al tubo que desciende de la sección de trituración.....	62
Figura 53. Perforaciones circulares en la sección de mezclado	63
Figura 54. Ducto conductor de la materia orgánica triturada	63
Figura 55. Pieza base del secador de cabello con malla.....	64
Figura 56. Pieza base del secador de cabello	64
Figura 57. Pieza circular para la sujeción de sección de trituración a la estructura principal	65
Figura 58. Soportes para la sujeción de la sección de mezclado a la estructura principal.....	65
Figura 59. Ensamble de las piezas elaboradas.	66
Figura 60. Montaje de motor encargado de la rotación de la sección de rotación	67
Figura 61. Pantalla OLED para monitoreo de temperatura y humedad del compost	67
Figura 62. Interruptores para el accionamiento manual de las diferentes secciones del compostador	68
Figura 63. Interfaz web para el accionamiento remoto de manera independiente de las secciones o automático de todo el sistema.....	69
Figura 64. Ejecución del sistema de control de temperatura	72
Figura 65. Diseño final del prototipo de compostador de residuos orgánicos	72
Figura 66. Residuos orgánicos recolectados para prueba 1.....	77
Figura 67. Peso registrado de los desechos que conforman la prueba 1	77
Figura 68. Depósito de residuos orgánicos en la sección de trituración	78
Figura 69. Temperatura después de 10 minutos encendido el prototipo compostador	79
Figura 70. Temperatura final tras 7 horas de funcionamiento del prototipo compostador	79
Figura 71. Reducción de peso equivalente al 68,1% del peso inicial.....	80
Figura 72. Compost final obtenido tras 7 horas de funcionamiento del prototipo compostador	80
Figura 73. Peso registrado de los desechos que fueron parte de la prueba 2	82
Figura 74. Reducción de peso equivalente al 67,7 de su peso inicial.....	82
Figura 75. Compost final obtenido tras 7 horas de funcionamiento del prototipo compostador	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información recopilada en la vigilancia tecnológica.....	24
Tabla 2. Requerimientos a cumplir por el prototipo de compostador de residuos orgánicos	28
Tabla 3. Materiales de fabricación	31
Tabla 4. Materiales eléctricos	32
Tabla 5. Información del motor DC de 1.5 HP. [37]	39
Tabla 6. Información del contactor CHINT NXC-18. [39].	41
Tabla 7. Información de Relé térmico CHINT NXR-25.....	42
Tabla 8. Peso de residuos orgánicos acorde a su clasificación	76
Tabla 9. Análisis de desarrollo de trabajo por parte del prototipo compostador	84
Tabla 10. Materiales de fabricación junto a su valor comercial	85
Tabla 11. Materiales eléctricos junto a su valor comercial	86

ÍNDICE DE GRAFICAS

Grafica 1. Clasificación y peso de los residuos presentes en cocinas del programa de Gestión Gastronómica durante 3 días. [53]	75
Grafica 2. Comportamiento del peso inicial vs final	81
Grafica 3. Comportamiento de la humedad inicial vs humedad final	81
Grafica 4. Comportamiento del peso inicial vs final	83
Grafica 5. Comportamiento de la humedad inicial vs humedad final	83

ANEXOS

➤ Anexo 1. Diseño CAD del prototipo compostador a desarrollar	90
➤ Anexo 2. Control eléctrico del prototipo compostador.....	90
➤ Anexo 3. Código de control del prototipo compostador	90

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de este proyecto, se aborda la problemática crucial relacionada con la gestión de residuos sólidos orgánicos, con un enfoque particular en aquellos generados en las cafeterías y cocinas del programa de Gestión Gastronómica de la Corporación Universitaria Comfacaucá. A nivel mundial, especialmente en las grandes ciudades de los países de América Latina y el Caribe, el manejo de los residuos sólidos ha representado un problema debido, entre otras cosas, a los altos volúmenes de residuos sólidos generados por los ciudadanos; cuando el manejo de éstos no es el adecuado, puede afectar la salud de los ciudadanos y al medio ambiente [1]. Estos desafíos subrayan la imperiosa necesidad de desarrollar soluciones innovadoras y sostenibles que permitan transformar estos desechos en recursos valiosos, como el compost, que es la descomposición o transformación controlada de material orgánico a través de su ciclo natural. El resultado de la descomposición, p.ej., de los residuos orgánicos de cocina y los residuos de jardín es el compost o humus, un oscuro acondicionador del suelo rico en nutrientes [2], reduciendo así su impacto ambiental. A lo largo de este trabajo, se explorarán los problemas asociados con la disposición de estos desechos, destacando las limitaciones de los métodos actuales como lo son la elaboración de compost en pilas o hileras en estado estático de la materia orgánica hasta un volteo manual o con maquinaria [3] y la urgencia de adoptar tecnologías eficientes y más prácticas que contribuyan al bienestar ambiental como lo son los compostadores de uso automático con uso doméstico y comercial, que tienen la capacidad de manejar los residuos generados por varios hogares y a gran escala industrial; las formas de los compostadores automáticos encontrados son rectangulares, de cilindro vertical u horizontal. El sistema de control permite airear, mezclar y controlar el material para temperaturas excesivas. [4]

El desarrollo de un prototipo compostador mecatrónico portátil emerge como una respuesta concreta a esta problemática, con el objetivo de transformar los residuos orgánicos en compost de alta calidad, minimizando el impacto ambiental. Este proyecto justifica la necesidad de dicho prototipo, estableciendo los objetivos del estudio y delineando las funcionalidades esenciales que el compostador debe cumplir para ser efectivo en su propósito. El objetivo general se centra en la creación de este dispositivo innovador, mientras que los objetivos específicos abordan aspectos clave como la revisión bibliométrica y vigilancia tecnológica, el diseño de componentes hardware y software mediante herramientas avanzadas CAM/CAD/CAE, la implementación de un mecanismo de compostaje eficiente, y la evaluación del prototipo en un contexto real dentro del programa de Gestión Gastronómica.

Finalmente, se presenta una visión general de la estructura de la tesis, detallando los temas que serán abordados en los capítulos subsecuentes. Con este estudio se busca no solo ofrecer una solución técnica al problema de la gestión de residuos orgánicos, sino también contribuir al avance del conocimiento en este campo.

JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto surge ante la necesidad de mitigar una problemática considerable: la falta de entidades que se encarguen del adecuado manejo de los desechos orgánicos en la ciudad de Popayán y sus alrededores. Desafortunadamente, los ciudadanos de Popayán perciben diariamente una gran cantidad de desechos arrojados en las vías, parques, zonas verdes y otros lugares, sin que nadie tome cartas en el asunto.

Para lograr un mejor manejo y clasificación de los desechos sólidos en cada hogar, es necesario establecer una metodología o alternativas que ayuden a concientizar a la población sobre la importancia del adecuado manejo de los desechos orgánicos y las consecuencias negativas de su disposición inadecuada; como también la asignación de personal que realice tareas de control y seguimiento para que exista el cumplimiento de las normas y aplicar las sanciones correspondientes a quienes no las cumplan. [5].

Una correcta clasificación y manejo de estos residuos permitirá aprovecharlos en el área ambiental y agropecuaria, gracias a la elaboración de compost, biocombustibles y otros productos. La automatización de estos procesos, por su parte, puede optimizar significativamente la producción de estos materiales, reduciendo costos y aumentando la eficiencia. Los sistemas automatizados pueden controlar de manera precisa las condiciones necesarias para la transformación de los residuos en productos útiles, asegurando una calidad constante y un menor impacto ambiental. Sin embargo, la accesibilidad a estos procesos y maquinaria automatizada sigue siendo un reto para muchos colombianos, principalmente debido a dos factores que son el alto costo de adquisición y de fabricación. Por esta razón, los ingenieros mecánicos tienen un papel fundamental en la construcción de un futuro mejor para la humanidad. Precisamente, el desarrollo de soluciones innovadoras y eficientes para el bienestar humano, ambiental y laboral es el campo en el que estos profesionales destacan. La ingeniería mecánica no sólo es hacer robots, sino la fabricación de los denominados “productos inteligentes”, es decir, aquellos capaces de procesar información para su funcionamiento. [6]. Este desafío exige contundencia, creatividad y eficacia, cualidades inherentes a la formación mecánica.

Hoy en día, debido a la creciente concienciación sanitaria, los colombianos están adoptando más productos vegetales, lo que se traduce en un aumento de la producción de cultivos. Esto aumenta la demanda de fertilizantes en Colombia. Debido a su respeto por el medio ambiente, los fertilizantes especiales, como los orgánicos y los de base biológica, son cada vez más apreciados. Esto está en consonancia con la creciente demanda de los consumidores de productos ecológicos y sostenibles.[7]

Los fertilizantes aumentan el rendimiento de las cosechas y contienen nutrientes esenciales para el crecimiento y la productividad de los cultivos. Colombia es uno de los mayores consumidores de fertilizantes de América Latina, y gasta alrededor del 35% del coste de producción de alimentos en fertilizantes y productos agroquímicos.[7]

Teniendo en cuenta lo anterior, el desarrollo de este proyecto se enmarca en el compromiso de la Corporación Universitaria Comfacaucá con la innovación, la sostenibilidad y el bienestar de la comunidad. Se espera que este prototipo represente un avance significativo en la gestión de residuos orgánicos en la ciudad de Popayán y sus alrededores. La economía circular y la agricultura sostenible se entrelazan en este proyecto, que busca optimizar la gestión de residuos orgánicos en Popayán. Al transformar estos residuos orgánicos en compost de alta calidad, se proporciona un fertilizante natural que mejora la productividad de los cultivos locales. Esta solución no solo reduce los costos de producción para los agricultores que está en un costo del 35% del valor del producto como lo da a

conocer el estudio realizado por la entidad Expert Market Resech [7], sino que también contribuye a la construcción de una economía circular más sólida, beneficiando tanto al medio ambiente como al sector agrícola de la región. El prototipo mecatrónico a desarrollar tiene la finalidad de triturar los desechos orgánicos residuales provenientes de las cocinas de gastronomía y cafetería de la institución para la elaboración de compost. Este sistema será puesto a prueba en la sede principal, donde se evaluará su funcionamiento y rendimiento para determinar su viabilidad para una fabricación a mayor escala.

Con el objetivo de brindar una solución sostenible a los hogares de Popayán y sus alrededores, se busca que empresas puedan determinar la viabilidad de utilizar el abono resultante para la sostenibilidad del agro y la protección del medio ambiente, promoviendo así un manejo adecuado de la materia orgánica.

PLANTEAMIENTO, DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Aproximadamente un tercio de las partes comestibles de los alimentos producidos para el consumo humano se pierde o se desperdicia, lo que representa alrededor de 1.300 millones de toneladas al año. Los alimentos se desperdician a lo largo de la cadena de suministro de alimentos, desde la producción agrícola inicial hasta el consumo final en el hogar. En los países de ingresos altos y medianos, los alimentos se desperdician en gran medida, lo que significa que se tiran incluso, siendo todavía adecuados para el consumo humano; no obstante, los alimentos también se pierden y desperdician al principio de la cadena de suministro de alimentos. En los países de ingresos bajos, los alimentos se pierden principalmente durante las primeras etapas y etapas intermedias de la cadena de suministro de alimentos y se desperdician menos alimentos en el consumo [3]. La gran cantidad de desperdicios de alimentos orgánicos, identificada a partir del estudio realizado, plantea una problemática significativa en términos de contaminación ambiental. Este desafío, que aún no ha encontrado una solución definitiva, se agrava debido a la naturaleza altamente contaminante de estos residuos en su proceso de descomposición. En respuesta a esta situación, diversos organismos han enfocado sus esfuerzos en investigar y aplicar alternativas como el compostaje, utilizando para ello mecanismos automatizados, procedimientos manuales, o la intervención constante de personal especializado en el manejo de la materia orgánica.

El compost, comúnmente referido como abono orgánico, ha demostrado ser de gran utilidad y ofrecer beneficios significativos en la rentabilidad y la incorporación de nutrientes en diversos cultivos. Además de sus ventajas directas para el agricultor, los productos agrícolas elaborados mediante procesos orgánicos están ganando mayor aceptación en el mercado debido a la ausencia de insumos químicos, lo que responde a una creciente demanda por prácticas agrícolas sostenibles y productos más saludables.[7]

En Colombia se tiene evidenciado que los estudios de Evaluación de Impacto Ambiental (E.I.A) son meramente descriptivos lo que conlleva a los planes de manejo ambiental diseñados sean deficientes y además no implementados de forma adecuada debido a la poca eficacia en el seguimiento a la implementación de los mismos por parte de las autoridades ambientales, debido a que no establecen mecanismos de control como indicadores de impacto y gestión que permitan la regulación. Esta realidad no es ajena al emplazamiento y operación de los rellenos sanitarios, cuyos impactos ambientales sobre el agua y el aire se agravan por el importante contenido de orgánicos que, bajo las condiciones de pluviosidad propias de latitudes intertropicales, incrementa la producción de gases, lixiviados y olores ofensivos, situación inductora de conflictividad ambiental en localidades y regiones del país. Es claro que, desde el propósito de reducir el impacto ambiental inducido por los rellenos sanitarios, el aprovechamiento de orgánicos también configura una prioridad en materia de gestión ambiental en el país y en la región [9]. Los lixiviados siendo un residuo proveniente de un manejo inadecuado en el almacenamiento de desechos orgánicos, brinda beneficios hacia las plantas dándole un buen manejo, pero a su vez también es perjudicial si no se le da un excelente tratamiento, ya que, al tener un gran aposentamiento expuesto al desarrollo libre ambiental, hace que surja gas metano, uno de los principales causantes de la contaminación y deterioro de la capa de ozono. Por tal motivo, los lixiviados que puedan tener la materia orgánica, serán depositados en un recipiente, donde personal con conocimiento en el manejo de estos, les dará un uso adecuado en el área a convenir acorde a las necesidades.

El problema del mal manejo de los desechos orgánicos en el Cauca no es una simple anécdota, sino una realidad con graves consecuencias. Según un estudio realizado por la Universidad Libre-Barranquilla, Los residuos sólidos orgánicos urbanos constituyen cerca del 70% del volumen total de desechos generados, por tal motivo es primordial buscar una salida integral que contribuya al manejo adecuado, potenciando los productos finales de estos procesos y minimizando un gran número de impactos ambientales que conlleven a la sostenibilidad de los recursos naturales [10]. Entre las alternativas en desarrollo, como la clasificación de desechos y la recolección selectiva por días, no se ha logrado un manejo eficiente ni una reducción significativa de la contaminación. A pesar de la implementación de estas estrategias, la gestión por parte de la población no ha sido adecuada, lo que ha limitado su efectividad en mitigar el impacto ambiental. Las causas de esta problemática son diversas, entre las más importantes se destaca la escasa incentivación para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, tanto por parte de la población como de los entes gubernamentales.

Las consecuencias del mal manejo de los desechos orgánicos son nefastas para el medio ambiente y la salud pública. La descomposición de la materia orgánica en los rellenos sanitarios genera gases de efecto invernadero [11], contamina las aguas subterráneas y produce malos olores que causan enfermedades que son producidas por microorganismos que se desarrollan en estos lugares [12]. Estos efectos no solo deterioran la calidad del entorno, sino que también crean condiciones propicias para el desarrollo de microorganismos patógenos, que pueden provocar enfermedades en las poblaciones afectadas. En consecuencia, es fundamental adoptar prácticas más efectivas para la gestión de desechos orgánicos, a fin de mitigar estos problemas y preservar tanto la salud humana como el equilibrio ambiental.

El elevado precio de los fertilizantes químicos azota la economía agraria, poniendo en riesgo la rentabilidad y la sostenibilidad del sector. Según datos de la sección de *Colombia potencia de vida* que hace parte de las secciones gubernamentales de agricultura colombiana (UPRA), en análisis entre los años 2022 y 2023, se da a conocer que ha habido un incremento notorio en los últimos 2 años, aunque han ido reduciendo en el último periodo. [13]. Aunque han reducido los fertilizantes, siguen siendo aún de costo elevado para los agricultores, ya que al ser tan altas las alzas, ha dificultado el comercio de los productos, hasta el punto de generar pérdidas. Esta situación está llevando a muchos agricultores a la quiebra, ya que no pueden acceder a estos insumos esenciales para la nutrición de sus cultivos. La falta de nutrientes afecta directamente la productividad de las cosechas, lo que se traduce en menores ingresos para los agricultores.

En este contexto, la fabricación de compost surge como una alternativa viable y sostenible a los fertilizantes químicos. El compost es un abono orgánico rico en nutrientes que se obtiene a partir de la descomposición de materia orgánica. La aplicación de materia orgánica humificada aporta nutrientes y funciona como base para la formación de múltiples compuestos que mantienen la actividad microbiana. [14].

Dentro del marco problemático expuesto se plantea ¿Cómo desarrollar un prototipo de compostador portátil para el aprovechamiento de residuos orgánicos residenciales?

ANTECEDENTES

Omar Ayala Cadena en el 2014, desarrolló un prototipo de compostador doméstico automatizado, empleando la plataforma Arduino. Este sistema innovador buscaba optimizar el proceso de compostaje al reducir la intervención humana. A través de sensores, el prototipo monitoreaba en tiempo real variables críticas como la humedad y temperatura, tomando decisiones autónomas para ajustar las condiciones óptimas de compostaje.

Cristian Santiago Cornejo Soria y María José Machado Gonzaga en el 2017, elaboraron un reactor batch prototipo para la obtención de compost con residuos orgánicos generados en la escuela superior politécnica de Chimborazo, este prototipo tenía la función de realizar mezcla y secado de la materia orgánica que era introducida en él, el reactor tenía un ventilador que hacía posible el secado de la materia orgánica cumpliendo las etapas del compost, dando como resultado la elaboración de compost de alta calidad.

Guillermo de Lima de Perú en 2022, desarrolló un prototipo de triturador de desechos orgánicos domésticos. Este dispositivo, inspirado en el diseño de trituradoras industriales, utilizaba un conjunto de cuchillas para reducir el tamaño de los residuos. Posteriormente, estos residuos triturados eran sometidos a un proceso de compostaje, ya sea mediante la técnica de pilas o aplicando una fuente de calor. El resultado final era un abono orgánico de alta calidad, obtenido de manera eficiente y sostenible.

Gabriel Santiago Saavedra Hernández en el 2023, desarrolló un prototipo de compostador doméstico automatizado. Este sistema, controlado por una placa Arduino, incorporaba un sensor de temperatura y un sensor de humedad para monitorear las condiciones internas del compostador. En función de las lecturas de estos sensores, se activaba una lámpara para regular la temperatura y un sistema de riego para mantener la humedad óptima. Además, un ventilador garantizaba una adecuada aireación del material orgánico, que era mezclado cada 7 días para acelerar el proceso de compostaje.

Deiber Andrés Aldana Pulido, Gabriela Manchola Reyes y Daniel Santiago Polanco Reyes en diciembre de 2024 publicado en la Revista Nova, desarrollaron un prototipo automatizado para el monitoreo de variables de la compostera de la Tecnoacademia Neiva; el prototipo desarrollado tiene como fuente de alimentación energía solar y con el uso de un controlador ESP32, por el cual se tiene monitoreo en tiempo real de la temperatura y humedad, mediante el cual se controla la fuente de calor y por medio de un sistema de riego la humedad necesaria en la materia orgánica. Los datos arrojados por los sensores son ilustrados en una pantalla LCD 16 x 2 líneas.

MARCO TEÓRICO

El marco teórico es esencial para comprender y optimizar el proceso de compostaje. En este capítulo se presentarán los conceptos fundamentales y las teorías más relevantes que guían la práctica del compostaje. Se analizará cómo los avances en microbiología, bioquímica e ingeniería ambiental han contribuido a desarrollar tecnologías de compostaje más eficientes y sostenibles. La comprensión de estos principios teóricos permitirá al lector tomar decisiones informadas sobre el diseño y la gestión de sistemas de compostaje.

Temática considerable para la elaboración del compostador

La gestión inadecuada de los desechos orgánicos contribuye al cambio climático, contaminación de los suelos y las aguas. El compostaje, un proceso milenario que imita los ciclos naturales de descomposición, ofrece una solución sostenible a este problema. En este marco teórico, se analizará el compostaje como una estrategia para reducir la cantidad de residuos enviados a los vertederos, mejorar la calidad de los suelos y fomentar la agricultura urbana. Además, se profundizará en el diseño y funcionamiento de los compostadores residenciales, explorando su potencial para promover la participación ciudadana en la economía circular.

● **COMPOSTAJE**

El compostaje consiste en la transformación aerobia de la materia orgánica por parte de diferentes tipos de agentes microbianos como bacterias y hongos; razón por la que es indispensable mencionar los factores físicos, químicos y biológicos, que influyen sobre su metabolismo, con el objetivo de acelerar la obtención de un producto estable de excelente calidad biológica y química. Así mismo, se deben disminuir los riesgos ambientales que se pueden presentar durante el proceso de transformación, entre los cuales se destaca la generación de gases y lixiviados, potencialmente dañinos, que contaminan los cuerpos de agua y el ambiente adyacente del lugar de producción, y reducen la concentración de nutrientes del producto final. Además, debe tenerse en cuenta que los factores ambientales óptimos para el proceso de compostaje están directamente relacionados con el metabolismo propio de los microorganismos implicados en las diferentes fases o etapas del proceso. De esta manera, factores como temperatura, oxígeno, humedad, PH, tamaño de la partícula y relación C/N (carbono/nitrógeno), determinan la velocidad de las reacciones de oxidación y las características físicas y químicas del compost obtenido.[15]



Figura 1.

Figura 1. Ciclo de compostaje residencial. Tomada de [16].

- **ABONO ORGÁNICO ELABORADO DEL COMPOST**

Es la transformación de materiales de origen vegetal, animal o mixtos en humus, a través de la descomposición aeróbica (contacto con el aire).[17]



Figura 2. Abono orgánico elaborado del compost. Tomada de [10]

- **COMPOSTADOR RESIDENCIAL**

Un compostador es un recipiente que permite el compostaje, es decir, la transformación de los residuos orgánicos en compost, a nivel doméstico, los compostadores están diseñados para facilitar la descomposición de los residuos orgánicos en nutrientes que pueden ser utilizados en el jardín, y el mejor: lo hacen sin que tengas que preocuparte en lidiar con el mal olor de la descomposición.



Figura 3. Compostador residencial. [17].

- **TEMPERATURA MÁXIMA PARA EL COMPOST**

El compostaje puede ser dividido en tres etapas diferenciadas según la temperatura del material en el proceso: Etapa mesófila inicial con duración aproximada de 2 a 3 días, donde la temperatura sigue un comportamiento ascendente que inicia con la temperatura ambiente hasta alcanzar los 40 °C; etapa termófila con duración variable, en ella la temperatura se incrementa por encima de los 40 °C, pudiendo alcanzar los 75°C; etapa mesófila final o de maduración con duración variable, donde la temperatura desciende de los 40°C hasta alcanzar la temperatura ambiente. En esta última etapa se alcanza la estabilidad biológica del material y se da por terminado el proceso. [18].

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo compostador portátil para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos generados en la actividad del programa de Gestión gastronómica y la cafetería de la Corporación Universitaria Comfacaucá.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- ✓ Realizar una revisión bibliométrica y vigilancia tecnológica relacionada con los compostadores y el proceso de compostaje.
- ✓ Diseñar los componentes hardware y software del prototipo del compostador de residuos orgánicos mediante herramientas CAM/CAD/CAE
- ✓ Implementar un mecanismo de compostaje que garantice la descomposición de residuos orgánicos de forma acelerada y de alta calidad
- ✓ Evaluar el prototipo de compostador portátil en un caso de estudio acorde a los residuos orgánicos generados en el programa de Gestión gastronómica y la cafetería de Unicomfacaucá

METODOLOGÍA

Este trabajo presenta el desarrollo de un prototipo de compostador mecatrónico diseñado para optimizar el aprovechamiento de residuos orgánicos y mitigar la contaminación ambiental. Se ha seguido una adaptación de la metodología de diseño mecatrónico estándar, ilustrada en la Figura 4, la cual ha sido ajustada para satisfacer las particularidades del proyecto. La Figura 5 detalla la aplicación de esta metodología en cada una de las etapas del desarrollo del prototipo.

Mechatronic Design Process

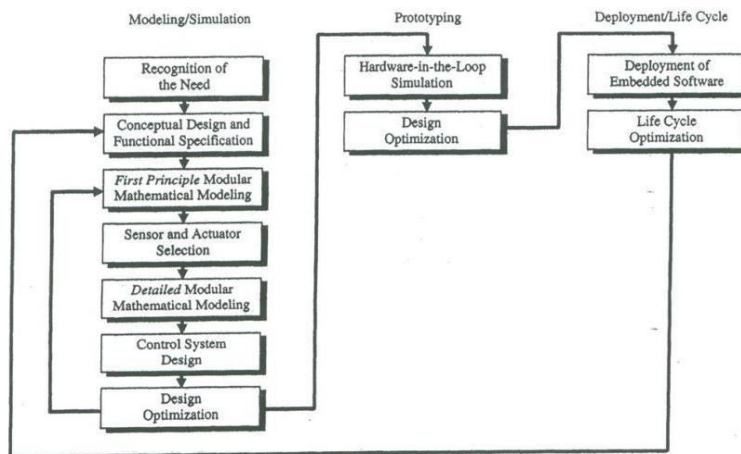


Figura 4. Metodología de diseño mecatrónico (The mechatronics design process). [19].

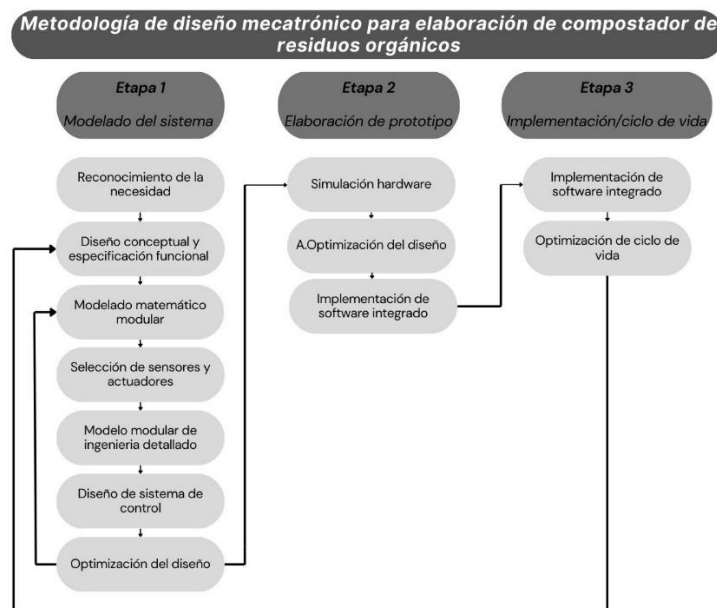


Figura 5. Metodología empleada para la fabricación del prototipo de compostador de residuos orgánicos.

Fuente propia

- **ETAPA 1: Modelado/simulación**

- A. Fase 1: Reconocimiento de la necesidad**

- Actividad:** Vigilancia tecnológica y estudio bibliométrico de los estudios realizados y prototipos ejecutados de compostadores y características de compostaje

- Método:** Recolección de información en base de datos de científicas o fuentes de información seguras y estudios acreditados

- Producto a obtener:** Documentación para un diseño y la ejecución de un prototipo de compostador eficiente y funcional, adaptado a las necesidades específicas del contexto local con un proceso de compostaje adecuado.

- B. Fase 2: Diseño conceptual y especificación funcional**

- **Actividad:** Establecer las características y especificaciones que tendrá el prototipo compostador para una buena ejecución de compost

- Método:** Definición de características, funciones y características a cumplir el compostador para un buen funcionamiento, ejecución de las tareas y comodidad a la hora de su uso.

- Producto a obtener:** Definición de las características a cumplir el compostador de residuos orgánicos acorde a estudios realizados con resultados positivos para un buen desarrollo del prototipo con un excelente proceso de compost.

- C. Fase 3: Modelado matemático modular**

- **Actividad:** Identificar los materiales y factores importantes del compost para definir el modelo, etapas y diseño destacable a desarrollar para el prototipo

- Método:** Diseñar un boceto del prototipo de compostador, definiendo sus secciones, componentes y materiales para asegurar un proceso eficiente y adecuado a las necesidades específicas, considerando las especificaciones técnicas y funcionales, los factores que influyen en el proceso de compostaje (temperatura, humedad, aireación, etc.), la viabilidad técnica y económica del diseño, la capacidad de producción y la optimización del proceso

- Producto a obtener:** Definición del boceto final del prototipo, la documentación técnica y la evaluación de la viabilidad del diseño con su debido seccionamiento de trabajo

- D. Fase 4: Selección de sensores y actuadores**

- **Actividad:** Analizar el diseño principal del compostador para la identificación de los diferentes componentes electrónicos necesarios acorde a la necesidad de cada sección

- Método:** Evaluación de características de los componentes necesarios para realizar una revisión tecnológica en el mercado y el debido estudio matemático para obtener las especificaciones de los componentes a definir por viabilidad y cumplimiento de características a requerir.

- Producto a obtener:** Características y especificaciones de cada sensor y actuador que conformará el compostador

- E. Fase 5: Modelo modular de ingeniería detallado**

- **Actividad:** Realizar el diseño del compostador para su debida simulación y viabilidad

de diseño establecido

Método: Diseñar a través de la herramienta CAD en el programa SolidWorks el modelo a seguir del prototipo con las características y requerimientos y diseño establecidos para la elaboración de compost, diseño que deberá ser portátil y con un correcto funcionamiento.

Producto a obtener: Diseño más detallado del prototipo teniendo en cuenta los diferentes componentes electrónicos (sensores y actuadores) para identificar el plan de elaboración para el cumplimiento de las especificaciones establecidas.

F. Fase 6: Diseño de sistema de control

→ **Actividad:** Implementar un sistema de control automático y manual para el funcionamiento del prototipo compostador con componentes de automatización Siemens PLC.

Método: Definir etapas de trabajo independientes en el compostador para accionamiento por medio de la señal de sensores y actuadores para dar un manejo independientes y trabajo en conjunto si el operario lo desea para un trabajo más práctico; usuario que tendrá su debida identificación para el acceso a la manipulación del prototipo como seguridad.

Producto a obtener: Sistema de control para el prototipo con funcionamiento de manera autónoma o manual con ilustración de funcionamiento en tiempo real de los diferentes mecanismos en tiempo real para personal habilitado como restricción de seguridad

G. Fase 7: Optimización del diseño

→ **Actividad:** Reducir el tiempo de compost y mejora de economía en el sector agrario a la hora de la inserción de nutrientes en cultivos

Método: Análisis e incorporación de sistema que agilice el proceso de secado del compost y elaboración mayorista de abono orgánico diario.

Producto a obtener: Diseño de prototipo con mayor ligereza a la hora de la elaboración de abono orgánico a comparación de un proceso de compost tradicional

● **ETAPA 2: Elaboración de prototipo**

A. Fase 1: Simulación hardware

→ **Actividad:** Análisis del diseño asistido por computador (CAD) para determinación de viabilidad.

Método: Análisis del comportamiento de las diferentes secciones para una simulación conjunta y disposición de materiales para la elaboración del prototipo

Producto a obtener: Desarrollo óptimo y definitivo del diseño del prototipo según las especificaciones requeridas y partes que lo conforman con el estudio de relación y comportamiento.

B. Fase 2: Optimización del diseño

→ **Actividad:** Certificar procesamiento de materia orgánica, trituración, secado de materia orgánica y manejo de líquidos lixiviados

Método: Diseñar y establecer metodologías que desarrollen las actividades de manera más práctica y rápida con un nivel alto de procesamiento y producción.

producto a obtener: Garantizar el procesamiento de materia orgánica, trituración, secado de materia orgánica y líquidos lixiviados con un diseño CAD con buen desarrollo con la ayuda de la fuerza gravitacional y transición de trituración.

- **ETAPA 3: Implementación/ciclo de vida**

- A. Fase 1: Implementación de software integrado**

- **Actividad:** Elaboración de las diferentes piezas que conforman el compostador para su debido ensamble con los sensores y actuadores para realizar pruebas de funcionamiento final del prototipo compostador

- Método:** Mecanizar de las diferentes piezas, soldar, torneear y ensamblar los componentes del compostador con la maquinaria y herramientas brindadas por las instalaciones de Tecnoparque SENA y la Corporación Universitaria Comfacauca

- Producto a obtener:** Prototipo de compostador orgánico para el aprovechamiento de residuos orgánicos.

- B. Fase 2: Optimización de ciclo de vida**

- **Actividad:** Iniciar la elaboración de compost por parte del prototipo

- Método:** Análisis del comportamiento del mecanismo para la determinación de la durabilidad y funcionamiento del mecanismo

- Producto a obtener:** características de desgaste de componentes con aproximaciones futuras para la determinación de tiempo estimado de un funcionamiento óptimo

CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE Y DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Estado del arte

El presente estado del arte tiene como objetivo analizar las diferentes perspectivas teóricas sobre el uso y beneficios del compost de los desechos sólidos. De acuerdo con el uso del compost de biorresiduos, se ha identificado que mejora la fertilidad del suelo, es fuente de nutrientes y materia orgánica, contribuye con la estructura y el mantenimiento de las propiedades del suelo [20]. No obstante, los efectos dependen de las características del suelo, donde es necesario considerar sus requerimientos para la aplicación del producto.[21]

A nivel mundial, los desechos orgánicos han sido una problemática a la que se le ha buscado diferentes soluciones ya que son una de las principales fuentes de contaminación, El compostaje de residuos orgánicos municipales puede presentar riesgos y ocasionar daños al ser utilizado como acondicionador de suelos, por el exceso de materiales inertes, emisión de malos olores, salinidad elevada, toxicidad por contaminantes orgánicos, toxicidad por metales pesados, inmadurez del proceso y presencia de organismos patógenos. Por lo anterior, es necesario hacer evaluaciones de los parámetros físico-químicos y microbiológicos del proceso, teniendo en cuenta la normatividad vigente colombiana que regula los materiales orgánicos usados como fertilizantes y acondicionadores de suelos para Colombia. [22].

La necesidad de plantear soluciones para apoyar la gestión integral de los residuos sólidos biodegradables ha llevado a proponer métodos de tratamiento como el compostaje, el cual consiste en la transformación de residuos sólidos por medios biológicos, bajo condiciones controladas, en productos como abono, sustrato o enmiendas para la agricultura.[5]. Investigación donde se realizan 2 métodos diferentes de compost y ambos dan resultado favorable en los suelos aplicados en abono orgánico.

El compost es un abono orgánico que se obtiene gracias a la descomposición de la materia prima gracias a los microorganismos existentes en el momento de desechar y putrefacción de los desechos sólidos, donde dependiendo el grado de descomposición se determina el grado de madurez del compost en proceso. [23]

La producción agrícola es una de las actividades antropogénicas que genera contaminantes ambientales debido al uso intensivo de agroquímicos, principalmente fertilizantes y plaguicidas, provocando la degradación del suelo, el agotamiento de la materia orgánica y la fertilidad del suelo. La intensificación de la agricultura acompañada de la urbanización y la industrialización ha acelerado de manera drástica la tasa de generación de residuos orgánicos e inorgánicos [24], esto generando una creciente preocupación de las empresas, instituciones e investigadores en buscar sistemas de producción agrícolas sostenibles para impulsar innovaciones globales para reducir, reciclar y reutilizar los residuos orgánicos, así, fabricar productos de valor agregado, como enmiendas de suelos agrícolas y fuente de nutrición para las plantas. Una de las prácticas agroecológicas es transformar la materia orgánica en abono orgánico tanto sólidos como líquidos [25]. En términos generales un abono orgánico es el resultado del proceso de descomposición, aeróbica o anaeróbica, de los residuos de plantas y animales, además, de los residuos industriales y municipales (biosólidos), en condiciones adecuadas de humedad, aireación, temperatura, microorganismos, que mineralizan los residuos en humus, por ejemplo algunos abonos orgánicos son: abonos verdes, bioles, biosólidos, abonos fermentados, compost,

vermicompost, téis minerales, estiércol animal, lixiviados de compost y vermicompost, nutribora y por últimos, sin menos importante el Bokashi [27]. Por otro lado, al hacer uso de compostas con los métodos conocidos actualmente, es necesario la intervención de las personas durante su elaboración y procesos, ya que se debe de controlar la temperatura y humedad existente para que los microorganismos que llevan a cabo el proceso de descomposición no mueran, así como descompactar la composta cuando sea necesario. Es por esta razón que al desarrollar un prototipo que implemente un sistema de automatización de procesos como los mencionados anteriormente (controlar humedad y temperatura) y también llevar a cabo la descompactación (aireación) de la composta por medio de mecanismos eléctricos con la finalidad de disminuir la intervención de las personas para elaborar composta. Por lo que la automatización de los procesos de producción de la composta orgánica como es la aireación, el control de humedad y la temperatura para la obtención de fertilizante como producto final facilitarán que las familias aprovechen sus desperdicios orgánicos y disminuyan la producción de basura en su hogar y por ende en su localidad.[28].

CAPÍTULO II. DESARROLLO DE METODOLOGÍA

2.1 ETAPA 1: MODELADO DEL SISTEMA

2.1.1 Fase 1: Reconocimiento de la necesidad

Con el propósito de materializar la primera fase de la primera etapa del proyecto, se llevó a cabo una exhaustiva investigación bibliográfica y una minuciosa vigilancia tecnológica, centradas en diseños de prototipos de compostadores y en las variables críticas del proceso de compostaje. Esta labor investigativa permitió recopilar una vasta cantidad de datos sobre las mejores prácticas para obtener un compost de alta calidad, considerando factores determinantes como la humedad óptima, la temperatura ideal y los niveles adecuados de aireación. Con base en la información recabada y en un análisis comparativo de los productos disponibles en el mercado, se procedió a definir las especificaciones técnicas del prototipo y las características funcionales de cada una de sus secciones. Los resultados más relevantes y significativos obtenidos tras la vigilancia tecnológica se presentan en la Tabla 1. Este estudio y análisis de maquinaria existente de compostadores resultan de gran importancia para el desarrollo del prototipo que se tiene como objetivo en este trabajo.

Tabla 1. Información recopilada en la vigilancia tecnológica

MÁQUINA	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICA DESTACABLE	DISEÑO
compostador Zera (EcoInventos Green technology)	Según la empresa, la máquina es capaz de reducir los residuos orgánicos de una familia media hasta 180 kg por año. Además, el proceso ayuda a reducir en dos tercios el volumen de basura Este compostador eléctrico ha sido diseñado para una cocina tipo residencial. Sus dimensiones son similares a las de un contenedor de basura normal y su funcionamiento es muy sencillo y práctico. Se conecta a la red wi-fi para que la puedas programar en remoto, además de controlar el	• Programación de uso de manera remota • Elaboración de compost en 24h	

	proceso a través de una aplicación. [29]		
Compostera automatizada TC-250 (Habitad Compostaje)	Estas máquinas fabricadas en Costa Rica combinan un tratamiento de calor con intervalos de mezcla, para convertir los residuos orgánicos en Compostera automatizada, con capacidad de procesar 250 kilos. [30]	• Capacidad de 250kg/día • Elaboración de compost en 24 horas	
TMK-300 (TOPMAKE ENVIRONMENT GROUP CO., LTD)	TMK-300 Organic Waste Compost Machine es una unidad independiente que facilita el proceso de compostaje y proporciona un mejor compost. Toma desechos como entrada y proporciona fertilizante orgánico como salida. Convierta los desechos orgánicos en suplementos de suelo similares a compost en menos de 24 horas. Sin mano de obra dedicada, sin olores, sin plagas. Convierta todo tipo de desechos orgánicos, incluidos desechos de alimentos, desechos vegetales, carne y huesos, cáscaras de huevo, desechos de jardín, etc., en estiércol sin ensuciar. [31]	• Elaboración de compost en menos de 24h • Trituración de cualquier desecho orgánico sin restricción • Proceso automatizado en funcionamiento o de maquinaria	
TMK-1 (TOPMAKE ENVIRONMENT GROUP CO., LTD)	La máquina trituradora de desperdicios de alimentos adopta una tecnología de esterilización y secado a alta temperatura de 126 °C que puede reducir fácilmente el peso de los desperdicios de cocina en un 90 %. Con el elemento de filtro de carbón activado bactericida y desodorante incorporado, solo se necesitan de 1 a 5 horas para convertir todos los desechos de la cocina que no se pueden comer en casa en restos de tierra		

	seca e inodoro, que se pueden utilizar como materia prima de fertilizante vegetal. La basura procesada se puede utilizar como fertilizante orgánico natural para que las plantas crezcan de manera constante. Puede reducir el volumen de chatarra y hacer fertilizante en casa fácilmente. [31]		
TMK-2 (TOPMAKE ENVIRONMENT GROUP CO., LTD)	TMKEI compostador -2 puede compostar hasta 2.5 kg de desperdicios de alimentos por día, convirtiendo los desperdicios en un recurso valioso que puede usarse para fertilizar plantas o cultivar frutas y verduras. Con una tasa de reducción del 80-90 %, el compost sólo deberá retirarse de la unidad semanalmente. TMKEI compostador eléctrico ayuda a los usuarios a desviar los desechos de alimentos del vertedero, reducir la cantidad de gas metano generado a partir de los desechos orgánicos y disminuir las emisiones de carbono y la huella de carbono. [31]		
TMK-5 (TOPMAKE ENVIRONMENT GROUP CO., LTD)	• Compostador para capacidad de 5 – 5.5 kg / día. • Realiza compostaje después de 24h • Detección de temperatura • Alarma de alerta • Fácil de usar. [31]		

Fase 2: Diseño conceptual y especificación funcional

Concebido como una innovación tecnológica para optimizar el proceso de compostaje, el prototipo en desarrollo tendrá 2 secciones fundamentales, las cuales son la sección de

trituration y la de mezclado. Este prototipo tiene como objetivo principal producir compost de alta calidad en un tiempo menor que los métodos tradicionales empleados. Al acelerar significativamente el proceso, se busca obtener un abono orgánico rico en nutrientes y listo para su uso en un plazo máximo de 24 horas. Para lograrlo, el diseño del prototipo se centra en el control preciso de las variables críticas del compostaje las cuales son la temperatura, aireación y humedad. Un sistema de triturado previo garantiza una homogeneización de la materia orgánica, facilitando así la acción de los microorganismos descomponedores. Mediante la implementación de un sensor de temperatura y humedad (sensor DHT22) y un microcontrolador ESP32, se monitorea y regula de forma continua la temperatura y humedad dentro del compostador, asegurando un proceso de compostaje eficiente y controlado.

El prototipo de compostador de residuos orgánicos que se desarrollará deberá cumplir con una serie de requisitos fundamentales para garantizar su eficacia y facilitar su uso. Es indispensable que el equipo sea capaz de procesar de manera eficiente los residuos orgánicos generados en la institución, transformándolos en compost de alta calidad en un tiempo relativamente corto. Asimismo, el diseño del prototipo debe priorizar la facilidad de operación y mantenimiento, permitiendo a los usuarios realizar tareas como la carga de residuos y la extracción de compost de forma sencilla e intuitiva. Además, es crucial que el compostador sea lo suficientemente portátil como para permitir su traslado a diferentes ubicaciones dentro de las instalaciones, adaptándose así a las necesidades cambiantes de la institución.

Tabla 2. Requerimientos a cumplir por el prototipo de compostador de residuos orgánicos

REQUERIMIENTOS	INSTRUMENTACIÓN
Trituración de cualquier desecho orgánico vegetal	• Sistema de cuchillas eficientes en acero inoxidable para evitar corrosión. • Motor con el torque suficiente para generar rotación a la sección de trituración.
Mezclado de materia orgánica triturada de manera homogénea para la obtención de compost pulverizado	• Sistemas de aspas para mezclado continuo • Motor con el torque suficiente para generar rotación a la sección de mezclado.
Fabricación de compost en un tiempo máximo de 24h	• Inserción de temperatura a través de ventilador para acelerar el proceso de secado del compost.
Manejo de líquidos lixiviados	• Fabricación de piezas y ductos para almacenamiento de lixiviados en recipiente.
Materiales de bajo costo y fácil acceso	• Incorporar materiales de fácil manejo y moldear como lo es: ✓ Tubería de PVC ✓ Tubo metalizado de 1.5mm de espesor ✓ Platina metalizada de 3mm de espesor
Fácil operación	• Encendido de manera manual y automática para que la persona encargada de emplear la maquinaria pueda manipularla con facilidad.
Manejo automatizado y manejo manual	• Incorporación de encendido a través de pulsadores e interruptores para facilitar encendido • Manejo de la máquina por medio de servidor web por si no puede dirigirse al lugar de ubicación de la máquina

Elaboración de compost: Para garantizar un proceso de compostaje óptimo y la obtención de un compost de calidad, se ha establecido una rigurosa selección de los residuos orgánicos que serán introducidos en el prototipo. Con el fin de evitar problemas operativos y asegurar un adecuado desarrollo del compost durante la trituración de los desechos orgánicos, se ha restringido categóricamente el suministro de cualquier tipo de residuo óseo, incluyendo huesos de pollo, res y otros fragmentos óseos provenientes de la preparación de alimentos. Por otro lado, para acelerar el proceso de compostaje, se ha establecido un tiempo máximo de 24 horas. Con este objetivo, se utilizó un secador de cabello como instrumento para la inserción de calor en el sistema. Sin embargo, es importante destacar que la fabricación de compost es un proceso biológico complejo que involucra no solo la temperatura, sino también la humedad, la aireación y la presencia de microorganismos. En este caso, el mezclado homogéneo proporcionado por un sistema de aspas impulsado por un motor DC también contribuye a acelerar el proceso.

Economía: Con el objetivo de optimizar los costos de producción y facilitar la construcción del prototipo, se ha seleccionado una combinación de materiales de fácil adquisición en el mercado local. Se emplearán principalmente materiales como PVC, tubo cuadrado y otros elementos disponibles en ferreterías. La mayoría de las piezas no requerirán procesos de fabricación complejos, favoreciendo así un montaje rápido y sencillo. No obstante, algunos componentes específicos serán diseñados mediante herramientas CAE, CAD y fabricados mediante impresión 3D para garantizar una mayor precisión y adaptación a las necesidades del proyecto. La elección de estos materiales se basó en criterios de bajo costo, facilidad de obtención y propiedades mecánicas adecuadas, como resistencia y durabilidad.

Compostador portátil y fácil de usar: Dado que el prototipo estará destinado a ser utilizado en espacios con alta concurrencia, debe adaptarse a diferentes entornos y necesidades. Por ello, se ha priorizado su portabilidad y facilidad de uso. La elección del PVC como material principal contribuye a reducir el peso del equipo, facilitando así su reubicación. Además de su portabilidad, se ha implementado un sistema de control dual: un panel OLED para un monitoreo en el lugar de ubicación y una aplicación móvil para permitir un monitoreo constante de las variables del proceso de compostaje desde cualquier lugar. Esta solución permite tanto una operación manual como un monitoreo remoto, garantizando un control preciso y eficiente.

Aparte de las características físicas de la máquina, se ha desarrollado un servidor web donde las variables de humedad y temperatura, cruciales en este proceso, se actualizan en tiempo real. El manejo de la máquina se encuentra disponible en este mismo servidor, con funcionamiento independiente de cada sección y con la posibilidad de automatizar todo el sistema.

Manejo de líquidos lixiviados: Dado que la acumulación de líquidos es una problemática común en el compostaje, el prototipo incorpora un sistema de drenaje para evacuar el exceso de humedad. Además, se ha incluido un sistema de calentamiento para acelerar el proceso de secado de la materia orgánica, evitando así la proliferación de malos olores.

2.1.3 Fase 3: Modelado matemático modular

Con el objetivo de optimizar el proceso de compostaje y obtener un producto final de alta calidad, se diseñó un prototipo como se ilustra en la figura 6, que incorpora una serie de etapas secuenciales. Para garantizar una homogeneización y un mayor grado de descomposición de la materia orgánica, se incluyó un módulo de trituración, el cual convierte los residuos en partículas de tamaño uniforme. Posteriormente, estos fragmentos son introducidos en un depósito de mezclado continuo, donde se someten a un proceso de compostaje acelerado gracias a la adición controlada de calor. Este sistema innovador no solo facilita la gestión de los residuos orgánicos, sino que también produce un compost de excelente calidad, enriquecido en nutrientes y con una mayor capacidad de retención de agua, lo cual favorece el desarrollo de las plantas.

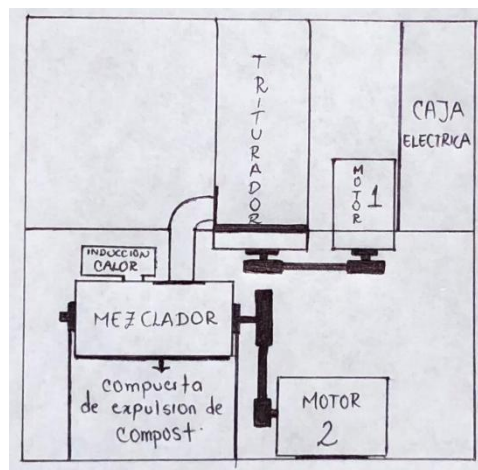


Figura 6. Boceto del prototipo de compostador de residuos orgánicos.

Con el objetivo de materializar el diseño plasmado en la figura 6, se llevó a cabo un exhaustivo análisis de los materiales y componentes disponibles en el mercado. A través de un riguroso estudio de mercado, se procedió a la evaluación técnica y económica de diversas alternativas, priorizando aquellos elementos que garantizaran un desempeño óptimo y una vida útil prolongada. Los resultados de este proceso se encuentran detallados en las tablas 3 y 4, donde se especifican los materiales de construcción y los componentes eléctricos seleccionados.

Tabla 3. Materiales de fabricación

MATERIALES DE FABRICACIÓN
Platina de 33mm de espesor
Motor WEG 1.5 HP
Motor Siemens 1 HP
Tubo metalizado de 25 mm*25 mm*6m
Tubo de PVC de 6" pulgadas
Tubo de PVC de 2" pulgadas
Tapones de PVC de tubo de 6" pulgadas
Rodamientos de 5/8" pulgadas con base cuadrada
Platina de acero de 3mm de espesor
Eje de 5/8" de diámetro
Rodamientos circulares de 5/8" pulgadas
Bloque de acetal
Polea
Polea
Banda lisa
Banda lisa
PLA de 1.75m m de espesor
Resortes tensores
Platina de acero de 4mm de espesor
Bujes de acero inoxidable de diámetro interno 5/8" pulgadas
MDF de 3mm
MDF de 9mm
4 agarraderas para compuertas
Broches retenedores de puertas
Borneras
Materiales de ensamble

Tabla 4. Materiales eléctricos

MATERIALES ELÉCTRICOS
Disyuntor de 110v 16A
Contactador CHINT NXR-25 de 110v
Contactador de 110v
Relé térmico CHINT NXR-25 de 110v
Sensor DTH22
Microcontrolador ESP32
Pulsadores NA y NC
Switch
Pantalla oled de 0.96" pulsadas
Módulo de relé en estado sólido de 5v
Secador de cabello
Cargador de 5v
LM2596
Jumpers
Protoboard pequeña
Cable vehicular calibre 14 (0.064" pulgadas) y 12 (0.081" pulgadas)

- **Tubo de PVC 6"**

La elección del tubo de PVC de 6" que se logra observar en la figura 7, se fundamentó en el análisis de diversos factores. Entre los criterios determinantes se destacan la accesibilidad en el mercado, la calidad del material y su costo competitivo. Se optó por un tubo de PVC de pared gruesa, específicamente diseñado para soportar altas presiones, en contraposición a las opciones de pared delgada, típicamente empleadas en aplicaciones de baja presión. Esta decisión se justifica por la necesidad de garantizar una elevada resistencia mecánica y una mínima pérdida de carga por fricción, evitando así fenómenos como la corrosión y el desgaste prematuro que podrían ocurrir al interactuar con componentes metálicos.



Figura 7. Tubo PVC de 6". [32]

- **Tubo metálico de 25mm para estructura**

Con el objetivo de construir una estructura sólida y duradera para el compostador, se ha seleccionado un perfil metálico cuadrado de dimensiones 25 mm x 25 mm equivalente a 625 mm^2 de área, con la figura y disposición estructural como el que se logra observar en la figura 8. El acero, material de construcción ampliamente utilizado en aplicaciones estructurales, ofrece una elevada resistencia a la tracción, compresión y flexión, lo cual resulta fundamental para soportar las cargas impuestas por el peso del compost y las condiciones ambientales. La sección transversal cuadrada del perfil proporciona una rigidez óptima, minimizando las deformaciones y garantizando la estabilidad de la estructura a largo plazo.



Figura 8. Tubo metálico empleado para la estructura. [33]

- **Acero inoxidable**

Las cuchillas de corte tanto del triturador como del mezclador del compostador están fabricadas en acero inoxidable AISI 304 con un espesor nominal de 3 mm como se ilustra en la figura 9. La selección de este material se justifica por su alta resistencia a la corrosión, su excelente maquinabilidad y su capacidad para mantener un filo afilado a lo largo del tiempo. Estas características son fundamentales para garantizar un corte limpio y eficiente de los materiales orgánicos, evitando la contaminación del compost con partículas metálicas.



Figura 9. Lámina de acero inoxidable. [34]

- **Acetal**

Con el objetivo de optimizar el proceso de trituración y expulsión, se optó por el acetal para la fabricación tanto de las mallas como de la cuchilla encargada de expulsar la materia triturada. Las mallas, al estar en contacto directo con los materiales orgánicos, requieren un material resistente a la abrasión y a la corrosión. Por su parte, la cuchilla, encargada de expulsar el material triturado, debe combinar dureza y resistencia al impacto. El acetal, gracias a su equilibrio entre rigidez y tenacidad, satisface plenamente estos requisitos, asegurando un rendimiento óptimo y una larga vida útil de los componentes. Pues este material que tiene ilustración en la figura 10, presenta propiedades destacables de resistencia y flexibilidad, características de gran provecho en piezas que no necesitan gran fuerza ni exceso de fricción.



Figura 10. Acetal. [35]

- **Eje de acero de 5/8 de diámetro**

El análisis de las cargas y esfuerzos a los que estará sometido el sistema de trituración y mezclado condujo a la selección de un eje de acero de 5/8" de diámetro, el cual está ilustrado en la figura 11. Este diámetro resulta adecuado para proporcionar la rigidez y resistencia necesarias para transmitir el movimiento de rotación desde el motor a los elementos de trabajo, sin comprometer la eficiencia del sistema. Asimismo, el acero, por sus propiedades intrínsecas, garantiza una adecuada alineación y precisión en el funcionamiento del equipo.



Figura 11. Eje metálico de 5/8" de diámetro. [36]

- **Platina de metal de 25 mm ancho x 3 mm espesor x 6 m de largo**

La selección de una lámina tiene el objetivo de brindar una unión estructuralmente sólida y resistente a las cargas dinámicas, se seleccionó un perfil de acero de dimensiones 25x3 mm y longitud de 6m con disposición estructural como se observa en la figura 12. Este perfil, gracias a su inercia y módulo de sección elevados, proporciona la rigidez necesaria para absorber las fuerzas flexionantes y cortantes generadas en la zona de unión entre las secciones de trituración y mezclado, garantizando así la estabilidad y durabilidad del equipo.



Figura 12. Platina de metal de 25 mm*3 mm*6m. [37]

- **Tubo de PVC de 2"**

Se optó por un tubo de PVC de 2" de diámetro interior para la conducción de la biomasa triturada hacia la región de mezclado del compostaje. Esta dimensión fue seleccionada en función del caudal másico esperado, la densidad aparente del material y la velocidad de flujo deseada, garantizando así un transporte eficiente y evitando fenómenos de sedimentación o atascamiento. El tubo seleccionado se ilustra en la figura 13.



Figura 13. Tubo de PVC de 2". [38]

- **Rodamiento con soporte cuadrado con diámetro interno de 5/8"**

Se optó por un rodamiento de bolas de contacto angular con soporte cuadrado y diámetro interno de 5/8" como se observa en la figura 14, este está encargado de soportar las cargas radiales y axiales generadas en el eje de rotación. La geometría cuadrada del soporte permite una distribución más uniforme de las cargas sobre las tapas circulares, mejorando la rigidez del conjunto y minimizando la posibilidad de desalineación. Además, el material del rodamiento y su lubricación garantizan un bajo coeficiente de rozamiento y una larga vida útil.



Figura 14. Rodamiento con soporte cuadrado con diámetro interno de 5/8". [39]

- **Bisagras para compuerta de vaciado de compost**

Con el objetivo de optimizar el proceso de extracción del compost maduro y minimizar el desgaste en las infraestructuras, se implementó un sistema de bisagras de [tipo de bisagra, figura 15] en la compuerta de vaciado. Esta solución permite una articulación fluida y controlada de la compuerta, reduciendo significativamente los esfuerzos de manipulación. Las bisagras, diseñadas para soportar cargas elevadas y resistir a la corrosión propia de ambientes húmedos, garantizan una larga vida útil y un funcionamiento óptimo a lo largo del tiempo. Además, el movimiento suave y preciso de la compuerta minimiza el riesgo de daños en las paredes de la sección de mezclado, preservando así la integridad estructural del equipo.



Figura 15. Bisagras para compuerta de vaciado de compost maduro. [40]

- **Madera MDF de 9mm**

El material elegido para cubrir todo el mecanismo es madera MDF de 9 mm de espesor. Esta selección se realizó considerando las amplias dimensiones disponibles en este material, lo que permite fabricar las diferentes piezas requeridas, como puertas, paneles laterales y secciones de cobertura, de manera eficiente. Además, la madera MDF es ideal para este tipo de aplicaciones debido a su estabilidad dimensional, uniformidad y facilidad de procesamiento. Las piezas serán cortadas utilizando tecnología láser, lo que garantiza una alta precisión y calidad en los cortes, minimizando errores y optimizando el ajuste de las piezas en el ensamblaje final. Este enfoque no solo mejora la calidad del producto, sino que también reduce los tiempos de producción y facilita la manipulación durante el montaje.



Figura 16. Madera MDF 9mm. [41]

2.1.4 Fase 4: Selección de sensores y actuadores

La elección de los sensores y actuadores acorde al análisis realizado, se puede observar a continuación

- **Motor encargado de mover la sección de trituración**

Con el propósito de seleccionar el motor óptimo para la trituración de residuos orgánicos mediante corte con cuchilla, se llevó a cabo un análisis detallado de las fuerzas involucradas en el proceso. Inicialmente, se determinó experimentalmente que la fuerza mínima requerida para el corte de los diferentes desechos orgánicos es de 8 kg. Al multiplicar este valor por la aceleración debida a la gravedad (9.81 m/s^2), se obtuvo una fuerza de corte de **78.48 N**. A partir de este dato fundamental, se procedió a calcular el torque necesario del motor, aplicando la ecuación n°1, esta ecuación relaciona la fuerza encontrada.

$$F = 8\text{Kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = \mathbf{78.48\text{N}}$$

$$\mathbf{Longitud \ de \ cuchilla = Distancia}$$

$$\mathbf{Distancia = 76 \ mm = 0.076m}$$



Figura 17. Deducción de fuerza necesaria para corte de materia orgánica

Fuente propia

$$T = F * D$$

Ecuación 1. Ecuación del torque

Donde:

T: Torque

F: Fuerza (N)

D: Distancia (m)

Quedando de la siguiente manera

$$T = (78.48\text{N}) * (0.076)$$

$$T = 5.96 \text{ N}$$

Ya conociendo el valor del torque, se procedió a calcular la potencia del motor del triturador, la cual se estima con las revoluciones de baja de 1800 rpm que es la que tiene motor seleccionado; teniendo estos datos se realizó los siguientes cálculos de la frecuencia de rotación y la velocidad de giro.

Conversión de rpm/min a rev/s

$$F: (1800\text{rpm}) * (1/60\text{s}) = 3 \text{ rev/s}$$

Donde **F** es la frecuencia de rotación

$$w: 2\pi * F$$

Ecuación 2. Ecuación de velocidad de giro

$$W: 2\pi * (30 \text{ rev/s}) = 188.5 \text{ rad/s}$$

Donde **W** es la velocidad de giro donde está dada por la siguiente ecuación

F: Frecuencia de rotación

W: velocidad de giro

Procedemos a reemplazar en la ecuación de potencia quedando de la siguiente manera

$$P = T * w$$

Ecuación 3. Ecuación de potencia

$$P = (5.96\text{N.m}) * (188.5 \text{ rad/s})$$

$$P = 113.46 \text{ watts}$$

Teniendo la potencia que debe tener el motor, se realiza la conversión de Watts a caballos de fuerza (hp) y da lo siguiente

$$P = (1123.46\text{W}) * (1\text{hp}/745.7\text{W}) = 1.5 \text{ hp}$$



Figura 18. Motor de 1.5 marca WEG adquirido para el compostador. [42].

Tabla 5. Información del motor DC de 1.5 HP. [37]

Marca	WEG
Potencia	1.5 HP / 1.10 kW
RPM	3460
Corriente nominal (A)	110V (17.40A) / 220V (8.70A)
Peso aproximado	18 kg
Tensión	110/220 V

Determinando que el motor necesario para para la parte de trituración, es de 1.5 caballos de fuerza (hp) con revoluciones de baja de 1800 rpm. Tras el análisis del mercado se optó por comprar el motor ilustrado en la figura 18.

- **Motor encargado de dar rotación al eje de la sección de mezclado**

El motor seleccionado para la sección de mezclado, fue elegido por la disponibilidad de un motor asíncrono monofásico (ver figura 19). Este motor tiene un funcionamiento de 1600 rpm en baja, motor que es capaz de proporcionar una fuerza y características sobresalientes para generar un mezclado de la materia orgánica sin ningún problema. En esta sección que tiene como nombre “sección de mezclado”, la fuerza necesaria para generar rotación de la materia orgánica es suficiente con las revoluciones de baja que son de 1600 rpm según las características del motor utilizado, ilustrado en la Figura 19.



Figura 19. Motor de la sección de mezclador.

Fuente propia.

- **Contactor CHINT XNC-18**

El contactor CHINT XNC-18 que se ilustra en la figura 20, debido a que sus especificaciones técnicas se ajustan a las demandas del motor WEG de 1.5 HP. Este componente garantiza un funcionamiento confiable y eficiente del sistema, gracias a su capacidad de corriente nominal, tensión de bobina y contactos auxiliares, los cuales son fundamentales para controlar de manera precisa y segura el arranque y parada del motor. La información de este contactor se puede ilustrar en la tabla 6.



Figura 20. Contactor CHINT NXC-18. [43].

Tabla 6. Información del contactor CHINT NXC-18. [44].

Contactor de 3 polos
AC-1: 32A,
AC-3 (380 V): 18A 7.5kW
Contacto auxiliar: 1NO + 1NC
Contacto principal: 3NO
Voltaje (V): 110V
Tensión nominal hasta 690 VAC 50/60 Hz
Voltaje de bobina hasta 660 VAC 50/60 Hz

- **Relé térmico CHINT NXR-25**

Con el objetivo de salvaguardar la integridad del motor y garantizar la continuidad operativa del equipo, se ha seleccionado el relé térmico especificado en la Tabla 7. Este componente, proveniente de un fabricante de prestigio, ofrece una protección eficaz contra sobrecalentamientos y cortocircuitos, contribuyendo así a la seguridad del sistema y a la optimización de los tiempos de producción.



Figura 21. Relé térmico CHINT NXR-25. [45]

Tabla 7. Información de Relé térmico CHINT NXR-25

Voltaje de aislamiento nominal: 690v
Voltaje nominal: 660/390v 50Hz
Corriente nominal: 25A
Clase de disparo: 10A
Par de contactos auxiliares desconectados o indicador de estado separable eléctricamente: El par NO (97 – 98) + el par NC (95 – 96) cambian de estado en caso de sobrecarga
Corriente de subcontacto: 95 – 96 y 97 – 98, Ith = 5A
Botón de parada
Botón de reinicio manual y automático
Peso: 180g
Temperatura de trabajo: -35 °C ~ 70 °C

- **Disyuntor Hyundai HGD 63M de 110v**

Con el objetivo de asegurar la integridad del sistema y proteger los equipos electrónicos conectados, se ha instalado un interruptor termomagnético HGD63M din 1P 16A 6kA de Hyundai en el polo positivo de la alimentación. Este dispositivo, gracias a sus características técnicas y cumplimiento con las normas de seguridad, ofrece una protección confiable ante posibles fallos en la red eléctrica. Su capacidad de interrupción de cortocircuito de 6kA y curva de disparo C garantizan una respuesta rápida y efectiva en caso de sobre corriente o cortocircuito.



Figura 22. Disyuntor Hyundai HGD 63M. [46].

- **Sensor DHT22**

El sensor de temperatura y humedad seleccionado destaca por su amplia adopción en el mercado, no solo por su asequibilidad, sino también por su sencilla instalación y bajo costo. Este dispositivo permitirá monitorear con precisión la temperatura de la materia orgánica durante el proceso de secado, garantizando que no se exceda el umbral crítico de 50°C. Su alta sensibilidad y respuesta rápida aseguran un control preciso de las condiciones térmicas, contribuyendo a optimizar el proceso y obtener resultados de alta calidad.



Figura 23. Sensor DHT22. [47].

- **Microcontrolador ESP32**

El microcontrolador ESP32 fue seleccionado como unidad de control principal debido a su arquitectura RISC-V de doble núcleo, su amplio conjunto de periféricos integrados y su módulo Wi-Fi de bajo consumo. La elección de este dispositivo se justifica por su capacidad para gestionar eficientemente las tareas de adquisición de datos de los sensores, el control de los actuadores y la comunicación inalámbrica con una estación base remota. Además, su bajo costo y su amplia disponibilidad en el mercado lo convierten en una solución atractiva en términos de relación costo-beneficio.



Figura 24. Microcontrolador ESP32. [48]

- **Pulsadores NA y NC**

Para la activación y desactivación del equipo, se implementaron pulsadores industriales de alta durabilidad, diseñados para soportar las demandas de un entorno de producción. Estos componentes garantizan una operación confiable y segura, optimizando el control del proceso de compostaje.



Figura 25. Pulsadores NA y NC. [49].

- **Pantalla OLED de 0.96**

Entre las diversas opciones disponibles, esta pantalla se eligió como la más adecuada para nuestro prototipo debido a su óptima relación costo-beneficio y su capacidad para satisfacer las necesidades de monitoreo y control. Su interfaz intuitiva y su facilidad de configuración aceleran el proceso de desarrollo, permitiendo centrar los esfuerzos en la validación de los conceptos clave.



Figura 26. Pantalla OLED de 0.96". [50]

- **Modulo relé para Arduino**

Se ha seleccionado un relé compatible con Arduino para controlar el secador de cabello, componente clave en el proceso de secado del compost. Este dispositivo electromecánico cumple una doble función: por un lado, acciona el secador para suministrar el calor necesario y acelerar la deshidratación de la materia orgánica; por otro lado, incorpora un sistema de protección que monitorea el flujo de corriente, garantizando que la temperatura del compost no exceda los 50°C, límite establecido para preservar la calidad del producto final.



Figura 27. Modulo relé estado sólido de 25A. [51]

- **Secador de cabello**

Se optó por un secador de cabello como fuente de calor para la sección de mezclado debido a su bajo costo, amplia disponibilidad comercial y facilidad de manejo. Esta elección se justifica por la necesidad de un equipo versátil y adaptable capaz de suministrar calor de manera controlada y localizada. Para garantizar la estabilidad y orientación precisa del secador durante el proceso, se diseñó y fabricó un soporte personalizado mediante impresión 3D. Este soporte, de una sola pieza, permite acoplar el secador de forma segura y ergonómica, optimizando así la eficiencia del sistema de calefacción.



Figura 28. Secador de cabello. [52]

2.1.5 Fase 5: Modelo modular de ingeniería detallado

En esta fase de modelado detallado, se llevó a cabo la conceptualización tridimensional del compostador mediante la herramienta CAD SolidWorks. El diseño resultante, minuciosamente elaborado para cumplir con los requisitos establecidos, prioriza la sencillez constructiva, la accesibilidad de los materiales y la facilidad de operación. El prototipo se ha concebido como un sistema modular, compuesto por secciones especializadas para la trituración del material orgánico, la mezcla homogénea con control de temperatura y la recolección de lixiviados. Cada componente ha sido diseñado con precisión para garantizar una interacción óptima con los materiales de entrada y facilitar los procesos de compostaje. La documentación gráfica completa, que incluye planos detallados y ensamblajes 3D, los cuales se encuentran disponibles en el anexo 1 para su consulta. A continuación, en las figuras 29, 30 y 31 se presentará el modelo final ensamblado, el cual refleja la integración armoniosa de todas las partes y su funcionalidad como un sistema integral de compostaje.

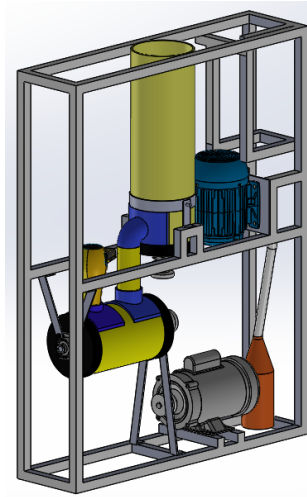


Figura 29. Ensamble de diseño CAD del compostador

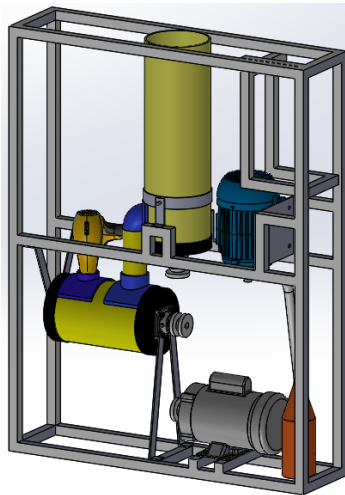


Figura 30. Ensamble de diseño CAD del compostador

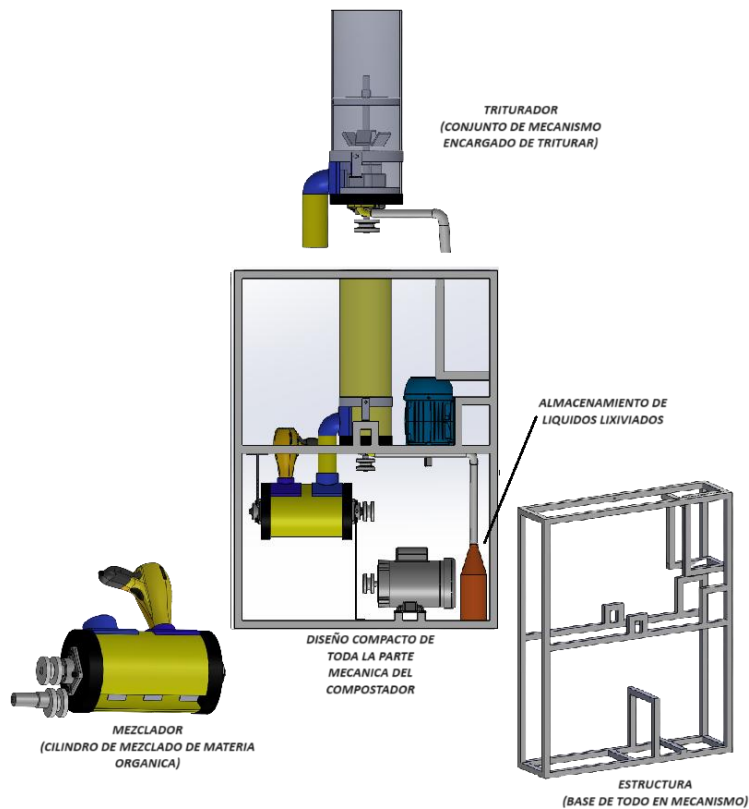


Figura 31. Conformación mecánica del compostador.

Elaboración propia

Como se evidencia en las figuras 29, 30 y 31, la configuración del sistema de compostaje de desechos orgánicos presenta un diseño ingenierilmente sencillo pero eficaz. Esta simplicidad constructiva, lejos de comprometer la funcionalidad, facilita notablemente su fabricación y mantenimiento. La mayor parte de sus componentes no requieren procesos de manufactura complejos, lo que optimiza los costos de producción y acorta los tiempos de ensamblaje. Esta configuración expone de manera clara y accesible las partes mecánicas, los sistemas de control y los sensores, permitiendo una inspección visual rápida y facilitando las tareas de diagnóstico y reparación.

2.1.6 Fase 6: Diseño de sistema de control

Durante la fase de diseño del sistema de control, se ha implementado una robusta protección eléctrica para salvaguardar los componentes electrónicos. A tal efecto, se ha incorporado un disyuntor termomagnético Hyundai de 16A en la línea de alimentación principal, seguido de un contactor electromagnético CHINT XNC-18 de 32A y un relé térmico CHINT NXR-25 de 10A. Esta combinación de dispositivos de protección garantiza una respuesta rápida ante sobrecargas y cortocircuitos, evitando daños en los equipos y asegurando la continuidad del proceso. La activación de estos elementos se realiza mediante un pulsador de arranque, el cual, al ser accionado, energiza tanto los motores de trituración y mezclado con el secador de cabello, iniciando así el ciclo de compostaje. Para una regulación precisa de la temperatura, se ha integrado el secador directamente en el sistema, lo que permite un calentamiento inmediato y controlado de la mezcla. Con el fin de

facilitar la operación y el monitoreo del proceso, se ha implementado un sistema de control basado en un microcontrolador ESP32. Este dispositivo, gracias a su conectividad Wi-Fi, permite la comunicación remota con el equipo a través de una aplicación móvil personalizada. Esta aplicación proporciona una interfaz gráfica intuitiva que muestra en tiempo real variables como la temperatura, humedad y estado de los componentes, facilitando así la supervisión y diagnóstico del sistema. Adicionalmente, se ha instalado una pantalla OLED de 0.96" caracteres en el panel de control local para visualizar los parámetros clave del proceso y permitir una interacción directa con el usuario. El diseño eléctrico se puede observar en el anexo 2 y en la figura 32.

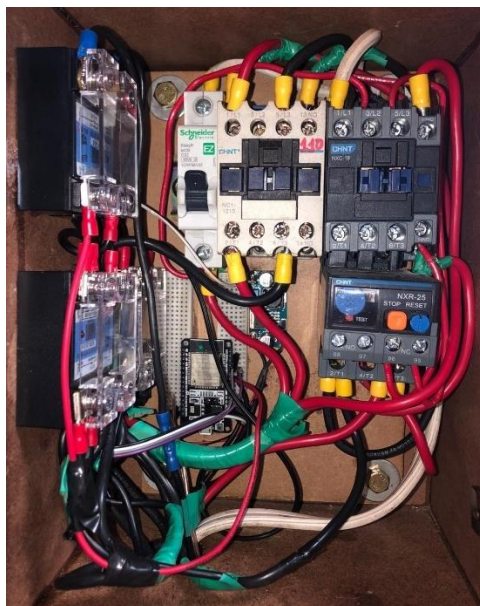


Figura 32. Conexión de la instrumentación de protección de los componentes electrónicos

Elaboración propia

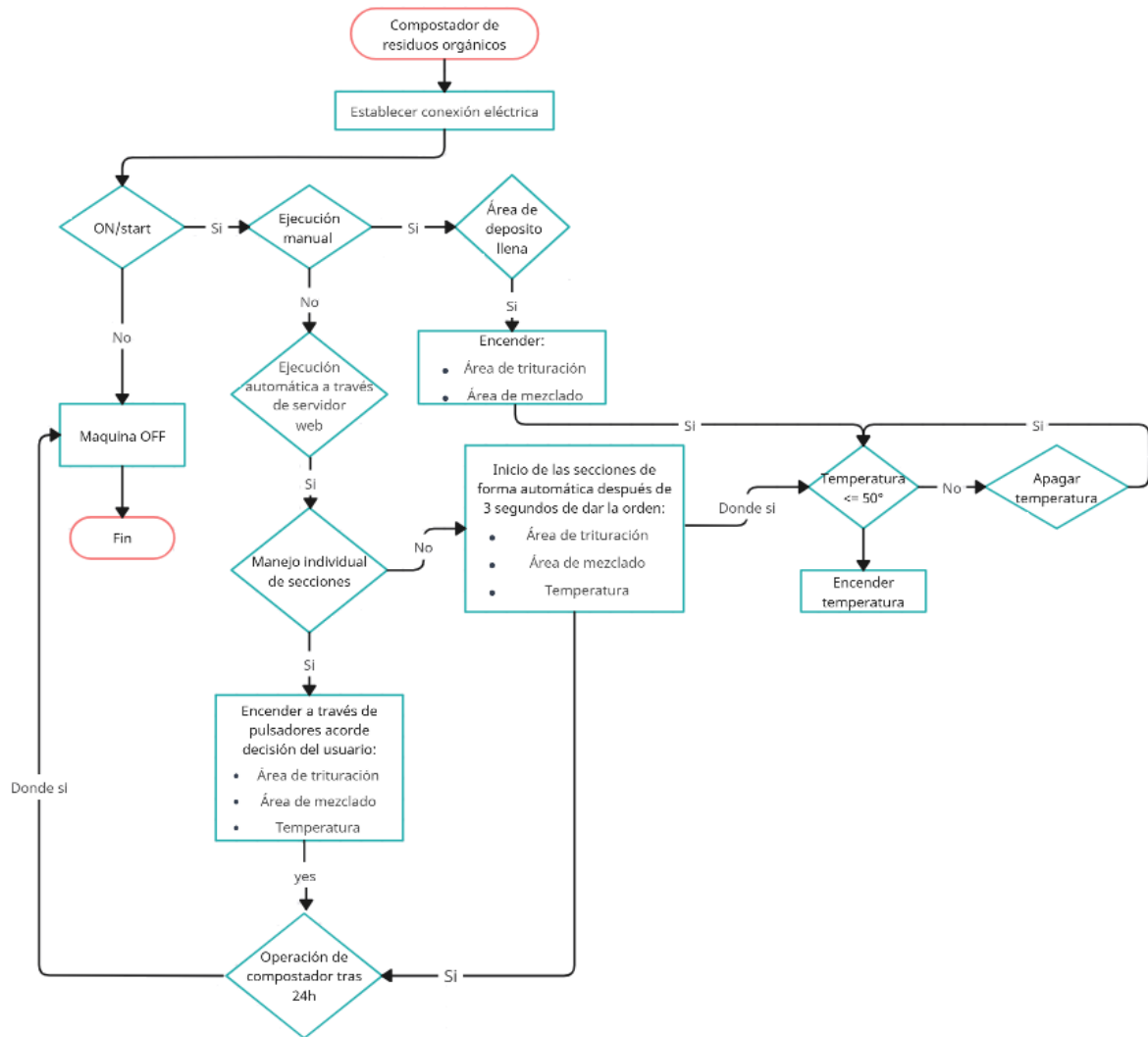


Figura 33. Diagrama de flujo del funcionamiento del compostador a través del uso manual y automático

Elaboración propia

Como se aprecia en la figura 33, el prototipo ofrece una interfaz dual para el usuario, manual y automatizada. La modalidad manual brinda un control directo sobre el proceso, permitiendo al usuario monitorear los parámetros de temperatura y humedad a través de una pantalla oled de 0.96" pulgadas gracias al sensor DTH22. Por otro lado, la interfaz web habilita un control remoto y autónomo del sistema, gracias a un microcontrolador ESP32 que actúa como cerebro del dispositivo. Este microcontrolador, mediante algoritmos de control PID, optimiza el proceso de compostaje en tiempo real, adaptándose a las condiciones cambiantes y asegurando un rendimiento óptimo.

2.1.7 Fase 7: Optimización del diseño

La fase actual del proyecto se centra en la optimización de los tiempos de secado de la materia orgánica mediante la implementación de un sistema de calentamiento controlado. Este sistema, compuesto por un secador de cabello controlado por un microcontrolador ESP 32 y un relé, permite introducir calor de manera precisa en el compostador. La temperatura y la humedad son monitoreadas constantemente por un sensor DHT22, se mantiene dentro de un rango óptimo de 50°C a 70°C para favorecer la actividad microbiana y acelerar la descomposición de la materia orgánica. La adición de aserrín de madera, que actúa como un acondicionador de aire y absorbente de humedad, complementa la acción del calor, creando un microambiente ideal para el desarrollo de las tres fases del compostaje. Con esta configuración, se espera reducir significativamente los tiempos de proceso, obteniendo compost de alta calidad en un plazo máximo de 24 horas tras un funcionamiento acorde a la decisión del usuario como se puede observar en la figura 33; funcionalidad y optimización del proceso que va tras el manejo manual y automático tras la decisión del funcionamiento de cada etapa o conjunto de ellas.

2.2 ETAPA 2: ELABORACIÓN DE PROTOTIPO

En esta etapa de la metodología empleada que es la de diseño mecatrónico, la fase de prototipado es el pilar fundamental en la metodología, pues en esta fase se encarga de validar la viabilidad y el desempeño del modelo conceptual generado mediante herramientas CAD. A través de la fabricación de un prototipo físico para experimentación y validación de que el diseño elaborado sea funcional, se evalúa cada componente y su interacción dentro del sistema completo. Esta etapa crítica permite identificar y corregir posibles disfunciones o ineficiencias en el diseño original, asegurando así que el producto final cumpla con los requisitos establecidos.

2.2.1 Fase 1: Simulación hardware

Como primera fase en la validación del modelo conceptual concebido en CAD, se ejecutó un exhaustivo análisis cinemático empleando el software SolidWorks. Esta etapa crucial permitió evaluar minuciosamente el desempeño individual de cada componente y sus interacciones dinámicas dentro de un entorno virtual simulado. Mediante la implementación de herramientas especializadas de simulación de movimiento, se logró corroborar la viabilidad del diseño, identificando y cuantificando posibles colisiones, interferencias geométricas y restricciones cinemáticas que pudieran limitar el rango de movimiento o comprometer la funcionalidad del sistema. Asimismo, se evaluaron los parámetros cinemáticos clave, tales como velocidades, aceleraciones y tiempos de ciclo, con el fin de verificar el cumplimiento de los requerimientos de diseño y optimizar el rendimiento del mecanismo. Los resultados obtenidos en esta fase de simulación proporcionaron una valiosa retroalimentación para refinar el modelo CAD y garantizar la robustez y confiabilidad del diseño antes de proceder a la fabricación de un prototipo físico. La simulación estudio realizado en el proceso actualmente descrito, se puede evidenciar en el anexo 1, anexo que contiene las piezas que conforman el prototipo junto al ensamble que se le realizó el estudio conjunto de todas las piezas y viabilidad de diseño para posteriormente su elaboración

2.2.2 Fase 2: Optimización del diseño

Los resultados obtenidos del análisis de simulación en SolidWorks evidencian un desempeño satisfactorio del diseño conceptual del compostador. La modelación tridimensional ha permitido evaluar de manera virtual el comportamiento estructural del sistema, anticipando su funcionamiento bajo condiciones reales. Con el fin de validar experimentalmente las predicciones del diseño, se procederá a la fabricación de un prototipo físico a pequeña escala para un análisis experimental de las secciones que conforman el compostador. Este prototipo que tiene como desarrollo y fabricación a pequeña escala será sometido a una serie de pruebas exhaustivas en condiciones controladas, pruebas que consisten en un análisis de trabajo de campo en condiciones reales con desechos orgánicos extraídos de un uso cotidiano en cocinas, como lo es la cáscara de naranja, de plátano, etc. Estas pruebas tienen el objetivo de cuantificar variables como la eficiencia de la elaboración del proceso que conlleva al compostaje. La comparación entre los datos experimentales y los resultados de la simulación permitirá evaluar la precisión del modelo numérico y, en caso necesario, introducir modificaciones al diseño para optimizar su rendimiento.

2.3 ETAPA 3: Implementación/ciclo de vida

La fase de prototipado físico representa el culmen y la validación tangible de las etapas previas de diseño y simulación. Tras una exhaustiva evaluación virtual del compostador, se procedió a la materialización de unos componentes a escala reducida para poder garantizar un eficaz funcionamiento. Este proceso implicó la fabricación precisa de cada componente y su posterior ensamblaje, siguiendo rigurosamente los parámetros obtenidos en las simulaciones. La contrastación entre los resultados computacionales y el comportamiento real del sistema en condiciones experimentales permitió refinar el diseño, identificar posibles cuellos de botella y ajustar los parámetros de funcionamiento, asegurando así un desempeño óptimo del compostador a escala real. La positiva validación de la simulación mediante el prototipo a escala ha sentado las bases para la construcción de un modelo a tamaño completo, permitiendo un análisis detallado de cada una de las regiones que conforman el compostador y optimizando así su eficiencia y rendimiento.

La etapa de implementación resultó fundamental para validar el concepto de diseño y detectar posibles falencias. Tras un riguroso proceso de prueba y error, se implementaron las mejoras necesarias para optimizar el funcionamiento del compostador. Con los datos obtenidos de las pruebas experimentales, se procedió a la fabricación del modelo definitivo, asegurando así la reproducibilidad del diseño y la calidad del producto final.

2.3.1 Fase 1: Implementación de software integrado

Este capítulo detalla los criterios de diseño y las modificaciones implementadas durante la fabricación del prototipo de compostador, desarrollado específicamente para procesar los residuos orgánicos provenientes de la cafetería y cocinas del programa de Gastronomía de la Corporación Universitaria Comfacauca. Se presentará un análisis exhaustivo de las etapas de diseño, construcción y las iteraciones necesarias para optimizar el prototipo, superando los desafíos encontrados durante el proceso. Asimismo, se discutirán las razones detrás de las modificaciones realizadas para un diseño y funcionamiento óptimo del compostador.

Para garantizar la viabilidad del prototipo, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los componentes críticos. En primer lugar, se evaluó la resistencia mecánica de las cuchillas, fabricadas en acero inoxidable de espesor de 1.2mm de espesor. Sin embargo, las pruebas de corte realizadas tras el montaje realizado e ilustrado en la figura 36 y 37 revelaron una flexión excesiva del material por el diseño establecido, comprometiendo la eficiencia de corte debido al arqueamiento de las cuchillas al encontrarse con material orgánico, ya que debido al diseño en “S” con el que fueron elaboradas las cuchillas permiten que la materia de mayor dureza tenga más posibilidad de quedar entre la reja y las cuchillas ya que las hacía flexionar hacia arriba y . Ante estos resultados, se optó por modificar el diseño de cuchillas que se iban a elaborar que tenían una forma de “S” por unas cuchillas en forma igual a las utilizadas para las guadañas; El material se seleccionó por su resistencia a la corrosión y también por su conformación química estructural, pues este material es de mayor dureza, lo cual nos garantiza que no presente flexión al interactuar con la materia orgánica y que conserve el filo de corte. Paralelamente, se analizó la capacidad del motor de ventilación de un automóvil para impulsar las cuchillas. A pesar de su elevado número de revoluciones, la fuerza de corte resultó insuficiente, incluso para materiales blandos como cáscaras de naranja. Estos hallazgos experimentales corroboraron los cálculos teóricos previos, lo que condujo a la selección de un motor de mayor potencia que en este caso sería de (1.5 HP) el cual sería capaz de satisfacer los requerimientos en la sección de trituración, corroborando así que los datos realizados inicialmente tras el análisis de fuerza de corte si eran correctos para las características necesarias por el mecanismo.



Figura 34. Cuchillas elaboradas con base al primer diseño.

Fuente propia



Figura 35. Fabricación de sección de triturado para prueba de cuchillas

Fuente propia



Figura 36. Sistema de trituración para prueba de cuchillas

Fuente propia



Figura 37. Cáscara de naranja triturada por las cuchillas, pero con dificultad de corte por el diseño elaborado y diámetro de material

Fuente propia

El análisis de la Figura 37 revela que el diseño inicial de las cuchillas presentaba una deficiencia al someterse a cargas de material orgánico elevadas. La flexión excesiva de las cuchillas, especialmente al procesar volúmenes superiores a dos cáscaras de naranja, comprometía significativamente la eficiencia de corte. Para superar esta limitación, se implementó un nuevo diseño de cuchilla inspirado en las usadas en guadañas, caracterizadas por una mayor rigidez y una geometría más rectilínea, como se observa en la Figura 38.



Figura 38. Diseño final de las cuchillas encargadas de la primera sección en la fase de trituración

Fuente propia



Figura 39. Diseño final de las cuchillas encargadas de la segunda fase en la sección de trituración

Fuente propia

Luego de realizar las cuchillas encargadas de realizar el corte de la materia orgánica, se procedió a realizar la cuchilla que se encarga de expulsar la materia ya tritura hacia el cilindro mezclador, esta cuchilla fue elaborada con la herramienta CAE y diseño en el programa AutoCad y con un material de fabricación en acetal, ya que no sufrirá una interacción significativa con fuerzas en el sistema. Esta cuchilla se puede mirar en la figura 40.

Una vez validado el desempeño del sistema de cuchillas y motor, se procedió al diseño y fabricación de los soportes estructurales. Estos componentes, de vital importancia para garantizar el correcto funcionamiento del equipo, fueron elaborados en platina metálica de 3 mm de espesor, material seleccionado por su resistencia a la flexión y su capacidad para soportar las cargas impuestas. El diseño final de los soportes, optimizado para maximizar la eficiencia de corte y minimizar vibraciones, se detalla en la Figura 40.

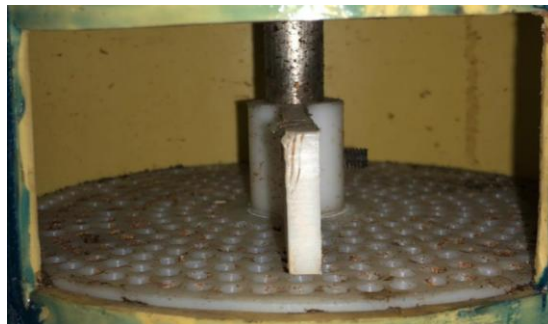


Figura 40. Diseño de cuchilla encargada de expulsión de la materia orgánica triturada

Fuente propia



Figura 41. Diseño final de los soportes encargados la distribución y sujeción de los mecanismos que conforman la sección de trituración

Fuente propia

Los soportes verticales, diseñados para soportar las cargas impuestas por el proceso de trituración y el material procesado, incorporan una serie de platinas perforadas estratégicamente ubicadas. Estas platinas no solo actúan como puntos de anclaje para las mallas de tamizado, sino que también contribuyen a la rigidez estructural del conjunto. La distribución de las platinas, fue determinada mediante un análisis por área ocupada de la materia orgánica a medida que se fuera dando el proceso de trituración, garantizando una distribución uniforme de las cargas y evitando la concentración de tensiones en zonas críticas. Además, la disposición de las perforaciones facilita el flujo de material a través de las mallas, optimizando el proceso de separación de partículas.

Se emplearon mallas filtrantes de acrílico, personalizadas con perforaciones circulares de 25 mm de diámetro y una distribución angular de 120 grados. Este diseño específico permite un filtrado eficiente de materia orgánica según el tamaño de partícula triturado por parte de las cuchillas. La disposición angular de las perforaciones asegura una distribución homogénea del flujo y optimiza la capacidad de filtración. El esquema de montaje de las mallas en los soportes se presenta en la Figura 42



Figura 42. Ensamble entre soporte y mallas

Fuente propia

Una vez finalizada la fabricación de las cuchillas, se procedió a su ensamblaje en el eje de rotación. Para ello, se emplearon bujes de acero inoxidable con un diámetro interno de 5/8", ajustados a la tolerancia necesaria para garantizar un encaje preciso. Estos bujes, previamente soldados a las cuchillas como se logra evidenciar en la figura 43, fueron deslizados sobre el eje y asegurados mediante prisioneros de alta resistencia. La alineación de las cuchillas se verificó minuciosamente para asegurar un balance dinámico del rotor y evitar vibraciones excesivas durante el funcionamiento.



Figura 43. Bujes soldados sobre las cuchillas y sujetos sobre el eje de rotación

Fuente propia

Una vez concluida la fabricación de todos los componentes internos de la sección de trituración, se procedió al ensamblaje de todas las piezas para realizar las pruebas del mecanismo; Para realizar las pruebas del mecanismo, se realizó la sección correspondiente de la estructura donde reposa esta esta sección como se logra mirar en la figura 43. Esta etapa crítica permitió verificar la precisión dimensional de las piezas, la alineación de los ejes y la funcionalidad de los mecanismos de transmisión. Posteriormente, se realizaron

pruebas para evaluar el desempeño de la sección bajo condiciones de carga máxima, utilizando material orgánico en su estado original como insumo. Estas pruebas permitieron validar el diseño y ajustar los parámetros operativos antes de pasar a las siguientes fases de validación.



Figura 44. Estructura en proceso de fabricación

Fuente propia

Durante la fase de pruebas, se identificaron diversas áreas de mejora en el diseño del sistema de trituración. La geometría de los soportes originales resultó inadecuada para garantizar una trituración eficiente, ya que impedía que las cuchillas pasaran cerca de la pared del tubo de PVC, haciendo que la materia orgánica que estaba sobre la pared no fuese triturada. Asimismo, el material de las mallas, acrílico, demostró ser insuficiente para soportar las cargas impuestas durante el proceso. En respuesta a estas limitaciones, se seleccionó el acetal como material para las mallas, debido a su mayor resistencia al desgaste y a la deformación, como análisis en el momento de la trituración, se logró observar que la malla del segundo nivel estaba realizando una labor en vano, ya que la materia orgánica desde la primera etapa pasaba ya en un tamaño pequeño, siendo innecesaria esta malla, lo cual llevó a su eliminación del sistema. Por las observaciones vistas, se llevó a cabo una reingeniería del sistema, reemplazando las mallas en otro material y los soportes por un sistema de fijación directa de las mallas al tubo de PVC. Se realizó la incorporación de rodamientos en la zona central de las mallas para reducir la fricción y mejorar la suavidad de funcionamiento del sistema; el diseño obtenido del mecanismo interno de la sección de trituración y cuchillas quedó como se puede ilustrar en la figura 45.



Figura 45. Mecanismo interno de la sección de trituración con su diseño final

Fuente propia

El cambio del diseño del sistema que tuvo como diseño final como se ilustra en la figura 45, fue puesto en prueba en condiciones reales y a tareas específicas a desarrollar; sistema que tuvo como resultado un comportamiento favorable al realizar una trituración adecuada y óptima de los desechos orgánicos, triturando toda la materia orgánica sin dejar depósito ni falencias en la trituración como se puede observar en la figura 46.



Figura 46. Trituración sin falencia por el sistema de cuchillas y sin falencias de depósito en las mallas

Fuente propia

Una vez concluida la etapa de trituración, el material orgánico resultante es transferido a la sección de mezclado, un componente esencial del proceso. Esta sección, de vital importancia para asegurar la homogeneidad y el secado adecuado del material, está equipada con un rotor de alta eficiencia. Dicho rotor, diseñado específicamente para esta fase del proceso, está provisto de aspas rectangulares fabricadas en acero inoxidable de 3 mm de espesor. Estas aspas, con dimensiones precisas de 25 cm de largo por 4 cm de ancho, han sido estratégicamente diseñadas para generar un flujo turbulento dentro de la

cámara de mezclado. Esta turbulencia, combinada con la alta velocidad de rotación del rotor, promueve una mezcla íntima y homogénea de los componentes del material orgánico, facilitando así la transferencia de masa y calor.

Las aspas del mezclador fueron fabricadas a partir de láminas de acero inoxidable de 3mm, un material seleccionado por su alta resistencia a la corrosión y su capacidad para soportar las condiciones operativas del proceso. El proceso de fabricación inició con el corte de las láminas a las dimensiones establecidas que son 25 cm de largo por 4 cm de ancho, utilizando una herramienta de corte por abrasión, comúnmente conocida como pulidora. Posteriormente, se realizó una perforación centrada en cada aspa para alojar el prisionero, el cual servirá como elemento de fijación al eje del rotor.



Figura 47. Corte de aspas de lámina de acero inoxidable

Fuente propia



Figura 48. Aspas de la sección de mezclado

Fuente propia

Una vez concluida la fabricación de las aspas, se procedió al mecanizado del eje de rotación. Este proceso crítico consistió en la elaboración de ranuras longitudinales de precisión en el eje, dimensionadas para alojar perfectamente las aspas. Estas ranuras, mecanizadas mediante un centro de mecanizado CNC, garantizan un ajuste preciso entre las aspas y el eje, eliminando holguras y vibraciones durante el funcionamiento.

Posteriormente, se introdujeron las aspas en las ranuras y se aseguraron mediante prisioneros pasantes, los cuales atraviesan tanto el eje como las aspas, creando una unión mecánica sólida y resistente.

Para garantizar un movimiento suave y eficiente del eje, se incorporan rodamientos de bloque cuadrado, los cuales fueron fijados a una tapa de PVC que es para el uso en un tubo de diámetro de 6" como se observa en la figura 50. Esta configuración, similar a la utilizada en la sección de trituración, permite un alineamiento preciso del eje y minimiza las fricciones, prolongando así la vida útil del equipo. La unión entre la tapa de PVC y el tubo se realizó mediante tornillos de alta resistencia, asegurando una fijación sólida y hermética. Una vez ensambladas las aspas al eje de rotación, este conjunto de piezas fue montado sobre un soporte tubular de PVC de 6 pulgadas de diámetro como se puede observar en la figura 49.



Figura 49. sección de mezclado ensamblado

Fuente propia



Figura 50. Sujeción de eje de rotación y rodamientos de base cuadrado a tapa de PVC

Fuente propia

Teniendo ya fabricadas las secciones de trituración y mezclado, se procede a realizar el ensamble del ducto que será el encargado de encaminar la materia orgánica desde la sección de trituración a la sección de mezclado, para poder encaminar la materia orgánica, se elaboraron 2 piezas a través de herramienta CAD en el programa SolidWorks para luego imprimir éstas en impresión 3D, estas piezas se pueden visualizar en la figura 51 y 52.

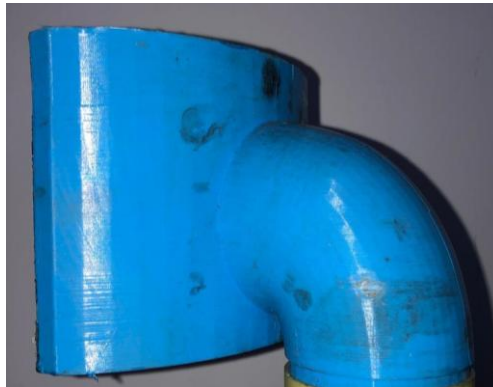


Figura 51. Impresión 3D que va adjunta a la sección de trituración para encaminar la materia orgánica triturada

Fuente propia

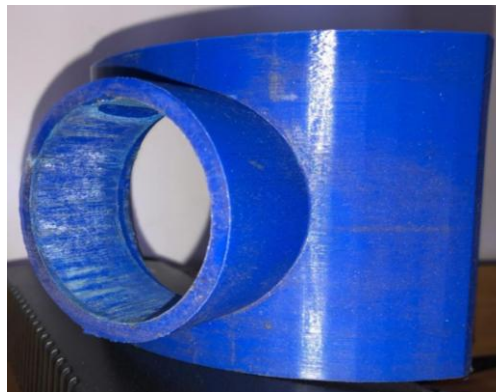


Figura 52. Impresión 3D que va adjunta a la sección de mezclado para dar soporte al tubo que descende de la sección de trituración

Fuente propia

Para facilitar el transporte continuo del material orgánico entre las secciones de trituración y mezclado, se realizaron perforaciones estratégicas en ambas estructuras. En la sección de trituración, se practicó una abertura para permitir el flujo gravitacional del material hacia la siguiente etapa por medio de una tubería de 2" que lleva como soporte las piezas ilustradas en las figuras 51 y 52. Por su parte, la sección de mezclado presenta dos perforaciones circulares como se pueden observar en la figura 53. La perforación que se encuentra en el lado derecho, sirve como entrada del material triturado proveniente de la sección anterior, mientras que la perforación del lado izquierdo, está destinada a la inserción de temperatura.



Figura 53. Perforaciones circulares en la sección de mezclado

Fuente propia

El ducto que transporta la materia orgánica que es conformado por la tubería PVC de 2" y las piezas elaboradas en 3D, quedaría como se observa en la figura 54.



Figura 54. Ducto conductor de la materia orgánica triturada

Fuente propia

Siguiente a la fabricación del ducto conductor de la materia orgánica, se fabrica una pieza en impresión 3D la cual fue fabricada también en el programa SolidWorks que tiene como fin dar soporte al secador de cabello que en este caso es usado para la inserción de temperatura.

La prevención de la migración de partículas de materia orgánica hacia el secador de cabello se logra mediante la inserción de una malla de tejido metálico denso, esta malla actúa como una barrera física que impide el paso de cualquier partícula sólida mayor al tamaño especificado. De esta manera, se garantiza la protección del equipo y se prolonga su vida útil. La pieza nombrada junto a la malla insertada se puede visualizar en la figura 55 y 56.



Figura 55. Pieza base del secador de cabello con malla

Fuente propia



Figura 56. Pieza base del secador de cabello

Fuente propia

Con el fin de garantizar un proceso de compostaje óptimo y eficiente, se implementó un sistema de monitoreo preciso. En la sección del tubo de PVC destinada a la mezcla, se practicó una perforación rectangular de dimensiones mínimas para alojar un sensor DHT22. Este dispositivo electrónico, altamente sensible, permite la medición continua de la temperatura y la humedad relativa de la materia orgánica en el interior del compostador. Los datos obtenidos por el sensor son fundamentales para establecer un control riguroso sobre las condiciones ambientales del sistema, asegurando que se mantengan dentro de los rangos óptimos para el desarrollo de los microorganismos descomponedores. De esta manera, es posible optimizar tanto la temperatura de fermentación como la duración del proceso, lo que redundará en la producción de un compost de alta calidad en el menor tiempo posible. Una vez alcanzadas las condiciones finales del compost, el sistema puede ser programado para desactivar automáticamente todos los mecanismos de operación, garantizando así un consumo energético eficiente.

Una vez finalizadas las secciones de trituración y mezclado, se procedió al ensamblaje del conjunto a la estructura. Para la sección de trituración, se diseñó una base circular de platina

de acero de 3 mm de espesor, a la cual se soldaron dos tornillos para su fijación con unas piezas angulares a la estructura principal como se observa en la figura 57. Además, se realizaron dos perforaciones alineadas en la parte superior de la sección de trituración en el tubo de PVC para asegurarlo a la mediante remaches. La sección de mezclado, por su parte, se fijó a la estructura mediante soportes fabricados en la misma platina, tienen un diseño recto en su cuerpo y curvos en uno de sus extremos como se ilustra en la figura 58, diseñados para para sujetar por su parte curva con tornillos a la estructura principal y en su parte recta asegurados con los mismos tornillos que sujetan a los rodamientos de esta sección.



Figura 57. Pieza circular para la sujeción de sección de trituración a la estructura principal

Fuente propia



Figura 58. Soportes para la sujeción de la sección de mezclado a la estructura principal

Fuente propia

Una vez ensambladas las secciones principales de la máquina, se procedió al montaje del motor eléctrico encargado de impulsar el rotor de trituración. El motor fue instalado sobre una sección de la estructura especialmente diseñada para asegurar su alineación con el eje de transmisión y minimizar las vibraciones. Para facilitar el ajuste de la tensión de la

banda y absorber las posibles desalineaciones térmicas, se incorporó un sistema de montaje elástico. Este sistema consiste en una base metálica, fijada al motor mediante pernos de alta resistencia, y un conjunto de resortes helicoidales que permiten ajustar la tensión de la banda de transmisión, garantizando una transmisión de potencia eficiente y sin deslizamientos. El montaje de todos los componentes y secciones fabricadas en este proceso hasta el momento se puede evidenciar en la figura 59.



Figura 59. Ensamble de las piezas elaboradas.

Fuente propia

Una vez concluido el montaje y puesta en marcha del motor de la sección de trituración, se procedió a instalar el motor de la sección de mezclado. Este último, un motor monofásico de 1 HP con una velocidad de rotación de 1600 RPM en baja, fue seleccionado para proporcionar la energía necesaria para la agitación del material. A fin de garantizar la protección y el correcto funcionamiento de ambos motores, se implementó un sistema de control eléctrico secuencial. Se instaló un contactor monofásico de 110 V para controlar el motor de la sección de mezclado. Además, se estableció una conexión secuencial entre los contactores de ambas secciones, de modo que cualquier cortocircuito en cualquiera de los circuitos provocaría la desconexión inmediata de ambos motores, asegurando así la seguridad del sistema. El montaje del motor, se pueden observar en las figuras 60.



Figura 60. Montaje de motor encargado de la rotación de la sección de rotación

Fuente propia

Posterior al montaje de los componentes mecánicos del sistema de compostaje como lo son los motores, las secciones de trituración, mezclado y la sección de inserción de temperatura, se procedió a la integración de una pantalla OLED de 0.96 pulgadas. Esta interfaz, representada en la Figura 61, proporciona una visualización gráfica de los datos obtenidos por los sensores de temperatura y humedad ubicados en la sección de trituración. La monitorización continua de estos parámetros es esencial para el control del proceso y la optimización de la calidad del compost.



Figura 61. Pantalla OLED para monitoreo de temperatura y humedad del compost

Fuente propia

El prototipo de compostador presenta un sistema de control dual que combina la practicidad del accionamiento manual con la versatilidad del control digital. El sistema manual, conformado por interruptores eléctricos estratégicamente ubicados en la cubierta frontal como se puede observar en la figura 62, permite al usuario activar o desactivar de manera independiente cada sección del compostador, adaptándose a las necesidades específicas de cada ciclo de compostaje. Paralelamente, se elaboró una interfaz web personalizada con punto de acceso a través de la dirección 172.20.10.13, interfaz que cuenta con un diseño que se puede observar en la figura 63, ofrece un control remoto y preciso sobre el equipo, permitiendo la activación independiente de cada una de las secciones que hacen parte del compostador, esta interfaz también permite un manejo autónomo de todo el prototipo bajo la programación en el microcontrolador ESP32 el cual está configurado para una toma de decisiones con base en la temperatura y humedad presente en la materia orgánica. El modo automático, brinda la posibilidad a través de configuración de tiempo el encendido y apagado de la sección de trituración, donde a través del análisis de la capacidad del almacenamiento en la fase de llenado de la materia orgánica sin ser triturada junto a la agilidad de trituración por parte de las cuchillas y las revoluciones del motor, se establece un tiempo suficiente para el procesamiento de toda la materia hasta la trituración de toda la suministrada, evitando así un consumo innecesario por el motor de trituración. Esta combinación de control manual y digital brinda al usuario una flexibilidad sin precedentes, optimizando el proceso de compostaje y garantizando resultados óptimos.



Figura 62. Interruptores para el accionamiento manual de las diferentes secciones del compostador

Fuente propia

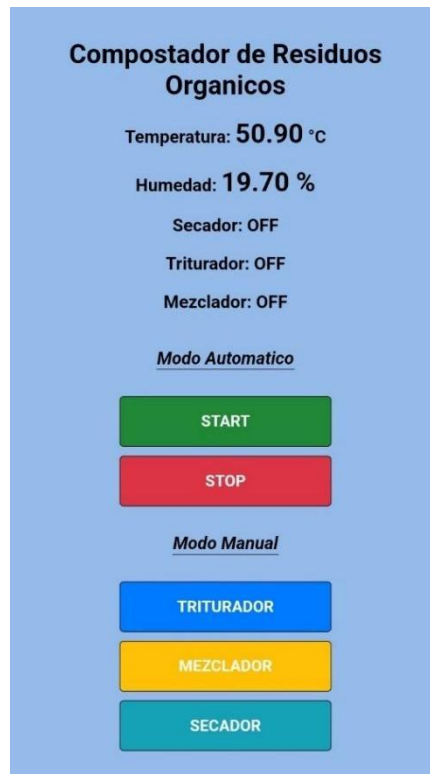


Figura 63. Interfaz web para el accionamiento remoto de manera independiente de las secciones o automático de todo el sistema

Fuente propia

Para habilitar la gestión a través del servidor web, se llevó a cabo la programación del microcontrolador ESP32 utilizando el entorno de desarrollo Arduino. El código fuente resultante de esta programación se encuentra detallado en el Anexo 3. Con el propósito de proporcionar una comprensión más clara del proceso, se ilustra en el diagrama de flujo correspondiente a la Figura 33, las diversas etapas y el mecanismo de control implementado en el microcontrolador.

La estructura del código se inicia con la inclusión de las librerías necesarias para el correcto funcionamiento del prototipo. Estas librerías abarcan desde el manejo de la conexión Wifi, esencial para la comunicación con la interfaz web alojada en un servidor remoto, la librería que permite el uso del sensor de temperatura y humedad, y la gestión de la pantalla OLED de 0.96 pulgadas. Una vez incluidas las librerías, se procede a inicializar los componentes hardware, definiendo las dimensiones de la pantalla OLED y creando un objeto para su control. Posteriormente, se declaran las variables correspondientes a las entradas y salidas digitales, las cuales se asocian a los pines del microcontrolador y controlan el funcionamiento de las diferentes secciones del compostador.

Siguiente a la declaración de variables, librerías, salidas, entradas y demás declaraciones de la primera parte del código, se procede a establecer la configuración del servidor Web y la conexión Wifi, en esta parte del código se crea un servidor web en el puerto 80 y se define cual es la red que se debe estar conectado el ordenador o dispositivo por mediante el cual

se va a manejar el prototipo. Luego de la configuración de red y wifi, se declara el estado de las variables para controlar el estado del sistema, como la activación de salidas y el inicio/parada del ciclo. Siguiendo, se procede a la programación que se encarga de gestionar las solicitudes HTTP provenientes de los clientes. Al establecer una conexión, el servidor lee la solicitud entrante hasta encontrar el carácter de nueva línea ('\n'), indicando el final de la solicitud. A continuación, se limpia el búfer de recepción para prepararse para la siguiente conexión. Este mecanismo garantiza que cada cliente sea atendido de manera independiente y eficiente. La interfaz web, por su parte, presenta de forma clara y concisa la información relevante para el usuario. En la parte superior de la pantalla, se muestran en tiempo real los valores de temperatura y humedad obtenidos del sensor DHT22 ubicado en la sección de mezclado. Además, se incluye un panel de estado que indica, mediante las etiquetas 'ON' y 'OFF', la condición de las salidas del sistema, proporcionando al usuario una visión completa de qué sección está encendida o apagada para así mismo poder verificar que se esté realizando un buen proceso de compost.

Luego se procede a la ejecución de las solicitudes del usuario, pues estas solicitudes están establecidas para un accionamiento del prototipo de manera manual como otro apartado para un accionamiento de manera automática. Las solicitudes que puede ejecutar el usuario son las de Start, Stop, output1, output2 y output 3, las cuales están definidas así:

- Output1= sección de trituración
- Output2= sección de mezclado
- Output3= inserción de temperatura
- Start= inicio del proceso de manera automatizada
- Stop= Desactivación de salidas activas

Donde dependiendo de cuál de las salidas esté activa, se reinicia un contador y activa la salida seleccionada y desactiva las restantes desactivadas. El estado de estas salidas, se indicará en modo de texto en la sección de Data descrita en la figura 61 se mostrará en forma de texto cuales son las secciones encendidas.

Para la ejecución de las solicitudes del cliente u operario sean de manera entendibles, visualizadas de una manera clara y con una ejecución eficaz, se comenzó a diseñar la página web de manera en que los botones, textos y demás información fuera dispersa sobre el área disponible y con animación es y formatos de textos deseados. La elaboración de la página web y declaración de funciones junto a los formatos deseados, fueron establecidos para que el usuario tenga una interfaz de fácil interacción y entendimiento a la hora de entrar en uso de la misma, así mismo damos paso a uno de los requerimientos que era un fácil uso y entendimiento del mecanismo a la hora de usar.

La función setup (), es el punto de partida para la inicialización del sistema. En esta sección del código, se configuran los periféricos esenciales para el funcionamiento del prototipo. Se inicializa la pantalla, que servirá como interfaz de usuario para visualizar información relevante sobre el estado del sistema y detectar posibles errores. Asimismo, se configura la comunicación serial, estableciendo la velocidad de transmisión y los pines correspondientes. Esta comunicación serial será utilizada para enviar y recibir datos, permitiendo la interacción con otros dispositivos o sistemas externos. En esta sección del código, se configuran las rutinas de manejo de errores y las notificaciones del sistema.

Estas rutinas se encargan de informar al usuario sobre el estado de la conexión entre el microcontrolador y el ordenador, así como de cualquier falla en los componentes. Por ejemplo, se incluyen notificaciones para indicar si la pantalla OLED está funcionando correctamente, si la conexión Wi-Fi se ha establecido satisfactoriamente y si el sensor está siendo detectado. Estas notificaciones son cruciales para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema, ya que cualquier falla en estos componentes puede impedir la comunicación con el servidor web y, por consiguiente, limitar la funcionalidad de la interfaz de usuario. Siguiendo a la sección descrita del código, sigue la que se encarga de dar paso al usuario a la visualización en la pantalla OLED los factores más importantes como lo son la humedad y la temperatura, en esta parte, también se define la programación y rango de función de las secciones que conforman el compostador para un óptimo desempeño en la función automatizada. En este punto, se actualiza la pantalla OLED con los datos en tiempo real proporcionados por el sensor DHT22, mostrando de forma clara y concisa los valores de temperatura y humedad. A continuación, se inicia una secuencia de control automatizada que incluye un período de espera inicial para permitir la carga de materia orgánica de 10 segundos, seguido de la activación del motor de trituración durante 15 segundos. Una vez próximo a dar fin del proceso de trituración, se activa el motor de mezclado y, posteriormente, se inicia el calentamiento de la cámara de compostaje. Esta secuencia de eventos está diseñada a través de delay, tiene como función optimizar el proceso de compostaje, asegurando una mezcla homogénea de los materiales y una temperatura adecuada para el desarrollo de los microorganismos como también reducir el consumo de corriente por motores que pueden estar realizando un funcionamiento inadecuado como innecesario.

Luego se establecieron los parámetros que dan paso a un funcionamiento adecuado al proceso automático, pues se diseñó un algoritmo de control encargado de regular la temperatura y la humedad dentro del compostador. Este algoritmo funciona de la siguiente manera: si la temperatura medida es inferior a 40°C, se activa el sistema de calentamiento y el mezclador para incrementar la temperatura y homogeneizar el material. Si la temperatura se encuentra entre 40°C y 50°C, el sistema de calentamiento se desactiva periodos de tiempos de 4 seg para evitar el sobrecalentamiento del material. Finalmente, si la temperatura supera los 50°C, se desactiva el sistema de inserción de temperatura en su totalidad. Este sistema de control garantiza que las condiciones ambientales se mantengan dentro de los rangos óptimos para un proceso de compostaje eficiente. El funcionamiento del sistema de control de temperatura acorde los criterios descritos, se puede evidenciar en la figura 64, figura que indica las decisiones a tomar el controlador dependiendo el rango de temperatura en el que se encuentre en el interior de la sección de mezclado.

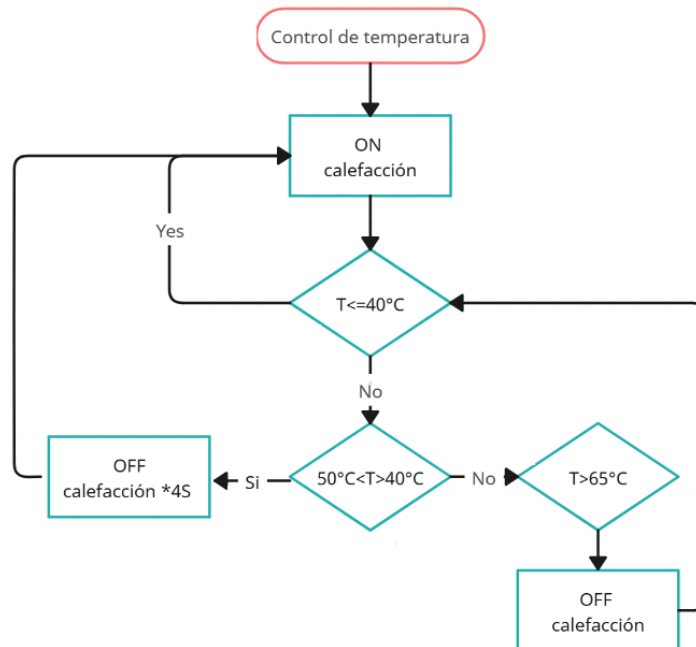


Figura 64. Ejecución del sistema de control de temperatura
Fuente propia

Una vez finalizados los trabajos de mecánica, electrónica y programación, se procedió al ensamblado del prototipo. Para proteger los componentes internos y conferirle una estética final, se recubrió el mecanismo con paneles de MDF de 6 mm de espesor. El diseño resultante se muestra en la Figura 65.



Figura 65. Diseño final del prototipo de compostador de residuos orgánicos

Fuente propia

CAPÍTULO III: VALIDACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE PROTOTIPO

Para validar la eficacia del prototipo de compostador desarrollado para el tratamiento de residuos orgánicos domésticos, se ha estructurado una metodología de evaluación. Esta metodología se aplicará utilizando como insumo los desechos orgánicos generados en el marco del programa de Gestión Gastronómica y cocina de cafetería de la Corporación Universitaria Comfacaucá.

La metodología empleada acorde las funcionalidad y características a evaluar están descritas a continuación:

1. Determinar el rendimiento de un compostador doméstico en términos de:

- **Velocidad de descomposición:** Tiempo requerido para convertir desperdicios orgánicos en compost.
- **Eficiencia ambiental:** Impacto en la reducción de desperdicios enviados a vertederos.

2. Diseño Experimental

2.1 Selección de variables

1. Variables independientes:

- Tipo de desperdicio (vegetales, frutas, residuos de jardín, etc.).
- Humedad inicial del material (en %).

2. Variables dependientes:

- Tiempo de descomposición (días/semana).
- Peso inicial y final del material (kg).
- Temperatura interna del compostador (°C).

3. Procedimiento

1. Preparación inicial:

- Pesar y registrar el tipo y cantidad de desperdicios (kg).
- Medir humedad inicial

2. Monitoreo periódico:

- Registrar la temperatura interna y humedad en 3 intervalos de tiempo en un rango de 24 horas.
- Voltear el material de manera continua para un compost polvoroso.

3. Finalización del proceso:

- Considerar como finalizado el proceso de elaboración de compost cuando el material orgánico complete 24h en el tratamiento por parte del prototipo compostador.

- Pesar el material final para calcular la reducción de peso.

4. Instrumentos y Recolección de Datos

Instrumentos necesarios:

- Báscula digital (para medir peso).
- Sensor de temperatura y humedad DHT22

Datos a registrar:

- Peso inicial y final.
- Temperatura y humedad en tres intervalos de tiempo en rango máx de 24 horas(°C).
- Tiempo total de compostaje.

5. Análisis de Datos

1. Gráficos:

- Temperatura inicial vs. Temperatura final
- Humedad inicial vs. Humedad final.
- Peso inicial vs. Peso final

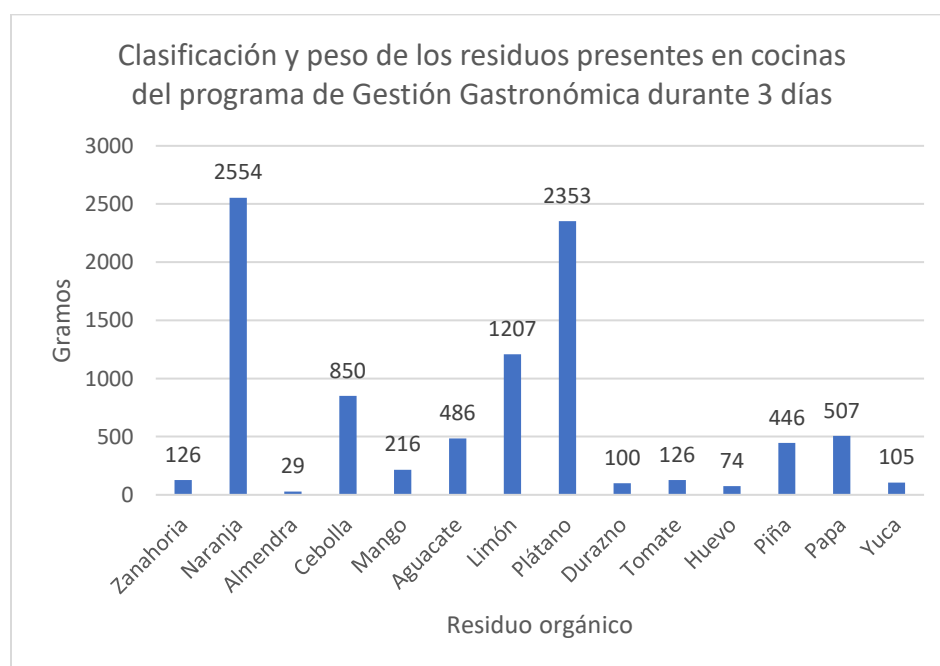
2. Informe Final

Incluirá:

- Resumen del comportamiento del compostador.
- Resultados obtenidos (tablas y gráficos).
- Conclusiones y recomendaciones prácticas para optimizar compostadores domésticos.

El análisis del trabajo a desarrollar por parte del prototipo compostador, se llevó a cabo empleando residuos orgánicos provenientes de fuentes externas a la universidad, específicamente aquellos generados en cocinas residenciales. Esta decisión se fundamentó gracias al trabajo investigativo llamado “Estrategias de aprovechamiento de las cáscaras de plátano (*M. Paradisiaca* Linn) y naranja (*Citrus Sinensis* L. Osbeck) obtenidos en el proceso de transformación gastronómica en los laboratorios de alimentos de la Corporación Universitaria Comfacaucá – Unicomfacaucá”, realizado por el estudiante del programa de Gestión Gastronómica, Julio César Parra como parte de su práctica empresarial, bajo la dirección de la docente Mabel Calvache. Los datos de la cantidad de residuos orgánicos producidos en cocinas del programa Gestión Gastronómica, que alcanzan como máximo los 2,82 kg diarios, y el tipo de residuos obtenidos en este estudio previo, sirvieron como base para determinar la carga orgánica a procesar en el compostador.

La investigación llevó a cabo un estudio cuantitativo de los residuos orgánicos generados en seis cursos de gastronomía de la Corporación Universitaria durante un periodo de cuatro días. El objetivo principal fue determinar la composición y cantidad de estos desechos. A través de una clasificación y pesaje detallado de los residuos generados en cada curso (Cocina básica, Cocina francesa, Buffet y catering, Electiva (italiana), Cocina avanzada y Carnes y pescados), se identificó que las cáscaras de plátano y naranja constituían la fracción mayoritaria de los residuos orgánicos como se puede observar en la gráfica 1. Basándose en estos resultados, Parra centró su investigación en el aprovechamiento de estos subproductos para la obtención de harinas a partir de cada uno de ellos. Con el objetivo de evaluar el desempeño del prototipo de compostador, se seleccionaron los residuos orgánicos identificados en el estudio previo, entre los que se destacaron las cáscaras de plátano y naranja. Estos residuos, tras ser triturados, y sometidos a una fuente de calor con una temperatura máxima de 50°C, tendrían como producto elaborado por parte de la máquina, un compost de alta calidad.



Grafica 1. Clasificación y peso de los residuos presentes en cocinas del programa de Gestión Gastronómica durante 3 días. [53]

La caracterización detallada de los residuos orgánicos ilustrados en la gráfica 1 y presentada en la tabla 8, permitió establecer la composición porcentual de los diferentes tipos de residuos, así como su generación diaria. Estos datos cuantitativos, obtenidos mediante la clasificación de cada uno de ellos, fueron los que dieron paso a la determinación de que residuos orgánicos eran los que iban a estar presentes en el compost a realizar por parte del prototipo compostador.

Tabla 8. Peso de residuos orgánicos acorde a su clasificación

Residuo orgánico	DIA 1	DIA 2	DIA 3	SEMESTRE 1 2024	Gramos Total
<i>Zanahoria</i>	86 g		40 g		126 g
<i>Naranja</i>	1500 g		1054 g		2554 g
<i>Almendra</i>	29 g				29 g
<i>Cebolla</i>	140 g	52 g	244 g	414 g	850 g
<i>Mango</i>	153 g	63 g			216 g
<i>Aguacate</i>	127 g	100 g		259 g	486 g
<i>Limón</i>	300 g	82 g	825 g		1207 g
<i>Plátano</i>	425 g	428 g		1500 g	2353 g
<i>Durazno</i>	51 g	49 g			100 g
<i>Tomate</i>		92 g		34 g	126 g
<i>Huevo</i>		46 g		28 g	74 g
<i>Piña</i>			237 g	209 g	446 g
<i>Papa</i>			137 g	370 g	507 g
<i>Yuca</i>			105 g		105 g

Fuente: Datos recolectados por Julio Cesar para su práctica empresarial

La validación del prototipo de compostador se inició con una prueba a escala real, utilizando como insumo la totalidad de los residuos orgánicos generados diariamente en las cocinas del programa de Gestión Gastronómica. La biomasa, compuesta principalmente por cáscaras de plátano y naranja, fue triturada y cargada al equipo. A lo largo de 7 horas, se monitorizaron variables como temperatura y humedad, donde se tomaron muestras periódicas para evaluar la evolución de la materia orgánica y la formación de compost, para posterior al proceso poder realizar un análisis estadístico y poder definir características importantes para la determinación del funcionamiento por parte del prototipo compostador, con un tiempo máximo de 24 horas de trabajo. Al finalizar la prueba, se determinaron la eficiencia de degradación, la capacidad de carga del equipo y la calidad del compost obtenido.

La biomasa orgánica utilizada para la primera prueba, compuesta por cáscaras de plátano, cebolla, zanahoria, cascara de limón, cascara de papa y naranja como se puede observar en la figura 66, fue cuantificada mediante pesaje (Figura 67) antes de ser introducida en la sección de trituración. La sección de trituración es la encargada de reducir el tamaño de partícula de la biomasa, lo cual favorece la homogeneización del material y la optimización de la superficie de contacto para los microorganismos durante el proceso de elaboración de compostaje en la sección de mezclado y con una inserción de temperatura de 50°C.



Figura 66. Residuos orgánicos recolectados para prueba 1
Fuente propia



Figura 67. Peso registrado de los desechos que conforman la prueba 1
Fuente propia



Figura 68. Depósito de residuos orgánicos en la sección de trituración
Fuente propia

Tras la carga inicial de materia orgánica con un peso de 4kg como se puede observar en la figura 67, se llevó a cabo un periodo de observación de 7 horas, con un intervalo horario comprendido entre las 10:00 am y las 5:00 pm. Este lapso temporal fue seleccionado debido a las restricciones de uso del laboratorio, que limita el acceso a las instalaciones después de las 6:00 pm como también por limitaciones de funcionamiento de equipos por largos lapsos, lo cual significa que el funcionamiento de 24h no era permitido. Aunque el proceso de compostaje completo requiere un mínimo de 24 horas, los datos obtenidos durante estas 7 horas iniciales permitirán realizar una evaluación preliminar del comportamiento de las variables asociadas a la materia orgánica y establecer una proyección del resultado final.

Los resultados experimentales evidenciaron una reducción significativa en el volumen de la materia orgánica tras su trituración y posterior procesamiento en el prototipo compostador. Además, el análisis comparativo de los pesos y contenidos de humedad iniciales y finales permitió determinar la eficiencia del sistema en la reducción de masa y la modificación del contenido hídrico del material orgánico, lo cual brinda información importante para determinar cómo sería el resultado final tras 24h de trabajo por parte del prototipo compostador



Figura 69. Temperatura después de 10 minutos encendido el prototipo compostador
Fuente propia



Figura 70. Temperatura final tras 7 horas de funcionamiento del prototipo compostador
Fuente propia

Como se evidencia en la Figura 69, el compost alcanzó una temperatura inicial de 32°C y una humedad del 96.9% tras 10 minutos de proceso, debido al alto contenido de humedad de la materia orgánica al ingresar al sistema de trituración. Tras 7 horas de operación, la temperatura aumentó a 47.4°C y la humedad se redujo al 30.9% como consecuencia del proceso de secado y mezclado por parte del prototipo compostador.

Al finalizar el ciclo de compostaje, se procedió a la extracción y pesaje del producto final. Los resultados, presentados en la Figura 71, indican una reducción del peso total a 1.220 kg, lo que representa un 68.1% del peso inicial. La Figura 72 muestra el compost obtenido, caracterizado por una estructura homogénea compuesta por partículas finas de materia orgánica y un 25% de aserrín, el cual actuó como acondicionador para la absorción de humedad.

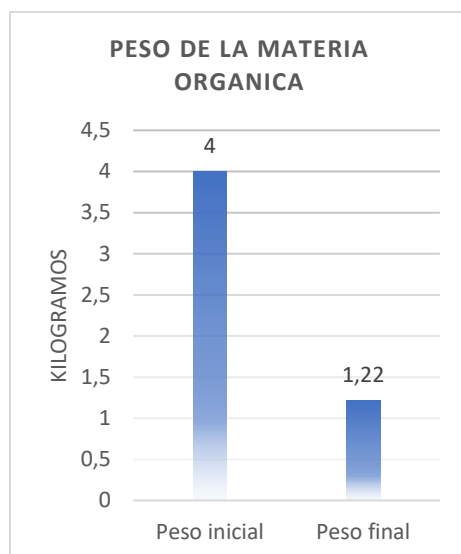


Figura 71. Reducción de peso equivalente al 68,1% del peso inicial
Fuente propia

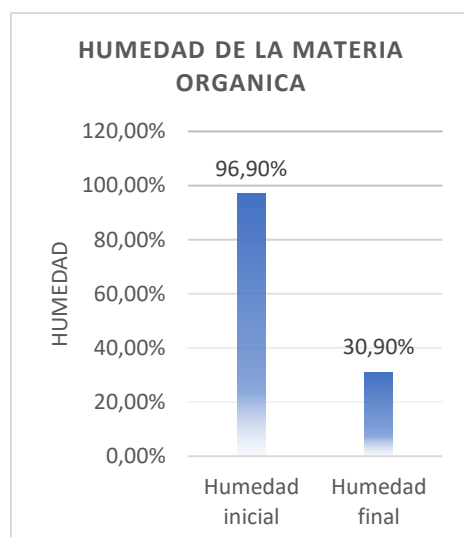


Figura 72. Compost final obtenido tras 7 horas de funcionamiento del prototipo compostador
Fuente propia

El análisis de los datos de peso y humedad como se logra evidenciar en las gráficas 2 y 3, confirma que el equipo de compostaje ha cumplido con los estándares establecidos para la producción de compost. El tratamiento térmico de 7 horas ha sido suficiente para reducir la humedad de la materia orgánica al rango de (40-50%), lo que indica que nuestro compost al estar en un rango de 31,9% de humedad, debe ser extraído del compostador debido a que está en un rango de humedad por debajo de lo recomendado, lo cual significa un punto óptimo para el desarrollo de los microorganismos en suelos, demostrando que el proceso ha sido eficiente y que el producto final puede ser aplicado de forma segura en la agricultura



Grafica 2. Comportamiento del peso inicial vs final
Fuente propia



Grafica 3. Comportamiento de la humedad inicial vs humedad final
Fuente propia

Al día siguiente, se llevó a cabo una segunda prueba utilizando una muestra de materia orgánica con un peso inicial de 3,445 kg (Figura 73), compuesta principalmente por cáscaras de plátano, naranja y yuca. Esta muestra presentó una humedad inicial del 85,7% y una temperatura de 28,9°C. Tras siete horas de mezclado continuo y exposición a la fuente de calor del compostador, se observó una reducción significativa en la humedad, alcanzando un valor final del 39,2%. Asimismo, el peso de la muestra disminuyó considerablemente hasta los 1,115 kg (Figura 74), datos que se encuentran ilustrados en las graficas 4 y 5. Estos resultados sugieren que la naturaleza más robusta de los residuos orgánicos empleados en esta prueba, influyó en una menor tasa de descomposición en comparación con la primera prueba, teniendo como resultado el compost que se logra observar en la figura 75.



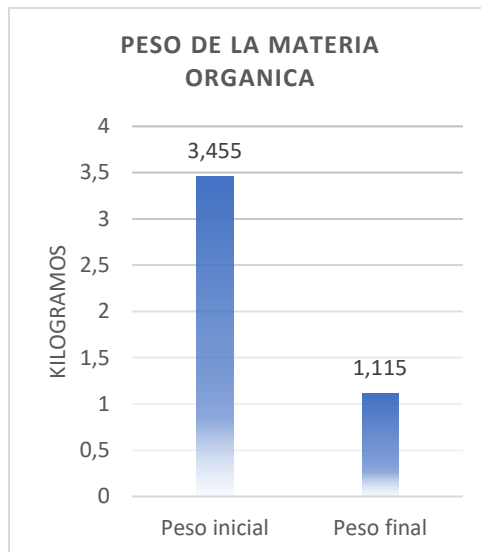
Figura 73. Peso registrado de los desechos que fueron parte de la prueba 2
Fuente propia



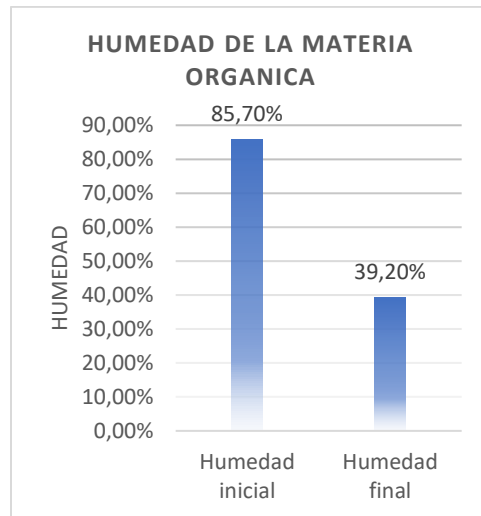
Figura 74. Reducción de peso equivalente al 67,7 de su peso inicial
Fuente propia



Figura 75. Compost final obtenido tras 7horas de funcionamiento del prototipo compostador
Fuente propia



Grafica 4. Comportamiento del peso inicial vs final
Fuente propia



Grafica 5. Comportamiento de la humedad inicial vs humedad final
Fuente propia

La información anteriormente graficada fue de gran importancia para la determinación de los desechos a triturar por parte del prototipo compostador, esta información suministrada por parte de la investigación Estrategias de aprovechamiento de las cáscaras de plátano (*M. Paradisiaca Linn*) y naranja (*Citrus Sinensis L. Osbeck*) obtenidos en el proceso de transformación gastronómica en los laboratorios de alimentos de la Corporación Universitaria Comfacaucua – Unicomfacaucua, información anexa al final de este documento.

Teniendo un análisis tras los resultados obtenidos tras la fabricación, pruebas y análisis de viabilidad, se determinó que el prototipo desarrollado tuvo un desempeño óptimo acorde a los requisitos establecidos inicialmente para su fabricación, el prototipo desarrolla compost en un lapso de 24 horas como máximo, gracias a la inserción de temperatura y aserrín de madera, el cual absorbe líquidos solventando el problema de elaboración de líquidos lixiviados como también ayudando absorber humedad, acelerando aún más el proceso de

elaboración de compost.

El prototipo de compostador al estar en uso con los desechos orgánicos mostró una alta eficiencia en la transformación de materia orgánica en compost. Al evaluar la masa de los materiales ingresados y el producto final, se ha constatado una reducción del 70% aproximadamente en el peso total. Esta disminución se explica por la pérdida de humedad durante el proceso de descomposición y la fragmentación de la materia orgánica. Con una carga inicial de 4 kg de materia orgánica y un 25% de aserrín, el sistema produce aproximadamente 1.2 kg de compost en la primera prueba, en la segunda con una carga inicial de 3,455 kg con un 25% de aserrín, el sistema produce aproximadamente 1,115 kg de compost, lo que evidencia la optimización del proceso de compostaje tal como se observa los resultados de estas 2 pruebas en la tabla 8.

Tabla 9. Análisis de desarrollo de trabajo por parte del prototipo compostador

PRUEBA	PESO INICIAL ES SU ESTADO FRESCO	PESO FINAL TRAS LA TRANSFORMACIÓN EN ABONO ORGÁNICO
1	4 kg	1,220kg
2	3,455 kg	1.115 kg

Siguiendo los requisitos establecidos, los factores contundentes como lo fue la economía como el fácil uso de la maquinaria y fácil portabilidad, siempre fueron factores que se tuvieron presente, pues los materiales empleados, piezas elaboradas y sistema de manejo, fueron abordados con metodologías y estrategias de ejecución versátiles para que el o los usuarios tuvieran tanto economía a la hora de la fabricación de este prototipo como facilidad de uso.

COSTO DE LOS MATERIALES INVERTIDOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Tabla 10. Materiales de fabricación junto a su valor comercial

MATERIALES DE FABRICACIÓN	PRECIO
Platina de 3mm de espesor	\$ 34.800
Motor WEG 1.5 HP	\$ 920.000
Motor Siemens 1 HP	\$ 200.000
Tubo metalizado de 25 mm*25 mm*6m	\$ 65.000
Tubo de PVC de 6" pulgadas	\$ 51.000
Tubo de PVC de 2" pulgadas	\$ 7.700
Tapones de PVC de tubo de 6" pulgadas	\$ 30.000
Rodamientos de 5/8" pulgadas con base cuadrada	\$ 84.000
Eje de 5/8" de diámetro	\$ 40.000
Rodamientos circulares de 5/8" pulgadas	\$ 14.000
Bloque de acetal	\$ 10.000
Poleas	\$ 12.000
Bandas lisas	\$ 8.000
PLA de 1.75m m de espesor	\$ 30.000
Resortes tensores	\$ 12.000
Platina de acero de 4mm de espesor	\$ 6.000
Bujes de acero inoxidable de diámetro interno 5/8" pulgadas	\$ 25.000
MDF de 3mm	\$ 3.000
MDF de 9mm	\$ 100.000
4 agarraderas para compuertas	\$ 40.000
Broches retenedores de puertas	\$ 28.000
Borneras	\$ 2.000
Materiales de ensamble	\$ 25.000

Tabla 11. Materiales eléctricos junto a su valor comercial

MATERIALES ELÉCTRICOS	PRECIO
Disyuntor de 110v 16A	\$ 30.000
Contactador CHINT NXR-25 de 110v	\$ 42.000
Contactador de 110v	\$ 38.000
Relé térmico CHINT NXR-25 de 110v	\$ 52.000
Sensor DTH22	\$ 20.000
Microcontrolador ESP32	\$ 28.000
Pulsadores NA y NC	\$ 16.000
Switch	\$ 12.000
Pantalla oled de 0.96" pulsadas	\$ 20.000
Módulo de relé en estado sólido de 5v	\$ 32.000
Secador de cabello	\$ 60.000
Cargador de 5v	\$ 5.000
LM2596	\$ 22.000
Jumpers	\$ 6.000
Protoboard pequeña	\$ 5.000
Cable vehicular calibre 14 (0.064" pulgadas) y 12 (0.081" pulgadas)	\$ 25.000

TOTAL: 2.160.500

CONCLUSIONES

- El prototipo de compostador desarrollado constituye una solución innovadora y altamente eficiente para la gestión de residuos orgánicos, destacándose por su óptima relación costo-capacidad frente a las tecnologías disponibles en el mercado. Un análisis comparativo con seis compostadores de la competencia evidenció que el prototipo presenta un precio competitivo de \$2.160.500, un 20% inferior al promedio de \$2.600.000, lo que lo posiciona como una alternativa económicamente viable sin comprometer el rendimiento. El sistema de trituración incorporado permite el procesamiento de hasta 5 kg de residuos, gracias a la implementación de cuatro cuchillas de diseño optimizado—similares a las utilizadas en guadañas y licuadoras—accionadas por un motor de 1.5 hp. Esta configuración garantiza una trituración eficiente de la materia orgánica, acelerando el proceso de compostaje y asegurando la obtención de un producto final de alta calidad. Además, el compostador integra un sistema de control dual, operable tanto de manera manual como remota a través de un servidor web, una funcionalidad ausente en los modelos analizados. Este sistema permite la gestión independiente de cada sección y la ejecución autónoma del proceso. Además, el monitoreo en tiempo real de variables críticas como temperatura y humedad se realiza mediante un servidor web y una pantalla OLED de 0.96" integrada en el dispositivo, optimizando el control de las condiciones del compostaje y mejorando la eficiencia del proceso.
- El desarrollo del prototipo de compostador para el aprovechamiento de residuos orgánicos se llevó a cabo mediante la integración de herramientas CAD/CAE/CAM, las cuales fueron esenciales para el diseño, simulación y optimización del mecanismo. La estructura mecánica del sistema está conformada por 95 componentes, cuyo diseño modular permite un ensamblaje eficiente y preciso. Durante el proceso de validación, se evidenció que el 90% de los componentes fabricados cumplen con los estudios mecánicos. En particular, el sistema de corte fue diseñado para soportar una fuerza mínima de 78,48 N, garantizando su capacidad para procesar residuos orgánicos de diversas características. Para ello, las cuchillas operan a una velocidad de giro de 188,5 rad/s, impulsadas por un motor de 1,5 hp, lo que asegura un desempeño estable y eficiente en la trituración de la materia orgánica. Además, las aspas encargadas del mezclado fueron fabricadas en acero inoxidable de mayor espesor en comparación con las cuchillas de corte, lo que previene posibles deformaciones y mejora la eficiencia del proceso de agitación. La aplicación de herramientas tecnológicas avanzadas permitió la selección óptima de materiales, la ejecución de simulaciones de esfuerzo y deformación, así como la optimización de los procesos de mecanizado, asegurando la precisión en la fabricación de los componentes clave del sistema.
- El prototipo de compostador ha sido diseñado para acelerar el proceso de compostaje hasta un máximo de 24 horas, optimizando el secado de la materia orgánica triturada mediante un sistema de control térmico que favorece el desarrollo de microorganismos. Para la generación de calor, el sistema emplea un mecanismo basado en un secador de cabello, cuya operación se regula según los siguientes rangos de temperatura: por debajo de 40°C, el secador permanece encendido de forma continua; entre 40°C y 50°C, funciona en ciclos intermitentes de 3 segundos; y por encima de 50°C, se desactiva hasta que la temperatura descienda a un nivel óptimo. El análisis comparativo de prototipos y maquinaria comercial evidencia que el control preciso de la temperatura es un factor crítico en la aceleración del proceso

de procesamiento, aspecto clave en la funcionalidad del presente diseño. La integración de este sistema térmico no solo permite optimizar la eficiencia del compostaje, sino que también garantiza condiciones ideales para la actividad microbiológica, mejorando así la calidad.

- La validación funcional del prototipo de compostador confirma su rendimiento óptimo, cumpliendo con los requisitos de fabricación y operación establecidos. El sistema de trituración, mezclado e interacción con la fuente de calor permitió la producción de compost con características sobresalientes. Se logró un control eficiente de la temperatura y una trituración homogénea, obteniendo un compost. El análisis de reducción de peso evidenció una eficiencia significativa del sistema, alcanzando una disminución del 70% entre la masa inicial y final de la materia orgánica. En particular, en la prueba 1, se procesaron 4 kg de residuos orgánicos, resultando en un peso final de 1,22 kg. Además, la humedad del material se reduce del 96.9% al 30.9% después de un ciclo de trabajo de 7 horas, lo que demuestra la efectividad del proceso de secado mediante el control térmico implementado. En conclusión, el prototipo de compostador validado ha demostrado una alta eficiencia en la transformación de residuos orgánicos, logrando una reducción significativa en peso y humedad, y garantizando la producción de compost de alta calidad en un tiempo optimizado

FUTURAS MEJORAS

➤ Implementación de un mejor sistema de inserción de temperatura

A pesar de la implementación de un proceso de centrifugado continuo sobre la materia orgánica triturada, los resultados experimentales revelaron una heterogeneidad significativa en la distribución térmica sobre la sección de mezclado donde se encuentra la materia orgánica triturada. Esta variabilidad térmica se atribuye principalmente a la configuración del sistema de calefacción. El secador de cabello, empleado como fuente de calor, se encontraba posicionado en un extremo del cilindro mezclador, lo cual generó un gradiente térmico pronunciado a lo largo de la muestra. Como consecuencia, las porciones de materia orgánica más cercanas al secador experimentaron temperaturas considerablemente superiores en comparación con aquellas ubicadas en el extremo opuesto. Esta disparidad térmica se ve exacerbada por la limitada capacidad de conducción térmica de la materia orgánica, lo cual dificulta la disipación uniforme del calor a través de la masa del material.

La falta de homogeneidad térmica tiene implicaciones directas en la eficiencia del proceso de secado. Las regiones más frías de la muestra requieren un tiempo de residencia mayor en el secador para alcanzar el nivel de humedad deseado, lo que puede prolongar significativamente el tiempo total de procesamiento. Además, la exposición a temperaturas excesivas en ciertas zonas puede dar lugar a la degradación térmica de algunos componentes orgánicos, afectando negativamente la calidad del producto final.

Para mitigar estos efectos adversos, se sugiere la implementación de un sistema de calentamiento más sofisticado, como un horno de convección o una resistencia eléctrica integrada en las paredes del cilindro mezclador. Estos sistemas permitirían una distribución más uniforme del calor a lo largo de la muestra, garantizando así un secado eficiente y homogéneo.

➤ Cambio de material encargado de cubrir el mecanismo

La elección del MDF de 6 mm como material de recubrimiento para el prototipo, aunque brindó versatilidad en el proceso de fabricación, presentó una limitante significativa la cual es su susceptibilidad a la humedad. Este material aglomerado, compuesto principalmente de fibras de madera y resinas, tiende a hincharse y perder resistencia mecánica cuando se expone a ambientes húmedos. En el contexto de un prototipo que entraría en contacto directo con materia orgánica en estado húmedo, esta característica compromete significativamente la durabilidad y el rendimiento del dispositivo.

La absorción de humedad por parte del MDF puede provocar deformaciones, delaminaciones y, en casos extremos, el colapso completo del recubrimiento. Estas

consecuencias no solo afectan la estética del prototipo, sino que también comprometen la integridad de los componentes internos y la funcionalidad del dispositivo en general.

Para mitigar estos riesgos y garantizar una mayor durabilidad del prototipo, se recomienda sustituir el MDF por materiales más resistentes a la humedad y la corrosión. Entre las alternativas más adecuadas se encuentran el acero inoxidable, maderas tropicales y compuestos poliméricos

- Cambio de pieza encargada de realizar transbordo de la materia orgánica desde la sección de trituración hacia la sección de mezclado

El componente encargado de transportar la materia orgánica desde la sección de trituración hacia la sección de mezclador presenta un diseño inadecuado. La geometría de la pieza, caracterizada por una transición brusca de 90° en el plano horizontal a vertical, combinada con una sección transversal circular de diámetro interior reducido de 60 mm, provoca una alta fricción y obstrucción del flujo de la materia orgánica triturada en la sección de trituración. Como consecuencia de estas limitaciones geométricas, se generan acumulaciones de material orgánico triturado en la zona de transición, resultando en bloqueos frecuentes y un rendimiento significativamente disminuido del proceso, por lo cual conlleva a rediseñar esta pieza por un diseño óptimo para el transbordo de la materia entre estas secciones.

ANEXOS

- **Anexo 1.** Diseño CAD del prototipo compostador a desarrollar

https://drive.google.com/drive/folders/1GTHbs1bXpKZhS-ABJo6YLcjMJfZ9svcR?usp=drive_link

- **Anexo 2.** Control eléctrico del prototipo compostador

https://drive.google.com/file/d/1-PL5cBLDDIJhj5rvNUrBi0irfHYRfOKU/view?usp=drive_link

- **Anexo 3.** Código de control del prototipo compostador

https://drive.google.com/drive/folders/1Bzm09bSCW8N2PdQopsJlfb8Q8FusggVx?usp=drive_link

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135.
- [2] CEDAF. (2018). Guía de compostaje para centros educativos.
- [3] Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2012). Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo.
- [4] VICENTE, F. F. J. (2021). DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMPOSTAJE AUTOMATIZADO PARA RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS GENERADOS EN EL MERCADO MUNICIPAL DE PASCUALES (Doctoral dissertation, PhD thesis, UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR).
- [5] Cueto Codorniú, A. N. (2017). Evaluación de tecnologías para la reutilización, valorización y disposición de residuos orgánicos.
- [6] Pereyra, M. S., Antonio, R. F., & Cruz, J. A. P. (2007). Ingeniería Mecatrónica. *TecnoCultura*, 40-40.
- [7] Expert Market Research. (2023). Mercado de Fertilizantes en Colombia – Por Producto (Orgánico, Inorgánico); Por Forma (Seco, Líquido); Por Tipo de Cultivo (Granos y Cereales, Legumbres y Oleaginosas, Cultivos Comerciales, Frutas y Vegetales, Otros); Dinámica del Mercado (2024-2032) y Panorama Competitivo
- [8] Porras, Á. C., & González, A. R. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Academia y virtualidad*, 9(2), 90-107.
- [9] Jaramillo Henao, G., & Zapata Márquez, L. M. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia.
- [10] Vargas, J. W. P., Buzón, J. A., Vergara, D. A., & Molina, E. (2011). Reducción de los residuos sólidos orgánicos en Colombia por medio del compostaje líquido. *Ingeniare*, (11), 37-44.

- [11] Martínez-Salcedo, C. A., Ramón-Valencia, J. A., & Pedroza-Rojas, Á. O. (2024). Estimación de emisiones y modelización del comportamiento ambiental de los gases de efecto invernadero para un relleno sanitario. *Revista Ingenio*, 21(1), 36-44.
- [12] Ballesteros, V. L., Cuadros Urrego, Y., Botero, S., & López Arango, Y. (2008). Factores de riesgo biológicos en recicladores informales de la ciudad de Medellín, 2005. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 26(2), 169-177.
- [13] Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2023). Índices de precios de insumos agrícolas y alimentos balanceados para animales
- [14] Herrán, J. A. F., Torres, R. R. S., Martínez, G. E. R., Ruiz, R. M., & Portugal, V. O. (2008). Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*, 4(1), 57-68.
- [15] Bohórquez Santana, W. (2019). El proceso de compostaje (Vol. 1). Universidad de la Salle.
- [16] Municipalidad de Ecazu. (2020). II Campaña Compostaje Residencial
- [17] Riancho, M. R. S., & Borges, E. R. C. (2002). Utilización de la composta en procesos para la remoción de contaminantes. *Ingeniería*, 6(3), 55-60.
- [18] Ing. Univ. Antioquia. (marzo, 2014). Diseño, construcción y prueba de un prototipo automático para compostaje
- [19] KÜNZEL Gunnar.(2005), THE MECHATRONICS DESIGN PROCESS
- [20] Odlare, M., Arthurson, V., Pell, M., Svensson, K., Nehrenheim, E., & Abubaker, J. (2011). Aplicación terrestre de residuos orgánicos: efectos sobre el ecosistema edáfico. *Energía Aplicada y con la actividad biológica*
- [21] Oviedo-Ocaña, E. R., Marmolejo-Rebellon, L. F., & Torres-Lozada, P. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18(1), 31-42.
- [22] Puerta Echeverri, S. M. (2004). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos.
- [23] Quintana, O.C., & Echeverri, S.M. (2004). Impacto del manejo integral de los residuos sólidos en la corporación universitaria lasallista.

- [24] Babla, M., Katwal, U., Yong, M.-T., Jahandari, S., Rahme, M., Chen, Z.-H., y Tao, Z. 2022. Value-added products as soil conditioners for sustainable agriculture. *Resources, Conservation and Recycling*, 178.
- [25] Quispe, L. A. 2015. El valor potencial de los residuos sólidos orgánicos, rurales y urbanos para la sostenibilidad de la agricultura *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6(1), 83-95.
- [26]
- [27] Moreno, R. A., Briceño, C. E. A., Valenzuela, N. L. M., y Hernández, H. J. A. 2019. Abonos orgánicos: una alternativa sustentable en la agricultura. In R. A. Moreno y C. J. L. Reyes (Eds.), *Temas selectos de sustentabilidad, un reto permanente para el nuevo milenio*.
- [28] Ayala Cadena, O. (2014). Prototipo de un compostador de uso doméstico automatizado con Arduino.
- [29] Eco Inventos, Green Technology. (2018). Compostador eléctrico portátil que convierte los residuos orgánicos en fertilizante en 24 h.
- [30] 360 soluciones Verdes. (2021). Compostera Automatizada TC-250
- [31] TMK. TMK compostadores
- [32] *Griferias Mundial*. (2023, 27 julio). *TUBO SANITARIO S/P TUBO MUNDIAL*
- [33] Tiscoradmdrstc. (2020, 17 agosto). *Tubos cuadrados - Tiscor*.
- [34] Jinan Daring Metal Products Co., Ltd. (2022). *Super Duplex Steel Uns S32304 Sheets And Plates*
- [35] Digmeta, & Digmeta. (2022, 2 febrero). Poliacetal: propiedades, usos e injeção.
- [36] Fischertechnik. (2020). *Eje metálico 235, plateado*.
- [37] DIPAC. (2022, 21 agosto). *Platinas acero inoxidable*.
- [38] *Linqing Deguan Bearing Co., Ltd.* (2024, 27 febrero). *Linqing Deguan Bearing Co., Ltd.*

- [39] Made in China. (2023). Precio de fábrica en China 4 pernos de chumacera de unidades de la brida de Unidades de rodamiento de bolas
- [40] Mercado Libre. (2021). *Bisagras de puerta de latón pulido Bisagras interiores de 3. (s. f.).*
- [41] Maderas Melendez. (2018, diciembre 15). Tableros y Maderas para todo el Perú.
- [42] Fabriles. (2024b, julio 31). *Motor monofásico WEG 1.5 HP 1750 RPM IP21 110/220V - Fabriles.*
- [43] Automatoncontrols.com.pk. (2023, 28 octubre). Chint Magnetic Contactor 3 Pole (NXC-18) > Automation & Controls. Automation & Controls. <https://www.automationcontrols.com.pk/product/chint-magnetic-contactor-3-pole-nxc-18/>
- [44] Jual Contactor Chint NXC - 18 7.5kW 3P 220V (1NO + 1NC) Jakarta | Chint Indonesia. (s. f.). <https://www.chint.id/product/contactor-chint-nxc-18-75kw-3p-220v-1no-1nc-p892214.aspx>
- [45] CHINT. (s. f.). Copyright © 2007 Programlama IdeaSoft Akıllı E-Ticaret. <https://www.kahramanelektromarket.com/urun/chint-9-13a-termik-role>
- [46] HYUNDAI. (s. f.). (2022). Низковольтного Оборудования HYUNDAI. <https://hyundai-b2b.ru/>
- [47] Aliexpress. Sensor Digital de temperatura y humedad, módulo de Sensor AM2302 DHT22 para Arduino
- [48] AZ-Delivery. (2022). ESP32 NodeMCU Module WLAN WiFi Development Board | Dev Kit C V2 mit CP2102 kompatibel mit Arduino
- [49] Mercado Libre. (2024). Pulsador Verde 22 Mm Y Pulsador Rojo 22 Mm
- [50] Multimport Macas. (2023). Pantalla OLED I2C display LCD 128X64 0.96in
- [51] Mercado Libre. (2024). Relé De Estado Sólido Ssr 25 Da 25A
- [52] Dolce E Bella. (2022). *Secador de pelo GAMA Salon Pro 4D. (s. f.).*
- [53] Julio Cesar Parra. (2024). Estrategias de aprovechamiento de las cáscaras de plátano (M. Paradisiaca Linn) y naranja (Citrus Sinensis L. Osbeck) obtenidos en el proceso de transformación gastronómica en los laboratorios de alimentos de la Corporación Universitaria Comfacaucá – Unicomfacaucá