

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecatrónica

Tesis

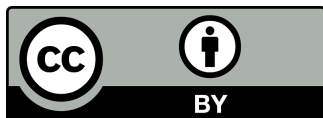
**Diseño de un sistema mecatrónico para la gestión de
residuos orgánicos en el ámbito doméstico en
Huancayo, 2025**

Jeferson Brayan Carhuaricra Chaca
Ruben Alexander Soriano Huaman

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecatrónico

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Frank William Zárate Peña
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 8 de Octubre de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

"Diseño de un sistema Mecatrónico para la Gestión de Residuos Orgánicos en el Ámbito Doméstico en Huancayo, 2025"

Autores:

Jeferson Brayan, Carhuaricra Chaca – Carrera profesional Ingeniería Mecatrónica
Ruben Alexander, Soriano Huaman – Carrera profesional Ingeniería Mecatrónica

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 15% de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI ☐ NO ☒
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores SI ☐ NO ☒
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**):
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI ☐ NO ☒

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

**La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)**

Ing. Frank Zárate Peña

ASESOR

AGRADECIMIENTOS

A nuestros docentes de la Facultad de Ingeniería y, en particular, de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecatrónica, por haber compartido sus conocimientos con generosidad, así como por su dedicación y guía a lo largo de nuestra formación profesional. Su enseñanza ha sido un pilar fundamental para alcanzar esta meta.

Al Ing. Frank Zárate Peña, por brindarnos su guía constante, por su dedicación y por el acompañamiento que nos ofreció a lo largo de este trabajo. Su trayectoria profesional y su compromiso fueron fundamentales para llevar adelante este proyecto.

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de investigación a nuestros padres, gracias a su esfuerzo, apoyo incondicional y amor constante, hemos podido alcanzar este objetivo. Su sabiduría y ejemplo han sido nuestra guía en este camino.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad el diseño de una compostadora mecatrónica doméstica con sistema de alimentación solar e integración de tecnologías IoT, orientada al tratamiento de residuos orgánicos en Huancayo. La problemática identificada está relacionada con la escasa implementación de tecnologías automatizadas accesibles para el manejo adecuado de los residuos orgánicos domiciliarios, lo cual genera acumulación de basura, emisión de gases nocivos y pérdida de materia útil que podría ser transformada en abono de calidad.

Frente a esa problemática, se plantea como objetivo diseñar una máquina compostadora automática para los hogares que controle los procesos de compostaje, considerando aspectos térmicos, de humedad, mezcla, trituración, ventilación y un monitorio en tiempo real. Para el desarrollo de este proyecto, se aplicó una metodología de diseño basada en la combinación de VDI 2221, VDI 2206, MIT y Big Picture, la cual permite estructurar el proceso de diseño de productos mecatrónicos desde la definición de requerimientos hasta la validación funcional permitiendo que la investigación aborde una visión holística, iterativa, interdisciplinaria y centrada en las necesidades del usuario. Además, se integraron simulaciones mecánicas, estructurales y de flujo para garantizar la viabilidad del sistema propuesto.

La estructura mecánica de la máquina considera un sistema de trituración mediante cuchillas fijas y móviles, diseñadas para reducir el tamaño de los residuos y facilitar su descomposición. El sistema de mezcla se compone de paletas inclinadas tipo escalonadas, distribuidas en espiral sobre un eje rotatorio, asegurando la aireación y homogeneización de los residuos. El control de temperatura se realiza mediante resistencias térmicas activadas automáticamente con base en sensores de temperatura, garantizando las condiciones necesarias para la fase termofílica del compostaje. Asimismo, el control de humedad se ejecuta a través de un sistema de atomización, activado por sensores de humedad del sustrato. La ventilación es gestionada por un extractor axial, regulado por un sensor de gases que permite la evacuación del exceso de gases y mantiene el flujo de oxígeno.

La unidad es alimentada por un sistema dual, por red domiciliar y por fotovoltaico autónomo, compuesto por paneles solares, regulador de carga, batería recargable y sistema inversor, lo que asegura independencia energética y sostenibilidad operativa. Todo el sistema es gobernado por un microcontrolador ESP32, que recopila datos en tiempo real y permite la supervisión remota mediante conectividad Wi-Fi y plataforma IoT, complementado por una interfaz visual para el usuario.

Los resultados obtenidos demuestran que el prototipo desarrollado cumple los objetivos planteados, logrando la trituración uniforme de los residuos orgánicos a un tamaño de 2–10 mm y su mezcla

funcional mediante paletas escalonadas, con un coeficiente de variación mínimo de 31 %, garantizando la mezcla del material. El sistema de control mantuvo la temperatura en el rango 40–65 °C, la humedad entre 45–60 % y la oxigenación por encima del 10 %, creando un entorno óptimo para la biodegradación. Finalmente, la plataforma IoT registró y transmitió en tiempo real estos parámetros con un error máximo de $\pm 0,3$ %, permitiendo monitoreo y control remoto confiables del proceso de compostaje. Estos resultados confirman la viabilidad técnica y tecnológica del sistema propuesto, constituyendo una alternativa sostenible para la gestión de residuos orgánicos domiciliarios en Huancayo y contribuyendo al desarrollo de prácticas de economía circular.

ABSTRACT

This research project aims to design a domestic mechatronic composter with solar-powered feeding and IoT technology integration, focused on the treatment of organic waste in Huancayo. The identified problem relates to the limited implementation of accessible automated technologies for the efficient management of household organic waste, which leads to the accumulation of garbage, the emission of harmful gases, and the loss of valuable material that could otherwise be transformed into high-quality compost.

In response to this problem, the objective is to design an automatic household composting machine that controls the composting processes, considering thermal, humidity, mixing, shredding, ventilation aspects, and real-time monitoring. For the development of this project, a design methodology was applied based on a combination of VDI 2221, VDI 2206, MIT, and Big Picture approaches, allowing the structuring of the mechatronic product design process from requirement definition to functional validation. This methodology ensures that the research addresses a holistic, iterative, interdisciplinary, and user-centered vision. Additionally, mechanical, structural, and flow simulations were integrated to guarantee the feasibility of the proposed system.

The mechanical structure of the machine includes a shredding system using fixed and rotating blades, designed to reduce the size of the waste and facilitate its decomposition. The mixing system consists of inclined, staggered paddles arranged spirally on a rotating shaft, ensuring proper aeration and homogenization of the waste. Temperature control is carried out through heating resistors that are automatically activated based on temperature sensor readings, ensuring the necessary conditions for the thermophilic phase of composting. Likewise, humidity control is managed through an atomization system activated by substrate humidity sensors. Ventilation is handled by an axial extractor, regulated by a gas sensor that evacuates excess gases and maintains oxygen flow.

The unit is powered by a dual system: household grid and autonomous photovoltaic, comprising solar panels, a charge controller, a rechargeable battery, and an inverter system, ensuring energy independence and operational sustainability. The entire system is governed by an ESP32 microcontroller, which collects real-time data and allows remote supervision via Wi-Fi connectivity and an IoT platform, complemented by a user visual interface.

The results obtained show that the developed prototype meets the stated objectives, achieving uniform shredding of organic waste to a size of 2–10 mm and functional mixing through staggered paddles, with a minimum coefficient of variation of 31%, ensuring proper material blending. The control system maintained the temperature within the 40–65 °C range, humidity between 45–60%, and oxygenation above 10%, creating an optimal environment for biodegradation. Finally, the IoT platform recorded and transmitted these parameters in real time with a maximum error of $\pm 0.3\%$,

allowing reliable remote monitoring and control of the composting process. These results confirm the technical and technological feasibility of the proposed system, offering a sustainable alternative for the management of household organic waste in Huancayo and contributing to the development of circular economy practice.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	V
DEDICATORIA.....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XXI
CAPITULO I.....	23
1 Planteamiento del problema	23
1.1 Descripción de la situación problemática.....	23
1.2 Formulación del problema.....	25
1.2.1 Problema General	25
1.2.2 Problemas Específicos.....	25
1.3 Objetivos de la investigación.....	25
1.3.1 Objetivo General	25
1.3.2 Objetivos Específicos	25
1.4 Justificación e importancia	26
1.4.1 Justificación teórica	26
1.4.2 Justificación práctica	27
1.4.3 Importancia de la investigación.....	27
1.5 Viabilidad de la investigación	28
1.5.1 Viabilidad a acceso a la información.....	28
1.5.2 Viabilidad Tecnológica	28
1.5.3 Viabilidad Técnica.....	29

1.6	Alcance y Limitaciones del estudio.....	30
1.6.1	Alcances	30
1.6.2	Limitaciones	30
1.7	Hipótesis y variables.....	31
1.7.1	Hipótesis general	31
1.7.2	Hipótesis específica	31
1.7.3	Variable independiente.....	31
1.7.4	Variable dependiente	33
1.7.5	Variable interviniente	33
	CAPITULO II.....	35
2	Marco Teórico	35
2.1	Antecedentes de la investigación.....	35
2.1.1	Antecedentes Nacionales.....	35
2.1.2	Antecedentes Internacionales	36
2.2	Bases Teóricas	39
2.2.1	Gestión de Residuos Orgánicos.....	39
2.2.2	Compostaje	46
2.2.3	Microrganismos.....	52
2.2.4	Maquinas compostadoras	54
2.2.5	Sistema electrónico y control	57
2.2.6	Sistema eléctrico de potencia	68
2.2.7	Sistema mecánico	70
2.2.8	Normativas y estándares.....	83
2.3	Definición de términos básicos.....	83
	CAPITULO III	85
3	Hipótesis y variables.....	85
3.1	Metodología de la investigación.....	85

3.1.1	Enfoque de la investigación.....	85
3.1.2	Tipo de investigación	85
3.1.3	Alcance de investigación.....	86
3.1.4	Diseño de investigación.....	87
3.2	Metodología del diseño	87
3.2.1	Diagrama de bloques	87
3.2.2	Diseño metodológico.....	89
3.3	Estado de la tecnología	90
3.3.1	Evaluación de requerimientos de usuario.....	92
3.3.2	Lista de necesidades y deseos.....	92
3.4	Análisis de solución.....	94
3.4.1	Black-Box (Caja negra).....	94
3.4.2	Caja blanca	95
3.4.3	Estructura de funciones	96
3.5	Evaluación conceptual.....	96
3.5.1	Matriz de selección de concepto.....	96
3.5.2	Matriz de evaluación de conceptos.....	97
3.5.3	Matriz morfológica.....	99
3.6	Evaluación técnica, tecnológica y económica.	105
3.6.1	Evaluación técnica.....	105
3.6.2	Evaluación tecnológica.....	106
3.6.3	Evaluación económica.....	106
3.7	Concepto solución del diseño	107
	CAPITULO IV	109
4	Desarrollo	109
4.1	Diseño mecánico.....	109
4.1.1	Cubeta de compostadora.....	109

4.1.2	Diseño del sistema de trituración	112
4.1.3	Diseño del sistema de mezclado.....	116
4.1.4	Diseño del sistema de transmisión	120
4.1.5	Diseño de complementos.....	139
4.2	Cálculos eléctricos de potencia.....	144
4.2.1	Requerimientos del sistema eléctrico por red domiciliaria	145
4.2.2	Requerimientos del sistema eléctrico por paneles solares.....	148
4.3	Balance energético y costos de operación	155
4.3.1	Balance energético detallado.....	155
4.3.2	Consumo por hora y por ciclo de trabajo	155
4.3.3	Costos asociados al consumo eléctrico	155
4.3.4	Comparativa con alternativas tecnológicas	156
4.4	Diseño de sistema electrónico	156
4.4.1	Selección de Componentes Electrónicos.....	156
4.5	Diseño de sistema de control.....	161
4.5.1	Funcionamiento del sistema de control	161
4.5.2	Control del motor	163
4.5.3	Control del atomizador (humidificador).....	165
4.5.4	Control de aireador.....	165
4.5.5	Lazo de control cerrado en la resistencia térmica	166
4.5.6	Sistema de monitoreo IoT	168
4.6	Diseño del sistema de gestión de residuos orgánicos domésticos	176
4.6.1	Introducción al sistema propuesto	176
4.6.2	Etapas del sistema.....	177
4.6.3	Comparación con el manejo tradicional	179
CAPITULO V		182
5	Resultados.....	182

5.1	Presentación de los resultados	182
	CONCLUSIONES.....	199
	RECOMENDACIONES	202
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	203
	ANEXOS.....	213
	Anexo A: Glosario de términos.....	213
	Anexo B: Matriz de consistencia.....	215
	Anexo C: Evaluaciones de requerimiento de usuario.....	216
	Anexo D: Código de programación para ESP32.....	219
	Anexo E: Radiación y rendimiento fotovoltaico en Huancayo	226
	Anexo E: Costos y presupuestos	227
	Anexo F: Planos	228

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 <i>Proporciones aproximadas de materiales en la mezcla para compostaje.</i> ..	50
Tabla 2.2 <i>Comparativa técnica del AISI 304 Y EL AISI 316.</i>	71
Tabla 2.3 <i>Comparación de materiales para cuchillas.</i>	73
Tabla 2.4 <i>Materiales para sistemas de transmisión.</i>	81
Tabla 3.1 <i>Deseos y métricas.</i>	93
Tabla 3.2 <i>Matriz de selección de concepto</i>	97
Tabla 3.3 <i>Matriz de evaluación de conceptos</i>	98
Tabla 3.4 <i>Matriz morfológica.</i>	99
Tabla 3.5 <i>Evaluación técnica.</i>	105
Tabla 3.6 <i>Evaluación tecnológica.</i>	106
Tabla 3.7 <i>Evaluación económica.</i>	107
Tabla 4.1 <i>Comparación de sistemas eléctricos.</i>	144
Tabla 4.2 <i>Máxima demanda para hallar transformador</i>	146
Tabla 4.3 <i>Protecciones eléctricas.</i>	148
Tabla 4.4 <i>El análisis simulado de la irradiación.</i>	149
Tabla 4.5 <i>Comparación de principales paneles solares.</i>	151
Tabla 4.6 <i>Costos de consumo eléctrico.</i>	156
Tabla 4.7 <i>Alternativas tecnológicas.</i>	156
Tabla 4.8 <i>Comparación de pines de entrada y salida en microcontroladores.</i>	157
Tabla 4.9 <i>Designación de pines para ESP32.</i>	157
Tabla 4.10 <i>Comparación de motores.</i>	159
Tabla 4.11 <i>Valores de fabricante de resistencia térmica.</i>	167
Tabla 4.12 <i>Tópicos de comunicación</i>	171
Tabla 4.13 <i>Comparativa de sistemas.</i>	180
Tabla 4.14 <i>Resultados de desempeño.</i>	180
Tabla 5.1 <i>Valores reales de humedad y valores mostrados en el sistema IoT</i>	198
Tabla 5.2 <i>Valores reales de humedad y valores mostrados en el sistema IoT</i>	198

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 <i>Terminales de entrada y salida de ESP32</i>	59
Figura 2.2 <i>Control PID</i>	65
Figura 2.3 <i>Control ON OFF</i>	66
Figura 3.1 <i>Diagrama de bloques VDI 2221 etapas y resultados</i>	88
Figura 3.2 <i>Diagrama de bloques VDI 2206 etapas y resultados</i>	89
Figura 3.3 <i>Fusión de metodologías</i>	90
Figura 3.4 <i>Diagrama de estado de tecnología</i>	91
Figura 3.5 <i>Caja negra</i>	94
Figura 3.6 <i>Caja blanca</i>	95
Figura 3.7 <i>Estructura de funciones</i>	96
Figura 3.8 <i>Bosquejo del concepto F</i>	103
Figura 3.9 <i>Bosquejo del concepto A</i>	104
Figura 3.10 <i>Bosquejo del concepto C</i>	105
Figura 3.11 <i>Evaluación de diseño</i>	107
Figura 3.12 <i>Vista explosionada del concepto F</i>	108
Figura 4.1 <i>Explosionado de los sistemas mecánicos</i>	109
Figura 4.2 <i>Diseño de cubeta</i>	111
Figura 4.3 <i>Prueba de elementos finitos de cubeta</i>	111
Figura 4.4 <i>Diseño de cuchillas principal y secundaria</i>	114
Figura 4.5 <i>Prueba de elementos finitos de cuchilla 1</i>	115
Figura 4.6 <i>Prueba de elementos finitos de cuchilla 2</i>	115
Figura 4.7 <i>Prueba de vibración de cuchilla</i>	116
Figura 4.8 <i>Diseño de paletas</i>	118
Figura 4.9 <i>Prueba de elementos finitos de paleta</i>	118
Figura 4.10 <i>Análisis de fatiga de paleta</i>	119
Figura 4.11 <i>Simulación del movimiento del fluido</i>	119
Figura 4.12 <i>Diseño de sistema de transmisión y acoples</i>	121
Figura 4.13 <i>Análisis de fuerza de torsión de eje de transmisión</i>	122
Figura 4.14 <i>Análisis de fuerza de torsión de acoples</i>	122
Figura 4.15 <i>Ductos de ventilación y filtro</i>	126
Figura 4.16 <i>Tapa para circulación de ventilación</i>	126
Figura 4.17 <i>Simulación de flujo de aire</i>	128
Figura 4.18 <i>Recipiente para carbón activado</i>	129

Figura 4.19 <i>Análisis estático de carga de recipiente para carbón.</i>	129
Figura 4.20 <i>Diseño de soporte térmico.</i>	132
Figura 4.21 <i>Análisis de resistencia de soporte térmico.</i>	132
Figura 4.22 <i>Soporte para aislante térmico.</i>	133
Figura 4.23 <i>Análisis de resistencia de cámara de compostaje.</i>	133
Figura 4.24 <i>Separación del motor</i>	134
Figura 4.25 <i>Análisis de resistencia de Separación del motor.</i>	134
Figura 4.26 <i>Aislante térmico</i>	135
Figura 4.27 <i>Simulación de temperatura producida por la resistencia.</i>	135
Figura 4.28 <i>Distribución de la temperatura a lo largo de los nodos de la cubeta.</i> ...	136
Figura 4.29 <i>Gradiente de temperatura en la cubeta desde la parte superior hasta la base</i>	136
Figura 4.30 <i>Comparación de la respuesta térmica del sistema con y sin aislamientos sin</i> <i>asilamiento.</i>	137
Figura 4.31 <i>Perfil de temperatura a lo largo de la cubierta cilíndrica con y sin</i> <i>asilamiento</i>	137
Figura 4.32 <i>Distribución comparativa de la temperatura en la estructura de soporte</i>	138
Figura 4.33 <i>Diseño de carcasa.</i>	140
Figura 4.34 <i>Diseño de tapa.</i>	140
Figura 4.35 <i>Ensamble de carcasa y tapa.</i>	141
Figura 4.36 <i>Tapas internas.</i>	141
Figura 4.37 <i>Base de carcasa.</i>	142
Figura 4.38 <i>Análisis de resistencia de base de carcasa.</i>	142
Figura 4.39 <i>Diseño de carcasa para pantalla OLED.</i>	143
Figura 4.40 <i>Diseño de contenedor de agua</i>	143
Figura 4.41 <i>Análisis estático del tanque de agua.</i>	144
Figura 4.42 <i>Onda sinusoidal rectificado.</i>	146
Figura 4.43 <i>Amplitud de rizado.</i>	147
Figura 4.44 <i>Esquema de fuente de alimentación por red doméstica.</i>	148
Figura 4.45 <i>Irradiación en Huancaayo.</i>	149
Figura 4.46 <i>Horas sol pico.</i>	150
Figura 4.47 <i>Horas sol pico en el año.</i>	151
Figura 4.48 <i>Simulación de panel solo monocristalino.</i>	153

Figura 4.49 <i>Producción de energía por paneles solares.</i>	153
Figura 4.50 <i>Conexión serie paneles.</i>	154
Figura 4.51 <i>Esquema de fuente de alimentación por paneles solares.</i>	154
Figura 4.52 <i>Esquema del sistema dual.</i>	154
Figura 4.53 <i>Conexión de motor mediante Mosfet.</i>	159
Figura 4.54 <i>Conexión general del sistema electrónico.</i>	160
Figura 4.55 <i>Diagrama de flujo del sistema de control.</i>	162
Figura 4.56 <i>Diagrama de funcionamiento.</i>	163
Figura 4.57 <i>Variación de PWM.</i>	164
Figura 4.58 <i>Esquema de conexión para control de motor DC.</i>	164
Figura 4.59 <i>Esquema de conexión para control de atomizador eléctrico.</i>	165
Figura 4.60 <i>Esquema de conexión para control de aireador.</i>	166
Figura 4.61 <i>Control lazo cerrado para la resistencia térmica.</i>	167
Figura 4.62 <i>Parámetros de control.</i>	168
Figura 4.63 <i>Diagrama de flujo de sistema de monitoreo.</i>	168
Figura 4.64 <i>Distribución de sistema de monitoreo.</i>	169
Figura 4.65 <i>Declaración de variables para MQTT en Micropython.</i>	169
Figura 4.66 <i>Código de publicación a MQTT.</i>	170
Figura 4.67 <i>Configuración de MQTT.</i>	170
Figura 4.68 <i>Tópicos de comunicación.</i>	172
Figura 4.69 <i>Bloques de conexión de estado, tiempo y ciclos.</i>	172
Figura 4.70 <i>Código del bloque de función 1 Node_RED.</i>	173
Figura 4.71 <i>Código del bloque de función 2 Node_RED.</i>	173
Figura 4.72 <i>Visualización de alertas dentro de la interfaz.</i>	174
Figura 4.73 <i>Bloques de conexión de temperatura y humedad.</i>	174
Figura 4.74 <i>Bloques de conexión de Start y Stop.</i>	175
Figura 4.75 <i>Código del bloque de función 3 y 4.</i>	175
Figura 4.76 <i>Visualización de alertas dentro de la interfaz.</i>	176
Figura 4.77 <i>Etapas sobre la gestión de residuos orgánicos domésticos.</i>	177
Figura 4.78 <i>Segregación de residuos.</i>	177
Figura 4.79 <i>Recolección de residuos.</i>	178
Figura 4.80 <i>Tratamiento de residuos.</i>	178
Figura 4.81 <i>Uso de compost.</i>	179
Figura 4.82 <i>Análisis gráfico de desempeño.</i>	181

Figura 5.1 <i>Ensamblaje de sistema de trituración.</i>	182
Figura 5.2 <i>Vista frontal de cubeta.</i>	183
Figura 5.3 <i>Limite de corte de paleta inferior.</i>	183
Figura 5.4 <i>Limite de corte de paleta media y superior.</i>	184
Figura 5.5 <i>Relación entre la fuerza y el tiempo en condición de vacío.</i>	184
Figura 5.6 <i>Relación entre la velocidad y el tiempo en condición de vacío.</i>	184
Figura 5.7 <i>Relación entre la fuerza y el tiempo con condición de carga.</i>	185
Figura 5.8 <i>Relación entre la velocidad y el tiempo con condición de carga.</i>	185
Figura 5.9 <i>Análisis estático de cuchilla principal.</i>	186
Figura 5.10 <i>Análisis estático de cuchilla secundaria.</i>	186
Figura 5.11 <i>Dinámica de funcionamiento.</i>	186
Figura 5.12 <i>Velocidades en la fase de trituración.</i>	187
Figura 5.13 <i>Comportamiento de fluido en funcionamiento.</i>	187
Figura 5.14 <i>Comportamiento en la zona superior de trituración.</i>	188
Figura 5.15 <i>Sistema de mezclado</i>	188
Figura 5.16 <i>Análisis estático de paletas.</i>	189
Figura 5.17 <i>Movimiento de mezclado con volumen inicial.</i>	189
Figura 5.18 <i>Comportamiento del mezclado con un volumen de 2.6 L</i>	190
Figura 5.19 <i>Simulación del mezclado con un volumen de 1.8 L</i>	190
Figura 5.20 <i>Coeficiente de varianza en el sistema de mezclado</i>	191
Figura 5.21 <i>Control PID temperatura en la etapa mesofílica.</i>	192
Figura 5.22 <i>Simulación de la temperatura en el sistema en la etapa mesofílica.</i>	192
Figura 5.23 <i>Control PID temperatura en la etapa termofílica.</i>	193
Figura 5.24 <i>Simulación de la temperatura en el sistema en la etapa termofílica.</i>	193
Figura 5.25 <i>Simulación de la humedad en el sistema.</i>	194
Figura 5.26 <i>Nivel de oxígeno.</i>	194
Figura 5.27 <i>Sistema de oxigenación.</i>	195
Figura 5.28 <i>Menú de opciones en la interfaz IoT.</i>	195
Figura 5.29 <i>Interfaz dentro de opción “TERRA”.</i>	196
Figura 5.30 <i>Interfaz dentro de opción “REPORTE”.</i>	196
Figura 5.31 <i>Valores de Temperatura y humedad en el proceso.</i>	197
Figura 5.32 <i>Valores de Temperatura y humedad en IoT.</i>	197

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos urbanos representa uno de los desafíos ambientales más urgentes en las ciudades latinoamericanas. En este contexto, la fracción orgánica constituye un componente significativo que, en muchos casos, no recibe un tratamiento adecuado. Esta situación se agrava en el ámbito domiciliario, donde la falta de tecnologías accesibles y prácticas sostenibles conlleva a que los residuos biodegradables sean desechados junto con la basura común, desaprovechando su potencial como recurso para la producción de compost.

En la ciudad de Huancayo, esta problemática adquiere particular relevancia. A pesar de los esfuerzos municipales por mejorar la recolección y promover la segregación en la fuente, los hogares continúan siendo un punto crítico en la cadena de gestión. La ausencia de soluciones tecnológicas adaptadas al entorno doméstico limita la participación ciudadana en el tratamiento de sus propios desechos, lo que afecta la eficiencia del sistema global y la sostenibilidad ambiental de la región.

Ante a esta realidad, el presente trabajo propone el desarrollo de una máquina compostadora automática de uso doméstico, como herramienta para fortalecer la gestión integral de residuos orgánicos en Huancayo. El objetivo principal es facilitar el tratamiento en origen mediante un sistema mecatrónico que automatice el proceso de compostaje, reduciendo la intervención humana y optimizando las condiciones necesarias para la descomposición. Esta solución busca reducir la carga de residuos sólidos urbanos y fomentar una cultura de responsabilidad ambiental en el entorno familiar, promoviendo prácticas alineadas con los principios de la economía circular.

El diseño del sistema se abordó desde una perspectiva multidisciplinaria, integrando componentes mecánicos, electrónicos, eléctricos y de control. Para estructurar el proceso de desarrollo, se adoptaron metodologías reconocidas internacionalmente como VDI 2221, VDI 2206, MTI y Big Picture, que permitieron una aproximación ordenada e integral. Estas herramientas facilitaron la identificación de requerimientos funcionales, la selección de materiales y tecnologías adecuadas, así como la validación técnica del sistema mediante simulaciones computacionales.

El proyecto incluyó cálculos teóricos para dimensionar los principales componentes del sistema, considerando variables como volumen de residuos, humedad, temperatura y tiempo de descomposición. Las simulaciones realizadas en SolidWorks y Matlab permitieron evaluar la viabilidad técnica y funcional del prototipo en un entorno doméstico, asegurando que su implementación resulte práctica y viable.

Los resultados obtenidos evidencian que la propuesta es técnica y funcionalmente viable, ofreciendo una alternativa concreta para el aprovechamiento de residuos orgánicos a nivel domiciliario. Además, el sistema puede integrarse a estrategias municipales de recolección

diferenciada y políticas nacionales de educación ambiental, contribuyendo al fortalecimiento de la gestión local y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Finalmente, el documento se organiza en cinco capítulos: el primero expone la problemática local y los desafíos actuales en la gestión de residuos orgánicos domiciliarios; el segundo presenta el marco teórico, revisando experiencias similares y tecnologías existentes; el tercero describe la metodología empleada en el diseño del sistema; el cuarto detalla el desarrollo técnico de la solución, incluyendo el diseño de los elementos mecánicos y electrónicos, así como los cálculos teóricos para definir sus componentes y funcionamiento; y el quinto capítulo expone los resultados obtenidos, el diseño final del sistema mecatrónico, las simulaciones realizadas y los planos elaborados para su futura construcción. El documento concluye con las conclusiones y recomendaciones, donde se sintetizan los principales aportes de la investigación y se plantean posibles líneas de mejora y aplicación futura.

CAPITULO I

1 Planteamiento del problema

1.1 Descripción de la situación problemática

Dentro de los principales problemas medioambientales que enfrenta el planeta se encuentra el manejo de los residuos sólidos, cuya generación aumenta cada año como consecuencia del crecimiento poblacional descontrolado en todos los países. Según el informe [1], en 2023 se generaron más de 2,100 millones de toneladas de residuos sólidos a nivel global, y se proyecta que esta cifra aumentará en un 70 % hacia 2050, alcanzando aproximadamente los 3,800 millones de toneladas.

En los países ingresos medios y bajos, el 50% de los residuos generados corresponde a materia orgánica, la cual en su mayoría no se aprovecha [2]. Estos residuos, potencialmente valorizables, terminan en vertederos mal gestionados que emiten metano, un gas con alto impacto en el efecto invernadero. Como consecuencia, se contaminan el aire, los suelos y diversas fuentes de agua, afectando de manera directa a comunidades vulnerable [3]. Ante ello, el PNUMA recalca la importancia de invertir en infraestructuras adecuadas, promover el consumo responsable y fomentar el reciclaje y el compostaje [1].

Diversos países potencia a nivel mundial demuestran que es posible enfrentar el problema de la gestión de los residuos sólidos mediante políticas y tecnologías adecuadas. Estos países implementan programas de compostaje doméstico, entre otras medidas, logrando aumentar la tasa de residuos municipales reciclados del 19 % al 48 % [4].

En Alemania, por ejemplo, se implementa una estrategia nacional de economía circular que promueve la reducción en el consumo de materias primas y el cierre de ciclos de materiales, con el fin de preservar su valor durante el mayor tiempo posible [5]. Desde 1985, el país establece la recolección diferenciada de biorresiduos, lo que genera un cambio ambiental significativo. En 2022, se tratan 15,75 millones de toneladas de residuos, de los cuales el 53 % corresponde a plantas de compostaje, evidenciando el aprovechamiento energético mediante la digestión anaeróbica [6].

Japón también constituye un referente en la gestión de residuos gracias a sus políticas nacionales de reciclaje. La ciudad de Osaki, en la prefectura de Miyagi, alcanza un 80 % de reciclaje de los residuos generados, principalmente a través del compostaje. Los restos de alimentos se recolectan tres veces por semana en contenedores especiales, se

trituran y se mezclan con restos de poda para su descomposición, y el compost obtenido se utiliza en las granjas locales [7].

Estas experiencias internacionales evidencian que es posible controlar la problemática global de los residuos sólidos y reducir su impacto ambiental. Sin embargo, en el Perú la situación es más crítica: se generan cerca de 8 millones de toneladas de residuos sólidos municipales al año, de los cuales apenas 148,500 toneladas se reciclan. La gran mayoría termina en vertederos y rellenos sanitarios sin tratamiento adecuado, liberando gases contaminantes y lixiviados peligrosos [8]. Aunque el gobierno promueve campañas de sensibilización e impulsa proyectos de valorización, muchos de ellos se encuentran aún en construcción, lo que refleja la carencia de infraestructura suficiente para la separación y tratamiento de residuos en las ciudades del país [9].

En el marco normativo se cambiaron leyes en pro de mejorar la gestión de los residuos sólidos, como la ley N°32212, que fortalece las directrices para la reducción y el aprovechamiento de los residuos sólidos mediante la supervisión y fiscalización por parte de la OEFA hacia los municipios, así mismo al SENACE se le asignó la evaluación de proyectos para nuevas infraestructuras [10]. A pesar de las medidas adoptadas, sigue siendo obstaculizada a nivel local, debido a limitaciones infraestructurales para la separación y tratamiento de los residuos. También existen desafíos culturales frente al desconocimiento de la población sobre técnicas de aprovechamiento como el compostaje y la escasa participación de la ciudadanía [11]. Y finalmente, la falta de herramientas y tecnologías como las máquinas de compostaje que suelen ser muy costosas y no están adaptadas para el uso doméstico, además de que no suelen estar disponibles dentro del mercado peruano [9].

Muchas de las soluciones actuales están enfocadas en el sector industrial, sin considerar que uno de los agentes principales en generar residuos orgánicos son los hogares. Por ende, nace la necesidad de desarrollar una tecnología accesible que permita enfrentar los desafíos ambientales en el país. En este sentido, el diseño de un sistema mecatrónico para el compostaje doméstico no se concibe de manera aislada, sino como un eslabón dentro de la gestión integral de los residuos orgánicos, que comprende etapas como la generación, separación en la fuente, recolección, tratamiento y valorización. La presente propuesta se enfoca en la etapa de tratamiento y valorización mediante el compostaje, aportando una solución tecnológica accesible que puede complementar las estrategias municipales de recolección y las políticas nacionales de segregación y educación ambiental.

Por ello, se plantea el desarrollo de una máquina compostadora automática de uso doméstico que facilite la transformación de residuos orgánicos en abono mediante sensores y sistemas IoT. Este diseño busca reducir la intervención humana, optimizar las condiciones de descomposición y permitir que los hogares gestionen sus propios desechos, evitando su disposición en vertederos. De esta manera, se fomenta la economía circular y se contribuye al cuidado del medio ambiente en Huancayo.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

¿Cómo diseñar una máquina compostadora automática que controle los procesos de compostaje en entornos domésticos?

1.2.2 Problemas Específicos

¿Cómo lograr una trituración uniforme y una mezcla funcional de los residuos?

¿Cómo mantener la temperatura, humedad y oxigenación según parámetros establecidos sin necesidad de una intervención manual?

¿Cómo monitorear y recopilar datos del compostaje en tiempo real?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una máquina compostadora automática que controle los procesos de compostaje en entornos domésticos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Elaborar un mecanismo que realice la trituración uniforme y la mezcla funcional de los residuos durante el proceso de compostaje para favorecer su descomposición.

Plantear un control PID para regular temperatura y gestione la humedad y oxigenación mediante lógica ON/OFF durante el proceso compostaje.

Desarrollar un sistema de monitoreo y seguimiento en tiempo real mediante IoT para supervisar las variables críticas del proceso de biodegradación.

1.4 Justificación e importancia

1.4.1 Justificación teórica

El compost es un abono natural rico en nutrientes, obtenido mediante la descomposición de los residuos orgánicos por la acción de microorganismos. Sin embargo, el proceso manual de compostaje suele prolongarse varios meses, debido a la necesidad de mantener condiciones específicas como la temperatura, la humedad, la oxigenación y la relación carbono-nitrógeno. Diversas investigaciones han evidenciado que la optimización del compostaje requiere un control riguroso de estas variables, ya sea a través de intervenciones manuales o mediante el uso de máquinas especializadas que aceleren la biodegradación [12].

En los últimos años se han desarrollado tecnologías orientadas al tratamiento de residuos orgánicos a nivel industrial; no obstante, la investigación enfocada en dispositivos de uso doméstico continúa siendo limitada. En el Perú se han realizado estudios sobre sistemas de control para automatizar el proceso de compostaje, aunque en la mayoría de los casos las propuestas no se dirigen al ámbito domiciliario o carecen de mecanismos que regulen integralmente todas las variables críticas [13]. La presente investigación busca superar estas limitaciones mediante el diseño de una máquina compostadora automática, concebida bajo criterios ergonómicos para el uso doméstico y capaz de controlar de manera precisa los parámetros determinantes del proceso.

El diseño se fundamenta en principios de biodegradación controlada, mecánica de materiales, termodinámica y tecnologías de monitoreo y control. De esta manera, se plantea una solución innovadora y sostenible para los hogares, que facilite la transformación de la materia orgánica en compost y contribuya a la gestión integral de los residuos sólidos. Asimismo, esta propuesta permitirá reducir significativamente la cantidad de desechos orgánicos no valorizados, disminuyendo la presión sobre los vertederos municipales. Finalmente, la validación de tecnologías avanzadas y el conocimiento generado servirán como base para futuras investigaciones, fortaleciendo el desarrollo de soluciones

adaptadas al contexto local y fomentando prácticas ambientales responsables desde el ámbito doméstico .

1.4.2 Justificación práctica

La implementación de una máquina automatizada busca aportar soluciones concretas y efectivas frente a la problemática actual de gestión de residuos orgánicos en Huancayo. Uno de los factores determinantes para garantizar la viabilidad y funcionalidad de esta propuesta es el empleo de software de diseño asistido por computadora (CAD). Estas herramientas permiten la elaboración de modelos tridimensionales detallados que facilitan tanto el análisis estructural como el funcional de cada componente antes de su fabricación. Programas como SolidWorks y AutoCAD posibilitan la simulación de esfuerzos mecánicos mediante análisis de elementos finitos, asegurando que la estructura de la máquina sea resistente y óptima. Asimismo, permiten seleccionar materiales adecuados considerando variables como la humedad, la corrosión o el calor, además de evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación.

De igual forma, el uso de software CAD permite analizar la distribución de cargas, así como el flujo de aire y calor dentro del sistema de compostaje, lo que favorece la detección temprana de posibles fallas y contribuye a la optimización del diseño. En la parte electrónica, se empleará el software Proteus, que facilita la creación y simulación de los circuitos de control. Para la lectura y procesamiento de datos de los sensores se utilizará Matlab y sus herramientas asociadas. Finalmente, la programación de la lógica de control se desarrollará en lenguaje Python, lo que asegura un funcionamiento integral, flexible y escalable del sistema.

1.4.3 Importancia de la investigación

La enorme presencia de materia biodegradable en los vertederos según muchas estadísticas del país demuestra la falta de conciencia ambiental y demuestra las problemáticas ambientales que existen [14]. Muchos de estos residuos orgánicos son desperdiciados por falta de conocimiento de métodos de aprovechamiento de materias orgánicas. Frente a esto el desarrollo de una máquina compostera automática se ve como una solución viable, ya que fomentará una educación ambiental en cada hogar y a su vez contribuirá en la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, contaminación de suelos y agua. Así mismo, demostrará que el uso de tecnologías de vanguardia

como sensores y algoritmos de control, permiten una optimización práctica e innovadora en el proceso del compostaje sin la necesidad de la intervención humana y conocimientos específicos sobre esto facilitando su uso.

Por ende, el resultado de este estudio brindará un registro de referencia sobre la eficiencia energética, economía circular, la selección de materiales resistentes e integración de modelos matemáticos para validar los procesos que podrán ser usados y adaptados para fortalecer la adopción de tecnologías verdes en favor del medio ambiente y de la población.

1.5 Viabilidad de la investigación

1.5.1 Viabilidad a acceso a la información

La investigación resulta viable en cuanto al acceso a la información, ya que se dispone de fuentes suficientes y confiables para su desarrollo. Se cuenta con el acceso a repositorios digitales de universidades peruanas que contienen artículos científicos, tesis y documentos técnicos en formato digital. Además, se tiene disponibilidad de bases de datos nacionales e internacionales con información actualizada sobre compostaje, diseño mecánico, automatización y áreas afines al proyecto.

Del mismo modo, es posible consultar libros especializados, investigaciones previas y publicaciones científicas en bibliotecas digitales como IEEE Xplore y ScienceDirect, lo que facilita el acceso a información relevante sobre innovaciones tecnológicas en compostaje, diseño de maquinaria, así como en normativas y estándares de calidad, eficiencia y seguridad aplicables.

Asimismo, se dispone de la posibilidad de recabar información a través de entrevistas con expertos en la región, quienes pueden aportar conocimientos técnicos y experiencias prácticas de gran valor. Esta interacción con profesionales especializados contribuirá a validar la funcionalidad y eficacia del proyecto, garantizando que la investigación se sustente en una base teórica y práctica sólida, apoyada en datos confiables y actualizados.

1.5.2 Viabilidad Tecnológica

El proyecto es tecnológicamente viable gracias a la disponibilidad de herramientas digitales avanzadas para el diseño y la simulación de los sistemas mecánicos y electrónicos. En particular, se cuenta con software de modelado CAD que permite la creación detallada de los componentes de la máquina compostadora. Estas herramientas posibilitan la optimización del diseño, la

selección adecuada de materiales y la realización de análisis de esfuerzos y deformaciones, lo que garantiza la resistencia y durabilidad del sistema.

En el ámbito electrónico y eléctrico, se dispone de software especializado para la simulación de circuitos y el desarrollo de sistemas de control. Estas herramientas son fundamentales para validar previamente la automatización del proyecto antes de su implementación física, lo que contribuye a reducir costos y minimizar errores en la fase de fabricación.

La integración de estas tecnologías digitales no solo mejora la precisión del diseño, sino que también agiliza los tiempos de desarrollo y asegura un resultado confiable y funcional.

1.5.3 Viabilidad Técnica

El proyecto es técnicamente viable, ya que cuenta con los conocimientos, herramientas y metodologías necesarias para su desarrollo e implementación. El equipo de trabajo dispone de experiencia en el manejo de diversas plataformas de diseño y simulación, lo que permite aplicar un enfoque estructurado en cada etapa del proyecto: concepción del diseño, evaluación de alternativas, optimización de componentes e integración de sistemas. Este procedimiento asegura un proceso de desarrollo ordenado y respaldado en criterios técnicos sólidos.

La disponibilidad de recursos tecnológicos posibilita el diseño y la simulación de los componentes bajo estándares de calidad, lo que garantiza tanto la funcionalidad como la durabilidad del sistema final. Asimismo, se ha previsto la incorporación de criterios de seguridad y sostenibilidad desde la etapa inicial del diseño, lo que fortalece la confiabilidad del producto y asegura su alineación con prácticas responsables en el ámbito de la ingeniería.

Un aspecto fundamental de esta viabilidad radica en la consideración de principios reconocidos internacionalmente para el desarrollo de máquinas seguras, confiables y de alta calidad. Del mismo modo, se contemplan las características que debe reunir el producto final para ser utilizado de manera segura y efectiva, asegurando que el sistema cumpla con los estándares técnicos y funcionales exigidos para su correcta operación en un entorno doméstico.

1.6 Alcance y Limitaciones del estudio

1.6.1 Alcances

Los alcances de este proyecto se enfocarán en el desarrollo conceptual, el diseño, la simulación y la validación en entornos virtuales de una máquina compostadora doméstica, asegurando su funcionalidad y viabilidad. El diseño de la máquina compostadora se centrará en su estructura, automatización e integración de componentes, priorizando la resistencia de los materiales a la humedad y corrosión, así como un sistema de aireación y mezcla. Se desarrollará un modelo CAD detallado y se realizarán simulaciones para evaluar su resistencia y flujo de aire. A nivel electrónico, se implementará un sistema de control con sensores para monitorear temperatura, humedad y gases, optimizando el proceso mediante algoritmos programados en microcontroladores. La validación se hará a través de simulaciones sin pruebas físicas ni fabricación de un prototipo. El estudio abarca sólo residuos domésticos y no incluirá estrategias de comercialización ni análisis de normativas de mercado. Los entregables consistirán en memoria de diseño, modelos CAD, esquemas electrónicos y simulaciones del proceso, asegurando una evaluación técnica y económica del proyecto.

1.6.2 Limitaciones

Económico:

El presente estudio se limita al diseño y simulación de la máquina compostadora, sin llegar a la construcción de un prototipo físico. Por este motivo, no se generan restricciones económicas directas en el desarrollo de la investigación. No obstante, se considera necesario proyectar un costo de fabricación accesible para los futuros usuarios, lo cual se evaluará mediante estudios de mercado posteriores.

Documental:

Si bien existen investigaciones relacionadas con el compostaje a nivel industrial, se dispone de escasa información detallada acerca de máquinas específicas para el ámbito doméstico. En consecuencia, será preciso cubrir ciertos vacíos de información a partir de investigaciones previas y de la adaptación de estudios similares, lo que representa una limitación en la base documental.

Técnicas:

La validación del diseño se efectuará únicamente a través de simulaciones en software especializado. En este sentido, no será posible evaluar factores reales como la resistencia mecánica frente al uso prolongado, ni se podrán recopilar datos experimentales sobre el proceso de compostaje en condiciones prácticas. Esta restricción limita la comprobación empírica del rendimiento del sistema, quedando la validación circunscrita a un entorno virtual.

1.7 Hipótesis y variables

1.7.1 Hipótesis general

El diseño de una máquina compostadora automática para entornos domésticos permitirá un control del proceso de compostaje con una efectividad del 99 %.

1.7.2 Hipótesis específica

El diseño del sistema de trituración y mezclado permitirá obtener partículas menores a 10 mm y lograr una mezcla funcional con hasta 35 % menos de variabilidad, optimizando la integración y el proceso de compostaje.

La automatización del control de temperatura entre 40°C y 65°C, humedad relativa entre 45% y 60% y oxigenación superior al 10% asegurará la estabilidad de las condiciones internas necesarias para el proceso del compostaje, reduciendo la necesidad de intervención manual.

El sistema de monitoreo y seguimiento en tiempo real mediante IoT proporcionará datos con un margen de error de +/- 0.3% sobre el estado del compostaje, permitiendo un monitoreo constante de la máquina y del producto.

1.7.3 Variable independiente

En este estudio, la variable independiente corresponde al diseño de la máquina automática de compostaje doméstico, considerando cómo influyen las características de sus sistemas principales (mecánico, eléctrico, electrónico, de control e IoT) en el rendimiento teórico esperado del equipo. La propuesta busca asegurar un diseño seguro y funcional desde un enfoque teórico, sin la necesidad de realizar pruebas experimentales.

A continuación, se describen brevemente los sistemas que conforman la máquina y los indicadores que permitirán evaluar su diseño:

Sistema Mecánico

Este sistema abarca la parte física y operativa de la máquina, incluyendo la estructura que soporta la carga y el mecanismo encargado de mezclar y airear los residuos orgánicos. Su correcto funcionamiento influye de manera directa en la calidad y eficiencia del proceso de compostaje.

- Capacidad máxima (en kg).
- Fuerza de torque (en Nm).
- Tipo de material (resistente a humedad y corrosión).
- Nivel de aislamiento térmico (en porcentaje).
- Cantidad ideal de aire (en litros por minuto).

Sistema Eléctrico

Suministra la energía necesaria para el funcionamiento de la máquina, integrando componentes como motores y fuentes de alimentación. Su diseño debe garantizar un uso seguro de la electricidad.

- Corriente(A)
- Voltaje (V)
- Potencia de alimentación (kW)

Sistema Electrónico

Permite la captura de datos clave sobre el estado del compost mediante sensores. La precisión en las mediciones resulta esencial, dado que la información obtenida orienta las decisiones del sistema automático.

- Exactitud de los sensores (%)
- Margen de error de los sensores (%)

Sistema de Control

Se encarga de gestionar y coordinar de manera automática las funciones de la máquina. Su desempeño es crítico, pues regula las operaciones en función de los datos proporcionados por los sensores, garantizando condiciones óptimas para el compostaje.

- Tiempo de respuesta del microcontrolador (ms)

Sistema IoT (Monitoreo en tiempo real)

Facilita el acceso remoto y constante del usuario al proceso de compostaje, transmitiendo datos en tiempo real hacia una plataforma digital de fácil uso desde cualquier dispositivo con conexión a internet.

- Tiempo de transmisión (en segundos).
- Rapidez de transmisión y visualización (latencia en segundos).
- Cantidad de información generada y almacenada (capacidad en MB).

1.7.4 Variable dependiente

El compost es un producto resultante de un proceso de descomposición controlada de materiales orgánicos, que se lleva a cabo mediante la acción de microorganismos.

Grado de maduración

Es una medida que indica qué tan avanzado está el proceso de descomposición de la materia orgánica. Determina la estabilidad química y biológica del producto final, garantizando que sea seguro y nutritivo para aplicarse a cultivos o jardines domésticos.

- Tiempo de descomposición
- Relación C/N final
- Color y textura del compost

Parámetros químicos

Con variables que determinan su estabilidad, madurez y calidad final. Estas condiciones químicas influyen directamente en el proceso de descomposición, afectando la actividad microbiana y definiendo la idoneidad del compost como abono agrícola o doméstico.

- Porcentaje de Carbono
- Dióxido de carbono
- Amoníaco

1.7.5 Variable interviniente

En el diseño de la máquina automática de compostaje doméstico, existen factores externos e internos que pueden influir en su rendimiento y efectividad. Estas variables intervinientes incluyen aspectos normativos, ambientales, operativos, materiales y humanos, que, aunque no se controlan directamente, afectan la calidad final del compost y la eficiencia del proceso.

Factores normativos:

- Decreto Supremo N°057-2004-PCM (Reglamento Ley General de Residuos Sólidos).

- Normas técnicas peruanas 201.207:2020(Parámetros técnicos sobre el compost)

Factores ambientales:

- Temperatura ambiental
- Humedad del entorno

CAPITULO II

2 Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes Nacionales

El antecedente [13] reportó una investigación con el objetivo de diseñar un prototipo de máquina el cual sería capaz de transformar residuos orgánicos en compost, en la empresa Inversiones Dramar S.A.C. Este estudio surgió a partir de la problemática de gestionar eficientemente grandes cantidades de residuos orgánicos que son generados en las operaciones diarias de la empresa, los cuales anteriormente eran procesados mediante métodos manuales y artesanales, lo cuales requieren tiempo, espacio físico mayor adicionalmente a la mano de obra. Durante la investigación, el autor decidió aplicar un enfoque innovador el cual combinaba principios teóricos con herramientas digitales de diseño, el cual facilita el diseño antes de proceder a la fabricación física del equipo. Se llevó a cabo análisis detallados de cada uno de los componentes que formó parte del sistema, empleando simulaciones digitales para evaluar su comportamiento bajo diferentes escenarios de funcionamiento. En el ámbito mecánico, se utilizó el programa SolidWorks, herramienta especializada en diseño mecánico el cual permitió una simulación virtual aspectos técnicos como resistencia estructural, rendimiento del sistema de mezcla y condiciones críticas bajo esfuerzos mecánicos. Mediante estas simulaciones se pudo verificar previamente cómo reaccionaron los materiales seleccionados, así como definir el mejor diseño antes de su construcción. En cuanto para la parte de electrónica y de control, recurrieron al software Proteus, el cual permitió diseñar, probar y validar a través de simulaciones los circuitos eléctricos también el comportamiento de los sensores antes de implementarlos físicamente. El resultado de esta investigación fue construir un prototipo cuyo material principal es el aluminio, el cual fue seleccionado por su ligereza, resistencia y facilidad de manejo, capaz de procesar aproximadamente 12 kg de residuos orgánicos y obtener compost en un periodo aproximado de un mes. Este resultado a comparación con los métodos tradicionales empleados anteriormente por la empresa nos da una optimización de tiempo y espacio. Asimismo, esta investigación aporta conocimientos de control de manera efectiva las condiciones internas necesarias para obtener compost, así como la

temperatura y humedad, gracias a un sistema de control que involucra sensores y actuadores.

2.1.2 Antecedentes Internacionales

El estudio presentado en [15] describe un sistema de compostaje automatizado para desechos orgánicos generados en un mercado, donde retratan la problemática ambiental que existe en la gestión de residuos orgánicos, teniendo como foco de investigación los mercados municipales. Ante esta situación, los autores plantearon como solución una máquina automática de para transformar los desechos orgánicos de un mercado municipal en abono agrícola. Este sistema automatizado utilizó la tecnología de Arduino, que se encargó de regular los parámetros como la temperatura y la humedad, ayudando a evitar una supervisión constante. De modo que con ayuda de este microcontrolador pudieron mantener las variables específicas estables durante el ciclo de compostaje, permitiendo obtener un sistema eficaz y una producción más rápida. El compostaje duró 94 días dentro de la máquina, en el que se transformaron cerca de 32 kg de residuos orgánicos en aproximadamente 8 kg de abono fertilizante. Durante el proceso, el control monitorea continuamente la temperatura interna para corroborar que se mantuviera dentro de los rangos entre 35 y 60 °C. A su vez, se controló la humedad, manteniéndola en niveles de 40 y 70 %. Después de las pruebas experimentales, los autores destacaron la factibilidad de uso y la eficiencia de la máquina compostadora, porque permitió reducir el tiempo de producción y esfuerzo humano. Posteriormente, determinaron que el compost obtenido estaba dentro de los estándares internacionales definidos por organismos como la FAO. Los resultados más importantes que destacan son el nivel de materia orgánica del 21,83 % con un valor de pH de 6,31 ligeramente ácido y con valores equilibrados de nutrientes como carbono, nitrógeno, fósforo y potasio, lo que asegura su calidad como abono. Este antecedente demuestra la aplicación real de la automatización en el compostaje mediante tecnologías como el Arduino puede facilitar y optimizar el control del proceso. Además, ofrece los parámetros y condiciones ideales que deberían considerarse a la hora de diseñar una máquina de compostaje doméstica, especialmente en relación con el monitoreo en tiempo real y al control automatizado del proceso.

El trabajo desarrollado en [16] propone el diseño de una máquina compostadora rotatoria que aprovecha la energía solar como su fuente de energía enfocado para un uso doméstico. Esta máquina cuenta con un sistema triturador rotatorio

mediante un eje que permite reducir a partículas pequeñas la materia orgánica con una aceleración de 350 rpm durante 5 min, para luego pasar a la etapa de compostaje. La integración uniforme que proporciona este método de trituración permite acelerar la descomposición de la materia debido a que la descomposición se da más rápido entre menor dimensión tengan los residuos, ya que facilita el trabajo del microorganismo. Este diseño tiene una capacidad de procesar 20 kg de residuos orgánicos, y cuenta con un sistema fotovoltaico mediante paneles solares policristalinos, un regulador de voltaje y baterías solares, lo que él da un plus a esta máquina porque cuenta con tecnología renovable para su alimentación energética y sostenibilidad ambiental. Para su sistema electrónico y de control cuenta con sensores de temperatura y humedad y gases para controlar todas las variables internas. Y su control se da por medio de un microcontrolador Arduino, donde a su vez proporciona una información en tiempo real mediante una app, permitiendo el monitoreo y configuración de parámetros de la máquina facilitando su operación. Para comprobar el funcionamiento de su sistema de control lo realizaron mediante simulaciones en Matlab Simulink, así como también para garantizar el correcto funcionamiento de su motor eléctrico DC y de su sistema de transmisión mediante poleas y correas, validando su diseño y su operatividad. Este antecedente aporta conocimientos respecto al uso de energías renovables, así como la integración de parámetros óptimos para un correcto proceso de compostaje proporcionando una tecnología detallada.

En la investigación citada en [17] detalla una tesis sobre máquinas semiautomáticas de compostaje a partir de desechos orgánicos domiciliarios, en la que se describe la construcción de un prototipo diseñado semiautomático para el tratamiento de 2.5 kg de capacidad de carga neta para una familia de 5 personas promedio en Ecuador, la carga se distribuye en materia orgánica y aserrín. Para el diseño mecánico, se consideró el diseño de una tolva para la recepción de los desechos, una trituradora para reducir el tamaño de la materia y una mezcladora para combinar los compuestos, y para validar esto, realizaron pruebas de elementos finitos sometidos a cargas, así como también cálculos teóricos para el diseño. Para la parte eléctrica y electrónica diseñaron un PCB para las conexiones de sus principales elementos como los sensores, motores entre otros. Y en la parte de Control se realizó en la IDE de Arduino. El diseño consta de 4 procesos que son el depósito de desechos orgánicos, trituración, mezclado y depósito de compost en etapas separados, no obstante por temas

económicos solo realizaron la etapa de mezclado, que es donde pasa el mayor tiempo de vida. En sus características del diseño detalla que utilizó una resistencia eléctrica de 700 W que le permitió obtener 60°C por 4 horas seguidas. Y En sus conclusiones, informan que realizaron pruebas experimentales combinando 2,5 kg de residuos orgánicos con 200 gramos de aserrín, obteniendo cerca de 900 gramos de abono fertilizante, dando una reducción de la materia ingresada en un 60 a 80%, el costo estimado de la construcción \$ 760. Y la producción final del compost semi maduro tomó un tiempo de 15 días, y completamente maduro en 30 a 60 días. Esta tesis aporta un diseño detallado de la estructura, electrónico y de control, aparte de que muestra datos experimentales en cuanto a el tiempo de producción, según los parámetros que consideraron dentro de su lazo de control.

El trabajo desarrollado por [18] describe una investigación sobre el desarrollo de un sistema respirométrico automatizado de varios recipientes para evaluar la descomposición de materias primas de compostaje detallan la construcción de un sistema respirométrico automatizado para evaluar la descomposición que presentan las materias primas en varios recipientes. En este estudio, se hicieron uso de varios recipientes de capacidad de 2, lo cual permite la evaluación paralela de distintas muestras, y pudieron validar que las mediciones realizadas tuvieron una precisión del 95%. Además, reportan que durante las pruebas registraron CO₂ con un rango de 150 a 250 mg/kg/h y con una concentración de oxígeno superior al 18%. También, detallan que para realizar las pruebas el sistema operó bajo condiciones ambientales controladas con temperaturas entre 50°C a 60°C, y una humedad relativa de 55% con un margen de error de $\pm 5\%$, todos estos parámetros fueron controlados por un algoritmo. Para la parte electrónica, se hicieron uso de sensores calibrados para detectar variaciones en las condiciones ambientales respecto a las condiciones iniciales y se utilizó un microcontrolador para el monitoreo en tiempo real del proceso respirométrico. Para corroborar la aplicabilidad del proyecto se realizaron pruebas experimentales y simulaciones de dinámica de fluidos en softwares especializados, lo que permitió una estabilidad durante todo el ciclo de las mediciones. Este antecedente aporta detalles técnicos específicos sobre la medición en tiempo real y el control automatizado de parámetros críticos como los rangos de emisión de CO₂, la precisión de los sensores, y las condiciones ambientales controladas, que a la hora de diseñar una máquina automatizada de compost son esenciales para dimensionar y validar el sistema de monitoreo, así

como demuestra que es posible integrar algoritmos de control para ajustar automáticamente las condiciones del proceso, reduciendo la necesidad de supervisión constante y fortaleciendo la viabilidad técnica del proyecto.

El antecedente [19] presenta el diseño y fabricación de una máquina mezcladora de paletas con tambor horizontal, el cual su función principal es la homogeneización de productos en polvo, destaca que el sistema de mezclado usado en esta investigación garantiza una distribución uniforme de los materiales, reduciendo la segregación y mejorando la calidad del producto final.; según el análisis, el tambor cilíndrico en forma de “U” facilita el flujo del material dentro del sistema , minimizando la acumulación del producto en las paredes del equipo en cuanto a las paletas se encuentra diseñado para generar movimientos convectivos y difusivos lo que permite el correcto mezclado incluso cuando se tiene material de diferente tamaño y volumen, este sistema tiene una velocidad que varía de 20 y 40 RPM, dependiendo del tipo de material, logrando tiempos de mezclado que varían entre 5 y 15 minutos por lote . Además se añadió un sistema de cuchillas de alta velocidad contribuye a la desintegración de aglomerados; y el diseño del sistema de descarga incluye válvulas de mariposa o compuertas deslizantes para una extracción óptima del material sin que llegue a afectar que el proceso continúe. Estos diseños se aplicarán en el diseño de una máquina compostadora, donde el mezclado uniforme es fundamental para poder controlar la humedad y temperatura; también nos da referencia sobre la velocidad de mezclado ayudaría a regular la actividad microbiana. Todos estos factores son clave para una descomposición adecuada de los residuos orgánicos.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Gestión de Residuos Orgánicos

Los residuos orgánicos se definen como materiales de origen biológico generados por actividades humanas o naturales, caracterizados por su condición biodegradable, es decir, su capacidad de descomponerse de manera natural a través de la acción de microorganismos como bacterias y hongos. Entre ellos se incluyen los restos de alimentos, los residuos de jardinería y ciertos subproductos industriales, que constituyen una fracción significativa de los desechos producidos por la sociedad.

La adecuada gestión de estos residuos es esencial, ya que permite reducir el impacto ambiental y, al mismo tiempo, aprovechar oportunidades de valorización mediante procesos como el compostaje, la digestión anaeróbica y otros mecanismos orientados a la producción de energía renovable o fertilizantes orgánicos. Dichos procesos no solo contribuyen a mitigar la acumulación de desechos, sino que también fortalecen modelos de sostenibilidad basados en la economía circular.

En el caso del Perú, los residuos orgánicos representan una proporción considerable de los desechos generados en los hogares, la industria y la agricultura. De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (MINAM), cerca del 56 % de los residuos sólidos producidos en las ciudades peruanas corresponden a este tipo de desechos [20]. Por ello, una correcta gestión de los residuos orgánicos se presenta como un eje estratégico para disminuir la presión sobre los vertederos, reducir emisiones contaminantes y promover la reutilización mediante la generación de compost y biogás, productos que aportan valor tanto ambiental como económico.

Clasificación de los residuos orgánicos

Los residuos orgánicos pueden clasificarse según el origen y naturaleza, como en las siguientes categorías:

- **Residuos Alimentarios**

Este tipo de residuos provienen de las comidas y los restos que se generan durante la preparación de alimentos. Suelen estar compuestos de cascara de frutas y vegetales, restos de pan, huesos de animales, residuos de productos lácteos, productos en mal estado entre otros. Tal como señala en [21], cada consumidor en el hogar desperdicia cerca de 67.34 Kg por Habitante/Año en el aspecto de pérdida y desperdicio de alimentos.

- **Residuos de Jardinería**

Comprende todo material vegetal de los jardines como los restos de la poda de plantas, césped cortado, ramas, hojas secas y flores marchitas. Este tipo de material suele ser rico en humedad por lo que son buenas opciones para practicar el compostaje o alimentar lombrices productoras de humus.

- **Residuos Agroindustriales**

Los residuos generados por las agroindustrias consisten en transformar materias primas de origen animal o vegetal en artículos con valor agregado mediante procesos industriales. En este sector agropecuario e industrial se

realiza el procesamiento de materia como la caña de azúcar, el café, el maíz y otros cultivos. Sus desechos suelen incluir bagazo, cascara de grano, tallos de plantas, pulpas y otros subproductos que necesitan una correcta gestión. Y existen métodos y alternativas de aprovechamiento como biorrefinerías, bioplásticos, bicomcombustibles entre otros [22].

- **Residuos Industriales Biodegradables**

Suele provenir de la industria alimentaria y otros sectores de producción, que genera residuos orgánicos a base de subproductos del procesamiento de pescado, carne, frutas, vegetales, cereales y productos lácteos. Este tipo de productos son altamente nutritivos y aprovechables para fertilizantes y biogás.

Características de los residuos orgánicos

Los residuos orgánicos comparten propiedades que los hacen susceptibles a procesos de valorización para su aprovechamiento, suelen ser:

- **Biodegradabilidad**

La principal e icónica característica de todo residuo orgánico es su capacidad de poder descomponerse de forma natural por la acción de microorganismos, como bacterias y hongos. Este proceso se puede llevar de forma aeróbica o anaeróbica. Pero, su tasa de descomposición depende enteramente de factores como la humedad, la temperatura y el tipo de material. Esta propiedad permite que se puedan aprovechar en la generación de compost o biogás. Como se indica en [23], los residuos orgánicos son ricos en carbono y nitrógeno, lo que los convierte en una fuente eficaz para ser transformados mediante procesos biológicos en productos útiles como compost o bioenergía.

- **Humedad**

Los materiales orgánicos suelen tener agua en su composición química, lo que favorece en la descomposición, pero también propone desafíos logísticos de transporte y almacenamiento. El contenido de agua presente en los residuos puede superar el 80% en los residuos alimentarios frescos [24]. La humedad favorece a la actividad microbiana, también puede aumentar el volumen de los residuos a gestionar. Y uno de los desafíos es poder controlar y evitar la emisión de líquidos lixiviados que puedan contaminar al medio ambiente. La FAO determina que el control de la humedad es primordial en cualquier estrategia de valorización, puesto que

afecta directamente en la digestión anaeróbica y en la estabilidad del compost [25].

- **Contenido Energético**

Este tipo de materia suele tener un alto contenido energético, lo que los convierte en una fuente potencial para la producción de biogás mediante la descomposición anaeróbica. Y este último suele ser aprovechado para generar energía eléctrica o de calor, contribuyendo a la mitigación de gases de efecto invernadero. En un estudio en Nigeria se determinó que el biogás derivado de residuos orgánicos tiene un potencial de 644,020 TJ por año, suficiente para reemplazar el 18% del consumo total de combustibles domésticos, como queroseno y carbón, y reducir el uso de leña en un 70% [26].

- **Composición Heterogénea**

La composición de la mayoría de los desechos orgánicos varía según su origen. Por ejemplo, los residuos alimentarios son ricos en carbohidratos, proteínas y grasas, mientras que los residuos de jardinería tienden a contener más celulosa, compuestos fibrosos y ricos en humedad. Esta variabilidad es un aspecto para tener en cuenta para la correcta selección de los métodos de tratamiento y de selección de tecnologías para la valorización de cada tipo de residuo.

Impacto ambiental de los residuos orgánicos

El manejo inadecuado de los desechos orgánicos contribuye significativamente en aspectos negativos hacia el medio ambiente, estos impactos son:

- **Emisión de gases de efecto invernadero**

La mayoría de los desechos orgánicos que terminan en vertederos y rellenos sanitarios sin un tratamiento adecuado, y que suelen estar en contacto con otro tipo de materias genera metano (CH_4), uno de los principales agentes generadores del efecto invernadero, que tiene un potencial de calentamiento global de 25 veces superior al dióxido de carbono (CO_2). Un estudio afirmó que alrededor del 47% de los residuos sólidos municipales que se disponen a vertederos mal gestionados contribuyeron en un 6% en la emisión de gases de efecto invernaderos, siendo el metano atmosférico quien tiene una mayor presencia en estas emisiones, y ha ido en incremento durante los últimos años contribuyendo en las terminaciones de muchos glaciares [27].

- **Contaminación del suelo y del agua**

La exposición no controlada de los residuos orgánicos, mezclados con otros tipos de residuos sólidos, a diferentes efectos climatológicos como el calor, genera la segregación de líquidos lixiviados que contaminan el suelo y fuentes de aguas cercanas. Siendo un riesgo crítico para la salud pública, porque contamina fuentes de agua subterráneas y superficiales, además la exposición a los suelos de los lixiviados causa su degradación y pérdida de biodiversidad. Un informe indicó que el 76% de los municipios del país carecen de rellenos sanitarios y que suelen arrojar las basuras a diferentes botaderos lo que refleja los serios problemas ambientales que genera esto [28].

- **Proliferación de plagas**

Los residuos orgánicos mal gestionados o tratados suelen atraer plagas como roedores, moscas y otros insectos, lo que contribuye en la proliferación de diversas enfermedades y problemas sanitarios. Además, la acumulación de estos desechos da lugar a olores desagradables y condiciones insalubres. En 2023 se declaró una emergencia sanitaria a causa de un crecimiento exponencial por la enfermedad del dengue a causa de residuos sólidos dispuestos de forma ineficiente en los hogares que se volvieron potenciales criaderos de zancudos [29].

Generación de residuos orgánicos por hogar

La generación de residuos orgánicos en los hogares es un factor crucial en la gestión de residuos sólidos urbanos y tiene implicaciones tanto a nivel de manejo como de sostenibilidad:

- **Estadísticas nacionales y locales**

Durante el año 2023, se recolectaron cerca de 8,7 millones de toneladas de residuos sólidos a nivel nacional, representando el 56% de tipo orgánico, de los cuales solo el 2,26% es valorizado, una cifra alarmante para un país que busca enfrentar este problema medio ambiental. A nivel local, en la ciudad de Huancayo se recolectaron 164 927 toneladas de basura, y de parte orgánico 95 964 representando por el 58% del total. De esta cifra solo el 1.67% recibió una valorización orgánica. Se estima que en Huancayo la generación per cápita de residuos domiciliarios de habitante por día es de 0.55Kg; es decir que cada habitante genera un promedio de 0.32Kg por día [20].

- **Factores que influyen en la generación**

La cantidad de residuos generado radica en la cantidad de miembros de una familia, las costumbres alimenticias y el acceso a productos procesados. En ciudades grandes por lo general existe un consumo elevado de productos procesados y envasados por lo que en zonas urbanas genera un mayor volumen de residuos. Por otro lado, en zonas rurales los hogares producen menos residuos a que predomina el consumo de alimentos frescos.

Problemas de recolección de los residuos orgánicos

Existen aspectos esenciales que perjudican la recolección de los residuos orgánicos municipales y domiciliarios como:

- **Recolección ineficaz**

La recolección municipal de los residuos orgánicos en el país tiende a ser ineficiente debido a que no suelen contar con una cobertura total de todas las zonas locales ya sea por falta de maquinarias, falta de personal calificado entre otras. A ello se suma el recojo de los desechos sin separación, una mezcla de diversos residuos que terminan en vertederos donde liberan gases y líquidos lixiviados.

- **Infraestructura insuficiente**

En muchas ciudades a lo largo del país existe una carencia de infraestructura adecuada para el tratamiento y manejo de los desechos sólidos, la falta de contenedores separadores aumenta los costos operativos y la cantidad de residuos que terminan en botaderos. Si bien existen muchos proyectos que ya están trabajando como la reciente planta de tratamiento de Tiranapampa en Huancayo, existen muchos otros que se encuentran en construcción o ideación de proyectos, lo que resalta que falta mucho para encaminar el país hacia una correcto manejo y aprovechamiento de los residuos [30].

- **Falta de separación adecuada**

Existe una falta de cultura de segregación de residuos por parte de la población, solo en zonas específicas se practica la separación de residuos, lo cual perjudica a la hora de aplicar métodos de aprovechamiento como generación de compost, reciclaje.

- **Legislación ambiental en Perú**

En el Perú, la gestión integral de los residuos sólidos se encuentra regulada por el Decreto Legislativo N.º 1278, el cual ha sido fortalecido recientemente con la promulgación de leyes como la Ley N.º 31896 y la Ley N.º 32212. La Ley N.º 31896 promueve la industrialización del reciclaje como mecanismo de valorización de residuos, incentivando la inversión en infraestructura tecnológica para el reaprovechamiento de materiales, así como la articulación entre el sector público y privado. Esta norma modifica artículos clave del D.L. N.º 1278, incluyendo el artículo 6 sobre principios de la gestión, el artículo 15 sobre valorización, y el artículo 21, que asigna responsabilidades concretas al Ministerio del Ambiente (MINAM) para fomentar tecnologías limpias [31]. Por su parte, la Ley N.º 32212 introduce medidas para fortalecer aún más la valorización de residuos orgánicos, como el compostaje y la generación de biogás, promoviendo el aprovechamiento de los residuos orgánicos con un impacto positivo en la salud pública y el medio ambiente. Además, establece lineamientos para que los gobiernos locales impulsen programas de segregación en la fuente, educación ambiental y desarrollo de infraestructura sostenible con financiamiento a través del Fondo Nacional del Ambiente [10]. Estas normas refuerzan un enfoque de economía circular, donde la reducción, reutilización y reciclaje son pilares fundamentales para lograr una gestión responsable de los residuos sólidos en el país.

Valorización de residuos orgánicos

Una de las estrategias para poder hacer frente a los problemas ambientales por el mal manejo de los desechos orgánicos es la valorización de estos, debido a que permite transformar y aprovechar estos residuos para volverlos útiles, los principales métodos son:

- **Compostaje**

El compostaje es un proceso aeróbico que hace aprovechamiento de la descomposición de la materia orgánica para transformarlo en compost, que es un abono natural y rico en nutrientes que se utiliza para mejorar la calidad del suelo en la agricultura y la jardinería. Este proceso ecológico contribuye en la reducción de residuos y al ciclo de nutrientes de la naturaleza.

- **Digestión Anaeróbica**

Este proceso consiste en una descomposición de los residuos orgánicos en ausencia del oxígeno, lo que da como resultando la generación de biogás, que está compuesto químicamente por metano. Este biogás se puede aprovechar como una fuente de energía renovable. Además de ello, en el proceso de digestivo se puede utilizar como fertilizante orgánico.

- **Producción de biocombustibles**

Se puede producir biocombustibles como bioetanol o biodiesel, que se aprovecharía como alternativas de los combustibles fósiles, mediante procesos de fermentación, digestión anaeróbica y pirolisis. Este tipo de proceso fomenta la diversificación de fuentes de energía renovables e impulsa una economía circular.

2.2.2 Compostaje

El compost es el producto resultante de un proceso natural de descomposición de los residuos orgánicos, tales como restos de alimentos y residuos de jardinería. En este proceso intervienen principalmente microorganismos (bacterias y hongos) que transforman la materia biodegradable en un abono natural rico en nutrientes. Este material contribuye a mejorar la calidad del suelo, favorece el crecimiento saludable de las plantas y reduce la dependencia de fertilizantes químicos.

Diversos estudios señalan que el compost mejora la estructura del suelo al incrementar su capacidad de retención de agua y al generar un entorno favorable para la proliferación de microorganismos y organismos beneficiosos, como las lombrices [32]. De este modo, el compostaje se configura como una estrategia clave para la reducción y valorización de los residuos orgánicos domiciliarios, además de contribuir a la mitigación del impacto ambiental ocasionado por su acumulación.

El proceso de compostaje se desarrolla en cuatro fases sucesivas, cada una con características específicas que garantizan la adecuada transformación de la materia orgánica:

Fases de compostaje

- **Fase mesófila (25-45°C): La activación microbiana**

Durante la fase mesófila del compostaje, la temperatura del sustrato se incrementa progresivamente hasta alcanzar aproximadamente los 40 °C,

como resultado de la intensa actividad metabólica de los microorganismos mesófilos, entre los que destacan bacterias del género *Bacillus* y diversos hongos filamentosos. Estos organismos inician la descomposición de compuestos orgánicos de fácil degradación, tales como azúcares, almidones y proteínas simples.

El aumento de la temperatura en esta etapa es crucial, ya que prepara el ambiente para la transición hacia la fase termófila y garantiza una biooxidación sostenida del material orgánico. La eficiencia y correcta evolución de esta fase dependen de factores como la aireación, el contenido de humedad y la adecuada relación carbono/nitrógeno del sustrato, variables que determinan en gran medida la calidad del compost final [33].

- **Fase termófila (45-70°C): La etapa higienización**

Esta fase es importante para la descomposición e higienización del compost. Durante esta etapa, la temperatura de la pila se eleva por encima de los 45°C, llegando a temperaturas entre 55 °C y 60 °C, lo que favorece la actividad microbiana de los termófilos, quienes son bacterias responsables de degradar compuestos como la celulosa y la lignina. Durante este proceso también se eliminan patógenos, semillas de maleza y parásitos, asegurando un compost seguro para su uso agrícola. Considerando los márgenes de temperatura que debe de alcanzar en esta etapa, la humedad ideal se sitúa entre el 40% y 60%, porque niveles superiores pueden desplazar el oxígeno y crear condiciones anaeróbicas [34].

- **Fase de enfriamiento (25-45°C): La estabilización biológica**

En esta fase, la temperatura del sustrato desciende progresivamente hasta aproximarse a la temperatura ambiente (cerca de 20 °C). Durante este período, se produce una intensa colonización de la biomasa por parte de hongos ligninolíticos, como *Trichoderma* y *Aspergillus niger*, así como de actinomicetos del género *Streptomyces*. Estos microorganismos desempeñan un papel fundamental en la descomposición de compuestos más complejos, como la lignina y la celulosa presentes en los residuos.

La actividad microbiológica en esta etapa no solo estabiliza el material orgánico, sino que también favorece la formación de compuestos húmicos y la neutralización de sustancias fitotóxicas. Asimismo, se produce

geosmina, un metabolito responsable del característico olor a “tierra mojada”, indicador de la maduración progresiva del compost.

De acuerdo con investigaciones recientes, la acción de estos microorganismos mejora la calidad final del compost, incrementando su capacidad de retención hídrica y su valor agronómico [35].

- **Maduración: La culminación del ciclo**

La fase de maduración constituye la última etapa del compostaje y tiene como finalidad garantizar la estabilidad química y biológica del producto final. Durante este proceso, el compost experimenta una estabilización avanzada que reduce significativamente la actividad microbiana residual y disminuye la emisión de gases como dióxido de carbono y amoníaco [36].

Esta fase resulta esencial para prevenir la presencia de efectos fitotóxicos en las plantas y asegurar que los nutrientes se liberen de manera gradual y controlada. De esta forma, el compost adquiere las características necesarias para ser utilizado de manera segura como enmienda orgánica en la agricultura y la jardinería.

Factores en el compostaje

La velocidad de descomposición y la calidad del compost dependen de varios factores esenciales. Entre ellos, la temperatura influye en la actividad microbiana, mientras que la humedad adecuada facilita la descomposición sin generar condiciones anaeróbicas. El oxígeno es crucial para evitar malos olores y favorecer la respiración de los microorganismos. Además, la proporción adecuada entre carbono y nitrógeno garantiza un equilibrio óptimo en el proceso.

- **Temperatura**

Mantener una temperatura adecuada en el proceso de compostaje es fundamental, ya que temperaturas superiores a 70 °C pueden matar microorganismos que son beneficiosos y ralentizar el proceso [37]. Por ello las temperaturas varían según la fase de compostaje que se encuentra:

Fase mesófila (20-40 °C): Los microorganismos comienzan a descomponer la materia orgánica.

Fase termófila (50-70 °C): Ocurre la mayor descomposición y se eliminan patógenos y semillas de malezas.

Fase de maduración (<40 °C): El compost se estabiliza y está listo para su uso.

- **Humedad**

El nivel de humedad durante el proceso es fundamental para la obtención de compost porque si la humedad es menor que el 40%, el proceso de descomposición se ralentiza, y esto se debe a que los microorganismos necesitan agua para su actividad metabólica y por otro lado, si la humedad excede más de un 60% puede provocar condiciones anaeróbicas, generando malos olores y dificultando la aireación de todo el sistema. entonces el nivel de humedad óptimo para el compost debe estar entre 40% y 60%, permitiendo que los microorganismos realicen su trabajo de manera confiable. [38].

- **Oxígeno**

El compostaje se desarrolla bajo condiciones aeróbicas, es decir, en presencia de oxígeno, lo cual permite que los microorganismos descompongan la materia orgánica mediante rutas metabólicas que no generan subproductos tóxicos ni gases de efecto invernadero. Cuando el oxígeno es limitado o inexistente, el proceso se vuelve anaeróbico, favoreciendo la formación de compuestos como metano (CH_4), óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), que no solo generan olores desagradables, sino que también tienen un impacto directo en la calidad del aire y en el calentamiento global.

- **Relación carbono y nitrógeno**

El compostaje requiere una proporción adecuada entre carbono y nitrógeno para mantener la actividad microbiana. El carbono proporciona energía a los microorganismos, mientras que el nitrógeno es esencial para su crecimiento y reproducción. La relación óptima se encuentra entre 25:1 y 30:1, es decir, 25-30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno. Un exceso de carbono ralentiza el proceso, mientras que un exceso de nitrógeno genera malos olores por la producción de amoníaco [38].

Tabla 2.1 *Proporciones aproximadas de materiales en la mezcla para compostaje.*

Tipo de Material	Proporción Ideal
Materiales "Marrones"	60 % - 70 %
Materiales "Verdes"	30 % - 40 %

Fuente: Elaboración propia.

Fundamentos del compostaje

Existen dos métodos de compostaje, siendo la principal diferencia la presencia o no del oxígeno en el proceso:

- **Compostaje aeróbico**

Proceso natural y biológico de descomposición de materia orgánica que ocurre en presencia de oxígeno. En este proceso, los residuos orgánicos como restos de comida, hojas secas, césped cortado, residuos de jardín, estiércol animal y otros materiales biodegradables, son descompuestos por macroorganismos aerobios que metabolizan los residuos, produciendo dióxido de carbono agua y calor como subproductos. Estos organismos descomponen la materia orgánica, transformándola en un producto final conocido como compost. La temperatura generada en el proceso ayuda a la eliminación de patógenos y semillas de malezas, resultando en un compost higiénico y seguro para su uso como fertilizante.

- **Compostaje anaeróbico**

Este proceso existe en la ausencia de oxígeno. Los microorganismos anaeróbicos descomponen la materia orgánica, generando biogás compuesto por metano y dióxido de carbono además de un digestato sólido. El biogás suele ser aprovechado como una fuente de energía, pero genera olores desagradables y tiende a ser un proceso más lento que el aeróbico.

- **Compostaje domestico vs Industrial**

El compostaje se puede implementar a diferentes escalas, siendo sus principales diferencias:

- **Compostaje domestico**

Se realizan a una pequeña escala y su público objetivo es realizar compostaje de la materia orgánica producida por los hogares o

comunidades. Utiliza composteras sencillas y suelen depende del esfuerzo manual para el manejo y volteo de la pila en ciertos intervalos de tiempo. Es ideal para gestionar residuos de jardines y cocinas.

- **Compostaje industrial**

Se realiza a grandes escalas, maneja volúmenes enormes de residuos orgánicos, que suelen provenir de municipios e industrias. Para poder abastecer al proceso, hacen uso de maquinarias especializados en volteo y control de parámetros, permitiendo un mejor manejo de la cantidad de materia. Estas instalaciones industriales suelen ser de grandes extensiones y cuentan con personal y maquinaria calificada para cada proceso a lo largo del compostaje [40].

Tipos de composteras

Suelen existir 2 tipos de composteras dependiendo de la escala y recursos disponibles:

- **Composteras manuales**

Suelen ser estructuras simples de madera, plástico o metal que requieren de la intervención humana para el volteo y el control de los parámetros, adaptadas para pequeñas cantidades de residuos.

- **Composteras automáticas**

Suelen ser utilizados por comunidades y entornos industriales, debido a que están equipados de un sistema mecánico que automatiza el volteo, la aireación y el control de parámetros. Representan una inversión mayor, pero garantizan un mejor proceso y reducen la intervención humana.

Beneficios Ambientales y Agrícolas del Compostaje

El compostaje, desde una perspectiva ambiental, supone una estrategia clave para disminuir la cantidad de desechos orgánicos destinados a vertederos, aliviando la saturación sobre estos sitios y contribuyendo a la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero. Al desviar estos residuos de los vertederos, se limita la producción de metano, un gas considerablemente más efectivo que el dióxido de carbono en términos de contribución al cambio climático. Además, el compostaje crea un valioso producto: el compost, que actúa como un acondicionador del suelo, mejorando su calidad, capacidad de retención de agua y nutrientes, y promoviendo la actividad microbiana provechosa. Esta mejora en la salud del suelo contribuye a ecosistemas más

resilientes y a la preservación de los recursos naturales. Desde la perspectiva agrícola, el compostaje tiene un impacto significativo al aumentar la fertilidad del suelo. El compost aporta una gama de nutrientes esenciales para las plantas, lo que lleva a cosechas más saludables y productivas. Al reducir la dependencia de los fertilizantes químicos, se disminuye la contaminación del suelo y del agua, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles. La utilización de compost en la agricultura no solo nutre los cultivos, sino que también mejora la textura del suelo y su capacidad para retener nutrientes y agua, generando sistemas agrícolas más resilientes y ecológicamente equilibrados.

- **Impacto Positivo en la Reducción de Residuos Orgánicos**

La gestión adecuada de los residuos orgánicos contribuye de manera significativa a la mejora del medio ambiente. Al disminuir la cantidad de desechos que van a los vertederos, se alivia la presión sobre estos sitios de disposición, prolongando su vida útil y reduciendo la emisión de metano, un potente gas de efecto invernadero generado por la descomposición de la materia orgánica en estos lugares. Además, el compostaje estimula la agricultura sostenible, debido a que reduce la necesidad de uso de productos químicos como fertilizantes, fomentando prácticas agrícolas más sostenibles. Esta reducción no solo impacta positivamente el entorno, sino que también educa y sensibiliza sobre la importancia de gestionar los residuos de manera responsable, promueve empleos verdes y fomenta una economía circular.

2.2.3 Microorganismos

Los microorganismos son los seres vivos que se encargan de la descomposición en el proceso y compostaje, son seres microscópicos que transforman la materia en un compost estable y rico en nutrientes. Los más importantes pertenecen a los grupos de bacterias, hongos y entre otros. Estos seres participan activamente en la degradación de los residuos orgánicos mediante procesos metabólicos liberando energía, dióxido de carbono, agua y compuestos estabilizados. Suelen ser de dos tipos, aeróbicos y anaeróbicos, su diferencia radica en su existencia en la presencia y no presencia de oxígeno para vivir.

Tipos de microorganismos

Estos organismos microscópicos pueden clasificarse en:

- **Bacterias**

Son los microorganismos más abundantes y activos durante todo el proceso de compostaje. Su capacidad para adaptarse a distintos rangos de temperatura y su rapidez de reproducción los convierte en los más confiables agentes de degradación, los más comunes son:

Bacterias mesofílicas: Este tipo de bacterias son de las primeras en intervenir en el proceso de descomposición, suelen desarrollarse en temperaturas entre los 10°C y 40°C, se encargan de descomponer materias de fácil degradación, como azúcares y proteínas. Algunos ejemplos de estas bacterias son la *Pseudomonas* y *Bacillus*[41].

Bacterias termofílicas: A diferencia de las bacterias mesofílicas, estas prosperan en temperaturas más altas, de 45°C a 70°C, y su función es descomponer materiales como la celulosa y la hemicelulosa. En este grupo se tiene a los *Thermus* y *Bacillus*[41].

- **Hongos**

Los hongos son los principales descomponedores de los materiales lignificados, como las ramas, tallos o restos fibrosos. Tiene la habilidad de secretar enzimas extracelulares potentes, como la ligninasa y celulasa. Su ambiente óptimo son los ácidos, y suelen tener un bajo contenido de agua. Suelen ser los hongos del grupo Basidiomycota y Ascomycota.

- **Actino bacterias**

Son bacterias filamentosas que se encargan de dar el olor característico a tierra mojada. Se encargan de descomponer compuestos como la celulosa, hemicelulosa y quitina. Además, producen antibióticos naturales que inhiben organismos patógenos.

Características de los microorganismos

Las principales características en los microorganismos son:

- **Alta diversidad y especificidad:**

En el compostaje intervienen diferentes organismos, cada uno especializado en descomponer un tipo de material específico. Y esto puede variar según parámetros externos como la relación carbono-nitrógeno, donde un desequilibrio que pueda existir en la proporción ralentiza la actividad microbiana y ralentizar la descomposición de la materia orgánica.

- **Adaptabilidad:**

Muchos de los microorganismos pueden sobrevivir a condiciones adversas y cambiar su metabolismo según el oxígeno, nutrientes y temperatura, además de que existen diversos microorganismos que actúan según la variabilidad de estos parámetros.

- **Índices de germinación:**

Esto suele usarse para evaluar la calidad del compost, el cual se debe encontrar por encima del 80%, para asegurarse que no presenta efectos fitotóxicos que inhiban la germinación de plantas en su función como fertilizante, para garantizar que el compost sea apto.

- **Producción enzimática:**

Durante el proceso de descomposición los microorganismos liberan enzimas como la celulosa y la lignina. Estas enzimas existen para facilitar la descomposición que permiten la transformación en formas simples y solubles, que son utilizadas por otros organismos o aprovechadas como nutrientes para plantas.

2.2.4 Maquinas compostadoras

Durante el compostaje, existen parámetros que necesitan controlarse u optimizar con la finalidad de mejorar la eficiencia de la producción de compost, siendo ideal que se reduzca la intervención humana. Las maquinas compostadoras son equipos diseñados para facilitar el tratamiento y transformación de residuos orgánicos mediante un control de variables como la temperatura, la humedad y la aireación. Estas máquinas varían dependiendo del tamaño y la cantidad a tratar, desde pequeñas utilizadas en hogares hasta enormes instalaciones industriales que procesan toneladas de materia orgánica a diario. A continuación, se describe los tipos más comunes que varían desde sus tecnologías, forma su funcionamiento y su aplicación en diversos escenarios.

Tipos de máquinas compostadoras

Las maquinas se clasifican según su diseño, capacidad y funcionamiento, entre los diseños más usados son:

- **Compostadoras de tambor rotatorio**

Este tipo de equipos consisten en un cilindro que rota lentamente, mezclando y aireando la materia orgánica de su interior. La ventaja que

presenta es que da una mezcla homogénea y constante, facilitando la exposición de toda la materia a ciertos intervalos para su exposición a la descomposición.

- **Compostadoras de aire forzado**

Estas máquinas utilizan ventiladores para introducir aire de manera controlada a la pila de residuos orgánicos, acelerando el proceso de descomposición por el método aeróbico. Esto ayuda a evitar malos olores y a reducir la presencia de gases tóxicos.

- **Compostadoras de aire pasivo**

Este tipo de compostadoras hacen uso de una ventilación natural, lo que a diferencia del anterior, no presenta un control sobre la aireación, pero son más ecológicas y económicas. Hacen uso de la diferencia de presión para facilitar la circulación del aire.

- **Compostadoras de caja térmica**

Este tipo de dispositivo está ambientado para mantener una temperatura constante a lo largo del proceso de descomposición, lo que permite un control sobre este parámetro que agiliza el proceso de degradación de la materia orgánica.

- **Compostadoras verticales**

Los residuos se colocan en pilas de forma vertical, lo que permite un control de la humedad y de una distribución homogénea de la aireación, son compactas y no requieren mantenimiento.

- **Compostadoras de túnel**

Suelen aplicarse en entornos industriales, en donde a lo largo de un túnel, se coloca una pila de los residuos orgánicos, y se procesan en una serie etapas donde se prioriza la circulación del aire y el control de la temperatura.

- **Compostadoras automatizadas**

Estas máquinas utilizan tecnologías de vanguardia, donde gestionan y controlan el proceso de compostaje sin la necesidad de la intervención humana, manteniendo un control de los parámetros principales.

Características de diseño

Al realizar el diseño de una maquina compostadora, existen criterios funcionales y condiciones técnicas específicas que deben de seguir según el entorno al que estén destinadas:

- **Rendimiento**

Esto refiera a la capacidad de procesamiento en kilogramos o toneladas de materia orgánica, que pueda procesar dentro de un periodo determinado. Entonces para un entorno domestico se estima una acumulación de residuos de 2kg a 10kg para mantener una tasa de procesamiento continua.

- **Volumen de procesamiento**

El volumen está directamente relacionado a la capacidad de almacenamiento que puede contener la maquina dentro de un ciclo de compostaje. Este se expresa en litros o metros cúbicos. Por ello, el diseño debe de considerar la densidad de los residuos orgánicos que son de aproximadamente de 0,3 a 0,7 kg/L; la relación carga de volumen vs carga de compost producido y una capacidad de mantener un espacio suficiente para la mezcla y la aireación.

- **Sistema de aireación**

La aireación es clave en el proceso aeróbico del compostaje, y los aspectos a considerar dentro del diseño es una aireación forzada, uso de ventiladores eléctricos o compresores, y de una agitación mecánica rotatoria, para mejorar y homogenizar la exposición de la materia al oxígeno, así mismo la aplicación de filtros de carbón activado para controlar olores.

- **Control de humedad y temperatura**

El diseño debe incorporar sensores o mecanismos que permitan controlar la humedad entre 40% y 60%, como también una temperatura entre 45°C y 65°C para promover una alta actividad microbiana, considerando ventanas de inspección y drenajes para eliminar exceso de líquidos lixiviados.

- **Materiales de construcción**

Un aspecto importante a tener en cuenta es la selección de materiales, puesto que deben ser resistentes a la corrosión, de fácil limpieza y con una alta durabilidad, los materiales más usados son acero inoxidable, plásticos

de alta densidad y aluminio tratado o fibra de vidrio. Cada uno con características propias según diseño.

- **Automatización y monitoreo**

Un aspecto clave a considerar en modelos modernos e inteligentes es la integración de sistemas automatizados que controlen la temperatura, humedad, oxígeno, pH y tiempo mediante la activación de mezcladores, ventiladores y calentadores de forma automática y controlada. Además, que permitan registrar datos en tiempo real.

- **Consumo energético**

Esto va de la mano con el nivel de automatización que presente el diseño de la maquinaria, por ende, la eficiencia energética debe considerarse tanto para zonas rurales o con acceso limitado a la electricidad integrando paneles solares o sistemas híbridos que sean amigables con el medio ambiente.

- **Seguridad y mantenimiento**

Debido a que el diseño está propuesto para entornos domésticos se debe de considerar que el dispositivo tenga cierres seguros para evitar la exposición a gases, de fácil acceso a mantenimiento, limpieza o cambio de piezas. Además de tener protecciones mecánicas y eléctricas, para las partes móviles o de circuitos.

2.2.5 Sistema electrónico y control

El sistema electrónico y de control constituye un elemento fundamental en el proceso de compostaje automatizado, ya que permite el funcionamiento autónomo de la máquina. Su función principal es recibir, procesar y responder a las señales emitidas por los sensores ubicados en puntos estratégicos del sistema. De este modo, se recopila información en tiempo real y se ejecutan acciones como la activación de dispositivos mecánicos o eléctricos para ajustar las condiciones internas del proceso. Con ello se asegura que variables críticas, como la temperatura, la humedad, el pH y la concentración de gases, se mantengan dentro de los rangos establecidos para garantizar una descomposición óptima de los residuos orgánicos.

Este sistema se clasifica como un sistema embebido, ya que integra en un solo dispositivo compacto el hardware —microcontrolador, sensores y actuadores— y el software encargado de gestionar las funciones de control. Su diseño le

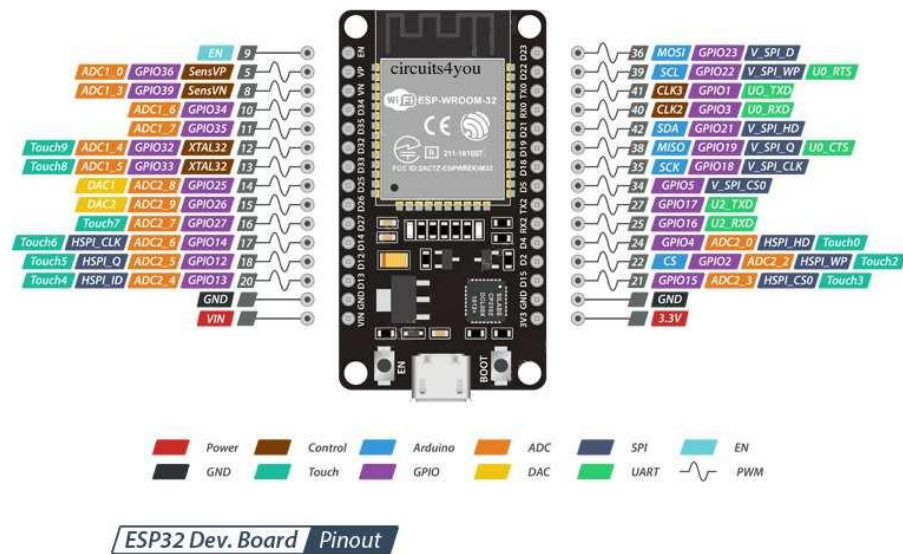
otorga la capacidad de tomar decisiones de manera autónoma, manteniendo el equilibrio del proceso sin necesidad de intervención constante.

El funcionamiento se basa en un sistema de lazo cerrado, en el cual los datos obtenidos del entorno son procesados continuamente para ejecutar ajustes inmediatos en las condiciones de operación. Esta capacidad de autorregulación en tiempo real permite al sistema adaptarse a las variaciones del ambiente o de los materiales, asegurando la estabilidad del compostaje. Asimismo, el monitoreo constante facilita una supervisión rápida y precisa, aspecto clave en proyectos de innovación orientados a soluciones sostenibles para la gestión de residuos [42].

Microcontrolador

El microcontrolador ESP32 es un procesador de doble núcleo de arquitectura ARM Cortex-M0+, el cual está diseñado para brindar un alto rendimiento con un consumo energético bajo. Esto conjuntamente a respuesta rápida a las señales de entrada como de salida hacen que se puedan usar como microcontrolador de los sistemas de control embebido. Además, el ESP32 cuenta con múltiples entradas y salidas (GPIO), los cuales nos permiten integrar diversos sensores y actuadores de manera sencilla y rápida. Su arquitectura flexible de bajo costo y de gran precisión permite que sea implementada en el proyecto, y su capacidad de procesamiento permite mantener la estabilidad del sistema compostador ante cambios en el entorno o en los materiales que interactúan dentro del proceso. El uso de este microcontrolador es eficaz para los sistemas embebidos, permitiendo la creación de soluciones de automatización confiables, escalables y energéticamente eficientes [43].

Figura 2.1 *Terminales de entrada y salida de ESP32*



Fuente: Elaboración propia

Lenguaje de programación

Python es el lenguaje de programación caracterizado por su simplicidad, claridad y poder expresivo. Gracias a su sintaxis amigable, Python permite construir soluciones prácticas en menos tiempo, siendo más sencillo su desarrollo como el mantenimiento del software que regula los sensores y actuadores del sistema. Una de sus mayores fortalezas es la enorme cantidad de bibliotecas disponibles, que permiten trabajar con interfaces físicas, manejar datos en tiempo real y comunicarse fácilmente con dispositivos como microcontroladores o módulos de red. Esta flexibilidad lo convierte en una herramienta ideal para el control de procesos ambientales automatizados que operan de forma autónoma, como el compostaje, donde es necesario realizar lecturas constantes, tomar decisiones lógicas y accionar mecanismos de manera automática y precisa. Además, se afirma que el lenguaje de programación Python ha demostrado ser una de las herramientas más versátiles en ingeniería moderna, permitiendo un desarrollo rápido, robusto y compatible con una amplia gama de tecnologías emergentes [44].

Sensores

Los sensores son componentes fundamentales en el sistema de control automático de la compostadora, porque permiten recopilar datos en tiempo real sobre las condiciones internas del proceso. Estos dispositivos proporcionan la información necesaria para que el microcontrolador tome decisiones y active

mecanismos que mantengan el ambiente ideal para la descomposición biológica de la materia orgánica. Los sensores se dividen generalmente en dos tipos.

- **Sensores analógicos:** los cuales se caracterizan por producir una señal de salida continua que varía de manera proporcional a la magnitud que están midiendo, así como el sensor de temperatura que está basado en termistores puede generar una señal de voltaje continua que cambia a medida que la temperatura aumenta o disminuye.
- **Sensores digitales:** estos se caracterizan por tener la señal de salida binaria, así que tiene solo dos posibles estados: encendido o apagado, solo se usa en casos especiales que solo necesitamos de dos estados en el sistema.

A continuación, se describen los principales sensores utilizados:

- **Sensor de Temperatura**

Los sensores de temperatura están diseñados para detectar y medir la temperatura en entornos específicos dentro de un sistema. dentro de estos sensores también hay tipos de acuerdo a la necesidad, como los termistores, el cual se caracteriza por modificar su resistencia eléctrica según la temperatura; los termopares que son compuestos por dos metales distintos que generan un voltaje proporcional a la diferencia de temperatura; los termómetros dependientes de resistencia los cuales utilizan materiales como el platino para medir la temperatura basándose en la variación de resistencia eléctrica; y finalmente los sensores infrarrojos que capaces de medir la temperatura sin la necesidad de contacto físico usando únicamente la radiación infrarroja emitida por un objeto.

- **Sensor de Gas**

Los sensores de gas están diseñados para detectar y medir la concentración de gases específicos dentro en un entorno cerrado o abierto. Estos pueden funcionar mediante diferentes principios, la más común es la absorción infrarroja, donde se mide la cantidad de radiación que es emitida por un gas particular; la reacción electroquímica, que genera una corriente proporcional a la concentración del gas; o la semiconductividad, donde la resistencia de un material semiconductor es modificada cuando tiene contacto con ciertos gases. Los sensores más comunes están especializados en compuestos específicos como monóxido de carbono CO,

dióxido de carbono CO₂, amoníaco NH₃ o metano CH₄. Todos estos tienen una finalidad de detectar gases dentro del sistema.

- **Sensor de Humedad**

Los sensores de humedad también conocidos como higrómetros su función es medir el contenido de humedad en diferentes entornos. Existen varios tipos, como los higrómetros capacitivos, el cual su principio de funcionamiento se basa en medir los cambios en la capacitancia eléctrica según la humedad; los higrómetros resistivos, el cual registra las variaciones de resistencia eléctrica y a su vez emite en forma de resistencia; los higrómetros ópticos, es un sistema más compuesto debido a que este funciona con los principios de refracción o absorción de luz; y los higrómetros de absorción, que calculan la humedad según la cantidad de agua absorbida por un material. Este sensor es ampliamente usado en el monitoreo climático hasta la producción de productos sensibles a la humedad.

- **Sensor de Presencia**

Los sensores de presencia son dispositivos que detectan la proximidad o movimiento de objetos o personas dentro de un área determinada. Algunos de los más comunes incluyen los sensores infrarrojos pasivos PIR, los cuales detectan cambios en la radiación térmica emitida por una masa; los sensores ultrasónicos que tienen el principio de funcionamiento emitiendo ondas sonoras de alta frecuencia y después miden el tiempo que tarda el eco en regresar; y por último los sensores más comunes que son los sensores capacitivos o inductivos, que detectan cambios en campos eléctricos o magnéticos cercanos dependiendo a la distancia y al tipo de material que se está detectando. Estos sensores no necesariamente requieren de contacto físico y son ampliamente utilizados en sistemas de automatización, iluminación, seguridad y control de acceso.

Actuadores

Los actuadores son dispositivos que reciben señales de control (generalmente eléctricas) y las convierten en movimiento o acción física, como rotación, desplazamiento o presión. Son componentes fundamentales en sistemas automáticos porque permiten que el sistema realice acciones o ajustes en el entorno basados en las decisiones tomadas por el sistema de control (como un microcontrolador). A continuación, se describen algunos de los actuadores más comunes y su funcionamiento.

Motor

Es el encargado de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. en el proyecto se usará este actuador con el fin de generar movimiento en el proceso de mezclado por lo cual se usará un motor de corriente continua debido a que sus características se acomodan de mejor manera al proyecto, siendo fácil la inversión de giro mediante el cambio en la polaridad de la corriente, su capacidad de variación de velocidad y el bajo consumo de energía. Este motor se mantendrá acoplado al cilindro de mezclado mediante una transmisión mecánica; en cuál será el encargado de mezclar todo el producto de forma homogénea, A su vez el mismo motor cumplirá la función del triturado lo que permitirá desmenuzar o triturar materiales sólidos, puesto que al reducir el tamaño de materiales se obtendrá mejor homogeneización y aceleración de residuos orgánicos.

$$V = k_e \cdot \omega + I \cdot R$$

V = Voltaje aplicado al motor (V)

k_e = Constante de velocidad electromotriz (V·s/rad o V·rpm)

ω = Velocidad angular (rad/s)

N = Velocidad en rpm (si usas rpm, también ajustar la constante)

I = Corriente que consume el motor (A)

R = Resistencia interna del inducido (ohmios, Ω)

Ventilador

El ventilador es un actuador que utiliza un motor para mover un fluido en estado de gas, así como el aire. Su función principal es generar flujo de aire o ventilación, lo cual es crucial en sistemas donde el control de la temperatura o la humedad es importante. Los ventiladores pueden ser axiales el aire fluye a lo largo del eje del ventilador, también existen los ventiladores centrífugos que tiene por principio acelerar el aire mediante un impulsor y expulsarlo a través de un conducto. Estos ventiladores dentro del sistema cumplirán la función de mantener la temperatura dentro de un rango determinado y para asegurar una correcta ventilación de un espacio cerrado. para el cálculo de aire suministrado al sistema mediante un ventilador

$$Q = P \cdot \eta \Delta P$$

Q = Caudal de aire (m³/s)

P = Potencia útil del ventilador (W)

η = Eficiencia del ventilador (adimensional, entre 0 y 1)

ΔP = Aumento de presión del aire (Pa)

Sistema de monitoreo

Un sistema de monitoreo es un conjunto de herramientas, dispositivos y tecnologías el cual permite observar, registrar y analizar en tiempo real el estado de un sistema o un proceso determinado. El funcionamiento de estos sistemas están relacionados a recopilar datos constantemente mediante sensores o instrumentos de medición, y mantener una base de datos que sea comprensible para facilitar la toma de decisiones en el sistemas y a su vez permitir respuestas automáticas. El sistema de monitoreo puede realizarse de forma local el cual consta de visualizar en una pantalla cercana al sistema o de manera remota en cual se podrá acceder a través de redes inalámbricas, internet o plataformas en la nube. Gracias a este sistema los usuarios pueden tener una visión continua y precisa de variables clave como temperatura, humedad, niveles de líquidos, consumo energético, presión, entre otros parámetros que interactúan dentro del sistema [45].

Este sistema de monitoreo tiene por partes fundamentales los siguientes elementos:

- **Interfaz de usuario**

La Interfaz es el componente visual en forma de una pantalla, en muchas ocasiones este solo emite información, pero en otras también nos permite configurar información en el sistema, a través del cual los usuarios pueden interactuar con el sistema, visualizar datos en tiempo real, interpretar el estado del proceso y tomar decisiones.

La interfaz presenta características clave como:

Visualización gráfica clara y comprensible: mediante paneles, gráficas, indicadores de estado, diagramas y alertas de colores.

Accesibilidad: puede estar diseñada para acceso remoto, permitiendo que el usuario consulte el estado del sistema desde cualquier lugar.

Personalización: adapta los elementos visuales según el tipo de proceso, preferencias del operador o nivel de acceso del usuario.

Capacidad de control: en muchos casos, además de visualizar datos, la HMI permite enviar comandos al sistema para activar o desactivar componentes, modificar parámetros o confirmar alertas.

- **Protocolos de comunicación**

Los protocolos de comunicación son los estándares que permiten el intercambio de datos entre los distintos componentes del sistema de monitoreo, como sensores, microcontroladores, actuadores y plataformas de análisis. Son fundamentales para garantizar que los datos viajen de forma rápida, segura y confiable desde el punto de medición hasta el sistema de visualización o almacenamiento.

Existen diversos protocolos, tanto cableados como inalámbricos, que se eligen según la aplicación, distancia, cantidad de datos, pero se optó por el protocolo wifi.

El protocolo de comunicación Wi-Fi permite la transmisión de datos de manera inalámbrica mediante ondas de radio, facilitando la interconexión de dispositivos electrónicos dentro de una red local sin la necesidad de conexiones físicas. Este protocolo opera comúnmente en bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz el cual permite equilibrar alcance y velocidad según los requerimientos del sistema. Cuando son aplicados a sistemas embebidos, como microcontroladores con módulos de red integrados como el ESP32 el Wi-Fi cumple un papel fundamental en la transmisión y recepción de datos entre sensores, actuadores y plataformas de monitoreo remoto. La estructura del protocolo se divide en varias capas, entre ellas la capa física (PHY), que maneja la transmisión real de señales, y la capa de control de acceso al medio MAC, que regula cómo los dispositivos acceden al canal para evitar colisiones. Sobre estas capas opera mediante el protocolo TCP/IP, el cual es responsable de garantizar una comunicación segura y confiable entre dispositivos [46].

- **Estrategia de control**

Son aquellos métodos diseñados para regular el comportamiento de un sistema dinámico con el fin de alcanzar un rendimiento deseado dentro del proceso. Estas estrategias definen cómo el sistema reacciona ante cambios internos o externos, ajustando las variables de entrada para mantener las

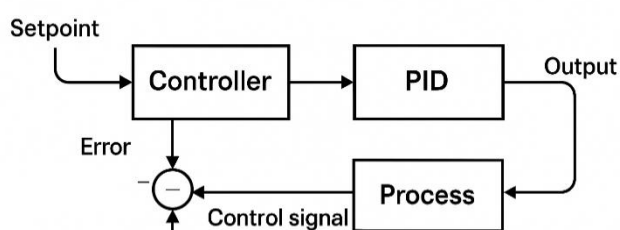
variables de salida dentro de ciertos límites. En otros términos, es cómo reacciona el sistema ante perturbaciones en las condiciones.

Existen múltiples estrategias, cada una adecuada para distintos niveles de complejidad, precisión y tipo de proceso.

- **Control Proporcional Integral Derivativo (PID)**

El controlador PID representa la estrategia más robusta y ampliamente utilizada en el campo del control automático debido a su capacidad para combinar tres tipos de respuestas complementarias: proporcional, integral y derivativa. La parte proporcional (P) actúa sobre el error actual, proporcionando una respuesta inmediata que busca corregir desviaciones. La parte integral (I) acumula el error a lo largo del tiempo, corrigiendo errores persistentes y eliminando el offset. Por último, la componente derivativa (D) responde a la tasa de cambio del error, anticipándose a su evolución futura y amortiguando oscilaciones. Gracias a esta combinación, el controlador PID es capaz de proporcionar estabilidad, precisión y rapidez de respuesta incluso en sistemas con dinámicas complejas. Requiere un ajuste fino de sus parámetros (K_p , K_i , K_d), tarea que puede realizarse de manera manual, heurística o mediante algoritmos de optimización.

Figura 2.2 Control PID.

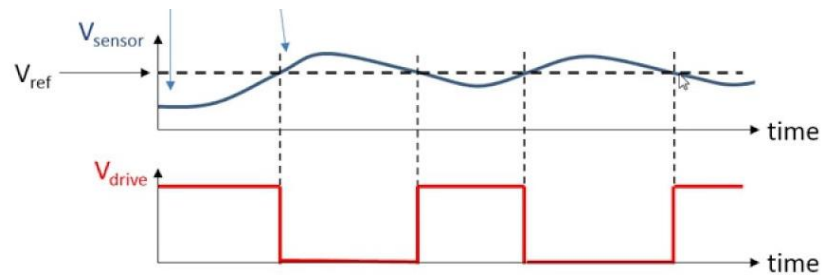


Fuente: Elaboración propia

- **Control ON OFF**

El control ON-OFF es una estrategia simple que funciona con dos estados; encendido y apagado. El cual este sujeto a una lógica de funcionamiento. Su principal ventaja es la facilidad de implementación y bajo costo, aunque genera oscilaciones alrededor del punto deseado.

Figura 2.3 Control ON OFF



Fuente: Elaboración propia.

Dispositivos electrónicos

Son componentes físicos que cumplen la función de controlar, manipular o responder al flujo de corriente eléctrica dentro del circuito. Los cuales se encuentran diseñados para realizar funciones específicas, así como amplificar señales, conmutar energía, almacenar carga, detectar condiciones del entorno y hasta poder realizar operaciones lógicas. Se dividen en dos grandes conjuntos. Los activos son dispositivos que requieren de una fuente de energía para su funcionamiento como transistores y microcontroladores. Los pasivos que no necesitan de una energía para su funcionamiento, pero estos pueden modificar la energía como resistencias, capacitores e inductores. En el proyecto tendremos ambos grupos en un mismo circuito dentro de ellos los más comunes son.

- **Resistencias**

Las resistencias son componentes pasivos que limitan o regulan el flujo de corriente eléctrica en un circuito. Su valor se mide en ohmios Ω y su representación de valores puede variar según el tipo de resistencia que se usa, se puede representar mediante un código de colores o por un código de letras y valores. Son esenciales para proteger componentes delicados, controlar la ganancia en amplificadores, establecer divisores de voltaje o configurar umbrales de activación en sensores. Para calcular la resistencia se usa la ecuación 1.

$$V = I \cdot R \quad (1)$$

- **Capacitores**

Los capacitores son dispositivos pasivos capaces de almacenar energía en forma de campo eléctrico. Están formados por dos placas conductoras separadas por una placa dieléctrica. Su capacidad de almacenaje se mide

en faradios (F), pero en la industria lo más común es microfaradios (μF) o picofaradios (pF). Para calcular la capacitancia se usa la ecuación 2.

$$V(t) = V_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2)$$

- **Diodos**

Un diodo es un componente semiconductor que permite el paso de corriente en un solo sentido, funcionando como una válvula unidireccional. El diodo entra en conducción cuando la tensión en sus terminales supera su umbral dependiendo del material semiconductor que lo conforma; silicio 0.7V y germanio 0.3V. Dentro de los circuitos electrónicos el diodo es muy importante y a su vez se clasifican dependiendo del tipo de aplicación que se le da.

Diodo rectificador: Convierte corriente alterna en corriente continua.

Diodo Zener: Permite el paso en inversa si se supera cierta tensión, usado como regulador.

Diodo LED: Emite luz cuando conduce electricidad, es muy común usar para señalar.

Diodo Schottky: tiene una caída de tensión menor, útil en aplicaciones de alta velocidad.

- **Transistores**

Los transistores son dispositivos semiconductores activos usados para amplificar señales o conmutar cargas eléctricas. Son fundamentales para el control de dispositivos de mayor potencia mediante señales pequeñas las cuáles son provenientes de microcontroladores o pequeños controladores.

- **Relés y Optoacopladores**

Los relés y los optoacopladores permiten controlar grandes cargas eléctricas ya sean de corriente continua o alterna, lo que los diferencia es su forma de accionamiento. En el caso de los relés tienen una bobina interna que, al activarse, cierra un contacto mecánico el cual da pase a corriente eléctrica proveniente de otro sistema. Por otro lado; los optoacopladores son accionados mediante luz. Un LED interno ilumina un fototransistor, que conduce o no dependiendo de la señal de entrada. Se usan para evitar interferencias o proteger circuitos sensibles.

2.2.6 Sistema eléctrico de potencia

Sistema eléctrico por red eléctrica doméstica

El sistema eléctrico conectado a una red doméstica funciona llevando electricidad desde que fue generado a través de hidroeléctricas, luego elevadas el voltaje, transmitidas a una subestación que dentro de la ciudad donde nuevamente se reduce el voltaje. Finalmente llegan hasta los aparatos del hogar mediante un medidor y un tablero de distribución. La corriente alterna que, normalmente de 220 voltios, se reparte por circuitos protegidos que alimentan enchufes, luces y electrodomésticos. Cuando se conecta un dispositivo, como una máquina de compostaje, la energía fluye desde el enchufe, si es necesario se transforma a corriente continua alterna a una corriente continua mediante una fuente de alimentación; esto con el fin de poder alimentar motores, sensores y controladores que normalmente funcionan a bajo voltaje y corriente directa. Todo el sistema eléctrico incluye etapas como se dará a conocer a continuación.

- **Corriente alterna**

La corriente alterna es el tipo de electricidad que usamos todos los días en nuestras casas es conocida así porque no fluye siempre en la misma dirección, sino que va cambiando de sentido muchas veces por segundo, alternando su estado de positivo a negativo. siguiendo un patrón que se llama onda senoidal. La velocidad del cambio de dirección de la onda está relacionada con la frecuencia y el período son dos conceptos que van de la mano cuando hablamos de corriente alterna. La frecuencia nos indica cuántas veces cambia de dirección la corriente dentro de un segundo, y su unidad de medida está dada en Hertz y el período, en cambio, es el tiempo que tarda en completarse un solo ciclo de esa onda, y se mide en segundos. La relación entre ambos se da en la ecuación 3.

$$\text{Periodo}(T) = 1/\text{Frecuencia (Hz)} \quad (3)$$

- **Fuente de alimentación**

Es un dispositivo que convierte la corriente alterna de la red domiciliaria en una salida de corriente continua apropiada para alimentar los dispositivos de un sistema eléctrico. Suele tener reguladores de voltaje y protección contra sobrecargas y cortocircuitos. Dentro de la fuente de alimentación el Transformador reductor es esencial para garantizar que todos los componentes del sistema, como motores y sensores, reciban la

cantidad correcta de voltaje sin riesgos de fluctuaciones que puedan llegar a dañar el sistema. La Relación de transformación se da en la ecuación 4.

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (4)$$

V_s : voltaje en el secundario (salida).

V_p : voltaje en el primario (entrada).

N_s : número de vueltas del secundario.

N_p : número de vueltas del primario.

- **Dispositivos de protección contra sobrecargas y cortocircuitos**

Son circuitos de seguridad que protegen los componentes eléctricos de daños causados por un flujo de corriente excesivo o una falla en el sistema que genera un cortocircuito. En el sistema eléctrico de tu máquina, estas protecciones aseguran que los componentes, como los convertidores y los motores, no sufran daños por sobrecargas, lo que aumenta la fiabilidad y vida útil del sistema, previniendo fallos eléctricos costosos.

- **Regulador de voltaje**

Es un proceso que asegura que el voltaje suministrado a un dispositivo se mantenga dentro de un rango específico, independientemente de las variaciones en la carga o en la entrada de energía. Para los sistemas electrónicos de tu máquina, la regulación de voltaje es fundamental para asegurar un funcionamiento estable y evitar daños a los circuitos sensibles, como los sensores y controladores, garantizando que estos componentes operen dentro de sus especificaciones sin riesgo de fallos.

Sistema eléctrico por paneles solares

- **Paneles solares fotovoltaicos**

Los paneles solares fotovoltaicos son dispositivos diseñados para convertir la energía proveniente del sol en electricidad utilizable en forma de corriente continua (DC). Esta conversión se realiza a través del efecto fotovoltaico, un fenómeno físico en el que los fotones de la luz solar impactan sobre materiales semiconductores, generalmente silicio, liberando electrones y generando una corriente eléctrica.

Cada panel está conformado por un conjunto de celdas solares conectadas entre sí en serie y paralelo para alcanzar la tensión y corriente necesarias. Estas celdas están encapsuladas entre varias capas: una lámina frontal de

vidrio templado que protege contra impactos y condiciones climáticas; una o varias capas antirreflejantes que optimizan la absorción de luz; encapsulantes de polímero (como EVA) que sellan y aíslan las celdas del ambiente; y una lámina posterior aislante que brinda soporte y aislamiento. Todo el conjunto está enmarcado por una estructura de aluminio anodizado, lo que proporciona rigidez y facilidad de montaje.

2.2.7 Sistema mecánico

El diseño mecánico de un dispositivo mecatrónico requiere de una integración funcional y estructural que garantice resistencia, durabilidad, eficiencia operativa y facilidad de mantenimiento. Considerando las condiciones específicas de la ciudad de Huancayo en cuanto a la generación per cápita de residuos orgánicos por persona integrando componentes que permitan el control de las condiciones internas con la finalidad de tener un entorno controlado para el proceso de compostaje.

Estructura soporte

Esta parte tiene que proporcionar rigidez, soporte y protección del sistema interno frente a cargas estáticas como la carga neta y cargas dinámicas generadas durante el funcionamiento del dispositivo.

- **Selección de materiales**

El material para considerar debe de presentar ciertas características, como la resistencia a la corrosión y de alta durabilidad, por lo general según normas como el ASTM A240 / A240M-22 establecen que en ambientes alimentarios y húmedos se debe usar acero inoxidable, ya que son materiales que responden muy bien ante ambientes con un pH ácido y condiciones de humedad, debido a su contenido de molibdeno que confiere una resistencia a la corrosión localizada. Además, su elección se debe a que, a diferencia del acero al carbono recubierto o polímeros simples, el acero inoxidable no requiere de un mantenimiento frecuente, tiene una buena resistencia mecánica y es higiénico. Esto es crucial considerando que está enfocado para entorno domésticos, y que está expuesto a líquidos lixiviados y presencia de gases que suelen deteriorar materiales como el acero galvanizado o plásticos. Se presenta las principales características de 2 calidades de acero inoxidable que encajarían muy bien para los requisitos que se necesita, el criterio de selección se basa en sus características técnicas y la relación costo-beneficio.

Tabla 2.2 Comparativa técnica del AISI 304 Y EL AISI 316.

Propiedad	AISI 304	AISI 316
Composición principal	Fe-Cr-Ni (18–20% Cr, 8–10.5% Ni)	Fe-Cr-Ni-Mo (16–18% Cr, 10–14% Ni, 2–3% Mo)
Densidad	7.93 g/cm ³	7.98 g/cm ³
Resistencia a la tracción	515–750 MPa	515–760 MPa
Límite elástico (0.2% offset)	≈ 205 MPa	≈ 290 MPa
Módulo de elasticidad	193 GPa	193 GPa
Dureza Brinell	201 HB	217 HB
Aplicaciones típicas	Cocinas, electrodomésticos, mobiliario	Industria química, marina, médica

Fuente: Elaboración propia.

- **Fundamentos de diseño estructural**

A la hora de seleccionar perfiles, placas y uniones se debe de tener en cuenta que esto influye directamente en la resistencia estructural, por lo que un espesor muy delgado puede comprometer la rigidez ante la vibración, mientras que mayores espesores añaden peso innecesario, esto se calcula considerando los principios de resistencia de materiales y análisis estructural. Para elementos sometidos a tracción o compresión se aplica la ecuación 6 de esfuerzo axial normal:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

- σ es el esfuerzo normal [Pa]
- F es la carga axial aplicada [N]
- A es el área transversal [m²].

Para analizar cargas transversales de vigas o soportes se tiene la ecuación 7 de esfuerzo de flexión:

$$\sigma_f = \frac{M \cdot c}{I} \quad (7)$$

- σ_f : esfuerzo flector (MPa)
- M: momento flector (Nm)
- c: distancia al eje neutro (m)
- I: momento de inercia (m⁴)

En la verificación de columnas o perfiles que sirvan de apoyo se debe realizar la prueba de pandeo mediante la fórmula de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (8)$$

- P_{cr} : carga crítica de pandeo (N)
- E: módulo de elasticidad (Pa)
- I: momento de inercia (m⁴)
- L: longitud de la columna (m)
- K: factor de longitud efectiva (depende del tipo de apoyo)

Además, es necesario garantizar que los esfuerzos reales se mantengan dentro de los límites seguros, mediante el criterio de seguridad (FS):

$$FS = \frac{\sigma_{admisible}}{\sigma_{trabajo}} \quad (9)$$

- FS: factor de seguridad (adimensional)
- $\sigma_{admisible}$: esfuerzo admisible del material (Pa)
- $\sigma_{trabajo}$: esfuerzo real o de trabajo aplicado (Pa)

- **Análisis estructural por elementos finitos**

Esta prueba es importante porque es una evaluación técnica que permite conocer el comportamiento de los componentes de una estructura frente a fuerzas, cargas y condiciones reales de trabajo y esto se realiza mediante una simulación por elementos finitos (FEA), el cual se realiza en softwares como SolidWorks simulación o ANSYS Mecánica. Las pruebas para realizar son:

Análisis estático lineal: Para evaluar deformaciones y esfuerzos bajo cargas gravitacionales, peso de la materia y esfuerzos dinámicos inducidos por el motor y el mezclador.

Análisis modal: Determinar las frecuencias de ciertos componentes para evitar que el sistema entre en resonancia con las vibraciones del motor.

Sistema de trituración

Esta parte del diseño tiene la finalidad de reducir el tamaño de las partículas de los residuos orgánicos, debido a que incrementara el área superficial y mejorara la velocidad de descomposición microbiana para el proceso de compostaje. La reducción de tamaño de la materia orgánica permitirá una mejor distribución térmica, de aireación y homogeneidad de la mezcla.

- **Principio de funcionamiento**

El sistema de trituración tiene que realizarse mediante un conjunto de cuchillas rotativas y fijas, que realizaran un corte por cizalladura, donde los residuos orgánicos pasan a través de un corte y desgarrado entre las cuchillas de distinto tipo.

Cuchillas rotativas: Se encargan de cortar los residuos más grandes y los desmenuzan en partes pequeñas.

Cuchillas fijas: Se usan a manera de guía para los residuos evitando que los materiales sean expulsados sin ser completamente triturados.

- **Selección de material para las cuchillas**

Las cuchillas deben de ser resistentes al desgaste, con buena dureza y capaces de soportar ambientes húmedos y ácidos sin desintegrarse, algunos de los materiales más comunes para cuchillas de trituración son:

Tabla 2.3 *Comparación de materiales para cuchillas.*

Material	Dureza Rockwell (HRC)	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia a la corrosión	Comentario técnico
AISI 420 (templado)	50–56	700–850	Alta	Muy buena dureza y resistencia al desgaste. Ideal para cuchillas templadas.

AISI 304	15–20	505–750	Muy alta	Excelente resistencia a la corrosión. Baja dureza. No recomendable sin recubrimiento.
AISI D2	55–62	1000–1200	Media	Acero herramienta. Alta dureza, pero requiere protección contra la oxidación.
AISI 316	15–20	~500–750	Muy alta	Similar al 304 pero con mejor comportamiento en ambientes húmedos o ácidos.

Fuente: Elaboración propia.

- **Geometría y ángulo de corte de cuchillas**

Es importante considerar en el diseño de cuchillas:

Angulo de ataque: Es el ángulo entre la cuchilla y el material a cortar.

Espesor: Es un aspecto que garantiza que sea estructuralmente resistente.

Numero de filos: A mayor número de filos mayor eficiencia de corte, pero también mayor complejidad mecánica.

Disposición de hélice o cruz: Es un aspecto acerca de la disposición de posición de las cuchillas dentro del sistema.

- **Fundamentos teóricos de diseño**

Para diseñar el sistema de trituración se debe tener en cuenta los principios de dinámica rotacional y la mecánica de materiales, mediante la estimación del torque necesario y la potencia requerida del motor. La ecuación 10 de torque permite determinar el esfuerzo requerido en el eje impulsor, considerando la fuerza necesaria para fragmentarlos residuos en contacto con las cuchillas:

$$FT = F * r \quad (10)$$

- T: torque o momento torsor (Nm)
- F: fuerza de trituración (N)

- r: radio del eje o punto de aplicación de la fuerza (m)

Además de ello, se debe calcular la potencia que debe de entregar el motor para poder generar el torque necesario a una velocidad de rotación determinada:

$$P = \tau * \omega \quad (11)$$

- P: potencia (w)
- τ : torque (Nm)
- ω : velocidad angular (rad/s)

Para verificar si el material del eje no fallara por cortante:

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (12)$$

- τ : Esfuerzo cortante (Pa)
- T: Torque (Nm)
- r: Radio del eje (m)
- J: Momento polar de inercia (m⁴)

Y evaluar que las cuchillas no se doblen o deformen por flexión:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (13)$$

- σ : Esfuerzo normal por flexión (Pa)
- M: Momento flector (Nm)
- c: Distancia desde el eje neutro (m)
- I: Momento de inercia (m⁴)

Para determinar el ángulo de corte en función de la fricción y tipo de residuo se tiene:

$$\eta_c = \cos(\theta) \cdot \left(1 - \left(\frac{F_f}{F_c}\right) \cdot \tan(\theta)\right) \quad (14)$$

- η_c : Eficiencia de corte (adimensional)
- η_c : Ángulo de corte (° o rad)
- F_f : Fuerza de fricción (N)
- F_c : Fuerza de corte total (N)

- **Prueba de validación**

En el diseño de cuchillas y su sistema de soporte se tiene que simular la prueba de elementos finitos en los aspectos:

Análisis estático: Para determinar zonas de máximas concentración de esfuerzo.

Análisis modal: Para evitar resonancias destructivas.

Sistema de mezclado

Esta parte es importante en el proceso de compostaje debido a que tiene como objetivo asegurar la funcionalidad térmica, de humedad y de oxigenación en el sistema interno. Para optimización de procesos la cámara de trituración y de mezclado serán la misma, no obstante cada uno tendrá sus propios requisitos.

- **Principio de funcionamiento**

El mezclado en eje vertical hace uso de un eje central equipado con paletas o brazos radiales que giran para desplazar el material en forma helicoidal o circular. Esta configuración genera un flujo tridimensional que evita zonas muertas, mejora la oxigenación y rompe conglomerados, que son cosas esenciales para un compostaje aeróbico viable.

- **Componentes del mezclador**

En el diseño del sistema de mezclado se tiene que considerar los siguientes componentes:

Eje central vertical: Debe de estar fijo a un sistema motriz inferior.

Paletas radiales curvas o planas: Distribuidas simétricamente, fijadas al eje mediante soldadura o acoples mecánicos.

Materiales: Se tiene que considerar que estará expuesto a húmedas y entornos ácidos, por ende, tiene que ser resistente a esas características.

Rodamientos sellados: Esto para evitar el ingreso de humedad por el eje.

- **Parámetros técnicos**

Las variables a tener en cuenta en el diseño del sistema mezclador son:

Velocidad de mezclado: Esta característica depende del tipo de material que se está removiendo, puesto que velocidades más altas pueden ser más necesarias para mezclas fibrosas, pero también debe de considerarse no generar sobrecalentamiento o compactación de la materia.

Altura efectiva de las paletas: A la hora del diseño debe considerarse que las paletas remuevan la mayor parte de volumen de materia, con una

inclinación o curvatura que impulse el movimiento axial de materia hacia arriba o hacia los bordes.

Frecuencia de operación: Los ciclos de mezclados tiene que ser basados en ciclos térmicos y necesidades de aireación de la materia, en estos tipos de sistemas suelen ser intermitentes, es decir accionarse cada cierto tiempo y dejar en reposo por otro tiempo determinado.

- **Fundamentos teóricos**

Para diseñar un sistema de mezclado se debe aplicar principios de dinámica rotacional y resistencia de materiales para poder dimensionar las paletas y el eje. Es necesario determinar el torque necesario a partir de la fuerza resistencia que ofrece la masa de residuos al ser desplazada por las paletas de rozamiento:

$$T = F_r * r \quad (15)$$

- T: torque o momento torsor (Nm)
- F_r : fuerza de tritución (N)
- r: radio del eje o punto de aplicación de la fuerza (m)

Esta ecuación es necesaria para seleccionar el motorreductor adecuado para el sistema de mezcla:

$$1. \quad P = \tau * \omega \quad (16)$$

- P: potencia (w)
- τ : torque (Nm)
- ω : velocidad angular (rad/s)

- **Integración con el sistema de tritución**

Se espera que el sistema de tritución y el sistema de mezclado convivan en una misma cámara, por lo que se debe de tener en cuenta los siguientes criterios:

Ciclo de operación: El mezclado se activará después de la trituración, evitando interferencias mecánicas, si bien compartirán el mismo eje rotacional se controlará el RPM para cada fase.

Compatibilidad estructural: Las paletas removedores no deben de obstaculizar el movimiento de las cuchillas, deben d estar en alturas diferentes o con mecanismos de acople desmontables.

Espacio optimizado: El diseño debe de permitir la libre rotación sin contacto con las paredes, asegurando accesibilidad para mantenimiento y limpieza.

- **Diseño y simulación**

El sistema debe de cumplir exigencias estructurales y funcionales que garanticen la durabilidad y eficiencias del mezclado mediante simulaciones numéricas avanzadas y análisis mecánicos detallados.

Análisis de esfuerzos de eje y paletas: Se realiza mediante pruebas de elementos finitos, para corroborar la reacción del eje a la torsión y de las paletas frente a las fuerzas de resistencia no homogénea de los residuos.

Simulación CFD (Computacional Fluid Dynamics): El comportamiento de la mezcla no es líquido ni sólido, sino de una mezcla semisólida de viscosidad variable, por ende, se debe de realizar esta simulación para observar el patrón de flujo, verificar la mezcla uniforme, evaluar la velocidad de movimiento del residuo y determinar si hay zonas muertas.

Cámara de procesamiento

La cámara de procesamiento es el núcleo operativo del dispositivo mecatrónico, debido a que es donde se concentra las operaciones de trituración, mezclado y los procesos térmicos. Esta cámara debe de garantizar la contención segura de los residuos, soportar las cargas dinámicas generadas por los sistemas internos y resistir las condiciones de humedad, temperatura y agentes corrosivos derivados de la descomposición orgánica.

- **Requisitos del diseño**

Las condiciones necesarias que necesita la cámara donde se almacenara y procesara la materia orgánica debe tener las siguientes características.

Estanqueidad: La cámara debe de evitar tener filtraciones de líquidos lixiviados, como también evitar la exposición de gases hacia el exterior.

Resistencia estructural: Tiene que resistir la vibración, torque y carga transmitida por el eje de rotación.

Aislamiento térmico: Contar con un sistema de revestimiento ante las variaciones de temperatura.

Facilidad de limpieza y mantenimiento: El diseño debe de permitir el fácil acceso y remoción de residuos adheridos, así como del producto final.

Material: El material debe de ser resistente a la corrosión y la exposición de la humedad.

Cierres herméticos: Para garantizar un control óptimo de las variables internas.

- **Cálculos teóricos**

El diseño estructural de la cámara debe de considerar el espesor mínimo en función del esfuerzo combinado de la flexión, corte y presión interna. Además de proporcionar análisis de esfuerzos en envolventes utilizando ecuaciones de mecánica estructural, como el esfuerzo normal por presión interna:

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{e} \quad (17)$$

- σ : Esfuerzo normal en la pared (Pa)
- P : Presión interna estimada (Pa)
- r : Radio interno de la cámara (m)
- e : Espesor de la pared de la cámara (m)

- **Evaluación mediante análisis FEA**

Se debe de verificar las tensiones en zonas críticas como el soporte del eje, zonas cercanas a uniones y áreas de contacto entre la cámara y la estructura. Por ende, se deben analizar presiones internas, concentraciones de esfuerzo y deformación máxima permitida para garantizar el sellado y operación continua en los puntos de fijación como la fuerza de cierre y torque de apertura.

Sistema de transmisión

El sistema de transmisión mecánica cumple la función de transferir el movimiento generado por el motorreductor hacia los sistemas de trituración y

mezclado ubicados en el interior de la cámara. El diseño debe de priorizar la simplicidad, eficiencia mecánica, control de velocidad y facilidad de mantenimiento.

- **Tipo de transmisión**

La transmisión será mecánica del dispositivo debe ser una opción robusta, aplicado para estos 2 tipos:

Transmisión mediante caja reductora: Se utilizará una caja reductora para reducir la velocidad de salida y aumentar el par de torsión, ajustándose a la necesidad de los mecanismos de triturado y mezclado.

Transmisión directa al eje: Se acoplará el motor con la caja reductora mediante un eje rígido, para evitar el uso de poleas o correas.

- **Fundamentos teóricos**

El diseño de la transmisión debe de poder transmitir un correcto par de torsión suficiente para accionar el sistema de mezclado y triturado sin causar sobrecargas ni pérdidas excesivas de eficiencia. Para calcular la potencia necesaria se emplea la siguiente ecuación:

$$P = \tau * \omega \quad (18)$$

- P: potencia (w)
- τ : torque (Nm)
- ω : velocidad angular (rad/s)

Y para el análisis de ejes y acoplamientos para garantizar que soporten las cargas de torsión generadas por el motor y la caja reductora se usa:

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (19)$$

- τ : Esfuerzo cortante (Pa)
- T: Torque (Nm)
- r: Radio del eje (m)
- J: Momento polar de inercia (m⁴)

- **Diseño y validación**

Validación mediante simulación FEA: El diseño del sistema de transmisión debe de pasar por simulación estructural, para modelar el comportamiento de los ejes y otros componentes bajo cargas de torsión y compresión para visualizar la distribución de esfuerzos y evitar zonas críticas. Además, se debe realizar una simulación dinámica, para evaluar el comportamiento de los componentes durante los ciclos de encendido y apagado, sobre todo las cargas de fatiga.

Selección de materiales: La selección es crítica puesto que el sistema estará expuesto a esfuerzos mecánicos, abrasión y exposición a ambiente húmedos y corrosivos debido a su contacto con la materia orgánica. Algunos de esos materiales son:

Tabla 2.4 *Materiales para sistemas de transmisión.*

Material	Propiedades	Aplicación
Acero Inoxidable	Alta resistencia a tracción, corrosión y abrasión	Ejes, acoplamientos, componentes expuestos a humedad
Acero Aleado	Alta resistencia a torsión y tracción	Ejes y componentes con esfuerzos torsionales
Acero Endurecido	Alta dureza, resistencia a la abrasión	Acoplamientos y partes móviles
Poliamida (PA)	Resistencia a humedad y corrosión	Componentes plásticos no sometidos a grandes cargas
Acero Forjado	Buena resistencia a la fatiga	Componentes con cargas cíclicas, como ejes en movimiento

Fuente: Elaboración propia.

Sistema de ventilación y flujo de aire

La aireación es un factor esencial en el compostaje aeróbico, porque permite el ingreso de oxígeno para la actividad microbiana, así como la evacuación de exceso de humedad y gases como el CO₂, NH₃ y H₂S. Por ende el diseño debe de asegurar un flujo de aire adecuado, controlado y distribuido homogéneamente dentro de la cámara.

- **Principio de funcionamiento**

El sistema se basa en el uso de un ventilado centrífugo acoplado a un conducto que permita la inyección y extracción de aire en la cámara de compostaje, la inyección de aire fresco garantiza la presencia de oxígeno para los microorganismos vivos, mientras que la extracción permite evacuar el vapor de agua, el exceso de humedad, gases y compuestos orgánicos volátiles además es necesario que el flujo pase por un sistema de filtración para neutralizar olores antes de liberarlo al ambiente.

- **Fundamentos técnicos**

El sistema de ventilación debe de mantener condiciones aeróbicas adecuadas basadas en los principios de mecánica de fluidos. Para calcular el caudal del aire que debe de circular por el sistema se estima con la siguiente ecuación:

$$Q = V_C * N \quad (20)$$

- Q: caudal de ventilación (m³/min)
- V_C: volumen de la cámara (m³)
- N: número de renovaciones por minuto

Para garantizar la velocidad que debe de tener el aire para atravesar el sustrato sin generar resecamiento o canalización:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (21)$$

- Q = Caudal volumétrico (m³/s)
- A = Área de la sección transversal del conducto (m²)
- v = Velocidad del aire (m/s)

Y para calcular las pérdidas por fricción y accesorios para dimensionar correctamente el ventilador:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (22)$$

- ΔP: pérdida de presión (Pa)
- f: factor de fricción
- L: longitud del conducto (m)
- D: diámetro del conducto (m)
- ρ: densidad del aire (kg/m³)

2.2.8 Normativas y estándares

- **Estándar de Protocolos de comunicación**

La norma IEEE 802.11 es un estándar técnico establecido por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) que regula el funcionamiento de las redes inalámbricas de área local (WLAN). Esta norma define las especificaciones a nivel físico (PHY) y de enlace de datos (MAC) para la comunicación inalámbrica mediante ondas de radio, permitiendo la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes. Como estándar oficial, IEEE 802.11 garantiza que los productos que lo implementan cumplan con criterios de compatibilidad, calidad de servicio, seguridad y eficiencia espectral.

Desde su primera publicación en 1997, el estándar ha sido objeto de múltiples revisiones y ampliaciones, denominadas con letras (como 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac y 802.11ax), cada una incorporando mejoras en velocidad de transmisión, alcance, modulación, gestión del espectro, y técnicas de codificación de datos. La norma ha sido fundamental en el desarrollo de tecnologías Wi-Fi, que se han convertido en un componente esencial para la conectividad global tanto en entornos domésticos como industriales. Como norma reconocida internacionalmente, IEEE 802.11 es adoptada por organismos como la ISO/IEC y utilizada como base para certificaciones oficiales como las otorgadas por la Wi-Fi Alliance, lo que garantiza su aplicación estandarizada a nivel mundial.

2.3 Definición de términos básicos

- **Biorresiduos:** Materiales orgánicos provenientes de restos de alimentos, residuos de jardín, etc., que son la materia prima para el compostaje.
- **Descomposición Microbiana:** Proceso biológico donde microorganismos descomponen la materia orgánica en compost.
- **Aireación:** Sistema que garantiza la presencia de oxígeno necesario para la descomposición aeróbica en el compostaje.
- **Biogás:** Biogás producido durante el compostaje para obtener energía renovable.
- **Compostaje:** Proceso controlado de descomposición de materiales orgánicos para producir compost, un abono orgánico rico en nutrientes.
- **Termófilo:** Microorganismo que prospera en altas temperaturas, como aquellas alcanzadas en la fase termófila del compostaje.
- **Fase Mesófila:** Etapa inicial del compostaje donde la actividad microbiana es moderada y las temperaturas son más suaves que en la fase termófila.

- **Fitoquímicos:** Compuestos orgánicos presentes en plantas que pueden influir en la descomposición y calidad del compost.
- **Materiales estructurantes:** Elementos como ramas, pajas o materiales leñosos que proporcionan estructura al compost y mejoran la aireación.
- **Humificación:** Proceso de formación de humus a partir de la descomposición completa de la materia orgánica.
- **Volatilización:** Proceso donde ciertos nutrientes, como el nitrógeno, se pierden en forma gaseosa durante el compostaje.
- **Ciclo del nitrógeno:** Proceso de transformación del nitrógeno en diferentes formas a lo largo del compostaje, esencial para la formación de nutrientes.
- **Estabilización:** Etapa final del compostaje donde el material alcanza un estado maduro y estable, listo para ser utilizado como abono.
- **Lixiviados:** Fluidos liberados durante el compostaje que contienen nutrientes y pueden ser recogidos para su uso como fertilizante líquido.
- **Sustrato:** Material base sobre el cual se lleva a cabo el proceso de compostaje, como pilas de residuos orgánicos o contenedores específicos.
- **Vermicompostaje:** Proceso de compostaje que utiliza lombrices para descomponer los materiales orgánicos.

CAPITULO III

3 Hipótesis y variables

3.1 Metodología de la investigación

3.1.1 Enfoque de la investigación

El presente estudio adopta un enfoque mixto, puesto que combina el análisis de elementos cuantitativos y cualitativos para el desarrollo del diseño de un dispositivo mecatrónico para la gestión de residuos en entornos domésticos. Dado que la investigación se centra en el desarrollo teórico y computacional, el enfoque mixto permite una comprensión integral del problema, donde los datos cuantitativos brindan información medible sobre análisis matemáticos, simulaciones numéricas y aspectos técnicos, mientras que los cualitativos se revisan normativas, estándares de diseños y se exploran las percepciones de los usuarios sobre la funcionalidad del dispositivo. Se señala que los métodos mixtos permiten integrar datos cuantitativos y cualitativos para abordar problemas complejos de manera más completa, siendo útiles en investigaciones donde se buscan evaluar el rendimiento técnico, esta característica los hace adecuados para proyectos de ingeniería que requiera combinar el modelado técnico con el análisis de factores humanos y sociales durante las fases de diseño preliminar [47]. La elección de este enfoque se justifica por la necesidad de validar el diseño mediante herramientas computacionales, como simulaciones por elementos finitos, dinámica de fluidos o modelos matemáticos, mientras que se incorporan criterios cualitativos como la adaptabilidad del dispositivo en los entornos domésticos junto con la ergonomía que debe proporcionar según requerimientos de los usuarios.

3.1.2 Tipo de investigación

La investigación está enmarcada dentro del enfoque de investigación aplicada, y a que se busca dar solución a una problemática a través de la creación de un diseño de un equipo mecatrónico. Para ello se usará la metodología de diseño y desarrollo tecnológico, esta metodología nos permite desarrollarlo en fases que incluyen desde el análisis del problema, el diseño técnico y la validación de un diseño funcional mediante simuladores. En la tesis [48] se busca mejorar la eficiencia en sistemas agrícolas urbanos mediante la automatización del riego aplicando desarrollo tecnológico; se

inicia con la recopilación de datos y la definición de necesidades funcionales del sistema, luego se pasa a la etapa de diseño conceptual, utilizando herramientas de modelado CAD para visualizar el producto y realizar simulaciones de su operación en diferentes condiciones, finalmente la etapa de desarrollo se complementa con los análisis de forma simulada, el cual es evaluado en entornos controlados para verificar su eficiencia y ajustar parámetros técnicos. En el presente caso, esta metodología se implementará para el diseño de una máquina de producción de compost en entornos domésticos, donde se desarrollará integrando conocimientos de ingeniería mecánica, electrónica y sistemas de control. Las herramientas para utilizar se encuentran SolidWorks para el modelado tridimensional de la estructura mecánica y análisis estructural por elementos finitos, Proteus para la simulación de circuitos electrónicos, y Python para la programación del sistema de control automatizado. Esta integración tecnológica permitirá validar virtualmente el funcionamiento de la máquina, optimizando recursos y garantizando la funcionalidad del sistema en condiciones reales de operación.

3.1.3 Alcance de investigación

Este estudio adopta un alcance descriptivo-explicativo. En su dimensión descriptiva, se especificarán los parámetros de diseño como la estructura, la selección de materiales y de mecanismos, así como los modelos matemáticos que gobiernan el proceso como la transferencia de calor; así mismo, establece los protocolos de simulación computacional mediante análisis por elementos finitos y dinámicas de fluidos. En la referencia [46] se plantea que los estudios descriptivos son necesarios e importantes para dar a conocer las bases técnicas para validar conceptualmente el sistema antes de una implementación física. Y en la dimensión explicativa, se analizarán las relaciones causales entre las decisiones de diseño y los resultados de las simulaciones computacionales. Este análisis permite comprender los parámetros del sistema elegidos y cómo influyen en el rendimiento del dispositivo, tanto en robustez como en funcionalidad dentro de la simulación, para su adaptabilidad a entornos domésticos urbanos. Se sostiene que el enfoque explicativo en simulaciones proporciona una base teórica para optimizar el diseño antes de una implementación física, pues permite identificar las razones detrás del comportamiento del sistema y, con ello, ajustar los parámetros del diseño [50].

3.1.4 Diseño de investigación

En esta investigación se propone un diseño de investigación no experimental, el cual se refiere a aquellos estudios en los cuales los investigadores no tienen control directo sobre las variables, lo que impide realizar experimentos controlados. En su lugar, se observan los fenómenos tal como se dan en su contexto natural, por lo cual se busca analizar las relaciones y correlaciones entre ellas sin intervención directa. Se señala que en los diseños no experimentales, el investigador se enfoca en contextos, variables o sucesos que ya han ocurrido. En este tipo de diseño, la intervención del investigador es mínima, ya que el propósito principal es la observación, descripción y análisis de fenómenos tal como ocurren en su entorno natural, sin modificar su desarrollo o comportamiento [51]. Este enfoque de la investigación es útil cuando las variables de estudio no pueden llegar a ser manipuladas, ya sea por limitaciones éticas, prácticas o metodológicas. Este Tipo de diseño de investigación se aplica en aquellos proyectos donde el objetivo no es probar hipótesis causales o establecer relaciones de causa y efecto, sino más bien obtener una comprensión detallada del fenómeno en cuestión.

3.2 Metodología del diseño

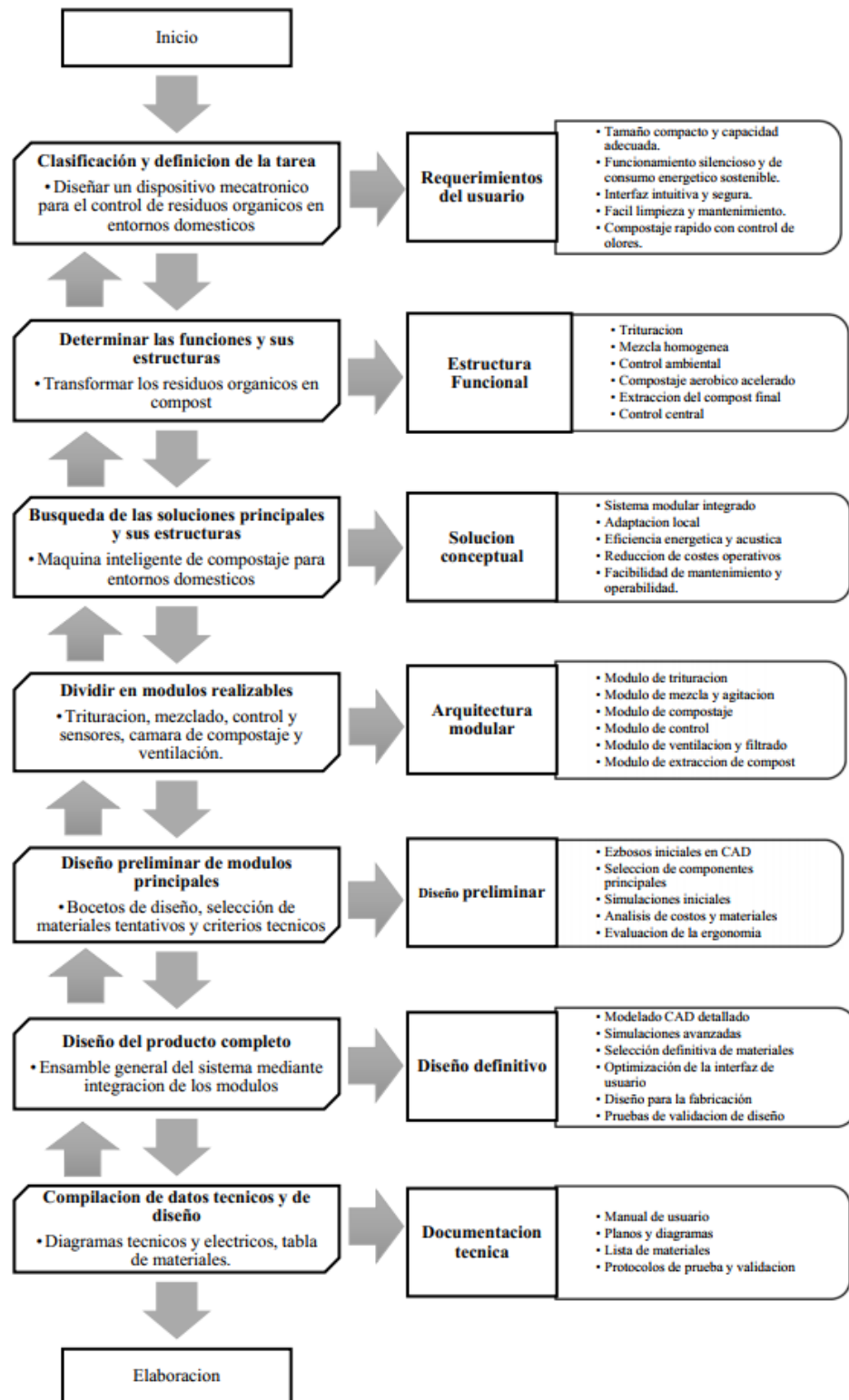
3.2.1 Diagrama de bloques

En esta sección se establece los requisitos necesarios para clasificar, determinar las funciones y distribuciones de la estructura funcional de la máquina.

La figura 3.1 retrata la norma alemana VDI2221 que sirve como una guía estructurada para desarrollar el diseño de un dispositivo mecatrónico para la gestión de residuos en entornos domésticos, desde una idea hasta un producto funcional.

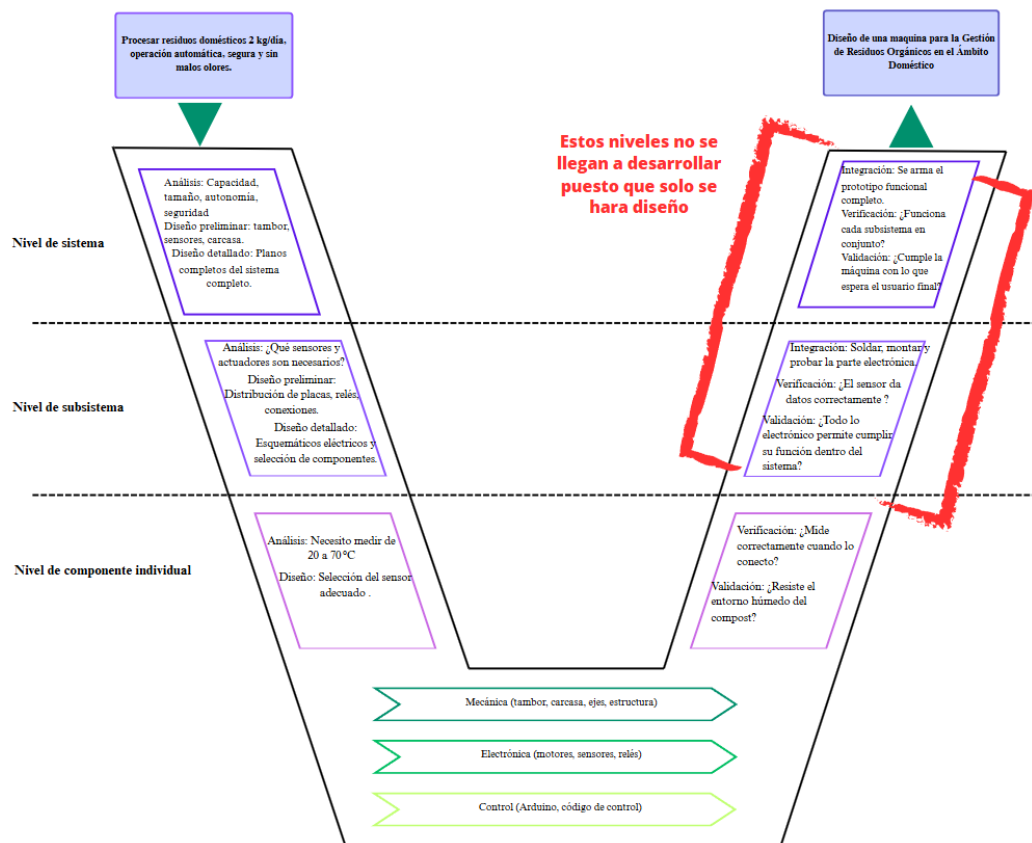
La Figura 3.2 representa la norma alemana VDI 2206, es utilizada como guía para desarrollar la máquina de compostaje autónoma para entornos domésticos. Con este modelo se estructuró el proceso desde los requisitos hasta el diseño simulado, integrando diseño, verificación y validación en niveles mecánico, electrónico y control.

Figura 3.1 Diagrama de bloques VDI 2221 etapas y resultados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2 Diagrama de bloques VDI 2206 etapas y resultados.



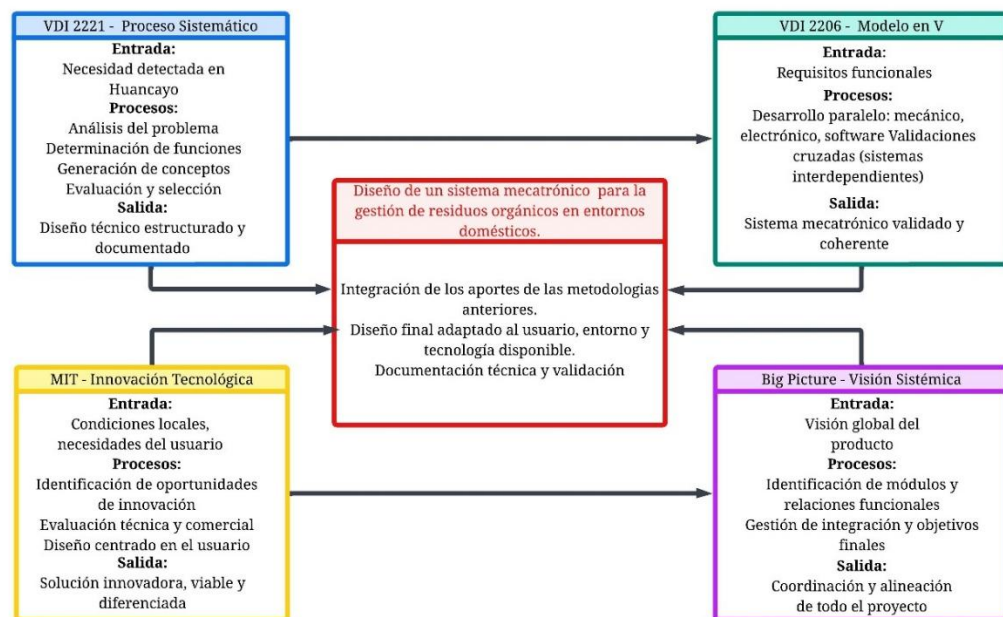
Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Diseño metodológico

Para el desarrollo de este proyecto es necesario una combinación metodológica que integre los lineamientos de VDI 2221, VDI 2206, la Metodología de Innovación Tecnológica (MIT) y el enfoque Big Picture. Esta integración permite abordar de forma rigurosa, estructurada y estratégica el diseño de un sistema mecatrónico como lo es una compostadora domestica inteligente. Cada metodología aporta herramientas y enfoques complementarios que permiten gestionar la innovación, la funcionalidad, la validación técnica y la visión sistemática del producto. La metodología VDI 2221 establece un proceso sistemático para el diseño y desarrollo de productos técnicos mediante una secuencia de etapas, desde el análisis del problema hasta la definición detallada del producto, lo que permite documentar, justificar y verificar cada decisión técnica tomada durante el proceso, manteniendo un orden, trazabilidad y coherencia en el diseño mecánico y estructural del sistema. Por su parte, el VDI 2206 complementa a la metodología mencionada con anterioridad al especializarse en el desarrollo de sistemas mecatrónicos, mediante su modelo en “V”, que permite el diseño y validación paralela de los subsistemas

mecánicos, electrónicos y de control, asegurando la coherencia entre las disciplinas, lo cual es importante para la interacción de los distintos componentes del diseño. La metodología MIT incorpora una dimensión estratégica en el proyecto que fomenta la identificación de oportunidades de innovación y evaluar la viabilidad técnica y comercial, se encarga de fortalecer el enfoque centrado en el usuario, la sostenibilidad y diferenciación tecnológica, que permite la adaptación de un diseño a condiciones locales mediante soluciones creativas y accesibles. Finalmente, el enfoque Big Picture proporciona una visión macro del sistema que permite visualizar la totalidad del proceso de diseño, sus módulos funcionales y la relación entre fases, mediante este sistema se promueve la gestión integral del proyecto, la comunicación entre disciplinas y asegura que las decisiones estén alineadas con los objetivos del proyecto. En conjuntos, permite enfrentar los retos del diseño mecatrónico de una compostadora inteligente para hogares asegurando la calidad técnica, viabilidad practica y valor social y ambiental.

Figura 3.3 *Fusión de metodologías.*



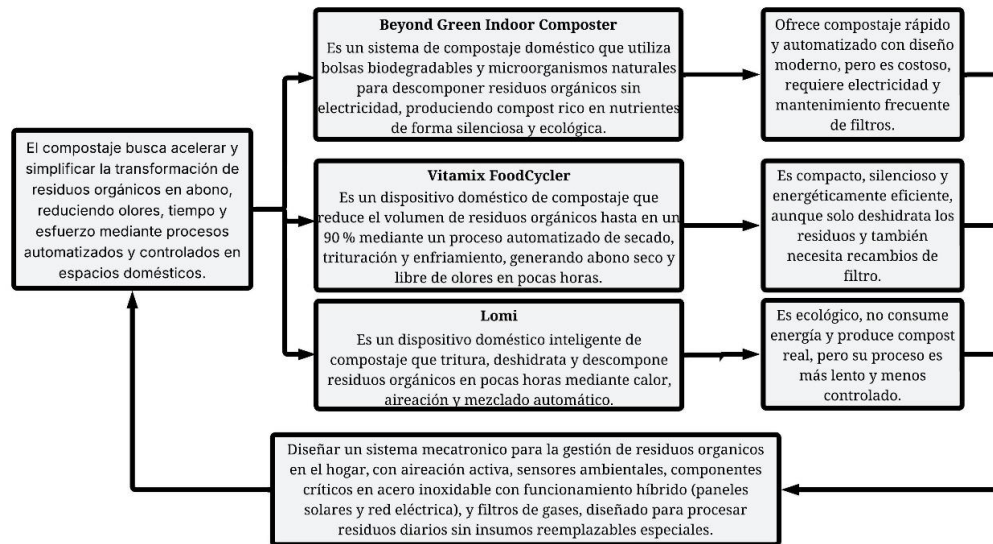
Fuente: Elaboración propia

3.3 Estado de la tecnología

La gestión de residuos orgánicos a nivel doméstico ha evolucionado significativamente gracias al desarrollo de tecnologías inteligentes, automatizadas y adaptadas al sector industrial y urbano. Este avance ha sido impulsado por la creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental, las normativas sobre la gestión de residuos y la demanda de

soluciones accesibles para el usuario común. El presente estado de la tecnología se enfoca en compostadoras inteligentes destacando los principales referentes tecnológicos, sus características técnicas y oportunidades de mejora identificadas.

Figura 3.4 Diagrama de estado de tecnología.



Fuente: Elaboración propia.

En el mercado existen varios dispositivos que cumplen con la problemática de realizar un compostaje en un entorno controlado, sin embargo, cada uno tiene pros y contras en su diseño, el Lomi por ejemplo si bien ofrece un compostaje rápido en pocas horas, lo hace mediante un alto consumo de energía eléctrica y hace uso de aceleradores de descomposición lo cual crea una necesidad de insumos de la marca. Otro ejemplo es el Vitamix que también tiene una producción rápida, sin embargo, lo que produce es un Precompost que necesita maduración. Por ende rescatando las mejores partes de cada diseño y proponiendo mejoras se busca un dispositivo de compostaje inteligente, que maneje los residuos orgánicos en un entorno controlado, que posea un material de fácil limpieza y de alta resistencia a las variables expuestas, sobre todo en las partes críticas como el acero inoxidable, que funcione con fuente de energía híbrida mediante paneles solares y conexión domiciliaria, que no dependa de insumos reemplazables como los aceleradores, pero si haga uso de un filtro de olores. Y que este optimizado para una realidad local estimando la producción diaria por familia de materia orgánica, generando una maquina competitiva con los que existen en el mercado y de alta relevancia para resolver la problemática medioambiental.

3.3.1 Evaluación de requerimientos de usuario

En el margen del desarrollo de una máquina compostadora domiciliaria, la identificación de las necesidades de usuario es considerado una etapa clave para garantizar que el producto final cumpla con las expectativas y requerimientos del público objetivo. Se considera que este proceso es fundamental para transformar ideas iniciales en soluciones concretas, centradas en el usuario. A través de estos métodos cualitativos como entrevistas, encuestas y observaciones, se busca entender no solo los usos típicos y preferencias de los usuarios, sino también sus frustraciones con soluciones actuales y sus propuestas de mejora [52].

En esta etapa se va a entender, interpretar y priorizar las necesidades de los usuarios siendo en su mayoría amas de casa, siendo el público objetivo principal del proyecto. Estos usuarios buscan compostar sus residuos orgánicos generados de forma práctica, limpia y segura, por lo que comprender sus expectativas es clave para el diseño del producto. Se interpretó enunciados recopilados durante las encuestas en requerimientos funcionales del proyecto. Entre las necesidades más destacadas se identificaron la facilidad de uso, la presencia de indicadores visuales del estado del proceso y un diseño estético que se integre adecuadamente en espacios interiores. A su vez, los usuarios expresaron un fuerte interés en que la máquina no emita olores desagradables, que funcione silenciosamente y que su funcionamiento sea. A través de energía solar. Estos hallazgos permiten orientar el desarrollo del proyecto hacia soluciones que generen valor real, priorizando los atributos que mejoren la experiencia del usuario y fomenten la adopción del compostaje doméstico en entornos urbanos.

3.3.2 Lista de necesidades y deseos

Con el fin de orientar el desarrollo del proyecto se desarrolló una matriz que relaciona las necesidades y deseos del usuario con las métricas que permitirán evaluar objetivamente el cumplimiento de dichas expectativas. Las necesidades corresponden a los requerimientos técnicos esenciales para que el producto funcione de manera segura y eficaz en los entornos domésticos. Se identificaron en base a un análisis funcional del compostaje automático y el estudio de tecnologías del mercado retratando los principales problemas de estos productos. Los deseos representan atributos valorados por los usuarios obtenido mediante una evaluación de requerimientos, que, si bien no son

imprescindibles, contribuyen a la aceptación del producto en aspectos claves del diseño.

Tabla 3.1 *Deseos y métricas.*

Deseos y Necesidades		Metricas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			Tamaño medio de partícula < 10 mm	Temperatura interna entre 40-65 °C	Humedad mantenida en el rango 40-60 %	concentración de O ₂ > 10 %	Conductividad térmica del aislamiento < 0.04 W/m·K	Tiempo de limpieza < 10 min	tiempo de mezcla ≤ 5 min	Eficiencia del sistema de transmisión > 80 %	Entrada de energía solar ≥ 100 W	Respaldo de energía por red domiciliaria (AC 220V)	Volumen total ≤ 5.5 L	Nivel de ruido < 60 dB	Concentración de compuestos volátiles en aire < 600 ppm	Factor de seguridad ≥ 3	Latencia de actualización de datos ≤ 10 s
1	Estructura resistente y estable	N														•	
2	Reduce el tamaño de la materia en partículas	N	•														
3	Mantiene condiciones térmicas estables	N		•													
4	Regula el nivel de humedad durante el proceso	N			•												
5	Asegura una aireación interna continua	N				•									•		
6	Conserva el calor dentro de la cámara de compostaje	N					•										
7	Evita derrames dentro de la cámara de compostaje	N		•						•							
8	Facilita la limpieza sin herramientas especiales	N						•									
9	Mezcla los residuos de manera uniforme	N															
10	Integra un sistema de transmisión modular y desacoplable	N							•	•							
11	Funciona con energía solar y doméstica	N									•	•					
12	Soporta el esfuerzo mecánico del uso continuo	N											•				
13	Se adapta a espacios reducidos en cocinas	N											•				
14	Acepta residuos orgánicos domésticos comunes	N															
15	Resiste la corrosión y la oxidación	N														•	
16	Cumple con normas básicas de seguridad doméstica	N															
17	Funcionamiento silencioso	D												•			
18	No genera olores desagradables	D													•		
19	Interfaz intuitiva y moderna	D															
20	Diseño atractivo y compacto	D											•				
21	Indicadores visuales del estado del proceso	D															•

Fuente: Elaboración propia.

Para cada necesidad y deseo, se ha definido al menos una métrica cuantificable, entendida como una propiedad del dispositivo que necesita medirse, observarse o evaluarse de forma objetiva durante las etapas del diseño y simulación. Esto

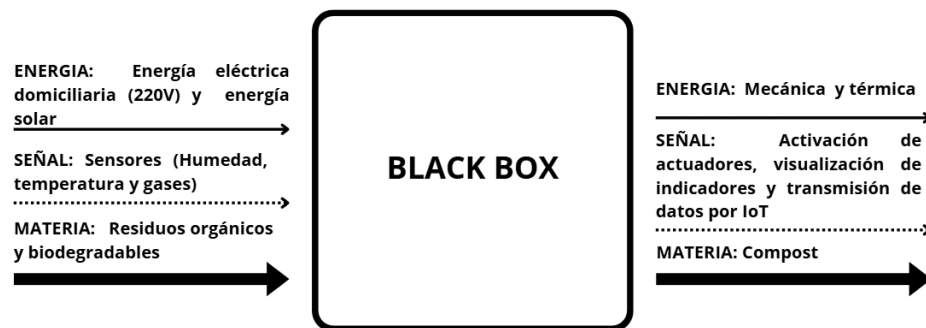
permite la toma de decisiones en el proceso del diseño y permitirá establecer criterios de evaluación del producto final.

3.4 Análisis de solución

3.4.1 Black-Box (Caja negra)

La caja negra representa una visión general del dispositivo mecatrónico de compostaje para hogares, considerando las entradas y salidas para poder determinar los recursos requeridos por el sistema y los productos o resultados que se espera.

Figura 3.5 *Caja negra.*



Fuente: Elaboración propia.

Entradas

- **Energía:** Para alimentar todo el proyecto se requerirá una alimentación híbrida, que aproveche la energía solar para transformarla en energía eléctrica y hacer funcionar los distintos componentes del dispositivo.
- **Señal:** Para obtener la lectura de variables críticas en el proyecto como la temperatura, humedad y gases se necesita el censado de los sensores dedicados a esas variables.
- **Materia:** Los residuos orgánicos provenientes de los hogares, en esencia, los generados en la cocina que suelen ser restos de frutas, vegetales, cáscaras, restos de comida y diversos materiales biodegradables.

Salidas

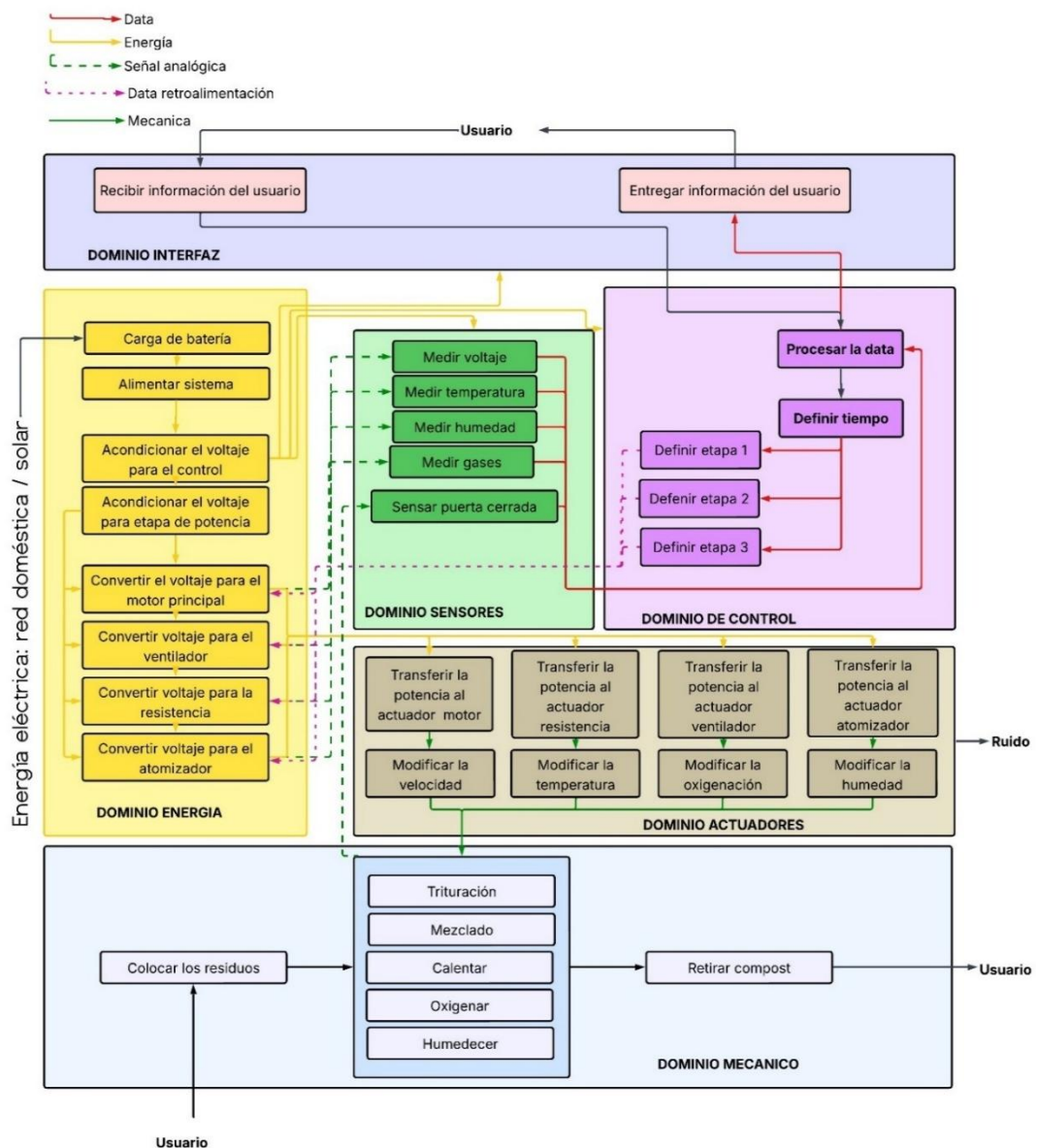
- **Energía:** Mediante la energía eléctrica se genera la energía mecánica a través del funcionamiento de motores como en la trituración, mezclado y aireación, a su vez genera energía térmica mediante el calefactor que ayuda a controlar la temperatura del sistema.

- Señal: Con la lectura de los sensores se activa los actuadores para modificar las variables de control, además de activar indicadores de estado y enviar los datos por IoT.
- Materia: El producto generado por el dispositivo será un compost fresco que podrá pasar el resto de su proceso en el exterior.

3.4.2 Caja blanca

Este diagrama permite observar el interior del sistema, detallando módulos y la forma en que interactúan para lograr una sinergia en el funcionamiento.

Figura 3.6 *Caja blanca*.



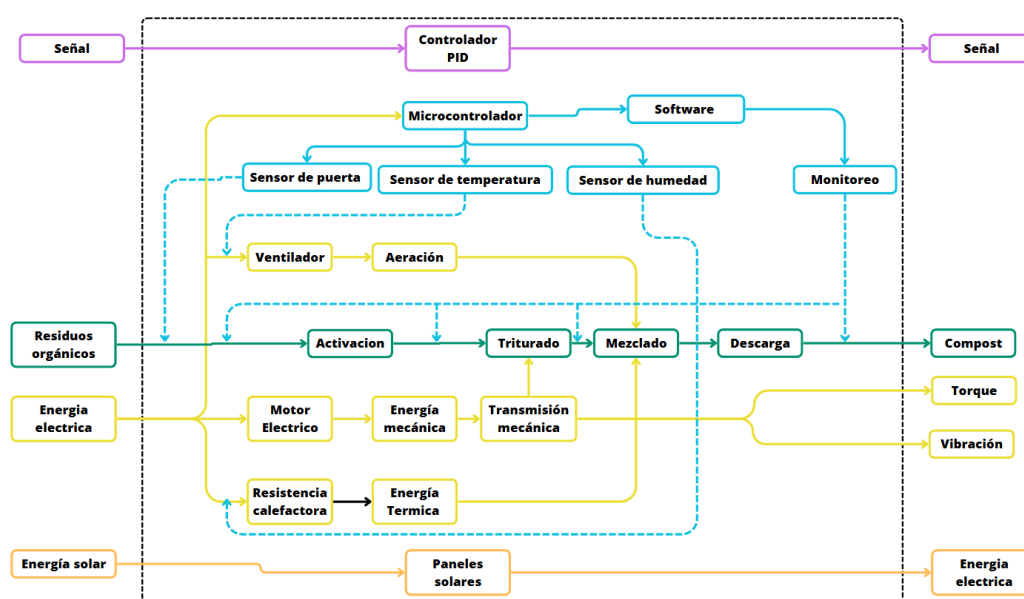
Fuente: Elaboración propia.

El sistema se trabaja por módulos, todo empieza desde la energización del sistema completo, se ingresa la materia orgánica a la cámara de procesos. Todo el sistema se monitoreará constantemente, tiene que verificar que el sistema está cerrado, y controlar las variables internas (temperatura, humedad y gases), mediante el uso de un microcontrolador que comanda los módulos de trituración, mezclado y térmico. Todo el proceso se visualizará en un sistema de comunicación para verificar el estado de la máquina.

3.4.3 Estructura de funciones

Diagramar la estructura funcional permite descomponer el funcionamiento general del dispositivo en funciones específicas. La base de desarrollo se centra en transformar los residuos orgánicos domiciliarios en compost utilizable mediante un proceso controlado.

Figura 3.7 Estructura de funciones.



Fuente: Elaboración propia. 1

3.5 Evaluación conceptual

3.5.1 Matriz de selección de concepto

Esta herramienta sirve para plasmar ideas iniciales y comparar múltiples conceptos en función de ciertos criterios cualitativos. Sirve para descartar las opciones menos viables y conservar las más prometedoras. Los criterios se definieron en base a las características más importantes que debería tener el diseño que se está ideando, se califica mediante códigos (+ “mejor que”, 0 “igual a”, - “peor que”).

Tabla 3.2 *Matriz de selección de concepto*

Criterios de selección	Conceptos						
	A	B	C	D	E	F	G
	Tambor giratorio con sensores	Compartimientos con actuadores	Vermicompostera automatizada	Triturador con calentador	Reactor vertical con ventilación	Solar con IoT	Visión IA
Funcionalidad							
Aireación interna eficiente	+	+	0	0	+	+	+
Integración de sensores	+	+	+	0	+	+	+
Control humedad /temperatura	0	+	+	+	+	+	+
Comodidad							
Fácil de usar y mantener	+	0	+	–	0	+	–
Acceso a componentes internos	0	+	+	0	+	+	–
Ruido bajo	+	–	+	–	+	+	–
Ergonomía							
Operación intuitiva	+	0	+	–	+	+	–
Interacción usuario amigable	+	0	+	–	+	+	–
Seguridad operativa	+	+	+	–	+	+	–
Durabilidad							
Resistencia de materiales	+	+	0	+	+	+	0
Bajo mantenimiento	+	0	+	–	+	+	–
Otros							
Costo de manufactura	+	–	+	–	0	0	–
Consumo energético	+	0	+	–	0	+	–
Escalabilidad doméstica	+	0	+	–	+	+	–
Suma +	10	6	11	2	13	15	3
Suma 0	3	6	3	3	2	1	1
Suma –	0	1	0	8	0	0	11
Evaluación neta	10	5	11	–6	13	15	–8
Calificación	4	5	3	7	2	1	6

Fuente: Elaboración propia.

Después del análisis se descartaron 2 opciones, el concepto G, aunque tecnológico, fallaba en los demás aspectos críticos, como la aireación y factibilidad de uso, muy costoso y poco escalables. Por otra parte, el concepto D, presenta una pésima comodidad y ergonomía, por lo ruidoso y poca seguridad.

3.5.2 Matriz de evaluación de conceptos

Después de una selección inicial, se realiza una evaluación cuantitativa más precisa respecto a los conceptos finalistas. Permite identificar cual concepto es más sólido con base a criterios ponderados, en porcentajes de peso para cada característica calificándolos de 1 a 5, siendo 5 “mejor” y 1 el “peor”, de este análisis se extraen los 3 conceptos con mejor calificación por ser los más viables en base a una comparación más objetiva y técnica de los conceptos.

Tabla 3.3 Matriz de evaluación de conceptos

Conceptos											
		A Tambor giratorio con sensores		B Compartimientos con actuadores		C Vermicompostera automatizada		E Reactor vertical con ventilación		F Solar con IoT	
Criterio	Peso (%)	Calificación	Ponderado Evaluación	Calificación	Ponderado Evaluación	Calificación	Ponderado Evaluación	Calificación	Ponderado Evaluación	Calificación	Ponderado Evaluación
FUNCIONALIDAD	40%										
Aireación interna	14%	5	0.7	5	0.7	3	0.42	5	0.7	5	0.7
Integración de sensores	12%	5	0.6	5	0.6	5	0.6	3	0.36	5	0.6
Control humedad/temper	14%	3	0.42	5	0.7	5	0.7	4	0.56	5	0.7
COMODIDAD (20%)	20%										
Fácil de usar y mantener	7%	5	0.35	3	0.21	5	0.35	3	0.21	5	0.35
Acceso a componentes internos	6%	3	0.18	5	0.3	5	0.3	5	0.3	5	0.3
Ruido bajo	7%	5	0.35	2	0.14	5	0.35	5	0.35	5	0.35
ERGONOMÍA (10%)	10%										
Operación intuitiva	3%	5	0.15	3	0.09	5	0.15	3	0.09	5	0.15
Interacción usuario amigable	4%	5	0.2	3	0.12	5	0.2	5	0.2	4	0.16
Seguridad operativa	3%	5	0.15	5	0.15	5	0.15	4	0.12	5	0.15
DURABILIDAD (15%)	15%										
Resistencia de materiales	8%	5	0.4	5	0.4	3	0.24	3	0.24	5	0.4
Bajo mantenimiento	7%	5	0.35	3	0.21	5	0.35	5	0.35	4	0.28
OTROS (15%)	15%										
Costo de manufactura	5%	5	0.25	2	0.1	5	0.25	4	0.2	5	0.25
Consumo energético	5%	5	0.25	3	0.15	5	0.25	3	0.15	4	0.2
Escalabilidad doméstica	5%	5	0.25	4	0.2	5	0.25	5	0.25	5	0.25
TOTAL PONDERADO	100%	4.6		4.07		4.56		4.08		4.84	
Calificación final		2		4		3		5		1	

Fuente: Elaboración propia.

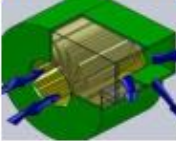
Mediante la comparación cuantitativa de los diferentes conceptos, se selecciona solo los tres mejores en base a su importancia relativa al diseño del dispositivo de compostaje. Estas soluciones sirven como base para un diseño ideal combinando lo mejor de cada diseño para obtener un diseño altamente competitivo adaptada al entorno doméstico.

3.5.3 Matriz morfológica

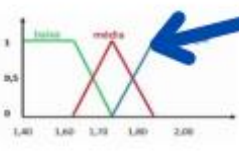
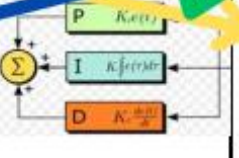
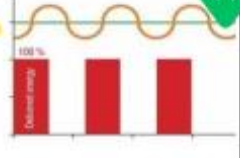
En este tipo de cuadro se generan y organizan soluciones técnicas posibles al descomponer un sistema en sus subsistemas y listar varias alternativas de componentes o mecanismos para cada concepto.

Tabla 3.4 *Matriz morfológica.*

Subsistema	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Cuchillas	 Rodillos dentados	 Disco triturador	 Cuchillas fijas
Paletas	 Tornillo sin fin	 Paletas helicoidales	 Aspas cruzadas
Motor	 Motor AC	 Motorreductor	 Motor DC
Transmisión	 Engranaje helicoidal	 Poleas	 Engranajes helicoidales
Acoplamiento	 Acople Flexible	 Acople hembra - macho	 Acople magnetico
Tapa superior	 Corredera corrediza	 Bisagra con resorte	 Bisagra manual
Inyección	 Bomba de agua	 Bomba peristaltica	 Atomizador

Cuerpo principal	 Polipropileno	 Aluminio anodizado	 Acero inoxidable
Mecanismo de vaciado	 Bandeja deslizable	 Cubeta extraíble	 Trampa de guillotina
Sistema de ventilación	 Ventilación pasiva con ductos	 Ventiladores axiales	 Ventiladores centrífugos
Calefacción interna	 Lámpara cerámica infrarroja	 Resistencia eléctrica	 Manta térmica flexible
Aislamiento térmico	 Paneles multicapa reflectantes	 Espuma de poliuretano	 Lana mineral
Fuente de energía	 Power bank Li-ion	 Panel solar + batería	 red domiciliaria
Regulador de voltaje	 MPPT 12/24V	 L7805 + L7812	 LM2596
Cableado interno	 Flat cable	 Cables siliconados	 Cables PVC multihilo

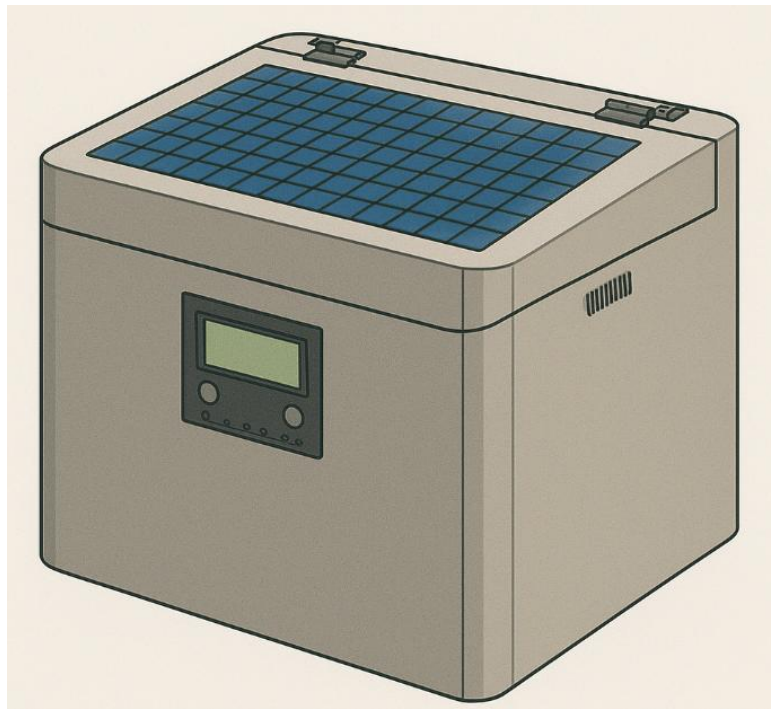
Interruptor principal	 Relé controlado por microcontrolador	 Switch palanca	 Pulsador con LED
Protección eléctrica	 Breaker	 Relé de protección electrónica	 Fusible térmico
Sensor de temperatura	 DS18B20	 Termopar tipo K	 TH04S
Microcontrolador	 Arduino Mega	 Raspberry Pi Pico	 ESP32
Sensor de humedad	 Higrómetro resistivo	 Capacitivo de sustrato	 TH04S
Sensor de gas	 MQ-2	 BME688	 MQ-135
Sensor de seguridad	 Final de carrera	 Sensor capacitivo	 Sensor ultrasónico HC-SR04
Módulo comunicación	 GSM A9G	 Bluetooth	 WiFi

Pantalla	 Pantalla táctil Nextion	 LCD I2C 16x2	 OLED
Indicadores LED	 Barras LED	 LED	 Neopixel
Lenguaje de programación	 Arduino C++	 Python	 MicroPython (ESP32)
Tipo de control	 Lógica difusa (fuzzy)	 PID	 Reglas On-Off
Interfaz remota	 Página web local	 Dashboard en Thingspeak	 App en Blynk
	CONCEPTO F	CONCEPTO A	CONCEPTO C

Fuente: Elaboración propia.

El concepto F es el más avanzado y tecnológicamente completo. Integra un sistema de trituración mediante cuchillas, paletas mezcladoras, transmisión desmontable y calefacción interna. Está diseñado para funcionar de manera autónoma mediante energía solar, gracias a paneles solares, baterías y un regulador MPPT, o alternatively con alimentación de la red doméstica. Incorpora sensores de temperatura, humedad y gases, además de un sistema de inyección de agua atomizada para mantener las condiciones del compostaje. Utiliza un control PID para regular el ambiente interno y cuenta con una interfaz IoT basada en Node-RED, accesible desde PC o dispositivo móvil. Es un sistema ideal para zonas con buen acceso solar, compacto y energéticamente autosostenible. Aunque requiere una inversión inicial mayor y cuidados técnicos, ofrece alto rendimiento, control total y bajo impacto ambiental.

Figura 3.8 *Bosquejo del concepto F.*



Fuente: Elaboración propia.

El concepto A es técnicamente viable para un uso doméstico intensivo. Incorpora un sistema de trituración mediante cuchillas giratorias y mezcla mediante paletas internas montadas en un tambor giratorio, todo accionado por un motor brushless DC con transmisión directa. La compuerta inferior facilita el vaciado automático del compost. Cuenta con sensores de temperatura, humedad y gas que permiten controlar el proceso por medio de un microcontrolador programado en Raspberry Pi. Incluye un sistema de ventilación activa y calefacción por resistencia, lo que lo hace eficaz incluso en climas fríos. Utiliza un control mixto basado en lógica difusa para humedad y mezcla, con indicadores LED para el estado general. Su fuente de energía es la red eléctrica, con protección básica y cableado interno organizado. Este concepto requiere una estructura balanceada y resistente, pero es ideal para hogares que producen grandes volúmenes de residuos orgánicos.

Figura 3.9 *Bosquejo del concepto A.*



Fuente: Elaboración propia.

El concepto C se basa en un enfoque ecológico y de bajo consumo energético. No utiliza sistemas de trituración ni mezcla mecánica, sino que se apoya en lombrices rojas californianas como agentes naturales del compostaje. La estructura consiste en bandejas extraíbles donde se colocan los residuos y las lombrices, permitiendo el paso entre niveles y la recolección del humus maduro. El sistema incluye sensores de temperatura y humedad, un microcontrolador programado en Arduino y un pequeño sistema de riego automático mediante aspersores. Utiliza un control ON/OFF simple, sin IoT ni comunicación remota. El mantenimiento es manual y requiere atención cuidadosa al ambiente interno, debido a que las lombrices son sensibles a variaciones drásticas. Su diseño es ideal para usuarios comprometidos con la sostenibilidad, con bajo costo de implementación y mínima demanda energética.

Figura 3.10 *Bosquejo del concepto C.*



Fuente: Elaboración propia.

3.6 Evaluación técnica, tecnológica y económica.

3.6.1 Evaluación técnica

Se verifica si el diseño propuesto cumple los requerimientos funcionales y operativos del proyecto.

Tabla 3.5 *Evaluación técnica.*

Criterio Técnico	Peso (%)	CONCEPTO C		CONCEPTO A		CONCEPTO F	
		Calificación	Promedio	Calificación	Promedio	Calificación	Promedio
Eficiencia de función	15%	7	1.05	9	1.35	10	1.5
Ergonomía	10%	8	0.8	7	0.7	9	0.9
Operabilidad y seguridad	10%	8	0.8	9	0.9	9	0.9
Resistencia a la humedad	10%	9	0.9	8	0.8	9	0.9
Resistencia a la temperatura	5%	6	0.3	7	0.35	9	0.45
Mantenimiento (interior/exterior)	10%	9	0.9	7	0.7	8	0.8
Operatividad térmica	10%	5	0.5	6	0.6	10	1
Desempeño estructural	10%	7	0.7	9	0.9	8	0.8
Consumo de potencia	10%	7	0.7	8	0.8	9	0.9
Capacidad de operación	10%	8	0.8	9	0.9	9	0.9
Total ponderado (máx. 100)	100%	7.45		8.00		9.05	

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que el concepto F obtiene un mayor puntaje debido a la integración de sistemas que contribuyen en lo estructural y operacional del diseño. Su estructura de acero inoxidable y su sistema de automatización genera una buena resistencia, bajo mantenimientos y alta operabilidad, sin embargo, su diseño complejo implica un mayor desafío en el montaje interior. El concepto A se muestra como una opción balanceada, mientras que el concepto C, aunque funcional presenta limitaciones en lo estructural y operativa.

3.6.2 Evaluación tecnológica

Se analiza si las tecnologías son adecuadas, actualizadas y compatibles con el desarrollo del sistema.

Tabla 3.6 *Evaluación tecnológica.*

Criterio Técnico	Peso (%)	CONCEPTO C		CONCEPTO A		CONCEPTO F	
		Calificación	Promedio	Calificación	Promedio	Calificación	Promedio
Nivel de automatización	15%	7	1.05	8	1.2	10	1.5
Capacidad de integración IoT	15%	6	0.9	8	1.2	10	1.5
Variedad y precisión de sensores	15%	6	0.9	9	1.35	10	1.5
Facilidad de programación	10%	8	0.8	7	0.7	9	0.9
Flexibilidad tecnológica (modular)	10%	7	0.7	8	0.8	9	0.9
Nivel de innovación tecnológica	15%	6	0.9	8	1.2	10	1.5
Interfaz usuario (visualización)	10%	7	0.7	7	0.7	9	0.9
Conectividad y comunicación remota	10%	5	0.5	8	0.8	10	1
Total ponderado (máx. 100)	100%	6.45		7.95		9.7	

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente destaca el concepto F por su conectividad a la nube, uso de sensores inteligentes y alimentación solar, lo que otorga una capacidad de monitoreo y control de las variables. El concepto A incorpora sensores básicos y algo de automatización, pero no alcanza el nivel de integración que el F. El concepto C, al ser un poco más tradicional tiene una baja incorporación de tecnología por lo que su adaptabilidad es limitada.

3.6.3 Evaluación económica

Se determina si el proyecto es rentable y sostenible, considerando costos, beneficios y retorno de inversión.

Tabla 3.7 *Evaluación económica.*

Criterio Técnico	Peso (%)	CONCEPTO C		CONCEPTO A		CONCEPTO F	
		Calificación	Promedio	Calificación	Promedio	Calificación	Promedio
Costo estimado de fabricación	25%	9	2.25	7	1.75	5	1.25
Costo de operación y mantenimiento	15%	9	1.35	7	1.05	6	0.9
Disponibilidad de componentes en el mercado	10%	8	0.8	8	0.8	7	0.7
Complejidad de fabricación	15%	9	1.35	7	1.05	6	0.9
Durabilidad/ciclo de vida (costo-beneficio)	10%	7	0.7	8	0.8	9	0.9
Escalabilidad de producción	10%	8	0.8	7	0.7	7	0.7
Costo de integración tecnológica	15%	6	0.9	8	1.2	9	1.35
Total ponderado (máx. 100)	100%	8.15		7.35		6.7	

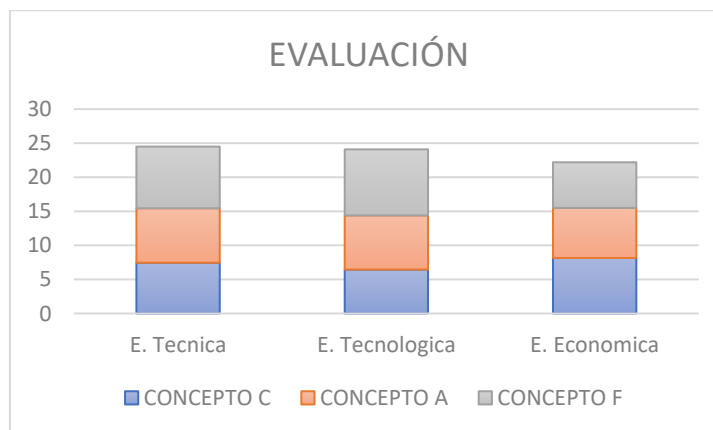
Fuente: Elaboración propia.

Al tener una simplicidad constructiva, la mejor opción se muestra el concepto C, que es de bajo costo constructivo y facilidad de fabricación. Lo convierte en una opción accesible para presupuestos reducidos. El concepto A presenta un equilibrio aceptable entre costo y tecnología, mostrando una inversión moderada. En contraste, el concepto F al tener una mayor cantidad de elementos y presentar un nivel de automatización mal alto, presenta un costo más elevado.

3.7 Concepto solución del diseño

Para seleccionar el mejor concepto tras las evaluaciones técnicas, tecnológicas y económicas, se disponen los resultados obtenidos en un gráfico de columnas apiladas para visualizar la opción con mayor puntuación.

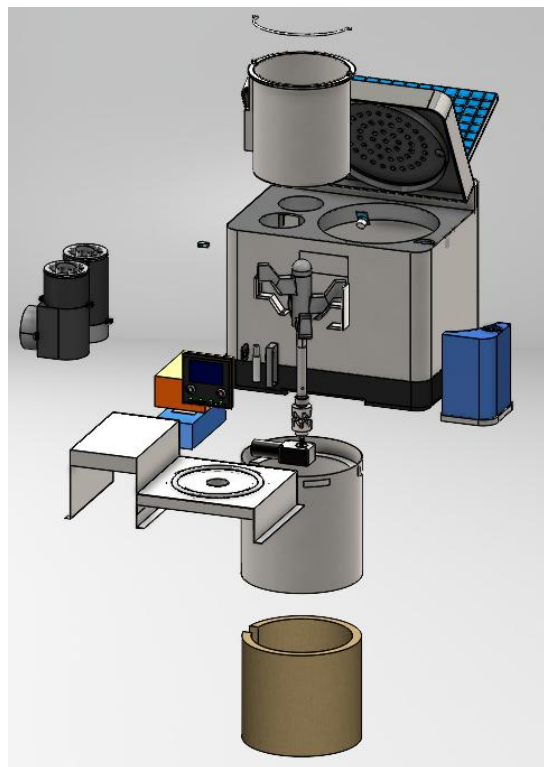
Figura 3.11 *Evaluación de diseño.*



Fuente: Elaboración propia.

Acorde a los resultados se determina que el concepto F es la mejor solución superando casi los 25 puntos de un total de 30. Esta propuesta consiste en un sistema de compostaje que combina un enfoque sustentable con tecnología IoT y automatización completa. Utiliza cuchillas fijas para triturar mediante el movimiento de aspas que sirve como mezcladores accionados por un motor DC que trabajará a dos velocidades dependiendo del proceso, la transmisión se dará mediante engranajes rectos de acople tipo macho y hembra. La estructura incluye un cuerpo de acero inoxidable en las partes con contacto a la humedad con una tapa abatible por bisagra y un mecanismo de salida mediante una cubeta extraíble para facilitar el vaciado del compost. Existirá un sistema de aireación forzada por medio de un ventilador axial que ayudará en la oxigenación del sistema. El sistema térmico este compuesto por una resistencia eléctrica tubular y aislamiento por lana mineral. Usa sensores DHT22 para la temperatura, sensor capacitivo digital para la humedad y MQ-135 para los gases y un final de carrera para la seguridad de la compuerta principal. Se alimenta con un panel solar y batería, mediante regulador de voltajes. Todo el sistema funcionara desde un ESP32 con un lenguaje en Micro Python, conectado a la nube por Wifi, visualizando datos en la aplicación Node-RED. Su sistema inteligente permite monitoreo constante del proceso.

Figura 3.12 *Vista explosionada del concepto F.*



Fuente: Elaboración propia.

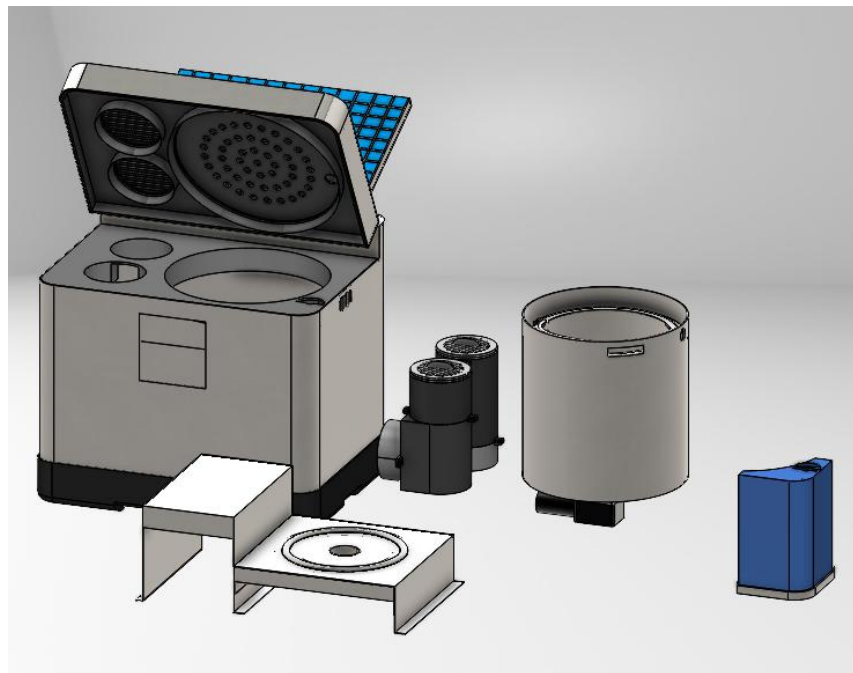
CAPITULO IV

4 Desarrollo

4.1 Diseño mecánico

El sistema mecánico se subdivide en 5 grandes ensambles generales, que abarcan los principales actuadores del proyecto, siendo el sistema de la cámara de compostaje, el sistema térmico, el montaje de los ductos de ventilación, el ensamble del atomizador y la carcasa completa de todo el dispositivo.

Figura 4.1 *Explosionado de los sistemas mecánicos.*



Fuente: Elaboración propia

Cada sistema cuenta con distintos componentes, los cuales se diseñan en base a cálculos y análisis de comportamientos estáticos y dinámicos.

4.1.1 Cubeta de compostadora

Cálculo del volumen diario

El espacio dispuesto por día para 4 personas es:

$$P_d = 0.32 \text{ kg / persona / dia} * 4 \text{ personas} = 1.28 \text{ kg/dia} \approx 1.28 \text{ kg}$$

El volumen necesario sin margen es:

$$V = \frac{P_d}{\rho} = \frac{1.28}{380} = 0.00337 \text{ m}^3 \approx 3.4 \text{ L}$$

Considerando volumen con margen de seguridad del 50%:

$$V_{diseño} = 3.4 * 3.4(0.5) = 5.1L$$

Cálculo de dimensiones

Se asume una altura total de la cubeta de 0.20 m:

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$0.0051 = \pi * r^2 * (0.20m)$$

$$r = 0.9m$$

Cálculo de la presión interna

La fuerza ejercida por los residuos orgánicos es:

$$F = M * g$$

$$F = 1.28 \text{ kg} * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 12.57 \text{ N}$$

El área de la base es:

$$A = \pi r^2 = \pi(0.09)^2 = 0.0254 \text{ m}^2$$

Y por ende la presión es:

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{12.57 \text{ N}}{0.0254 \text{ m}^2}$$

$$P \approx 495 \text{ Pa}$$

Cálculo del espesor de la pared del cilindro

La resistencia a la tracción del acero inoxidable AISI 304 es 520 MPa y con un factor de 25%, la resistencia admisible es:

$$\sigma_{admisble} = 0.25 * 500 * 10^6 \text{ Pa} = 125 * 10^6 \text{ Pa}$$

El resultado del espesor es:

$$t = \frac{(P * r)}{\sigma_{admisble}}$$

$$t = \frac{(495 \text{ Pa} * 0.09 \text{ m})}{125 * 10^6 \text{ Pa}}$$

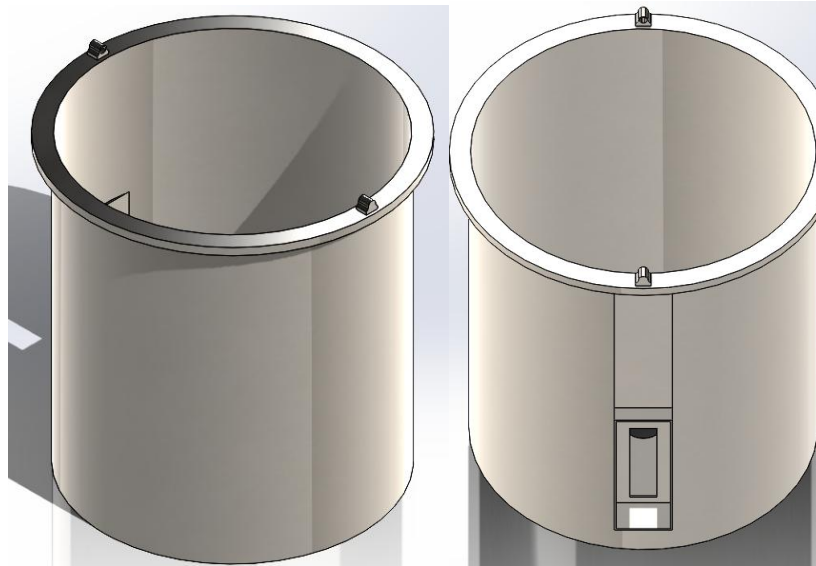
$$t = 3.56 * 10^{-7} m \approx 0.000356 mm$$

El espesor asumido es de 1 mm.

Diseño en SolidWorks

La siguiente figura muestra la cubeta donde se alojará los residuos orgánicos y se procesaran para obtener compost, diseñado en acero inoxidable AISI 304:

Figura 4.2 *Diseño de cubeta.*

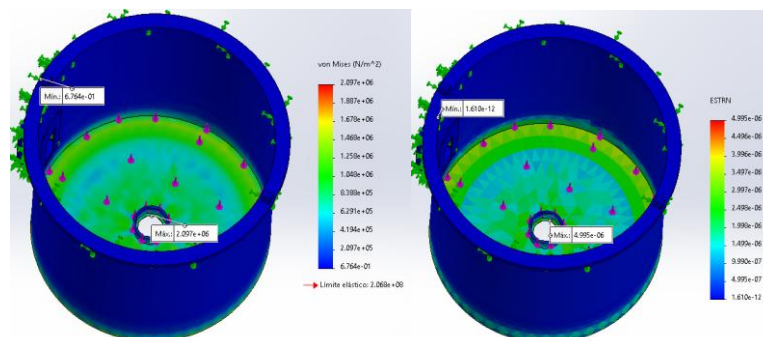


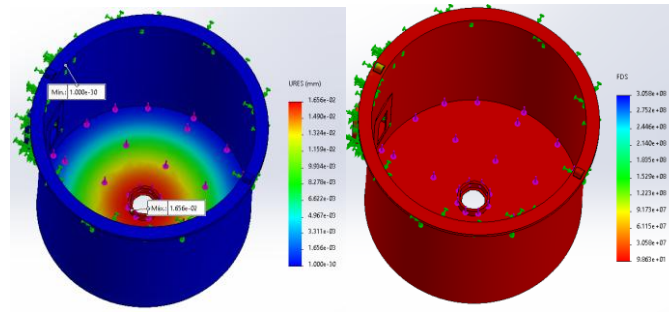
Fuente: Elaboración propia

Prueba de elementos finitos

El máxima esfuerzo a la que está expuesto es 2.01Mpa y el límite elástico es de 200 MPA. Los resultados de las pruebas de elementos finitos se reflejan en la figura 4.3.

Figura 4.3 *Prueba de elementos finitos de cubeta.*





Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Diseño del sistema de trituración

Fuerza cortante

El área de corte estimado es:

$$A_{\text{corte}} = \text{Longitud de cuchilla} \times \text{espesor de material a cortar} \\ = 0.03 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

La resistencia al corte de las materias orgánicas en promedio es de 0.5 MPa y la fuerza necesaria obtenida es:

$$F_{\text{corte}} = \tau \times A_{\text{corte}} = (0.5 \times 10^6 \text{ Pa}) \times (3 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 150 \text{ N}$$

Par del motor

El torque del motor correspondiente a la distancia radial entre el eje y el punto de aplicación de la fuerza es:

$$T = F \times r = 150 \text{ N} \times 0.055 \text{ m} = 8.25 \text{ Nm}$$

Cálculo de potencia

La velocidad de rotación es fijada en 180 RPM, estimado para el corte de la materia orgánica.

$$\omega = 2\pi \times \frac{n}{60} = 2\pi \times \frac{180}{60} = 18.85 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Entonces, la potencia obtenida es:

$$P = T \times \omega = 8.25 \text{ Nm} \times 18.85 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 155.5 \text{ W} \approx 155 \text{ W}$$

Angulo y posicionamiento de cuchillas

Las cuchillas están posicionadas en las bases del cilindro, orientadas frente a frente, y su ángulo de corte es:

$$\theta = \arctan\left(\frac{F_c}{A_c \times \sigma_{\text{materia}}}\right)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{150 \text{ N}}{\frac{150 \text{ N}}{1 * 10^6 \text{ Pa}} * 1 * 10^6 \text{ Pa}}\right)$$

$$\theta = 0.7854 \cdot \frac{180}{\pi} = 45^\circ$$

Con residuos orgánicos enfrentando la cuchilla de manera ortogonal, el sistema opera bajo un coeficiente de fricción de 0.5, por lo que el ángulo final es:

$$\beta = \tan^{-1}(\mu)$$

$$\beta = \tan^{-1}(0.5)$$

$$\beta = 0.5 \approx 26.6^\circ$$

Por tanto, mediante la mecánica del corte ortogonal el ángulo de ataque es:

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}$$

$$\phi = 45^\circ - \frac{26.6}{2} = 31.7^\circ \approx 30^\circ$$

Espesor de las cuchillas

El espesor mínimo calculado para las cuchillas es:

$$e_{cuchilla} = \frac{F_c}{\tau * L}$$

$$e_{cuchilla} = \frac{150 \text{ N}}{700 * 10^6 \text{ Pa} * 0.06 \text{ m}}$$

$$e_{cuchilla} = 0.00375 \text{ mm}$$

Espesor mínimo por flexión

La resistencia a la flexión del acero inoxidable AISI 420 es 175 MPa, por tanto el espesor mínimo es:

$$F_{puntual} = \frac{12.56 \text{ N}}{3} = 4.19 \text{ N}$$

$$e = \sqrt{\frac{6 * F * L}{b * \sigma_{flex}}} = \sqrt{\frac{6 * 4.19 \text{ N} * 0.06 \text{ m}}{0.03 \text{ m} * 175 * 10^6 \text{ Pa}}} = 0.000536 \text{ m} = 0.536 \text{ mm}$$

Al aplicar criterios de seguridad de 2, fatiga por ciclos repetitivos de 50% al 100%, desgaste por abrasión con pérdidas por filo y por impactos accidentales:

$$e_1 = 0.536 \text{ mm} * \sqrt{2} = 0.76 \text{ mm}$$

$$e_2 = 0.76 \text{ mm} * 1.5 = 1.14 \text{ mm}$$

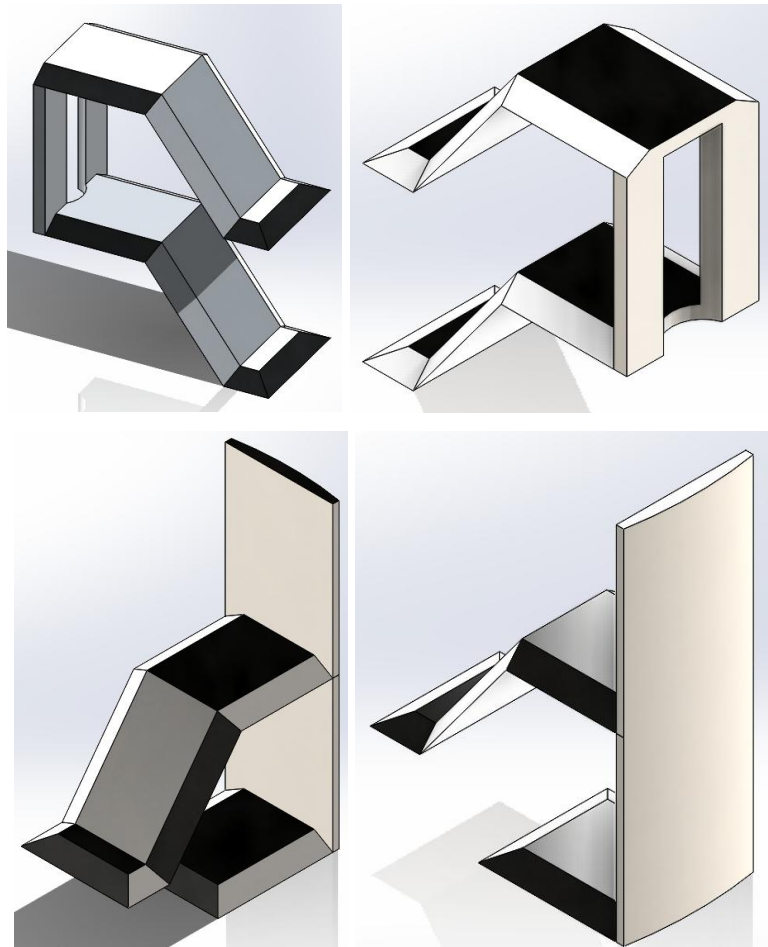
$$e_3 = 1.14 \text{ mm} + 1 = 2.15$$

$$e_4 = 2.15 \text{ mm} + 0.8m = 2.95 \text{ mm} \approx 3 \text{ mm}$$

Diseño de las cuchillas

El diseño de las cuchillas está considerado de manera fija en los laterales de la cámara de compostaje con la forma propuesta, ubicados frente a frente, tal como se observa en la figura 4.4.

Figura 4.4 *Diseño de cuchillas principal y secundaria*

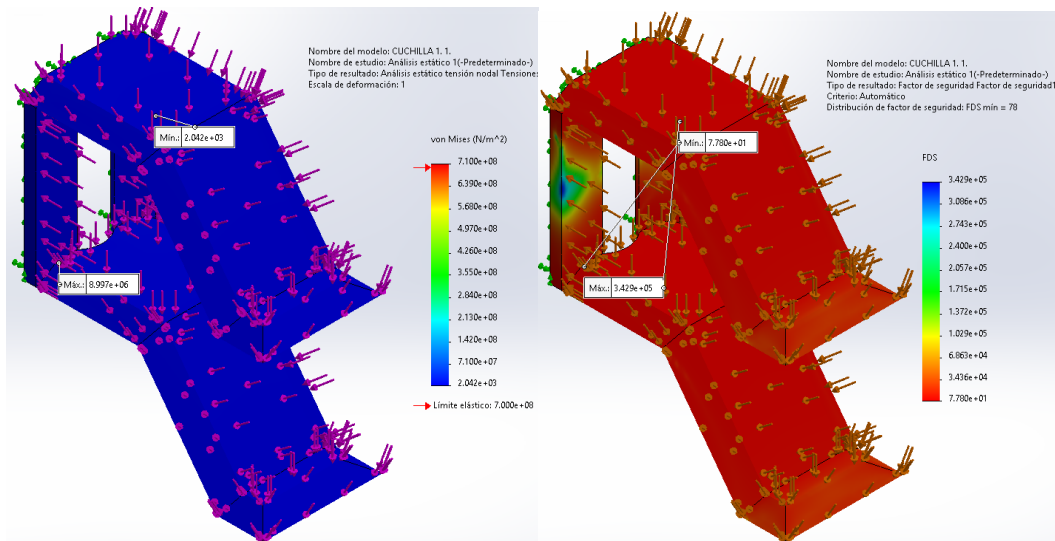


Fuente: Elaboración propia.

Prueba de elementos finitos

Se realizó un análisis estático en las 2 cuchillas ante una carga máxima de 12.56 N, tal como se muestra en la figura 4.5.

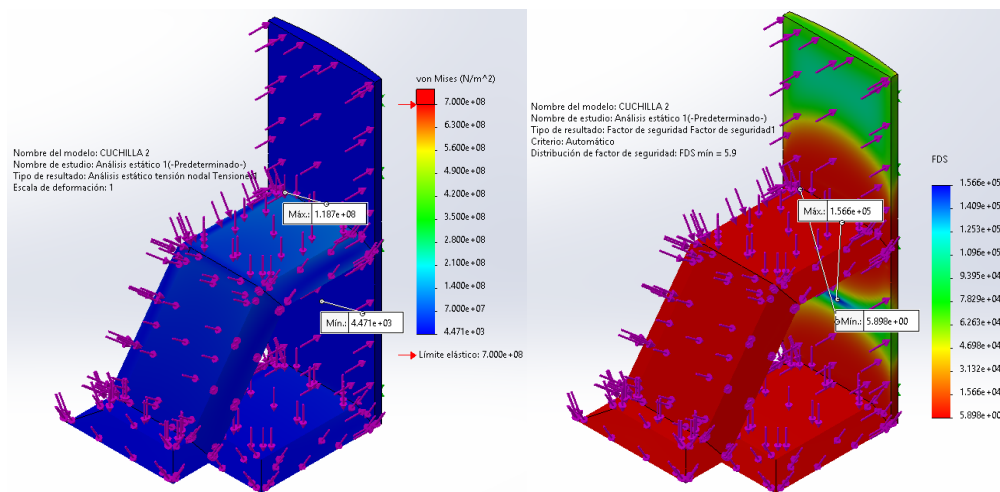
Figura 4.5 Prueba de elementos finitos de cuchilla 1.



Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo, al aplicar la misma magnitud de fuerza sobre la segunda cuchilla, se obtuvieron los resultados que se detallan en la figura 4.6, evidenciando el comportamiento del sistema bajo condiciones equivalentes.

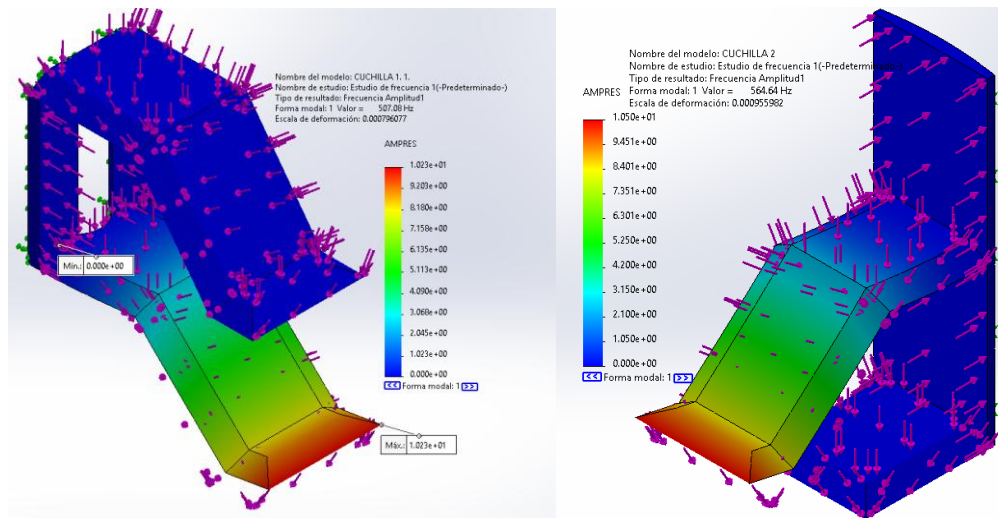
Figura 4.6 Prueba de elementos finitos de cuchilla 2.



Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de frecuencia de las cuchillas, ante la vibración producida por el motor ubicado en la base del cilindro, muestran que no tienen una reacción considerable. En la figura 4.7 se ve el análisis modal de las cuchilla principal y secundaria.

Figura 4.7 Prueba de vibración de cuchilla.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Diseño del sistema de mezclado

Torque para mezclar

Para estimar el torque necesario para mezclar residuos orgánicos semihúmedos, se considera una viscosidad de 100 Pa:

$$T = K * \mu * N * R^3$$

$$N = \frac{RPM}{60} = \frac{180}{60} \approx 3 \text{ rev/s}$$

$$T = 3 * 100 * 3 * (0.16)^3$$

$$T = 3.686 \text{ Nm}$$

Momento flecto en las paletas

El momento flecto en la base de la paleta corresponde al torque aplicado por cada paleta. Considerando el torque total de 3.686 Nm, el torque se distribuye en partes iguales:

$$M = F * L$$

$$T_{paleta} = \frac{T_{total}}{3} = \frac{3.686 \text{ N.m}}{3} \approx 1.228 \text{ N.m}$$

La fuerza generada por el torque de cada paleta es:

$$F = \frac{T_{paleta}}{r} = \frac{1228 \text{ N.mm}}{90 \text{ mm}} = 13.65 \text{ N.}$$

Y el torque se traduce directamente en momento flector en la base de cada paleta:

$$M = F * L = 13.65 \text{ N} * 81.5 \approx 1112.5 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Cálculo del espesor de la paleta

Se considera el esfuerzo por flexión en vigas de sección rectangular, utilizando la relación:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I}$$

Adoptando un esfuerzo admisible de 65 N/mm^2 del material propileno y un ancho de paleta de 30mm, el espesor requerido se calcula como:

$$t = \sqrt{\frac{6 * M}{b * \sigma}}$$

$$t = \sqrt{\frac{6 * 1112.5 \text{ N} \cdot \text{mm}}{30 \text{ mm} * 65 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}$$

$$t = \sqrt{3.423} \approx 1.85 \text{ cm} = 18.5 \text{ mm}$$

Potencia de motor requerida para mezclar

La potencia es calculada por la siguiente formula:

$$P = T * \omega$$

$$P = 3.686 * 18.85 = 69.45 \text{ W}$$

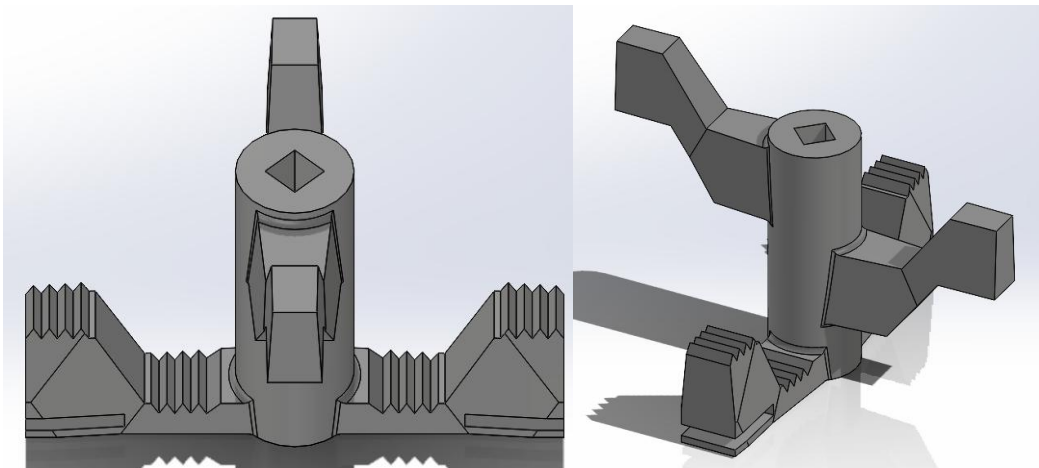
Selección de paletas

Se selecciono un sistema de mezcla por paletas escalonadas. La configuración considera tres paletas puestas a 90° entre sí. El largo total de punta a punta es de 0.16 m y el ancho mínimo es de 0.20 mm. El material seleccionado por sus propiedades y ligereza es de polipropileno.

Diseño de paletas

Las paletas escalonadas tienen una forma de manera que tenga una separación no máxima de 3 mm de las cuchillas.

Figura 4.8 *Diseño de paletas.*

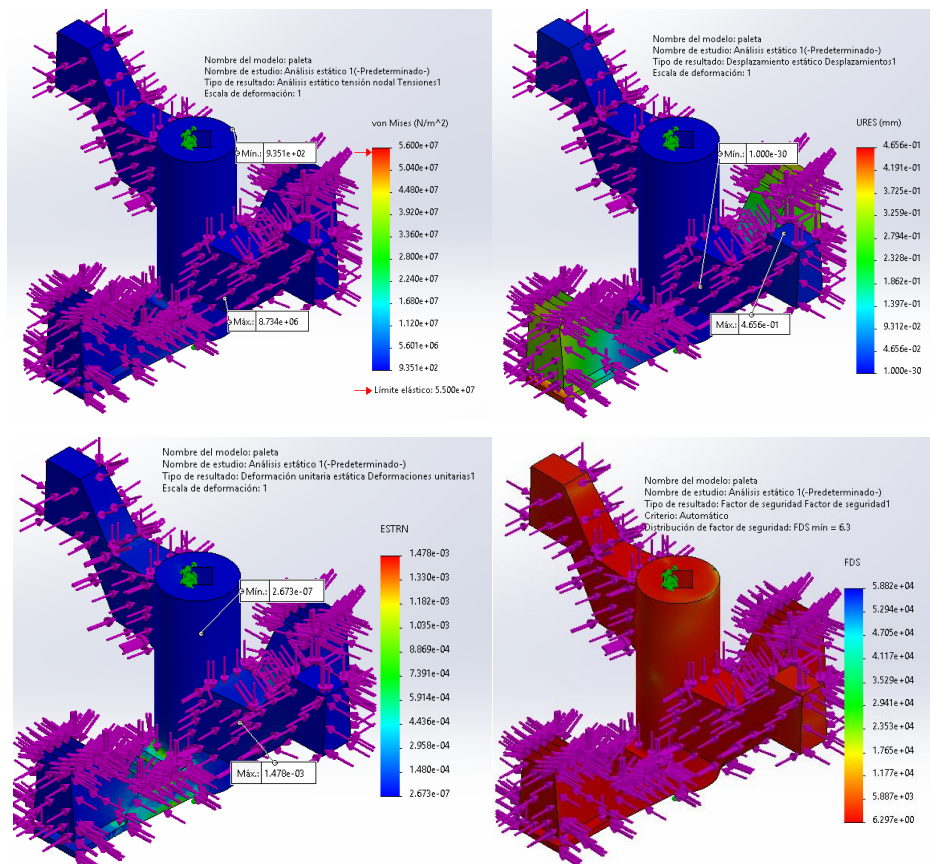


Fuente: Elaboración propia.

Simulación de elementos finitos

La carga estática a la que está expuesta la paleta tiene un promedio máximo de 8 MPa expuesto a un límite elástico de 55MPa se aprecia en la figura 4.9.

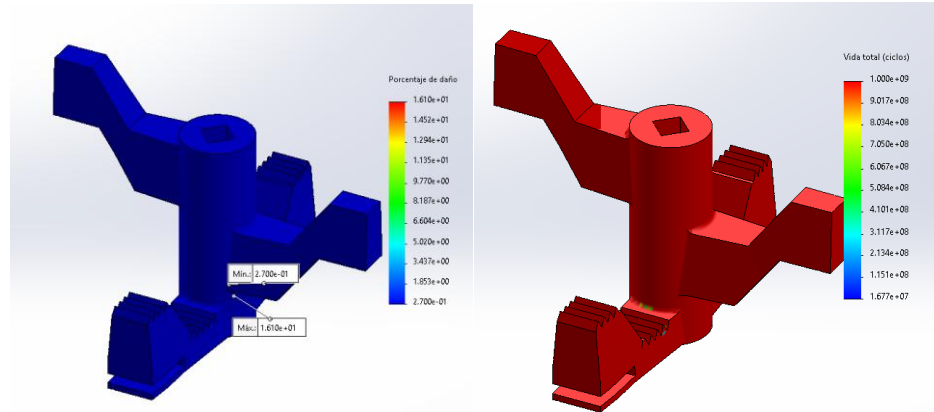
Figura 4.9 *Prueba de elementos finitos de paleta.*



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de fatiga por carga cíclicas considerando un funcionamiento de 66 ciclos, por 12 horas en un año, dio como resultado lo que se observa en la figura 4.10.

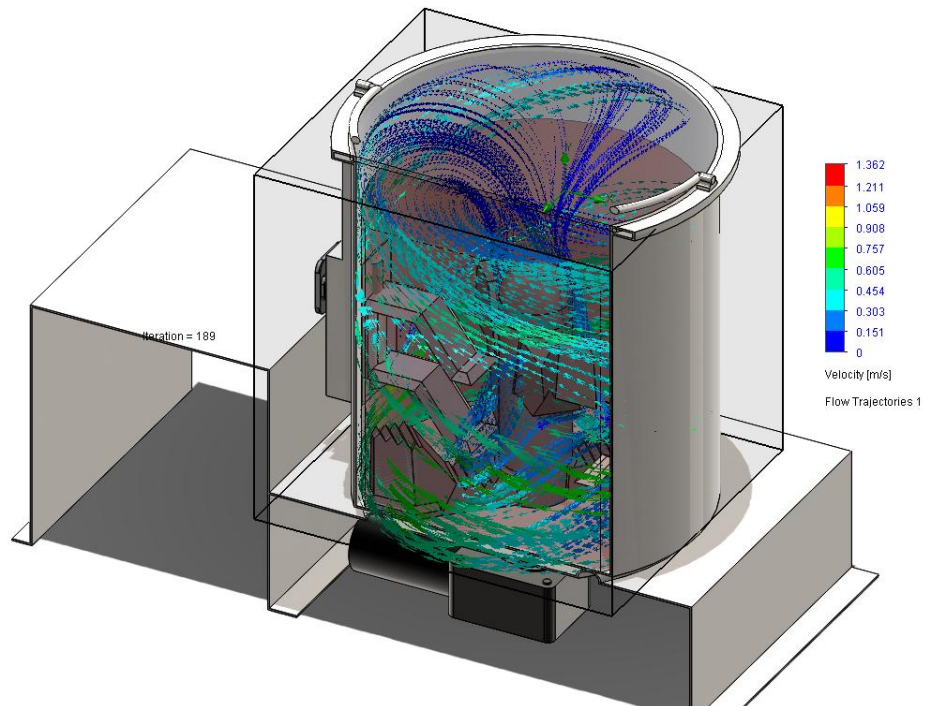
Figura 4.10 *Análisis de fatiga de paleta.*

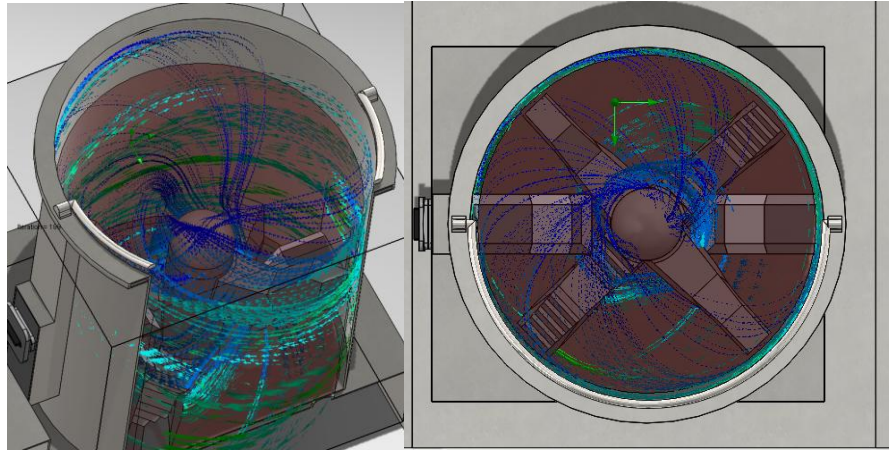


Fuente: Elaboración propia.

El diseño de las paletas con la disposición de las cuchillas se sometió a una simulación de comportamiento del fluido, para verificar el movimiento de este dentro de la cámara a causa del movimiento generado por el motorreductor, se refleja el movimiento según las siguientes imágenes.

Figura 4.11 *Simulación del movimiento del fluido.*





Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Diseño del sistema de transmisión

Cálculo del diámetro del eje

El diámetro del eje de rotación considerando el esfuerzo cortante del acero inoxidable AISI 304, es:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 8250 \text{ N.m}}{\pi \cdot 60 \text{ N/mm}^2}} = \sqrt[3]{700.56} = 8.89 \text{ mm} \approx 9 \text{ mm}$$

Considerando un factor de seguridad de 2, el diámetro usado para el eje es de 18 mm.

Cálculos para acople

Se selecciono un acople de dientes helicoidales para la transmisión y para facilitar la extracción de la cubeta. El torque por diente es:

$$T_{\text{por diente}} = \frac{8.25 \text{ N.m}}{6} = 1.37 \text{ N.m}$$

Las dimensiones adoptadas son una altura de 15 mm de los dientes, el ancho de la base de 5 mm y el radio del acople de 11mm. Por tanto, el área de contacto de cada aleta es:

$$A = \frac{15 \cdot 5}{2} = 37.5 \text{ mm} = 37.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

El torque que resisten las aletas del acople es:

$$T_{\text{aletas}} = \tau_{\text{material}} \cdot A_{\text{eje}} \cdot r_{\text{eje}}$$

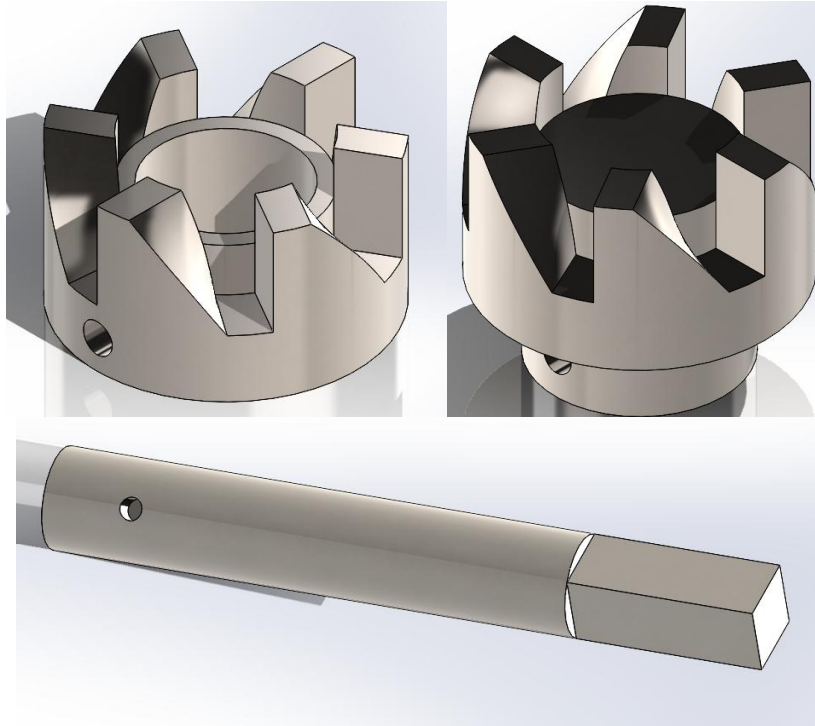
$$T_{\text{aletas}} = 60 \cdot 10^6 \cdot 37.5 \cdot 10^{-6} \cdot 0.018$$

$$T_{\text{aletas}} = 40.5 \text{ N.m}$$

Diseño del eje y acople

La longitud del eje se establece en 130 mm, considerando la reducción del volumen tras los procesos de trituración y mezclado.

Figura 4.12 *Diseño de sistema de transmisión y acoples.*

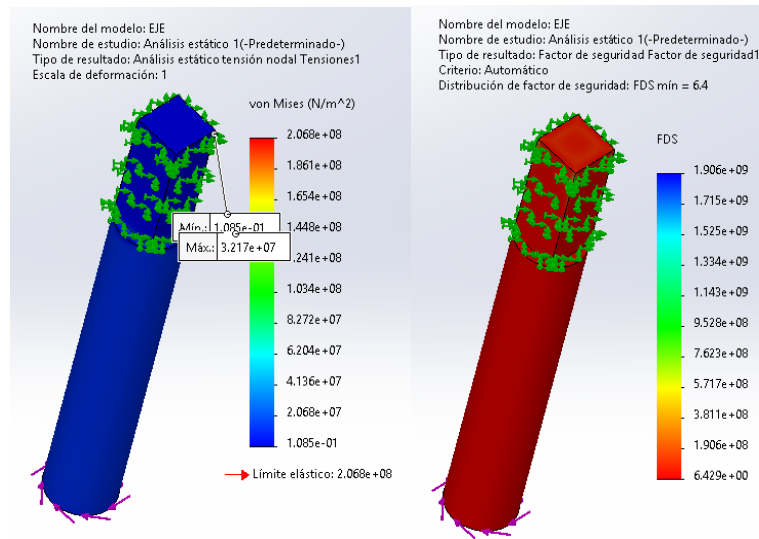


Fuente: Elaboración propia.

Simulación

El análisis estático por fuerza de torsión aplicando una fuerza de 8.25 Nm, da los resultados de la figura 4.13.

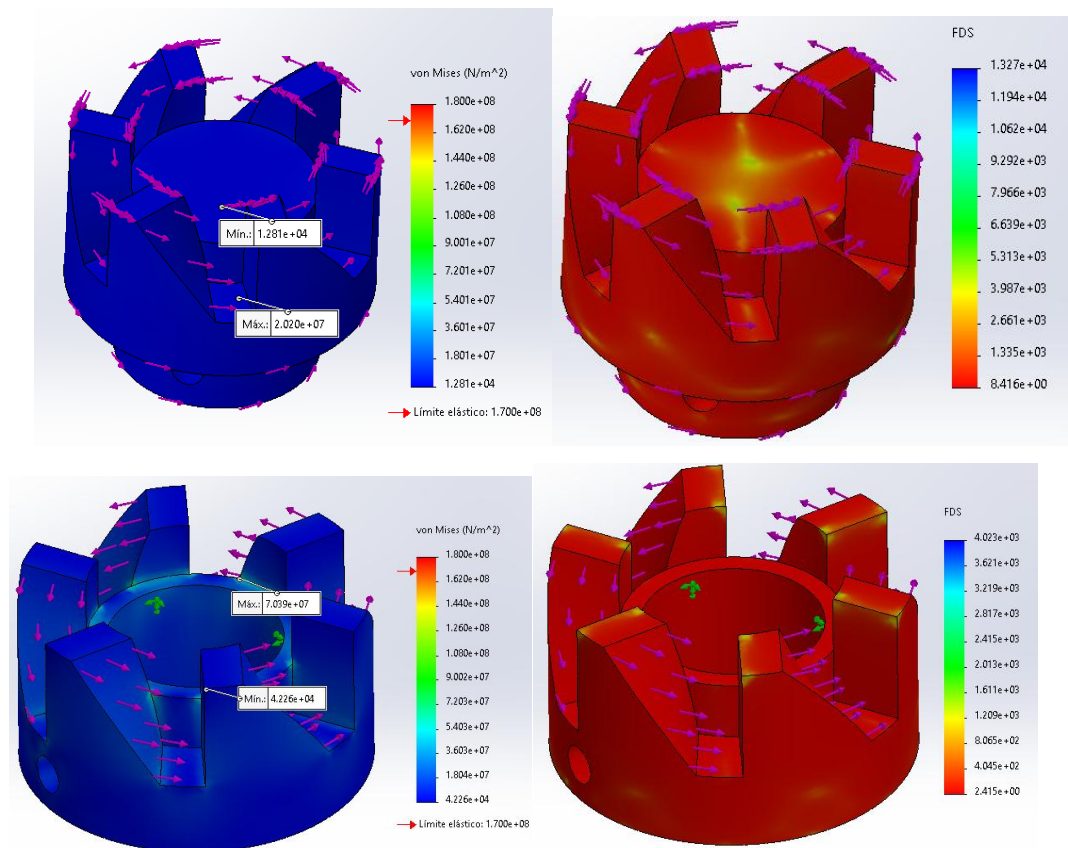
Figura 4.13 *Análisis de fuerza de torsión de eje de trasmisión.*



Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo máximo al que están sometido los acoples del eje y del sistema de transmisión de movimiento es de 70 Mpa, mientras que el límite elástico del material es de 170 Mpa, como se muestra en la figura 4.14.

Figura 4.14 *Análisis de fuerza de torsión de acoples.*



Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de caudal de ventilación

Se contempla una renovación de aire periódica lo largo del proceso, el caudal necesario es:

$$Q = V_{cilindro} * R = 5.1 \text{ L} * \frac{60}{3600} = 8.5 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Perdida de presión por fricción

Para calcular la presión necesaria primero se debe de calcula la velocidad del caudal.

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V_1 = \frac{8.5 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{4.034 * 10^{-2} \text{ m}^2} = 0.0021 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{8.5 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{5.027 * 10^{-3} \text{ m}^2} = 0.0169 \text{ m/s}$$

$$V_3 = \frac{8.5 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{1.009 * 10^{-2} \text{ m}^2} = 0.0084 \text{ m/s}$$

$$V_4 = \frac{8.5 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{5.027 * 10^{-2} \text{ m}^2} = 0.0169 \text{ m/s}$$

$$V_5 = \frac{8.5 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{9.193 * 10^{-3} \text{ m}^2} = 0.0092 \text{ m/s}$$

El diámetro para los tramos 2 y 4 es de 0.08 m y el diámetro para los tramos irregulares, se obtuvo con:

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

$$D_{h1} = \frac{4 * 4.034 * 10^{-2} \text{ m}^2}{7.888 * 10^{-1} \text{ m}} = 0.2445 \text{ m}$$

$$D_{h3} = \frac{4 * 1.009 * 10^{-2} \text{ m}^2}{4.577 * 10^{-1} \text{ m}} = 0.0882 \text{ m}$$

$$D_{h5} = \frac{4 * 9.193 * 10^{-3} \text{ m}^2}{3.727 * 10^{-1} \text{ m}} = 0.0987 \text{ m}$$

El número de Reynolds se calculó para los ductos, considerando que la temperatura máxima es de 65°C, y la ρ_{aire} es:

$$\rho_{aire} = \frac{P}{R * T} = \frac{101325 \text{ Pa}}{287.05 \text{ J} * \frac{\text{kg}}{\text{K}} * (65^\circ\text{C} + 273.15)\text{K}} = 1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Por ende:

$$Re = \frac{\rho_{aire} * V * D_h}{\mu_{aire}}$$

$$Re_1 = \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.0021 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.2445 \text{ m}}{1.9 * 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 24$$

$$Re_2 = \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.0169 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.08 \text{ m}}{1.9 * 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 75.4$$

$$Re_3 = \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.00842 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.0882 \text{ m}}{1.9 * 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 41.4$$

$$Re_4 = \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.0169 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.08 \text{ m}}{1.9 * 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 75.4$$

$$Re_5 = \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.00924 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.0987 \text{ m}}{1.9 * 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 50.5$$

Para estimar el factor de fricción:

$$f = \frac{64}{Re}$$

$$f_1 = \frac{64}{24} = 2.67 \quad f_2 = \frac{64}{75.4} = 0.894 \quad f_3 = \frac{64}{41.4} = 1.55$$

$$f_4 = \frac{64}{75.4} = 0.894 \quad f_5 = \frac{64}{50.5} = 1.27$$

Entonces, la pérdida por presión de fricción es:

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

$$\Delta P_{f1} = 2.67 * \frac{0.01 \text{ m}}{0.2045 \text{ m}} * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0021 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 3.07 * 10^{-7} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{f2} = 0.894 * \frac{0.17 \text{ m}}{0.08 \text{ m}} * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0169 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 2.74 * 10^{-4} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{f3} = 1.55 * \frac{0.03 \text{ m}}{0.0882 \text{ m}} * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0084 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 1.97 * 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{f4} = 0.894 * \frac{0.14 \text{ m}}{0.08 \text{ m}} * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0169 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 2.74 * 10^{-4} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{f5} = 1.27 * \frac{0.01 \text{ m}}{0.0987 \text{ m}} * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.00924 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 5.8 * 10^{-6} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{Total \text{ fricción}} = 1.179 * 10^{-1} \text{ Pa}$$

Luego, se calculó la pérdida de presión singulares considerando una constante dependiendo del tipo de elemento:

$$\Delta P_s = k \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

$$\Delta P_{entrada} = 0.5 * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0021 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 1.18 * 10^{-6} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{C1} = 0.3 * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0169 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 4.53 * 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{CT1} = 0.2 * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0169 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 3.02 * 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{EXP1} = 0.2 * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0084 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 7.5 * 10^{-6} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{C2} = 0.3 * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0169 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 4.53 * 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{CT2} = 0.2 * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0169 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 3.02 * 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{EXP2} = 0.2 * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0127 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 1.7 * 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{Salida} = 1.0 * \frac{1.058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0.0127 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 8.49 * 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{Singular \text{ Total}} = 3.14 * 10^{-4} \text{ Pa}$$

Finalmente, la pérdida de presión total es:

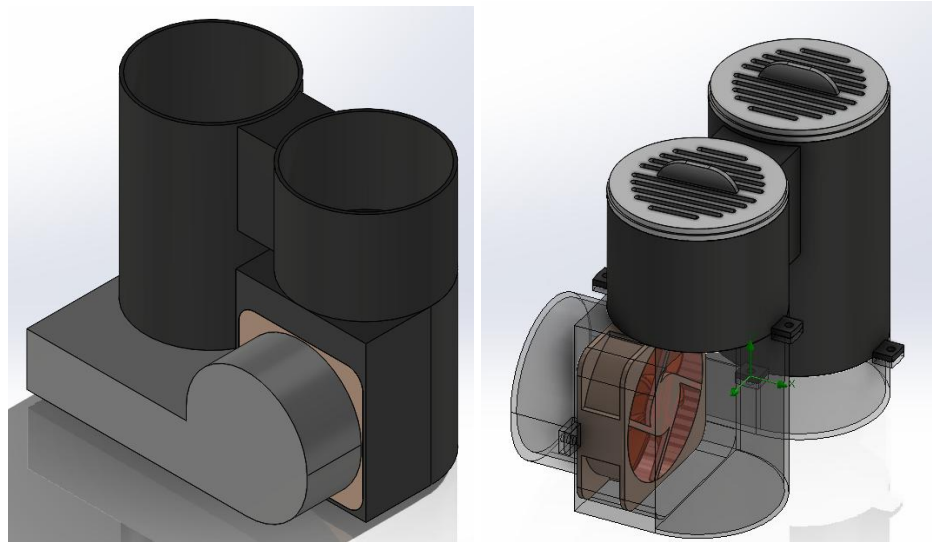
$$\Delta P_{Total} = \Delta P_{Singular Total} + \Delta P_{Total fricción} = 0.1182 Pa \approx 0.012 mmH_2O$$

El caudal mínimo necesario es de $8.5 * 10^{-5} m^3/s$ y con una presión mayor a $0.012 mmH_2O$.

Disposición de los ductos de ventilación

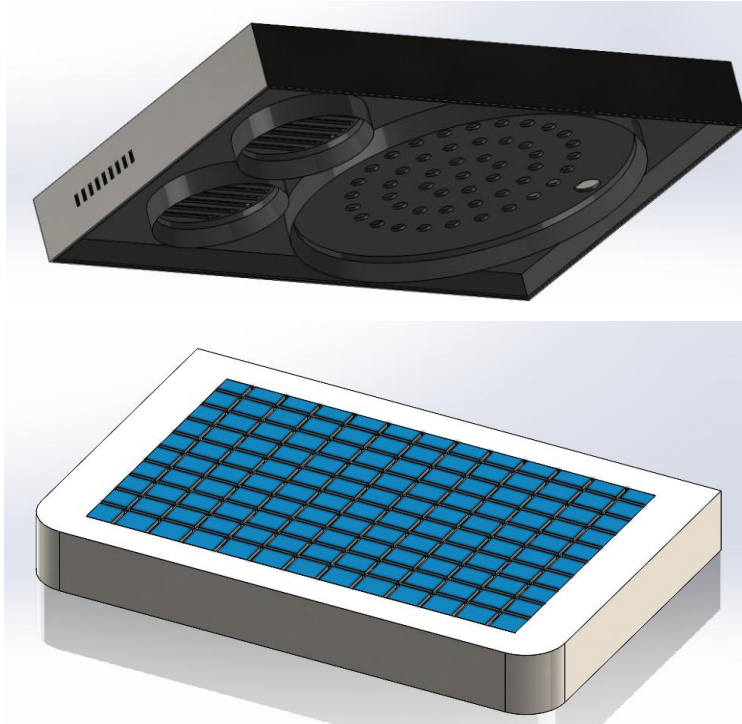
Se consideran 5 tramos de ductos para la ventilación, partiendo desde el principio de que la extracción pasa de la cámara principal hacia la tapa, luego pasar por 2 filtrados para mitigar gases y mejorara la calidad del aire y luego liberarlos al aire libre.

Figura 4.15 Ductos de ventilación y filtro.



Fuente: Elaboración propia.

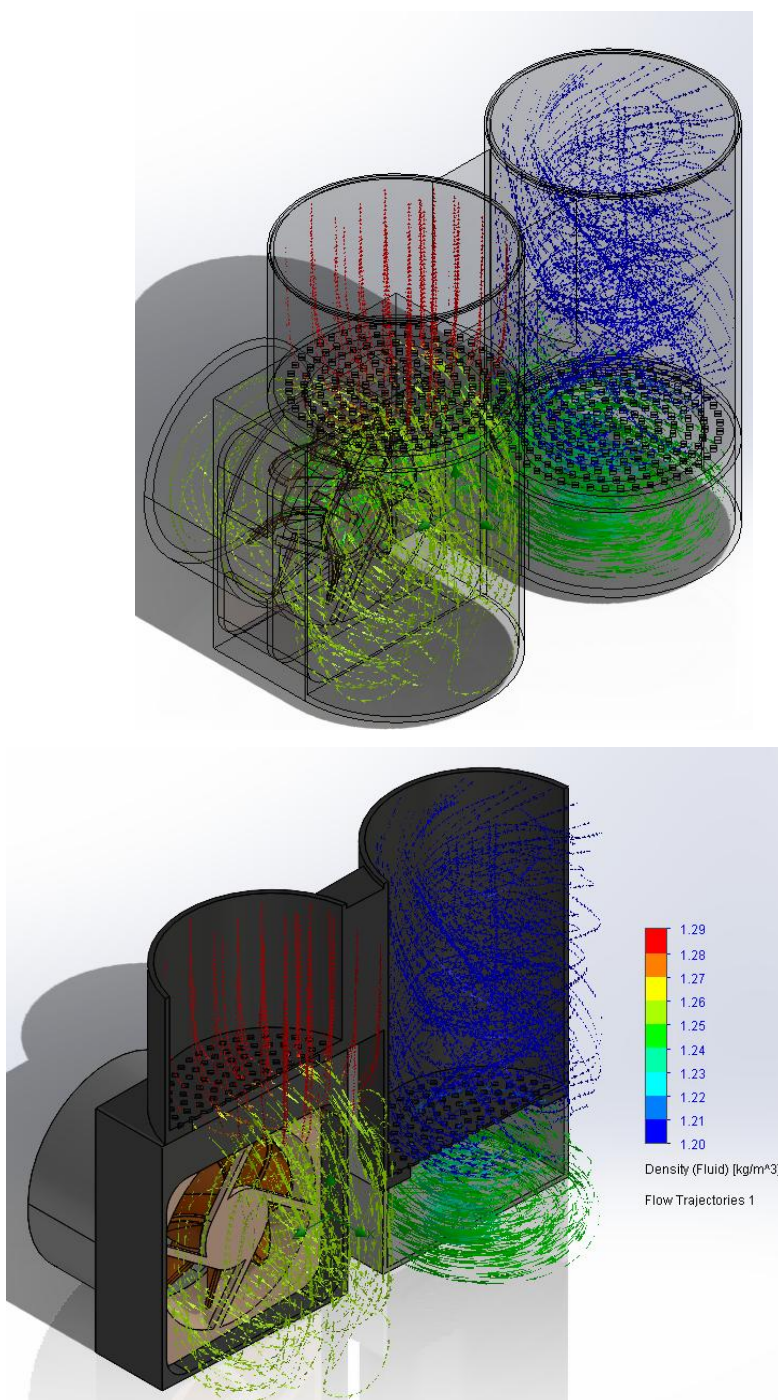
Figura 4.16 Tapa para circulación de ventilación.



Fuente: Elaboración propia.

En la simulación de flujo se obtuvo el comportamiento que muestra la figura 4.17.

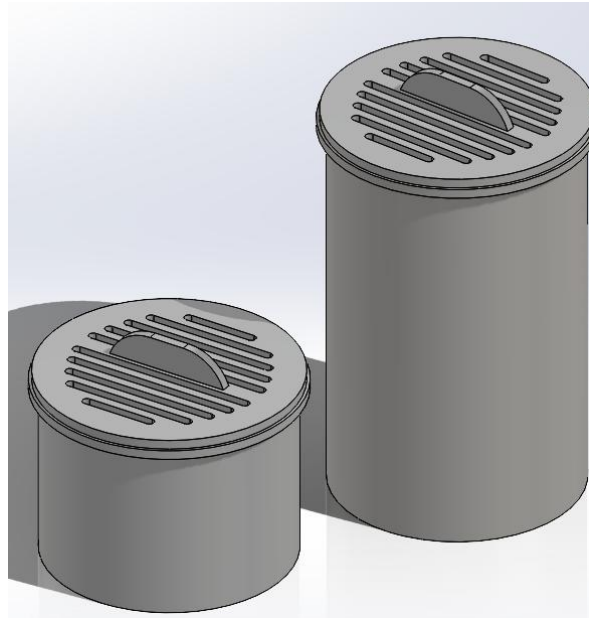
Figura 4.17 *Simulación de flujo de aire.*



Fuente: Elaboración propia.

El sistema está compuesto con 2 recipientes para colocar carbón activado y actúe como un filtrado de gases que provienen de la cámara de compostaje como se retrata en la figura 4.18.

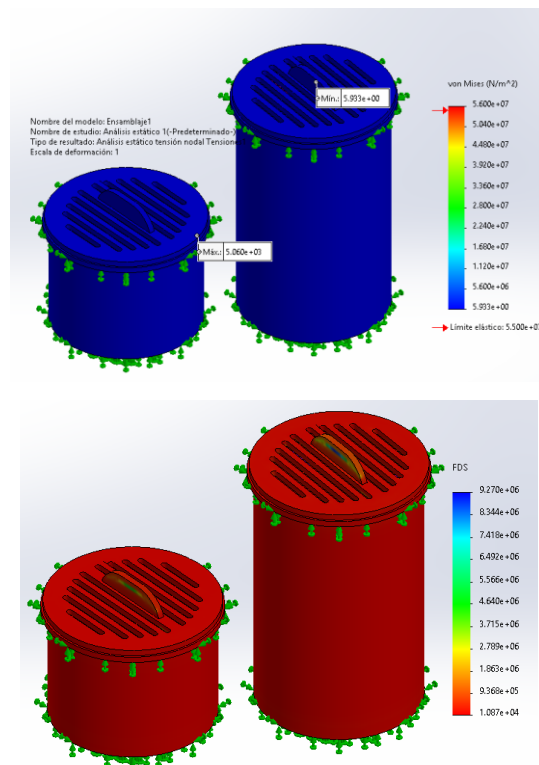
Figura 4.18 Recipiente para carbón activado.



Fuente: Elaboración propia.

La simulación de análisis estático para la carga que presentaran, mostro los detalles de la figura 4.19.

Figura 4.19 Análisis estático de carga de recipiente para carbón.



Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de la carga térmica

El calor necesario para calentar los residuos se determina por:

$$Q = m_{residuos} \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q = 1.28 \text{ kg} \cdot 2500 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (65^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 144 \text{ kJ}$$

El calor necesario para calentar el cilindro de acero inoxidable AISI 304 es:

$$A_{lateral} = \pi \cdot D \cdot H = \pi \cdot 0.18 \text{ m} \cdot 0.20 \text{ m} \approx 0.1131 \text{ m}^2$$

$$A_{base} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \cdot (0.09)^2 \approx 0.0255 \text{ m}^2$$

$$V_{cilindro} = (A_{base} + A_{lateral}) \cdot \varepsilon = (0.1131 \text{ m}^2 + 0.0255 \text{ m}^2) \cdot 0.001 \text{ m}$$

$$V_{cilindro} = 0.0001386 \text{ m}^3$$

Por tanto:

$$m_{cilindro} = \rho \cdot V = 8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.0001386 \text{ m}^3 = 1.1088 \text{ kg}$$

Entonces:

$$Q = m_{cilindro} \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q = 1.1088 \text{ kg} \cdot 500 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (65^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 24\,948 \text{ J}$$

Se calcula la pérdida de energía por conducción en la pared cilíndrica lateral aislada de la cámara de compost.

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L (T_{in} - T_{amb})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Donde:

- $k = 0.04 \text{ W/m.K}$ (aislante térmico = lana de vidrio)

Entonces para pérdidas de las paredes laterales es:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0.04 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 0.20 \text{ m} (65^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{0.11 \text{ m}}{0.09 \text{ m}}\right)} \approx 11.27 \text{ W}$$

Y para las pérdidas por la base que están en contacto directo son:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T$$

Donde:

- $h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (conducción natural horizontal, aire quieto)

$$Q = 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} * 0.0255 \text{ m}^2 * 45 \text{ }^\circ\text{C} \approx 5.74 \text{ W}$$

La pérdida total sería:

$$Q_{perdidas} = Q_{lateral} + Q_{base} = 11.27 \text{ W} + 5.74 \text{ W} = 17.01 \text{ W}$$

Es decir que en una hora existiría una pérdida total de 61236 J. Por ende, se planteó la necesidad de elevar la temperatura de la carga útil y de compensar las pérdidas de calor por la conducción. Entonces el calor útil total necesario es:

$$Q_{total} = Q_{residuos} + Q_{cilindro} + Q_{perdidas} =$$

$$Q_{total} = 144\,000 \text{ J} + 24948 \text{ J} + 61236 \text{ J} = 230184 \text{ J}$$

Es decir:

$$Wh = \frac{230184 \text{ J}}{3600} = 63.94 \text{ Wh}$$

Para un calentamiento a 65°C en 35 minutos se estima una potencia de la resistencia eléctrica necesaria de:

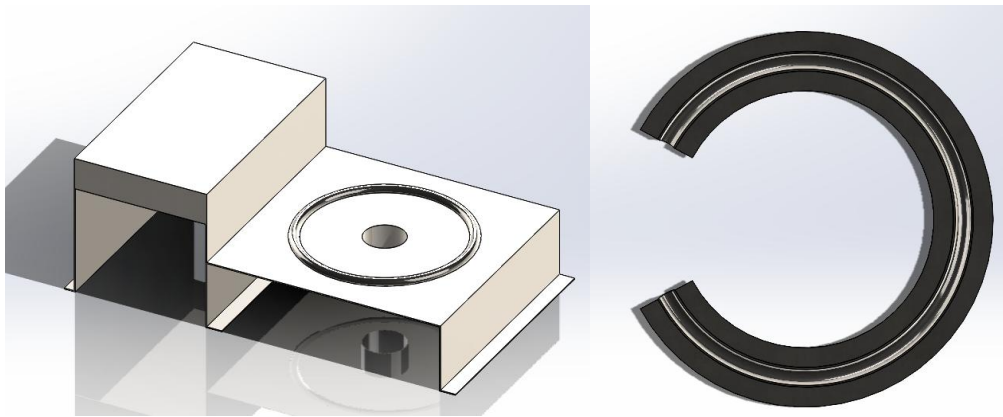
$$P = \frac{E}{t}$$

$$P = \frac{63.94 \text{ Wh}}{0.583 \text{ h}} = 97.75 \text{ W}$$

Diseño de soporte térmico

Para sostener la resistencia térmica y demás componentes se diseñó una base en acero inoxidable AISI 304, por sus propiedades de dureza y conductividad térmica.

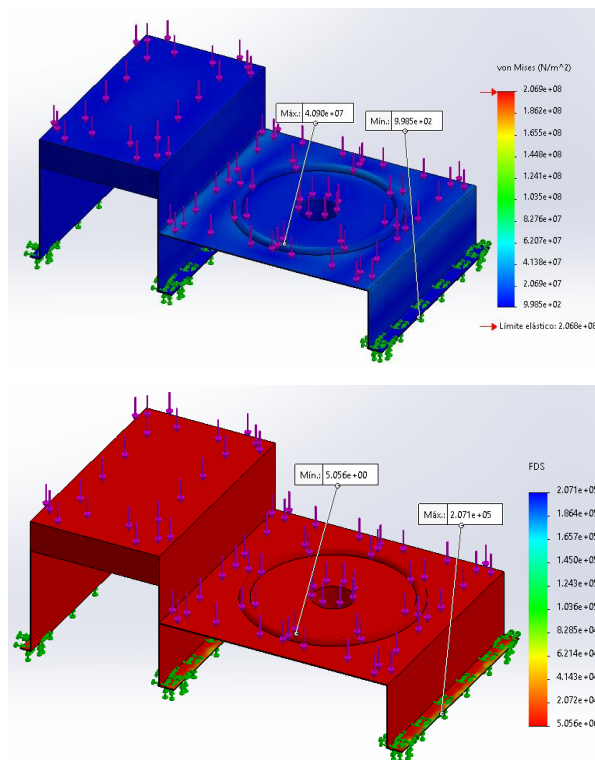
Figura 4.20 *Diseño de soporte térmico.*



Fuente: Elaboración propia.

Esta parte resiste cerca de 6 kg entre la cámara de compostaje, el sistema de ventilación y la cámara de aislamiento.

Figura 4.21 *Análisis de resistencia de soporte térmico.*



Fuente: Elaboración propia.

Se propone dejar espacios para aplicar un aislante térmico, que vendría a ser la lana de vidrio para asegurar a los demás componentes, puesto que estarán expuestos a elevaciones de temperatura.

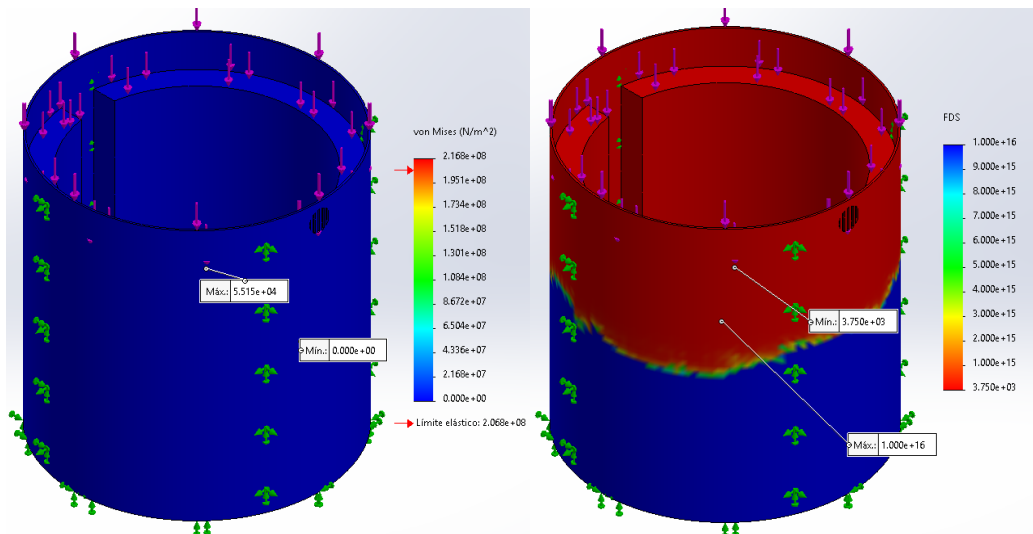
Figura 4.22 Soporte para aislante térmico.



Fuente: Elaboración propia.

Esta parte resiste el peso de los residuos orgánicos y la masa de la cámara de compostaje, como se ve en la figura 4.23.

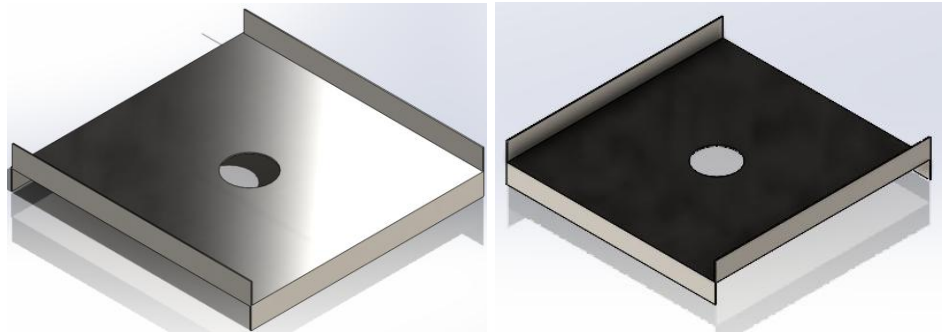
Figura 4.23 Análisis de resistencia de cámara de compostaje.



Fuente: Elaboración propia.

En la parte inferior de la resistencia para proteger al motorreductor se necesita que también cuente con aislamiento térmico.

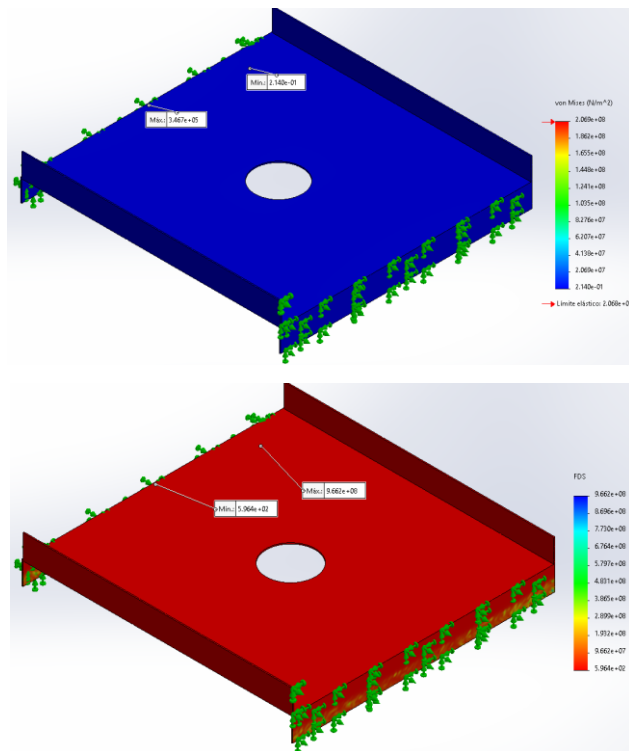
Figura 4.24 *Separación del motor*



Fuente: Elaboración propia.

Esta parte sirve como soporte para el aislamiento térmico, el cual presentara una carga muy pequeña, y eso lo refleja su análisis estático.

Figura 4.25 *Análisis de resistencia de Separación del motor.*

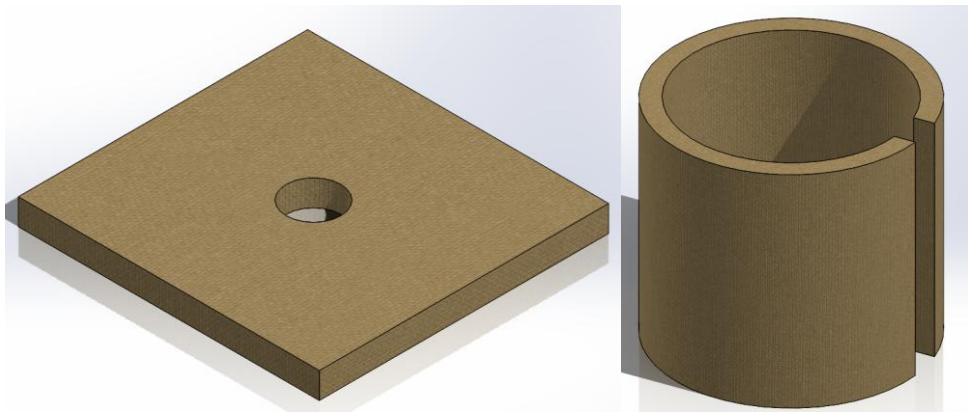


Fuente: Elaboración propia.

Simulación térmica

Se realizó el análisis térmico considerando la conductividad térmica de los materiales y la potencia calorífica de la resistencia, asumiendo un aislante térmico de lana de vidrio con la forma de las secciones donde se ubicarán, como se ve en la figura 4.26.

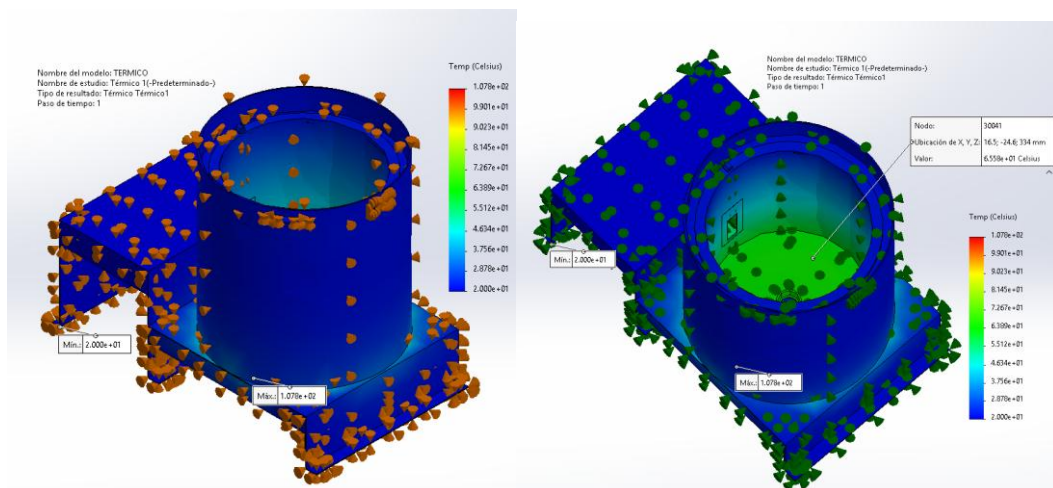
Figura 4.26 Aislante térmico



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la temperatura producida por la resistencia eléctrica a la potencia de 63.94 W se refleja en las siguientes imágenes.

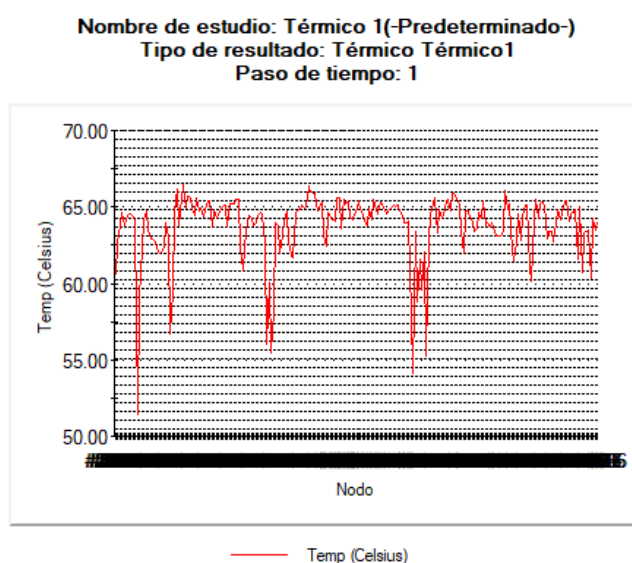
Figura 4.27 Simulación de temperatura producida por la resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

El perfil térmico obtenido a lo largo de los nodos evidencia que la temperatura del sistema se mantiene cercana al valor de diseño (65 °C) en la parte inferior de la cubeta, confirmando el correcto funcionamiento de la resistencia eléctrica.

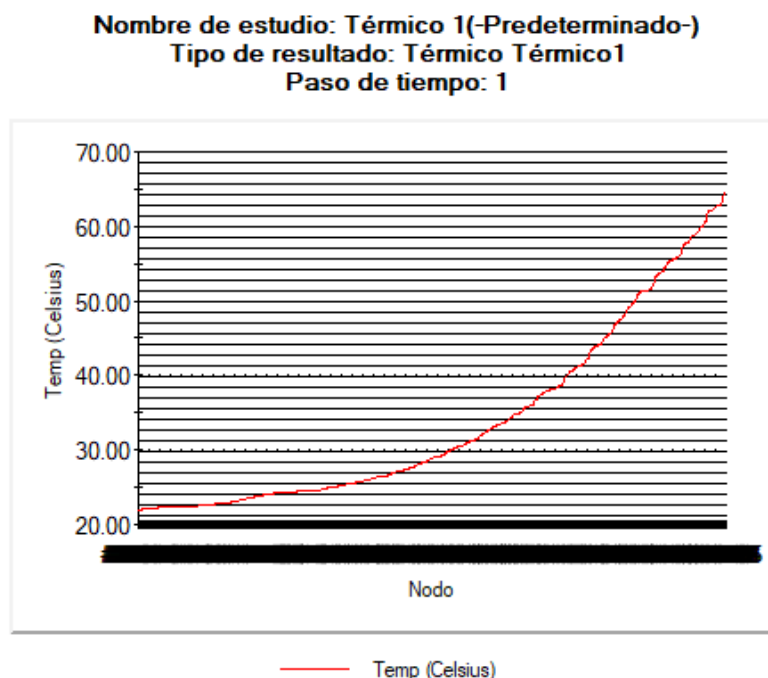
Figura 4.28 *Distribución de la temperatura a lo largo de los nodos de la cubeta.*



Fuente: Elaboración propia.

El perfil nodal en la figura 4.29 evidencia un gradiente de temperatura ascendente desde la parte superior (20 °C) hasta la parte inferior de la cubeta (65 °C), lo cual confirma la concentración de calor en la zona donde actúa la resistencia eléctrica.

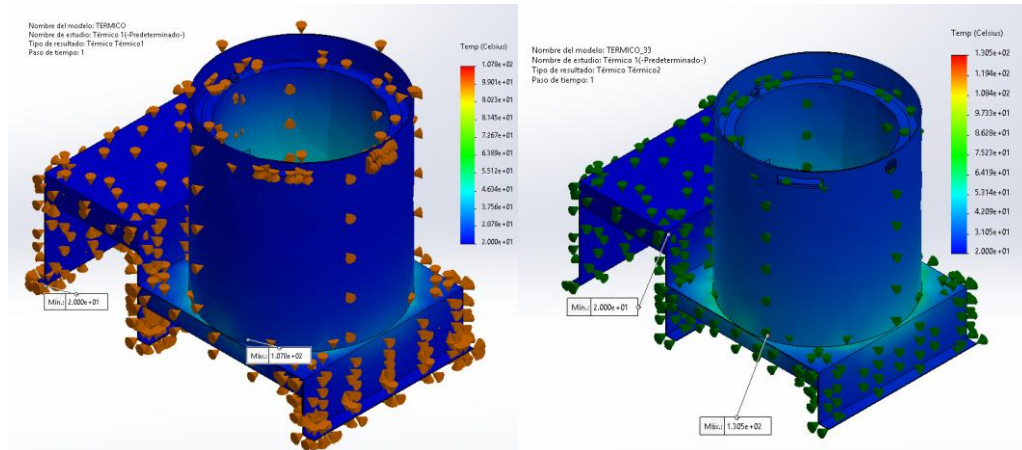
Figura 4.29 *Gradiente de temperatura en la cubeta desde la parte superior hasta la base*



Fuente: Elaboración propia.

La respuesta del sistema con aislamiento y sin aislamiento muestra una elevación de la temperatura en las cubiertas exteriores de la cubeta y de la base de soporte en 23°C, como se refleja en la figura 4.30.

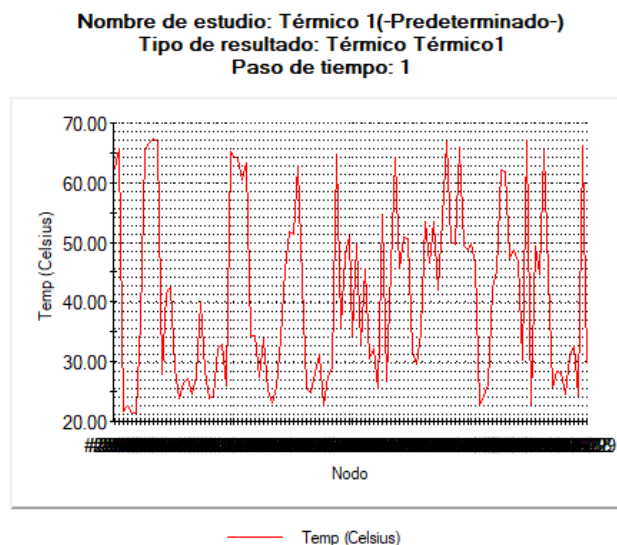
Figura 4.30 Comparación de la respuesta térmica del sistema con y sin aislamientos sin aislamiento.



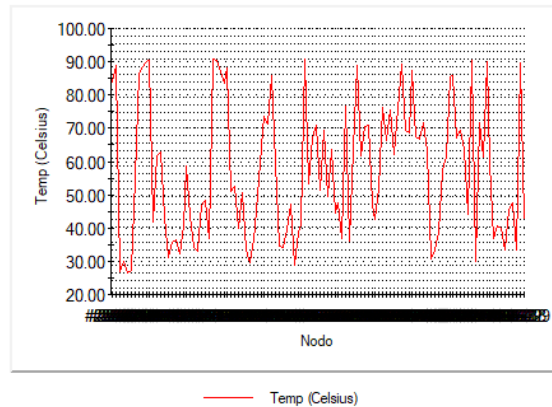
Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas que se presentan en las partes más críticas con aislamiento y sin aislamiento reflejan una elevación de la temperaturas mínimas y máximas de 4 a 20°C, primero la cubierta cilíndrica refleja los datos que se muestran en la figura 4.31.

Figura 4.31 Perfil de temperatura a lo largo de la cubierta cilíndrica con y sin aislamiento



Nombre de estudio: Térmico 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Térmico Térmico2
 Paso de tiempo: 1



Fuente: Elaboración propia.

El nivel de aislamiento térmico expresado en porcentaje, sobre la cubierta cilíndrica donde se aprecia la acción térmica de la resistencia eléctrica es:

$$E(\%) = \frac{T_{sin} - T_{con}}{T_{sin}} \times 100$$

$$E_{C_1}(\%) = \frac{26 - 22}{26} \times 100 = 15.4 \%$$

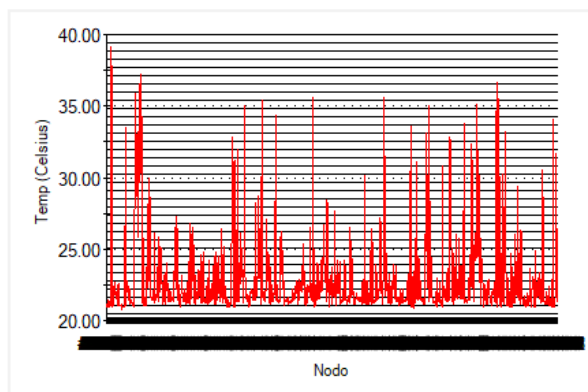
$$E_{C_2}(\%) = \frac{90 - 66}{24} \times 100 = 26.7 \%$$

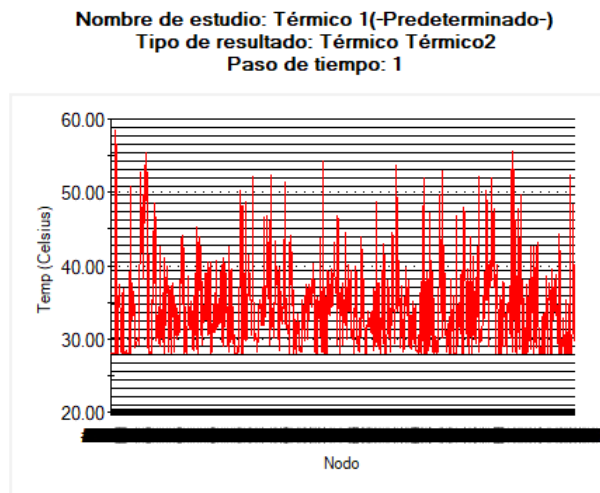
Por ende, la reducción media del nivel de aislamiento térmico en esa parte de la pieza es de aproximadamente 24.1 %.

De la misma manera, la reacción de la estructura de soporte reflejando una variación de subida de la temperatura mínima en 7°C y una máxima en 22°C, lo que se muestra en la figura 4.32.

Figura 4.32 Distribución comparativa de la temperatura en la estructura de soporte

Nombre de estudio: Térmico 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Térmico Térmico1
 Paso de tiempo: 1





Fuente: Elaboración propia.

Y el nivel de aislamiento térmico expresado en porcentaje, sobre la estructura de soporte es:

$$E(\%) = \frac{T_{sin} - T_{con}}{T_{sin}} \times 100$$

$$E_{C_1}(\%) = \frac{28 - 22}{28} \times 100 = 21.4 \%$$

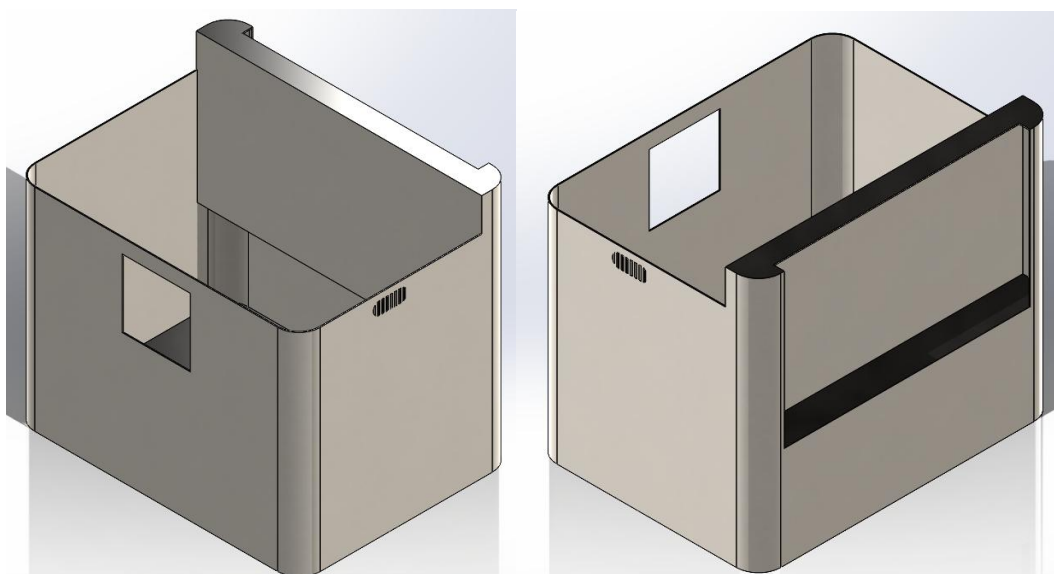
$$E_{C_2}(\%) = \frac{58 - 38}{58} \times 100 = 34.5 \%$$

Por ende, la reducción media del nivel de aislamiento térmico en esa parte de la pieza es de aproximadamente 30.2 %.

4.1.5 Diseño de complementos

El forro principal de todos los dispositivos se dispuso en base al material de acero inoxidable AISI 304 por su salubridad y facilidad de limpiar, las medidas dispuestas son de 40 cm * 30 cm * 36 cm de volumen total, la forma adaptada se refleja en la figurar 4.33.

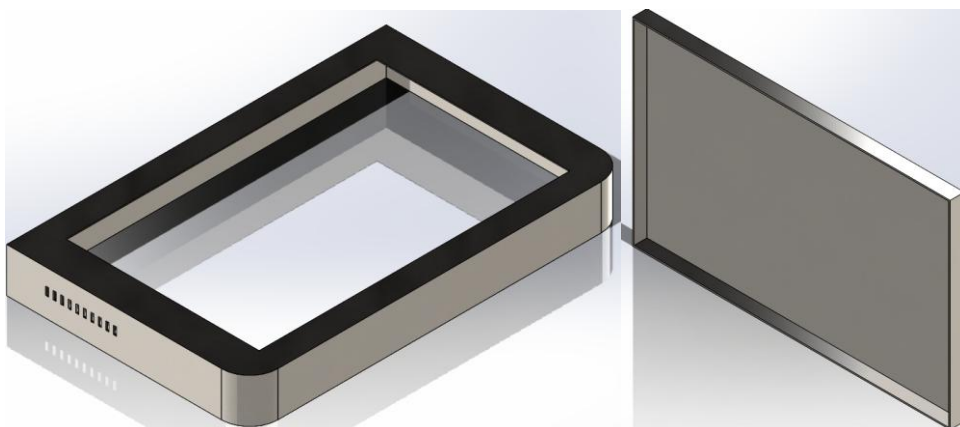
Figura 4.33 *Diseño de carcasa.*



Fuente: Elaboración propia.

Estas disposiciones tienen compartimentos donde se alojan los paneles solares, y que a su vez actúan como compuertas que sellan los dispositivos tanto de la parte superior como de la parte lateral, como se mira en la figura 4.34.

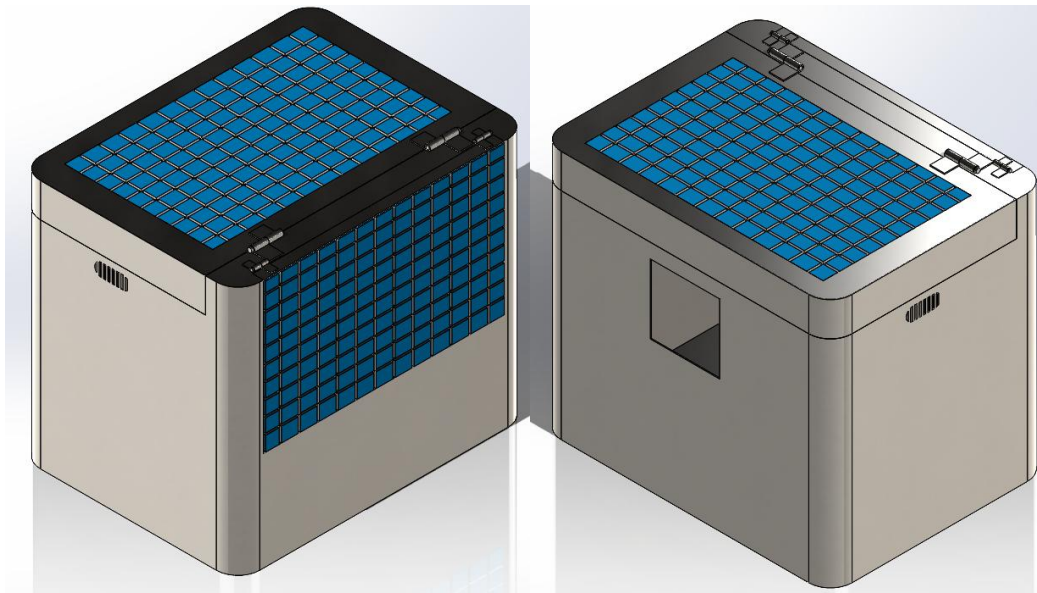
Figura 4.34 *Diseño de tapa.*



Fuente: Elaboración propia.

La vista ensamblada ya con los paneles y las bisagras se muestra en la figura 4.30.

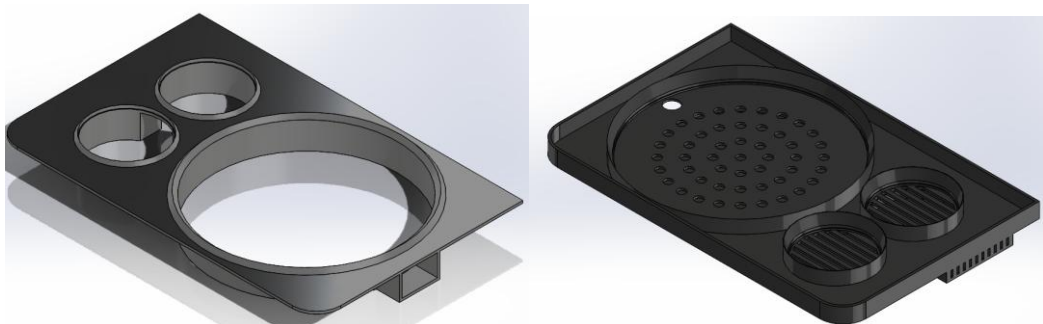
Figura 4.35 *Ensamble de carcasa y tapa.*



Fuente: Elaboración propia.

Las tapas internas tienen las formas de los contenedores de la cámara de compostaje y los filtros, se encarga de sellar y dirigir el flujo del aire. Para alivianar peso son del mismo material que las paletas.

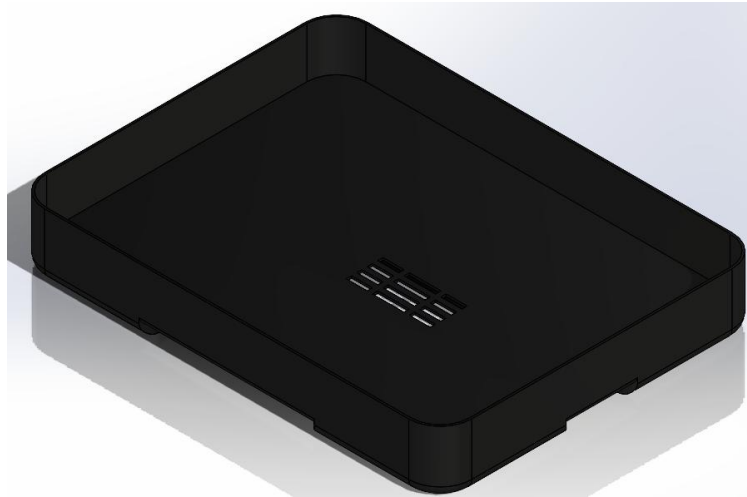
Figura 4.36 *Tapas internas.*



Fuente: Elaboración propia.

Y para elevar un poco la maquina y permitir la fluencia de aireación pasiva para los componentes internos, se diseñó una base que permita elevar y proteja las esquinas del dispositivo.

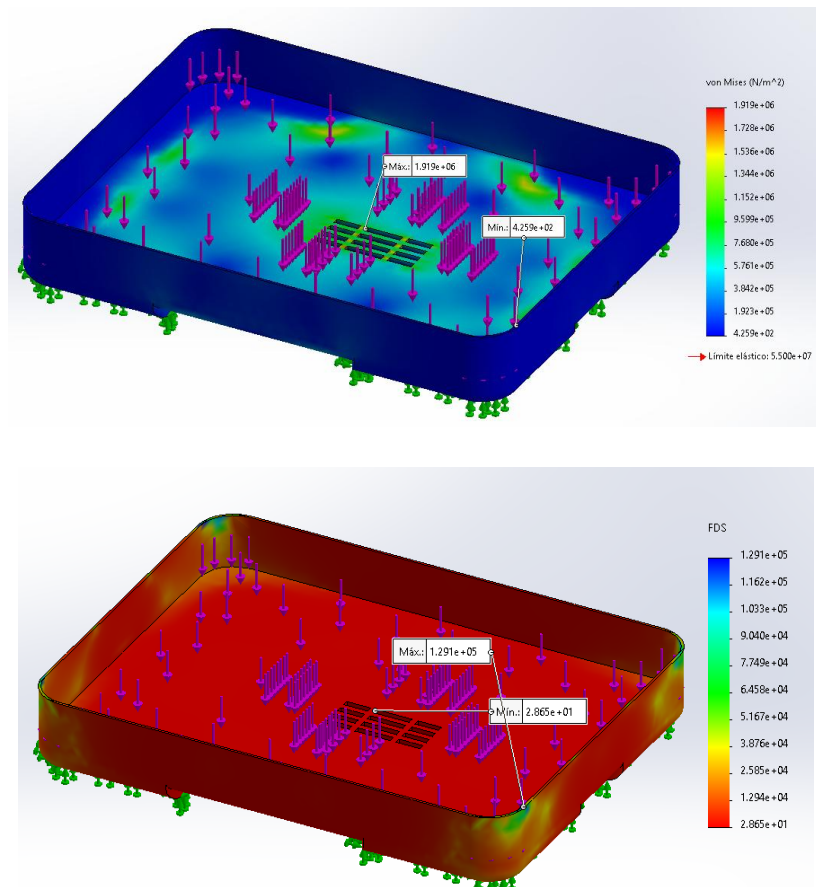
Figura 4.37 *Base de carcasa.*



Fuente: Elaboración propia.

Esta parte tiene que soportar todo el peso de la máquina que tiende a ser aproximadamente de 18 a 20 kg, y su comportamiento ante esa fuerza se ve en la figura 4.33.

Figura 4.38 *Análisis de resistencia de base de carcasa.*



Fuente: Elaboración propia.

Para sostener los componentes de la interfaz y que se ubica en la parte externa frontal del diseño se dispuso la siguiente carcasa, que contara con un OLED, que proporcionar información del estado de los parámetros, botones de encendido y apagado, junto a led indicadores del proceso.

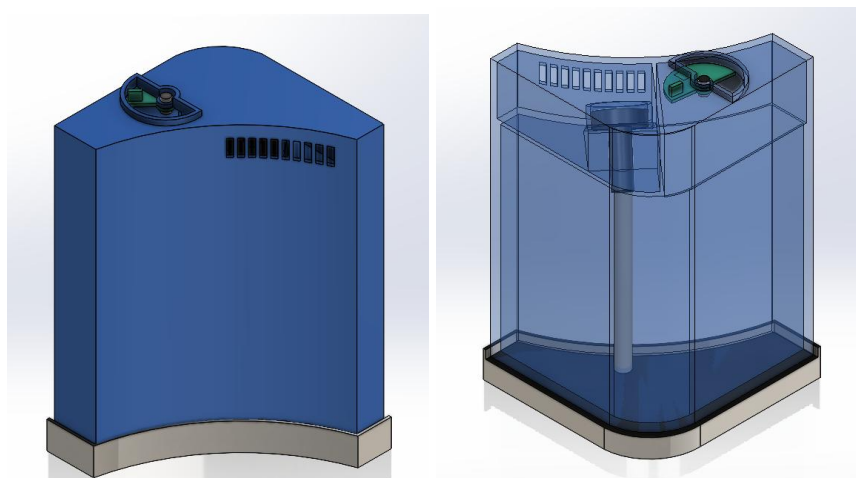
Figura 4.39 *Diseño de carcasa para pantalla OLED.*



Fuente: Elaboración propia.

Para garantizar un adecuado control de la humedad del material, considerando que estará expuesto a elevadas temperaturas y a un flujo constante de aire, se ha previsto la incorporación de un contenedor de agua. El suministro se realizará mediante un sistema de atomización, que al activarse dispersará finas partículas de agua sobre la materia orgánica, favoreciendo así una humectación uniforme y controlada.

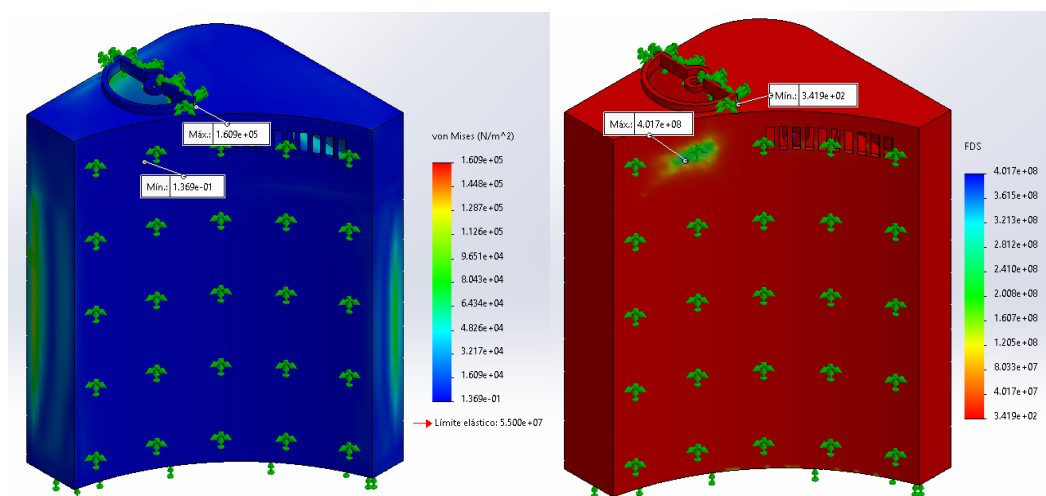
Figura 4.40 *Diseño de contenedor de agua*



Fuente: Elaboración propia.

La exposición a 4.905 N como fuerza que resistirá el tanque produce el siguiente análisis estático.

Figura 4.41 *Análisis estático del tanque de agua.*



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Cálculos eléctricos de potencia

En este subcapítulo se desarrolla el diseño del sistema de potencia encargado de suministrar energía a la máquina compostadora automática, mediante dos fuentes de energía eléctrica: la red eléctrica domiciliaria 220 V AC y un sistema de generación fotovoltaica con paneles solares. El objetivo principal es garantizar un suministro energético confiable y continuo, maximizando el uso de energía renovable cuando esté disponible, y permitiendo la conmutación automática o manual entre ambas fuentes según las condiciones de operación. Para determinar la configuración más adecuada, se comparan dos alternativas:

Tabla 4.1 *Comparación de sistemas eléctricos.*

Característica	Sistema Dual	Sistema Híbrido
Fuentes activas a la vez	Solo una fuente activa	Varias fuentes pueden estar activas juntas
Conmutación	Manual o automática	Integración simultánea
Complejidad	Menor	Mayor (requiere gestión energética)
Coste	Más económico	Más costoso

Aplicación típica	Sistemas sencillos o de respaldo	Sistemas optimizados para eficiencia
-------------------	---	--------------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

En función de la simplicidad con el entorno doméstico y la naturaleza del proyecto, se opta por la implementación del sistema dual, donde la energía solar se utilizará como fuente principal y la red eléctrica actuará como respaldo en casos de que no se tenga días con mucha radiación o la batería este descargado. A partir de esta decisión, se procederá a seleccionar los principales componentes del sistema de potencia, incluyendo una fuente conmutada AC-DC para el respaldo desde la red, paneles solares, el banco de baterías, el inversor, dispositivos de protección. Posteriormente, se elaborará el esquema de cada sistema por separado; el diseño incluirá protecciones eléctricas como fusibles, disyuntores, supresores de picos y aislamiento eléctrico para garantizar la integridad del sistema ante posibles fallos. Finalmente, se presentará un diagrama unifilar del sistema de potencia completo.

4.2.1 Requerimientos del sistema eléctrico por red domiciliaria

El sistema eléctrico domiciliaria convencional nos entrega un voltaje de 220VAC el cual deberá ser modificado porque el sistema funcionara en corriente directa en 24V y 5V.

Cálculo de dispositivos para fuente de alimentación

• Transformación

Es el encargado de reducir el voltaje de 220VAC a 24VAC y la potencia está relacionada a la máxima demanda de todo el circuito. Siendo este un transformador con relación de transformación de 1 a 9.

$$V2 = \frac{V1}{m}$$

Teniendo en cuenta que el voltaje es 220v.

$$V2 = \frac{220}{9} = 24.45v$$

Teniendo en cuenta que el pico de voltaje en horarios puntuales sube a 230v.

$$V2 = \frac{230}{9} = 25.56v$$

Tabla 4.2 Máxima demanda para hallar transformador

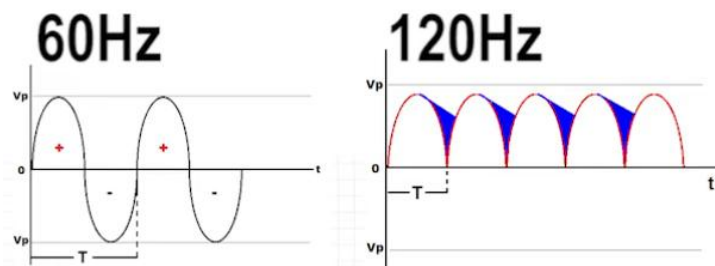
#	Carga	Voltaje (V)	Corriente (A)	Margen de Seguridad (%)	Corriente con Margen (A)	Potencia (W)
1	Motor DC	24 V	6.25 A	10 %	6.875 A	150.0 W
2	Microcontrolador + sensores y actuadores	5 V	0.5 A	10 %	0.550 A	2.5 W
3	Resistencia	24V	2.7 A	10 %	2.970 A	65 W
4	Atomizador	12V	0.6A	10%	0.715 A	8.64 W
Total		24V			11.11 A	226.148 W

Fuente: Elaboración propia.

○ Rectificador

Se usará una configuración para la rectificación completa de onda, por ello se usará puente de diodos GBPC3504 (35 A, 1000 V)

Figura 4.42 Onda sinusoidal rectificado.



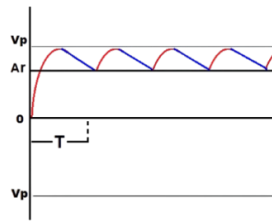
Fuente: Elaboración propia.

La frecuencia usada en Perú es de 60Hz, y al rectificar tenemos el doble de esta frecuencia nominal 120Hz.

○ Filtro

Se usa condensadores antes de cada regulador de voltaje en forma independiente, para amortiguar las crestas restantes después del rectificado.

Figura 4.43 Amplitud de rizado.



Fuente: Elaboración propia.

Amplitud de rizado (\$V_r\$)

$$V_{p_{min}} = 24.4 * \sqrt{2} - 1.4 = 33.10v$$

$$V_{p_{max}} = 25.5 * \sqrt{2} - 1.4 = 34.66v$$

Usamos el voltaje pico máximo para el voltaje de capacitor. Luego resolvemos la amplitud del rizado.

$$V_r = \frac{10}{100} * 34.66v = 3.46v$$

Filtro para regulador 12V

$$C = \frac{IDC}{F \cdot V_r}$$

$$C = \frac{1A}{120 * 3.46v} = 2.41\mu F \approx 2.7\mu F$$

Filtro para regulador 5V

$$C = \frac{IDC}{F \cdot V_r}$$

$$C = \frac{1.5A}{120 * 3.46} = 3.61\mu F \approx 4.7\mu F$$

○ **Regulador 24 V-12V-5V**

La salida después del rectificado y el filtro se obtendrá 32.5V y este estará fluctuando; entonces es necesario un Regulador de voltaje ya que los componentes del sistema funcionan a 24V, 12V y 5V; para ello se usará Regulador 24V y LM7812 LM7805.

○ **Protecciones**

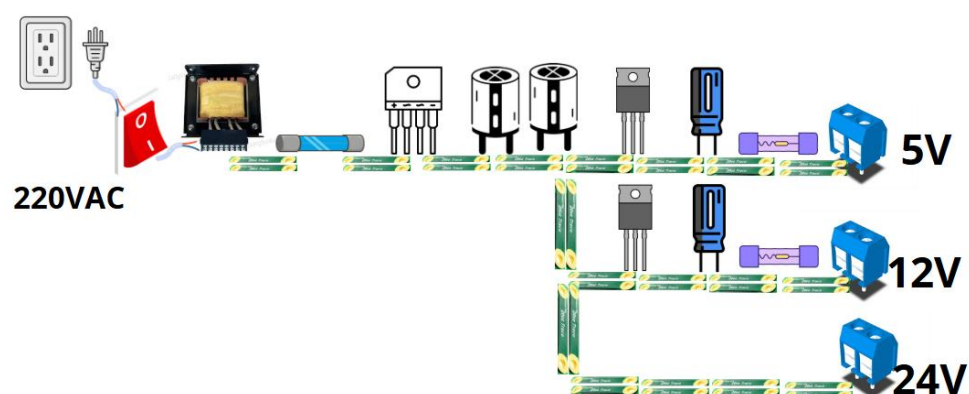
Para el sistema se tendrá en cuenta las protecciones eléctricas ante sobre tensiones, sobre corrientes de consumos y sobre corto circuitos; adicional también el actuador principal tendrá su propio protector.

Tabla 4.3 *Protecciones eléctricas.*

	Protección	Elemento sugerido
1	Fusible AC	250 V / 2 A (retardo)
2	Fusible DC	10A
3	Varistor	MOV 275 V AC
4	Flyback motor	Diodo Schottky 40 A, ≥ 50 V

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.44 *Esquema de fuente de alimentación por red doméstica.*



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Requerimientos del sistema eléctrico por paneles solares

Con el presente sistema utilizará energía proveniente de un panel solar, el cual genera electricidad en corriente directa (DC). Esta energía será regulada y adaptada para alimentar el sistema a dos niveles de voltaje.

Radiación solar

Para la obtención de datos de la irradiación solar en Huancayo se emplea PVGIS, un software gratuito desarrollado por el Joint Research Center de la Comisión Europea, que permite obtener datos de radiación solar. En la figura 4.45 se muestra la radiación correspondiente a la zona donde funcionara el proyecto.

Figura 4.45 Irradiación en Huancayo.

The screenshot displays the PVGIS web application interface. On the left, a map shows the location of Huancayo, Peru, with a cursor at coordinates -12.032, -75.225. The selected location has an elevation of 3257 meters and is at PVGIS version 5.3. The right panel, titled 'DATOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN', shows the configuration for monthly solar irradiation data. The 'Base de datos de radiación solar' is set to 'PVGIS-ERAS'. The 'Año inicial' and 'Año final' are both set to 2024. Under 'Irradiación', the 'Irradiación global con el ángulo óptimo' is selected, and the 'Ratio' is set to 11.98. Under 'Temperatura', the 'Temperatura media' is selected. The bottom of the interface has buttons for 'Visualizar resultados', 'csv', and 'json'.

Fuente: Joint Research Center de la Comisión Europea

Dentro de los parámetros necesarios nos pide el ángulo, para ello se empleó la siguiente formula que hace referencia a la inclinación óptima, teniendo en cuenta que Huancayo tiene aproximadamente 12° latitud sur (12° LS).

$$Inclinacion\ op. = 3.7 + 0.69 * LS$$

$$Inclinacion\ op. = 3.7 + 0.69 * 12^{\circ}$$

$$Inclinacion\ op. = 11.98^{\circ}$$

El análisis simulado de la irradiación se presenta en la tabla 4.4, a partir de la cual es necesario identificar el mes con la radiación solar más baja, ya que este valor será el de referencia para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Tabla 4.4 El análisis simulado de la irradiación.

Mes	Irradiación (kWh/m²/mes)	T2m (°C)	HSP
Enero	163.12	8.4	5.437
Febrero	144.34	8.6	4.811
Marzo	156.79	8.1	5.226
Abril	164.51	8.4	5.484
Mayo	165.33	8.1	5.511
Junio	177.01	7.4	5.900
Julio	193.3	8.4	6.443
Agosto	192.14	8.7	6.405
Septiembre	181.12	8.5	6.037
Octubre	177.43	9.3	5.914

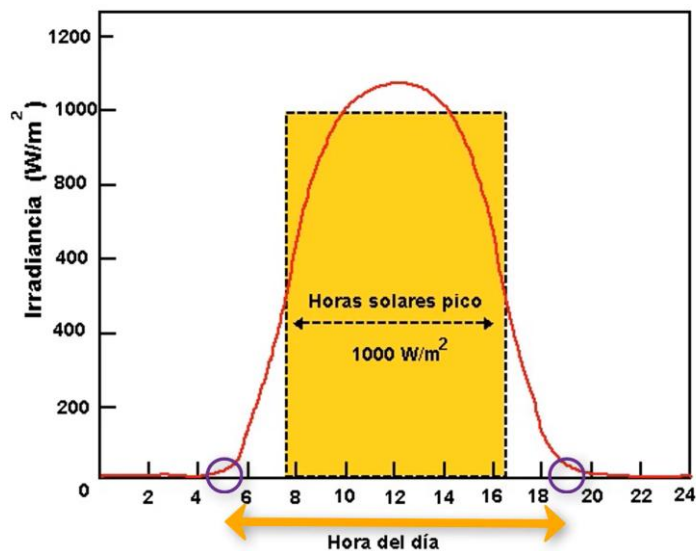
Noviembre	164.98	9.6	5.499
Diciembre	158.62	9.6	5.287

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de la hora solar pico (HSP)

Para determinar HSP que corresponde al número de horas efectivas de sol pleno disponibles para la generación de energía, se considera el valor del mes con menor radiación solar a lo largo del año. Este criterio se adopta con el fin de asegurar que el sistema fotovoltaico pueda cubrir la demanda energética de manera confiable incluso en las condiciones menos favorables, o días con menos irradiación.

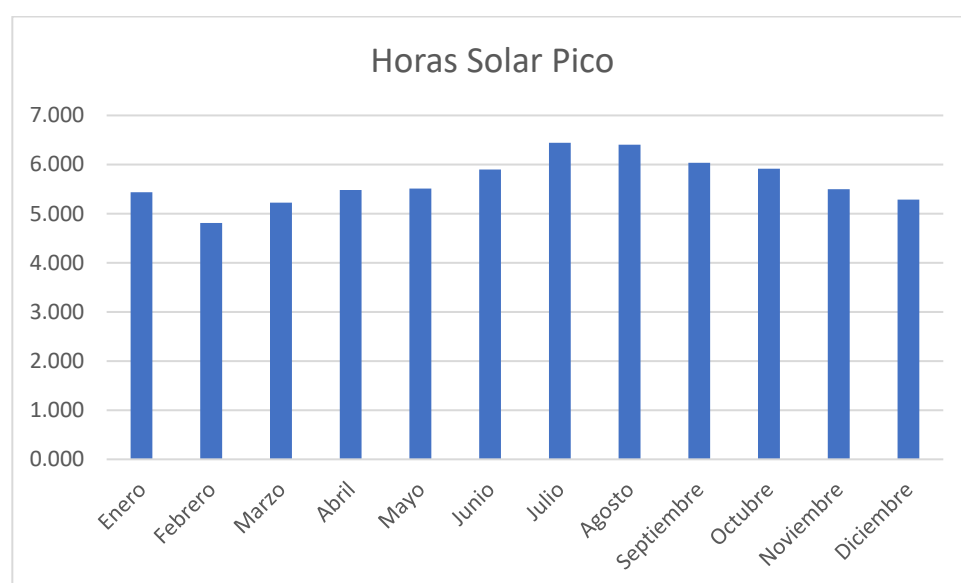
Figura 4.46 Horas sol pico.



Fuente: Elaboración propia.

La irradiación solar varía a lo largo del día, alcanzando un máximo en determinadas horas. Para simplificar su análisis, se suman todas las irradiancias diarias obtenidas y ese valor acumulado se convierte en un equivalente bajo una irradiación constante de 1000 W/m^2 de tal modo que así se obtiene HSP el cual nos sirve para dimensionar sistemas fotovoltaicos.

Figura 4.47 Horas sol pico en el año.



Fuente: Elaboración propia.

Selección de panel solar

Tabla 4.5 Comparación de principales paneles solares.

Característica	Monocrystalino	Policristalino
Material	Silicio puro con estructura cristalina única	Silicio formado por múltiples cristales
Color	Negro uniforme	Azul moteado
Eficiencia	Alta (18 % – 24 %)	Media (15 % – 18 %)
Espacio requerido	Menor área para misma potencia	Mayor área para misma potencia
Durabilidad	Larga vida útil (25-30 años)	Similar (25-30 años), pero con ligera degradación más rápida
Rendimiento en baja radiación (nublado/mañana/tarde)	Mejor desempeño	Menor desempeño
Comportamiento con altas temperaturas	Ligeramente menos eficiente en calor extremo	Menor pérdida por temperatura que el monocrystalino
Aplicaciones recomendadas	Espacios reducidos, alta eficiencia requerida	Proyectos con espacio amplio y presupuesto limitado

Fuente: Elaboración propia.

En función de la eficiencia, el espacio disponible y la necesidad de mantener un buen rendimiento incluso en condiciones de baja radiación que este sujeto a la ubicación geográfica de Huancayo visto en la figura 4.45, se opta por la implementación de paneles solares monocrystalinos, ya que presentan una mayor eficiencia energética, requieren menor superficie de instalación y mantienen un

desempeño superior en climas nublados. A partir de esta decisión, se procederá a integrar los paneles dentro del sistema de generación renovable, las baterías, dispositivos de protección y la fuente de respaldo será desde la red eléctrica.

Cálculo del panel solar

Se considera 5 horas solares pico (HSP):

$$Potencia\ mínima = \frac{154Wh}{5h} = 30.8W$$

Y las pérdidas:

$$Panel\ recomendado = 30.8 * 2 \approx 62W$$

Cálculo de controlador solar

Se determina el controlador del panel solar:

- Para panel de 80 W a 24 V

$$I = \frac{80}{24} \approx 3.3A$$

Cálculo de la batería

La potencia requerida se muestra en la tabla 4.2 que está relacionada con la máxima demanda del sistema.

$$E = 226\ Wh$$

Se convierte a Ah para batería de 24 V

$$Capacidad = \frac{154}{24} \approx 9.41\ Ah$$

Por lo cual la capacidad en potencia generada por hora con un 90% de eficiencia

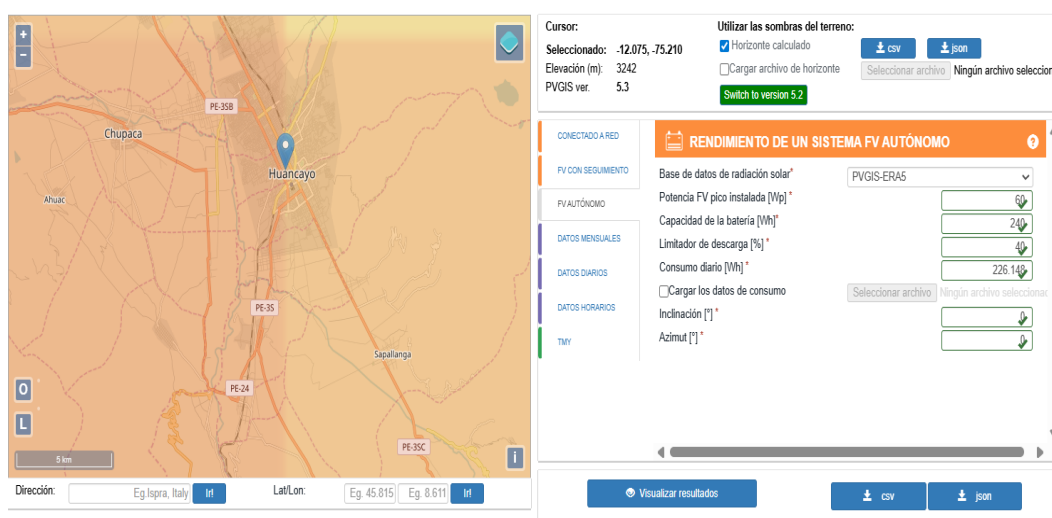
$$Capacidad\ real = \frac{9.41}{0.90} * 24 \approx 250.9\ Wh$$

Dentro del mercado no se cuenta con esta capacidad exactamente por ello se opta en una batería de 10Ah $\approx$ 240Wh.

Simulación del sistema fotovoltaico

Teniendo en consideración los valores obtenidos matemáticamente se procede a usar el simulador de sistemas fotovoltaicos PVGIS como se ve en la figura 4.48

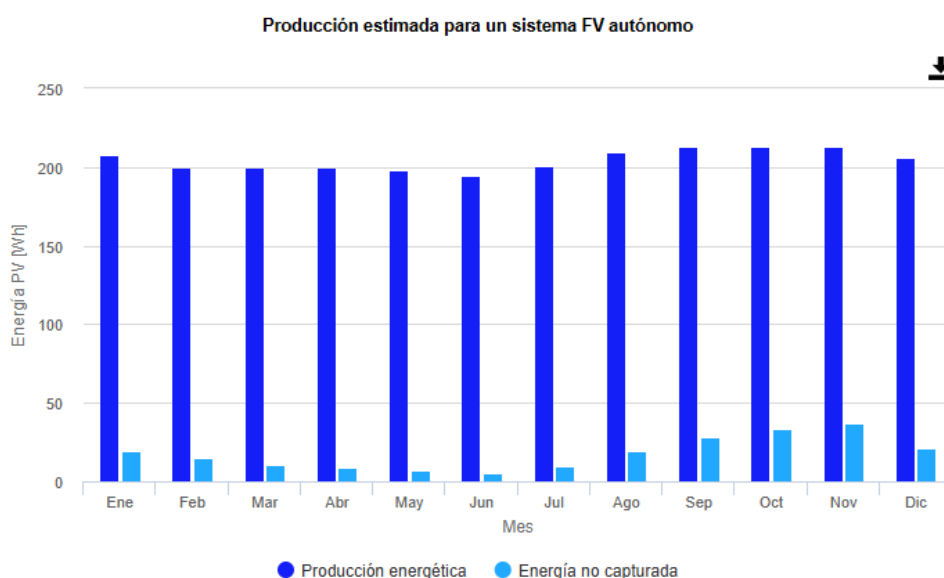
Figura 4.48 Simulación de panel solo monocristalino.



Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo como resultados la producción energética que entregara los paneles solares monocristalinos con respecto a HSP de Huancaayo, además hay análisis de eficiencia y carga de batería; el resultado completo se presenta en el anexo E.

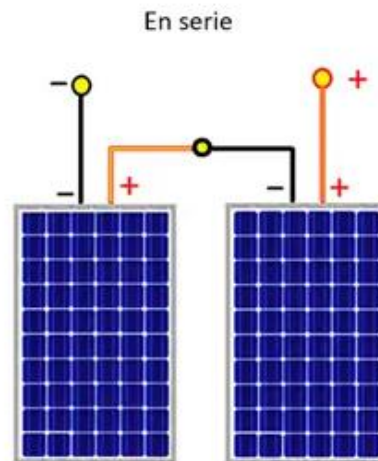
Figura 4.49 Producción de energía por paneles solares.



Fuente: Elaboración propia.

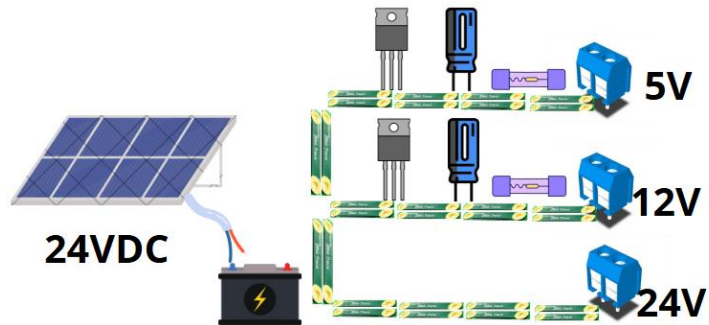
Con respecto a los datos técnicos del panel solar monocristalino a emplear será necesario el uso de dos paneles conectados en serie, con la finalidad de alcanzar el voltaje requerido como se muestra en la figura 4.50.

Figura 4.50 *Conexión serie paneles.*



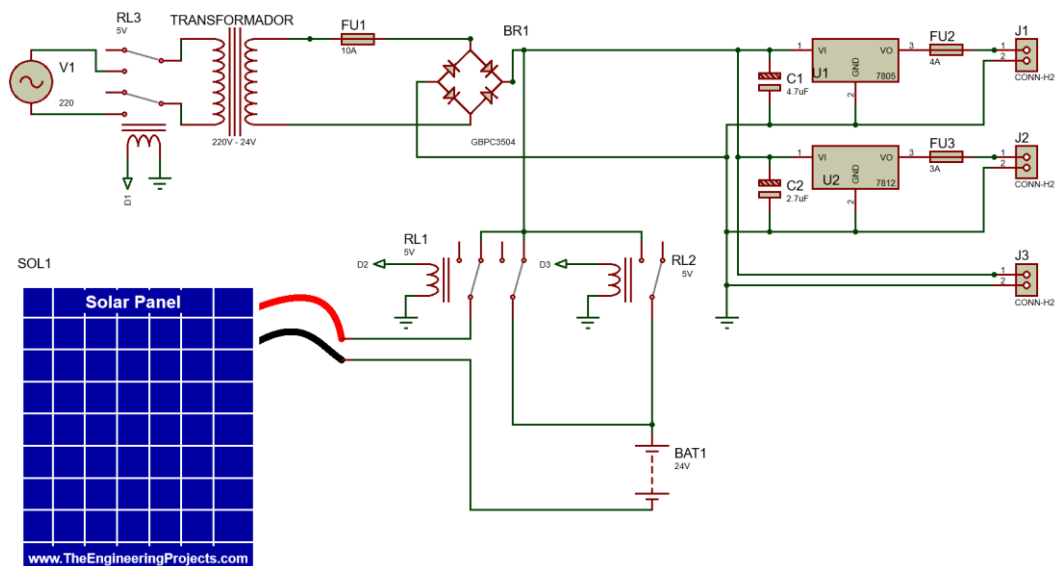
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.51 *Esquema de fuente de alimentación por paneles solares.*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.52 *Esquema del sistema dual.*



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Balance energético y costos de operación

4.3.1 Balance energético detallado

Teniendo en consideración la tabla 4.2, se tiene que la potencia de funcionamiento es 226.148 W. Se calcula la energía en kWh.

$$E_i(kWh) = \frac{P_i \cdot t_i}{100}$$
$$E_i(kWh) = \frac{226.148W \cdot 1h}{1000}$$
$$E_i(kWh) = 0.226148kWh$$

Este resultado nos indica que la energía por hora de operación es de 0.226148 kWh.

4.3.2 Consumo por hora y por ciclo de trabajo

A partir de la energía por hora $E_i(kWh) = 0.226148$ kWh se calcula la energía por ciclo multiplicando por la duración del ciclo en horas:

$$E_{hora} = \frac{226.148W \times h_{ciclo}}{1000} = 0.226148kWh$$

Y debido a que el proceso no tiene una hora fija, para cálculos aproximados se usa un rango aproximado de 12h a 22h. por ciclo

$$E_{ciclo_{min}} = \frac{226.148W \times 12h}{1000} = 2.713776kWh$$
$$E_{ciclo_{max}} = \frac{226.148W \times 22h}{1000} = 4.975256kW$$

Nos da un resultado de 2.71377 kW como mínimo y 4.975256 como máximo por cada ciclo de trabajo.

4.3.3 Costos asociados al consumo eléctrico

Teniendo en cuenta que el valor mínimo que cobra la empresa de servicios de electricidad en Huancayo es de S/ 0.64 por kWh y el valor máximo es de S/ 1.30 por kWh, se realiza la siguiente tabla 4.6 con el fin de conocer el costo asociado al consumo eléctrico por hora de operación y por ciclo de funcionamiento.

Tabla 4.6 *Costos de consumo eléctrico.*

Concepto	Energía (kWh)	Costo mínimo S/0.64	Costo máximo S/1.30
Consumo por hora	0.226148	0.14	0.29
Ciclo mínimo (12 h)	2.713776	1.74	3.53
Ciclo máximo (22 h)	4.975256	3.18	6.47

Fuente: Elaboración propia.

Entonces el costo asociado al consumo por ciclo de trabajo es de S/1.74 y como máximo de S/6.47.

4.3.4 Comparativa con alternativas tecnológicas

En el mercado existen modelos similares al proyecto planteado como presentamos en la Figura 3.4. Se realizó los cálculos de cada uno de ellos teniendo en cuenta los datos técnicos de cada producto, como se muestra en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 *Alternativas tecnológicas.*

Tecnología	Duración de ciclo (h)	Consumo (kWh/ciclo)	Costo por ciclo (mín) S/	Costo por ciclo (máx) S/
Lomi	20 h	12 kWh	7.68	15.6
Vitamix FoodCycler	8 h	4 kWh	2.56	5.2
Beyond Green	12 h	18 kWh	11.52	23.4

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Diseño de sistema electrónico

Se presenta el diseño del sistema electrónico y del modelo de control para una máquina compostadora automática en entornos domésticos. Se realiza la selección de sensores, actuadores, módulos de control y elementos de visualización. Luego se realiza una tabla de componentes y sus conexiones en el microcontrolador. Finalmente Se establece un diagrama esquemático de las conexiones de los componentes.

4.4.1 Selección de Componentes Electrónicos

A continuación, en esta sección se realizará la comparativa de componentes electrónicos alternos y la selección de los necesarios en el control del sistema de la maquina compostadora.

Para empezar, se realizó la selección del microcontrolador en base a la cantidad de entradas y salidas que se requiere en el sistema así mismo se tiene en cuenta la capacidad de procesamiento. Se elaboró la Tabla 4.5, donde se compararon los diferentes microcontroladores.

Tabla 4.8 Comparación de pines de entrada y salida en microcontroladores.

Modelo	Núcleos	Frecuencia	I/O Totales	Salidas PWM	Timers PWM	Lógica	Ventajas
Raspberry Pi Pico	2 (Cortex-M0+)	133 MHz	26 GPIO	16 canales PWM (8 pares)	8 slices (2 canales c/u)	3.3 V	Potente, versátil, múltiples protocolos
Arduino Nano	1	16 MHz	22	6	3	5 V	Muy común, fácil de usar
ESP32	2	240 MHz	30+	16	Config. flex	3.3 V	WiFi/Bluetooth, muy potente

Fuente: Elaboración propia.

Se escogió el ESP32 porque este microcontrolador cuenta con la cantidad de pines requeridos para controlar todo el sistema, tanto analógica y digitales, en la Tabla 4.6 se muestra la lista de componentes y que pines serán establecidos. Dentro de estos pines también están considerados las salidas digitales para el control de los relees que están encargados a la transferencia de fuente de energía eléctrica cuando sea necesario.

Tabla 4.9 Designación de pines para ESP32.

Elemento	Tipo	Interfaz / Tipo de Pin	GPIO ESP32
Motor principal (PWM)	Actuador	PWM	GPIO19
Ventilador/Extractor	Actuador	Digital OUT	GPIO17
Resistencia térmica	Actuador	Digital OUT	GPIO18
Sensor de temperatura y humedad	Sensor	DHT22 (Digital IN)	GPIO16
Sensor de gas (CO ₂ /NH ₃ - MQ-135)	Sensor	ADC	GPIO35
Sensor de voltaje (batería)	Sensor	ADC	GPIO34
Fuente solar	Actuador	Digital OUT	GPIO32
Fuente batería	Actuador	Digital OUT	GPIO33
Fuente red eléctrica	Actuador	Digital OUT	GPIO25
Botón START	Entrada	Digital IN (Pull-up)	GPIO4
Botón STOP	Entrada	Digital IN (Pull-up)	GPIO15

Interruptor de tapa	Entrada	Digital IN	GPIO5
LED señalización F1 (estado)	Actuador	Digital OUT	GPIO27
LED señalización F2 (proceso)	Actuador	Digital OUT	GPIO14
LED señalización F3 (error)	Actuador	Digital OUT	GPIO12
LED señalización F4 (fin proceso)	Actuador	Digital OUT	GPIO13
Atomizador ultrasónico	Actuador	Digital OUT	GPIO26
Pantalla OLED 128x64	Display	I2C (SDA/SCL)	GPIO21 (SDA) / GPIO22 (SCL)

Fuente: Elaboración propia.

Luego de definir el microcontrolador en el apartado anterior, se realiza la distribución y conexión de los elementos que conforman al sistema mecatrónico. En la figura 4.40 representa al diagrama de la estructura central del sistema electrónico y su integración con sensores, actuadores y elementos de monitoreo.

En la etapa de mecánica de la máquina compostadora automática requiere un sistema de mezclado y triturado; por lo cual se realizó cálculos para encontrar la potencia mecánica requerida siendo 155W y para la selección es necesario la potencia eléctrica de entrada:

$$P_{electrica} = \frac{P_{Mecanica}}{\eta} = \frac{155W}{0.98} = 158.16 W$$

Se uso una eficiencia de 98%, teniendo el dato de la potencia eléctrica se calcula la corriente requerida por el motor a 24VDC.

$$I = \frac{P_{eléctrica}}{V}$$

$$I = \frac{158.16 W}{24V} \approx 6.59 A$$

Para ello, se consideró el uso de un motor con escobillas que incluye un reductor incorporado. Es decir, se trata de un motor de alta velocidad cuya velocidad se reduce gracias al reductor, lo que a su vez incrementa el torque hasta alcanzar el valor necesario definido en la etapa mecánica. En la tabla 4.7 se muestran motores como referencia.

Tabla 4.10 Comparación de motores.

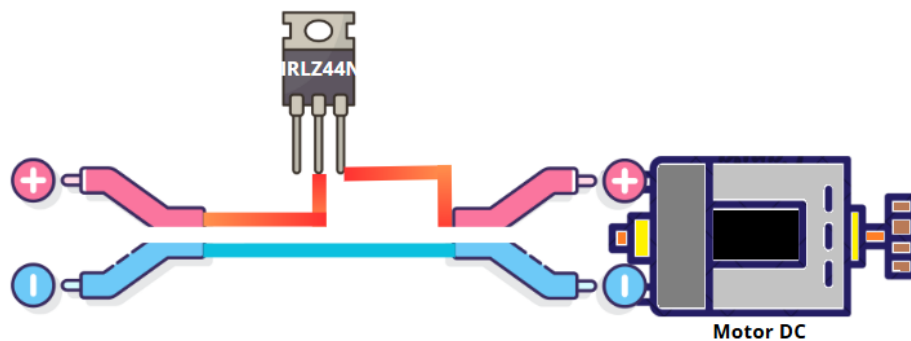
Modelo	Voltaje (V)	Torque (Nm)	Velocidad (RPM)	Corriente (A)	Dimensiones aprox.	Ruido aprox. (dB)
Motor DC 24 V tipo turbina	24	7-8 Nm	~180 rpm	3.5-7 A	Compacto, carcasa metálica	55-65
JGY-370 24 V 60 RPM	24	2-3 Nm	60 rpm	0.5-1 A	Muy compacto	40-50
775 DC con reductor metálico	24	6-10 Nm	200-300 rpm	3-6 A	Grande	65-75

Fuente: Elaboración propia.

Se eligió esta opción de motor por su relación torque velocidad el cual cumple para el sistema mecatrónico, el nivel de ruido es moderado y será atenuado mediante la carcasa. sumado a su eficiencia y su diseño compacto lo hace apropiado para aplicaciones de uso doméstico.

Debido a que se controlara la velocidad mediante PWM del mismo microcontrolador y sabiendo que el motor tiene una potencia mayor al que soporta, se opta por realizar el circuito de control de velocidad mediante un MOSFET IRLZ44N y será conectado como se muestra en la imagen 4.53.

Figura 4.53 Conexionado de motor mediante Mosfet.



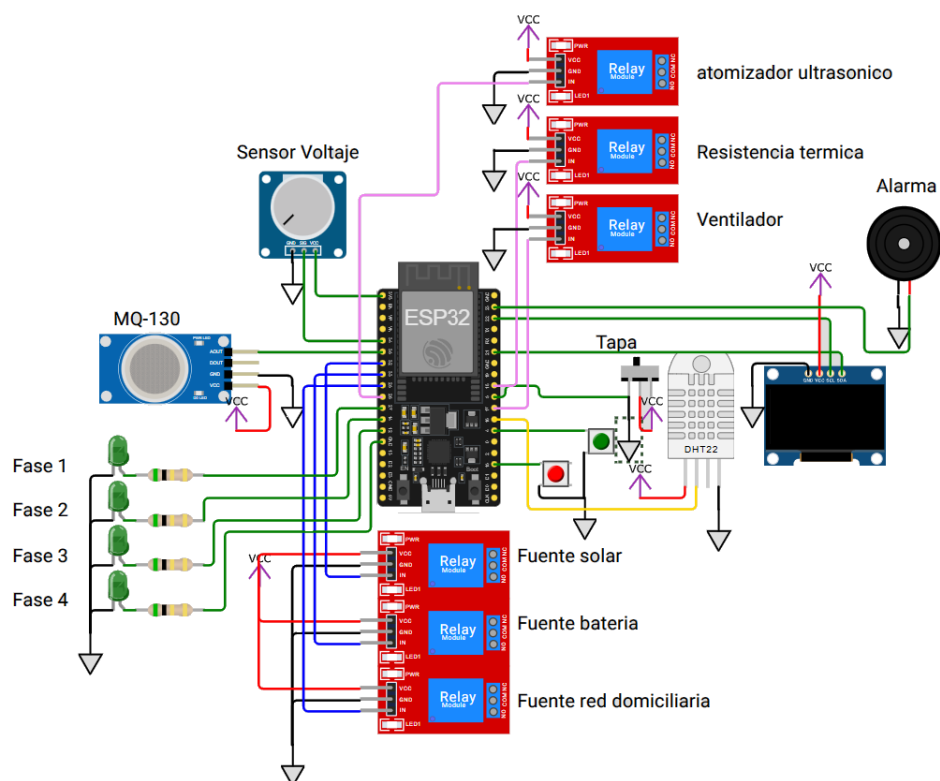
Fuente: Elaboración propia.

Dentro del sistema se emplearán sensores para medir temperatura y humedad, el cual proporcionara la señal de nivel de temperatura y humedad para el control de lazo cerrado en el actuador resistencia calorífica, los cuales se encargarán de monitorear y mantener la temperatura y humedad en las condiciones durante el proceso de compostaje. Se seleccionó el modelo RS485 debido a sus características técnicas que incluyen la capacidad de hacer lecturas a más de 5cm, menor margen de error en lectura, y la característica de ser un sensor con IP 67

el cual le hace resistente al polvo y al agua, además, su diseño compacto, con dimensiones 8.8 x 8.5 x17.5 mm lo hace ideal para su ubicación en el espacio reducido dentro del presente proyecto.

A su vez, se incluirán sensores para detectar la presencia de gases que son generados propios del proceso de descomposición, tales como amoníaco NH_3 y dióxido de carbono CO_2 , los cuales proporcionarán la señal de concentración de gases para el control de lazo cerrado para el actuador ventilador. Este actuador se encargará de activar el sistema de ventilación que conducirá el flujo de aire hacia un filtro de carbón activado, con el objetivo de mitigar posibles riesgos asociados a la acumulación de gases nocivos. Por ello se seleccionó el sensor MQ- 135 por su alta sensibilidad a gases tóxicos y nocivos, su tiempo de respuesta corto, la distancia de funcionamiento y su alta precisión por ser un sensor de señal analógica, además de su tamaño compacto que facilita su integración en el diseño del sistema de compostaje automático. Finalmente, se utilizará un sensor de voltaje que permitirá supervisar el estado de la alimentación eléctrica y conmutar entre distintas fuentes de energía según sea necesario. En la figura 4.54 se muestra las ilustraciones conexas de actuadores y sensores del sistema en el microcontrolador.

Figura 4.54 *Conexión general del sistema electrónico.*



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 4.54, el diseño contempla la incorporación de cuatro LED verdes ubicados en la interfaz del sistema. Cada uno de representa una etapa específica del proceso de compostaje, permitiendo al usuario identificar de forma visual y rápida el avance del ciclo de operación de la máquina compostadora automática. Para garantizar la correcta operación y evitar daños en los LED, se emplea una resistencia de protección en serie, cuyo valor se determina mediante la ecuación.

$$R = \frac{V_{fuente} - V_{led}}{I_{led}}$$

Teniendo en cuenta que el led es verde y su voltaje de funcionamiento es de 3.2V y su corriente de funcionamiento 20mA.

$$R = \frac{3.3V - 3.2V}{0.02A} = 5\Omega$$

4.5 Diseño de sistema de control

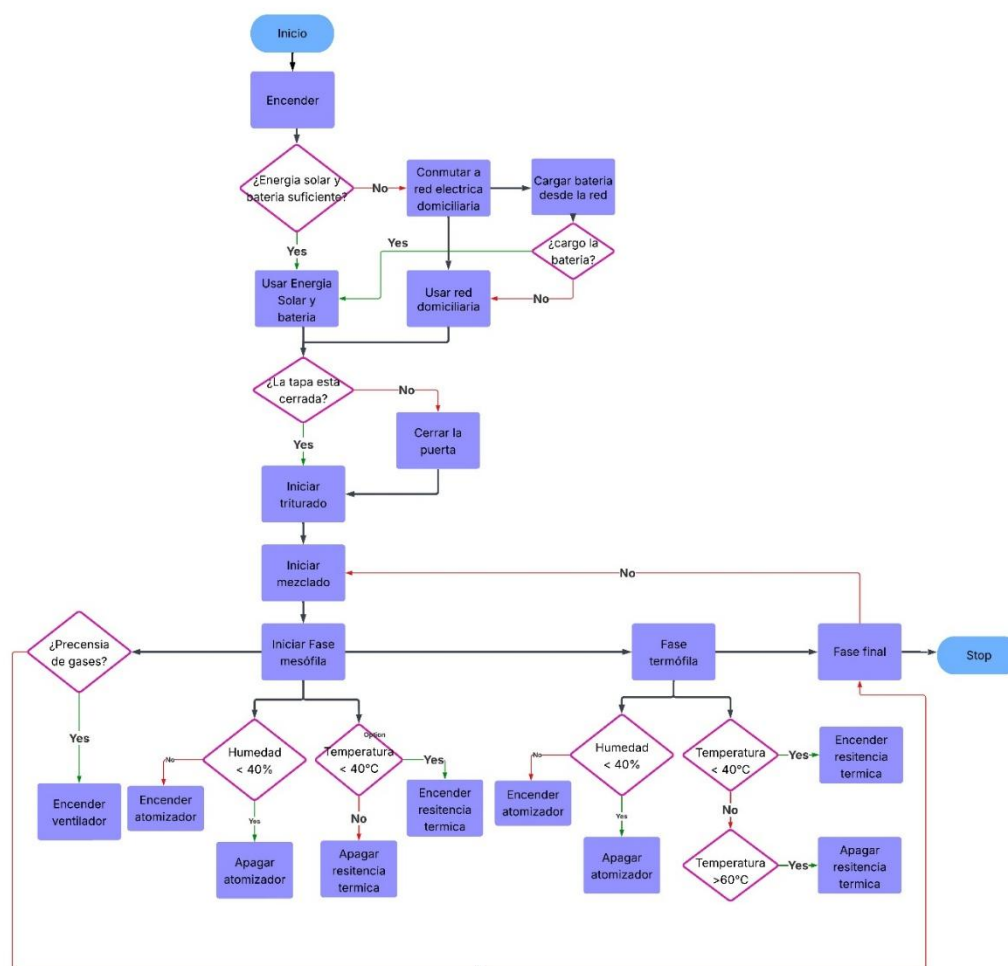
En este apartado se desarrollará el diseño del sistema de control del sistema mecatrónico de la maquina compostadora de residuos orgánicos en entornos domésticos. Primero se determinará los controles independientemente de cada actuador. El sistema completo comprenderá de una unidad central de procesamiento, sensores y actuadores. Una vez que se tenga el diagrama de control de las distintas etapas del sistema mecatrónico, se procederá a realizar el diagrama de control realimentado para una de las etapas. Finalmente, se integrarán los diagramas de control de las diferentes etapas en un diagrama de control general, que representará el funcionamiento completo y coordinado del sistema.

4.5.1 Funcionamiento del sistema de control

El sistema de control de la máquina compostadora doméstica gestiona automáticamente las condiciones internas durante todo el proceso de compostaje. Para ello es necesario un conjunto de sensores que monitoreen constantemente las variables clave como la temperatura, la humedad, la presencia de gases. Posteriormente con base a las variables que nos den los sensores, el sistema pueda ser capaz de tomar decisiones en tiempo real como activar la resistencia térmica si en caso la temperatura es baja, enciende el ventilador ante la presencia de gases, y dar pase al motor mezclador en los momentos necesarios para garantizar una descomposición homogénea. Finalmente, este sistema prioriza el uso de energía solar almacenada en batería, con respaldo de la red eléctrica domiciliaria en caso de insuficiencia, asegurando eficiencia energética. Como se

observa en la figura 4.55 en el cual se detalla el funcionamiento completo de todo el sistema de control.

Figura 4.55 Diagrama de flujo del sistema de control.

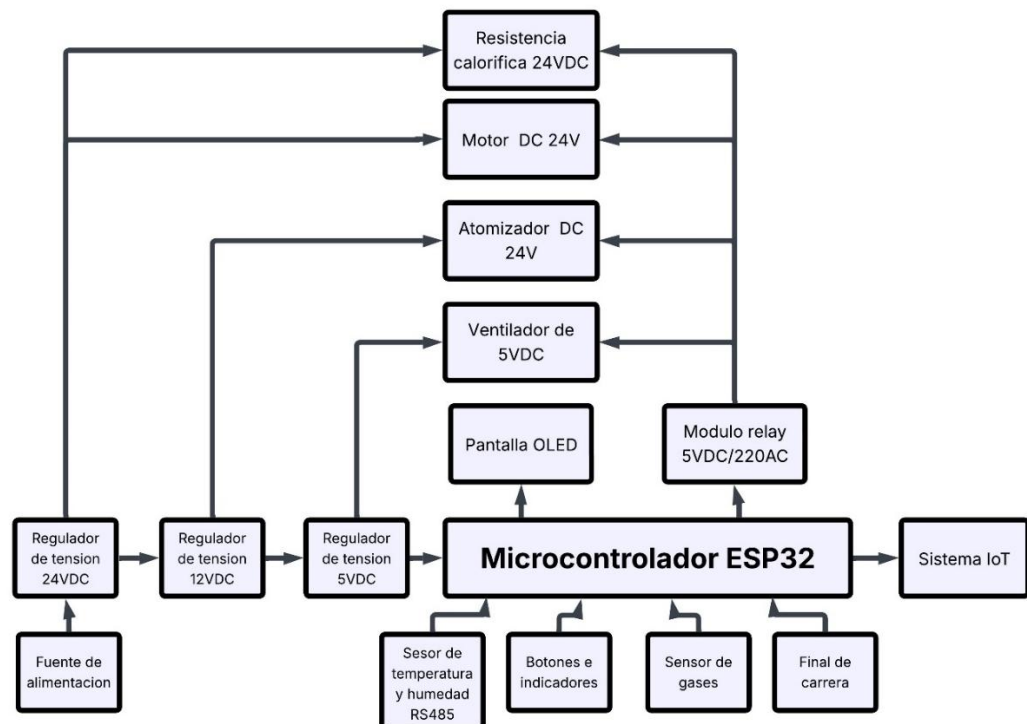


Fuente: Elaboración propia.

El funcionamiento del sistema es controlado por un microcontrolador ESP32, el cual se encarga de gestionar el inicio del proceso y la activación de los diferentes componentes. El funcionamiento comienza cuando se detecta la tapa de la maquina cerrada, para ellos de usa un final de carrera el cual genera una señal de activación que pone en marcha el motor principal de 24 V, en primera instancia encargado de triturar. Después de los residuos ser triturados, se deberá activar la resistencia calorífica hasta llegar a 40°C y a su vez el mismo motor, pero a diferente velocidad estará moviendo las paletas para el proceso de mezclado en la etapa de misofilia, después de esto la temperatura seguirá subiendo hasta llegar a 65°C entrando a la etapa de termofílica.

Durante todo este proceso, se realiza el monitoreo continuo de temperatura y humedad mediante el sensor RS485, el cual permite mantener las condiciones óptimas para el proceso de compostaje. A su vez se monitorea la presencia de gases mediante el sensor MQ 135 el cual es responsable de dar la señal si en caso existe presencia de gases como el dióxido de carbono y/o amoníaco dando pase al ventilador el cual conducirá los gases aun filtro de carbón activado para posteriormente ser expulsado evitando así malos olores y riesgos de intoxicación. A la vez que realiza todo este proceso se enviará los datos recolectados por los sensores a una nube para el monitoreo por IoT, que dichos valores y estado de proceso también será posible de ser visualizados de manera física en la maquina a través de leds indicadores y pantallas informativas.

Figura 4.56 Diagrama de funcionamiento.



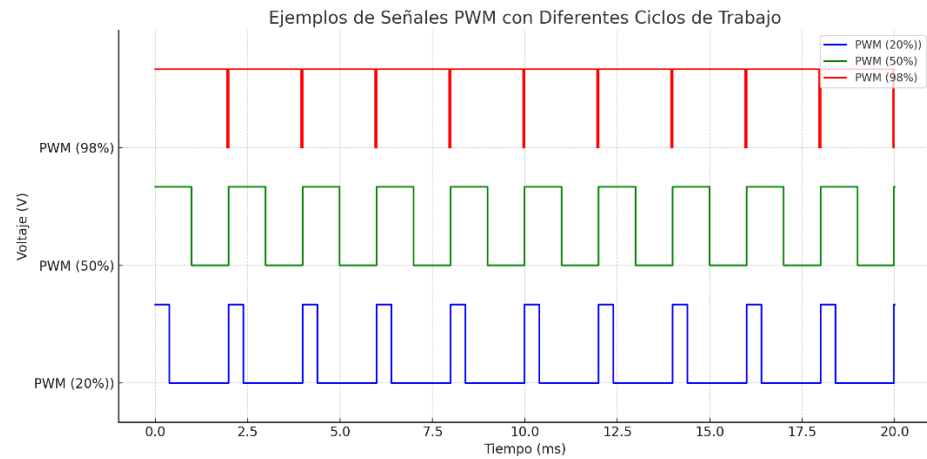
Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Control del motor

En esta sección se abordará el diseño e implementación de un sistema de control para un motor de corriente continua. Debido a que dentro del proyecto se deberá contar con dos velocidades distintas, el objetivo principal es regular la velocidad del motor mediante señales de modulación por ancho de pulso PWM como se observa en la figura 4.57, utilizando herramientas de simulación para validar su

comportamiento. Finalmente se visualizará en el esquema de conexión del motor con su controlador, y se presentará la simulación del sistema utilizando Simulink.

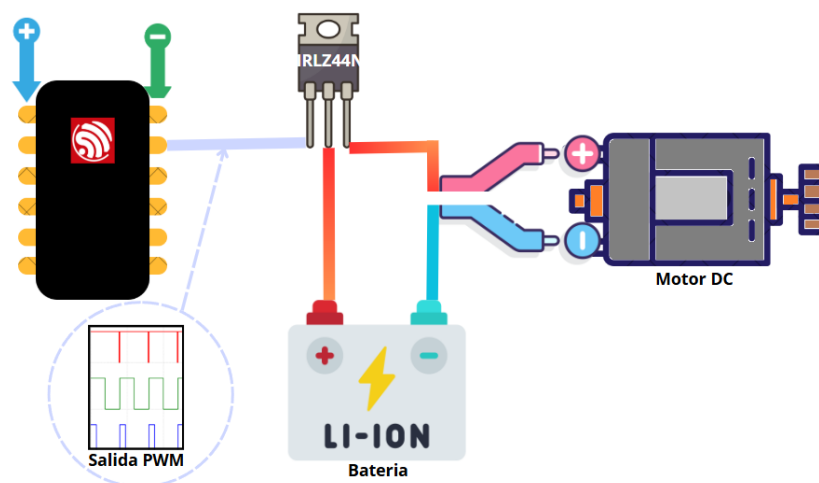
Figura 4.57 *Variación de PWM.*



Fuente: Elaboración propia.

Una vez definida la señal de PWM, se modela la arquitectura del circuito para el control del motor. Debido a que el motor es de una potencia mayor se llegará a controlar mediante el MOSFET IRLZ44N, el cual actúa como interruptor de alta velocidad y eficiencia. Se le aplicará un voltaje lógico al pin GATE proveniente desde el microcontrolador, el cual permitirá el paso de la corriente desde el drenador hacia la fuente, así alimentando al motor DC como se observa en la figura 4.58.

Figura 4.58 *Esquema de conexión para control de motor DC*



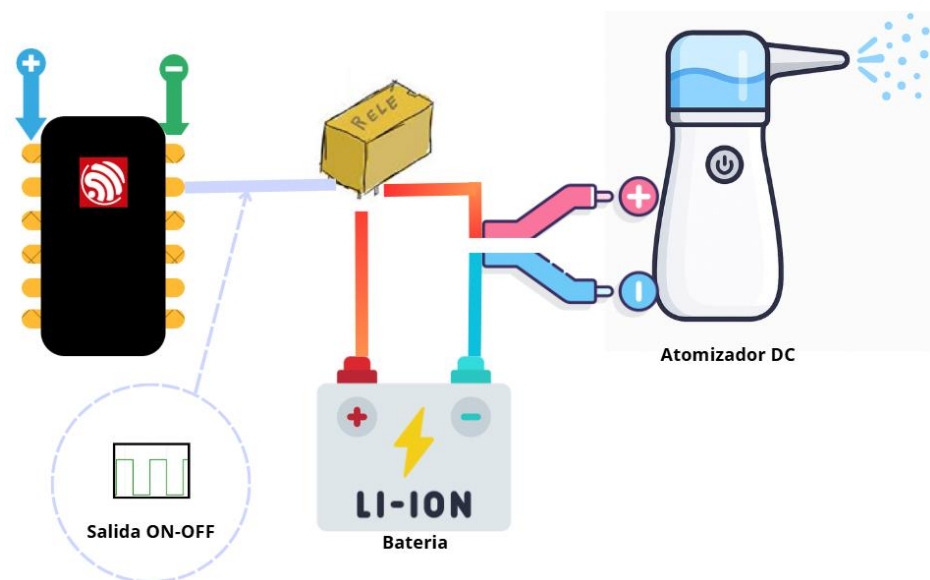
Fuente: Elaboración propia.

4.5.3 Control del atomizador (humidificador)

En esta sección se detalla la implementación del sistema de control para el atomizador, encargado de mantener la humedad dentro de la cámara de compostaje en un rango adecuado para el proceso. El objetivo principal es activar el atomizador cuando los valores de humedad, medidos por el sensor RS485, se encuentren por debajo del umbral definido.

El control ON-OFF se llevará a cabo a través de un módulo de relé, que actuará como un interruptor electrónico gobernado por la señal del microcontrolador. Este relé habilitará el suministro de corriente al atomizador solo cuando se encuentre por debajo de 45% e inhabilitándolo cuando llegue a 60%, lo que no solo asegura los parámetros óptimos para el proceso, si no también asegura el consumo energético rentable.

Figura 4.59 Esquema de conexión para control de atomizador eléctrico.



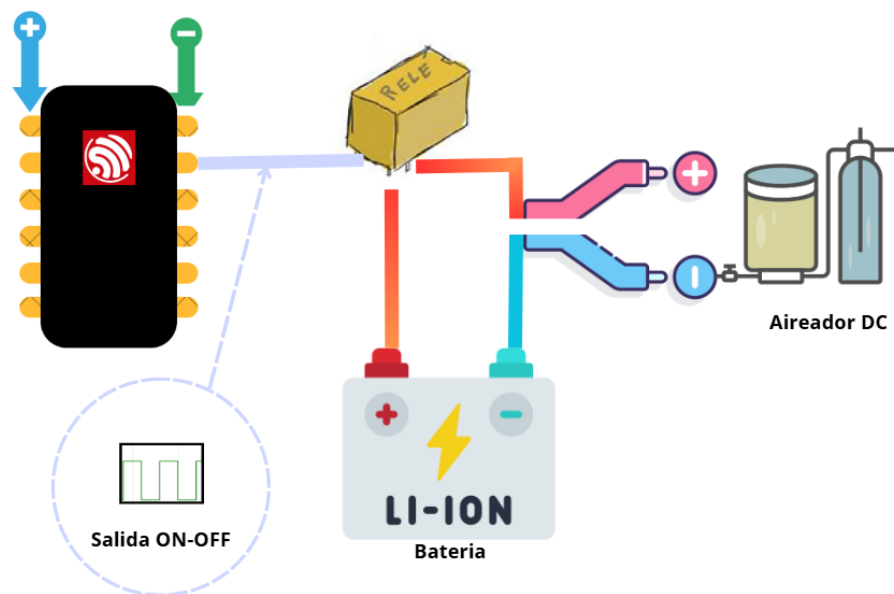
Fuente: Elaboración propia.

4.5.4 Control de aireador

Se abordará el diseño e implementación de un sistema de control para el aireador, encargado de proporcionar oxígeno y la evacuación de gases generados en el proceso de compostaje. El objetivo principal es activar el ventilador únicamente cuando el sensor de gases MQ-135 detecte concentraciones superiores al umbral permitido, asegurando la seguridad y evitando acumulaciones indeseadas dentro de la cámara. Para ello se realiza la simulación del ventilador y del oxígeno dentro de la cámara

El control ON-OFF se implementará mediante un módulo de relé, el cual será gobernado por una señal de control proveniente del microcontrolador ESP32. De esta forma, el relé permitirá el suministro de energía al aireador cuando el nivel de oxígeno se encuentre debajo de 10% mínimo necesario para mantener una concentración segura durante el proceso.

Figura 4.60 Esquema de conexión para control de aireador.



Fuente: Elaboración propia.

4.5.5 Lazo de control cerrado en la resistencia térmica

En esta sección se plantea el control en lazo cerrado para el sistema térmico del actuador. En primer lugar, se definen las ecuaciones diferenciales que están sujetos al comportamiento térmico del sistema. Las ecuaciones describen el balance de energía en el cuerpo a calentar y constituyen la base para poder analizar dinámicamente del proceso. Donde la variable de entrada es la potencia eléctrica aplicada al calefactor $Q(t)$, mientras que la variable de salida es la temperatura de la resistencia térmica $T(t)$, el cual es medida por el sensor RS485. La dinámica térmica del sistema se describe mediante la siguiente ecuación.

$$C_{\theta} \frac{dT(t)}{dt} + \frac{T(t)}{R_{\theta}} = Q_{in}(t)$$

Luego aplicamos la transformada de Laplace a la ecuación anterior, teniendo en cuenta las condiciones iniciales nulas, se obtiene la función de transferencia del sistema.

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{R\theta}{R\theta C\theta s + 1} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Los valores requeridos para esta ecuación se pueden encontrar dentro de los datos del fabricante de la resistencia térmica, en la tabla 4.11 se visualiza la tabla de datos.

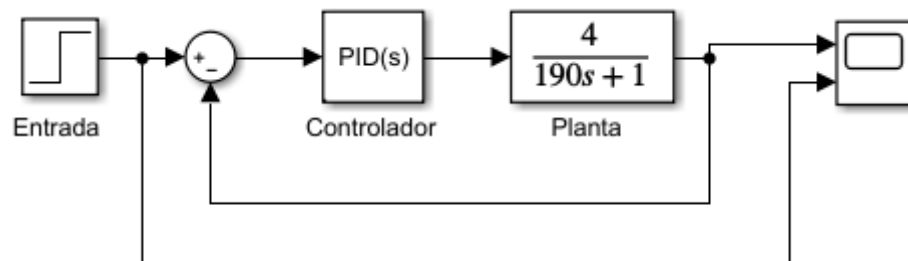
Tabla 4.11 *Valores de fabricante de resistencia térmica.*

Parámetro	Valor estimado	Unidad	Descripción
Potencia nominal	150	W	Potencia eléctrica máxima
Dimensiones aproximadas	Ø 6 mm × 20 mm	mm	Diámetro y largo del calefactor
Material del entorno	Aluminio	—	Medio en el que se disipa el calor
Rθ	4	°C/W	Resistencia térmica estimada
Cθ	8	J/°C	Capacidad térmica estimada del cuerpo calentado
τ=Rθ*Cθ	32	s	Constante de tiempo térmica

Fuente: Elaboración propia.

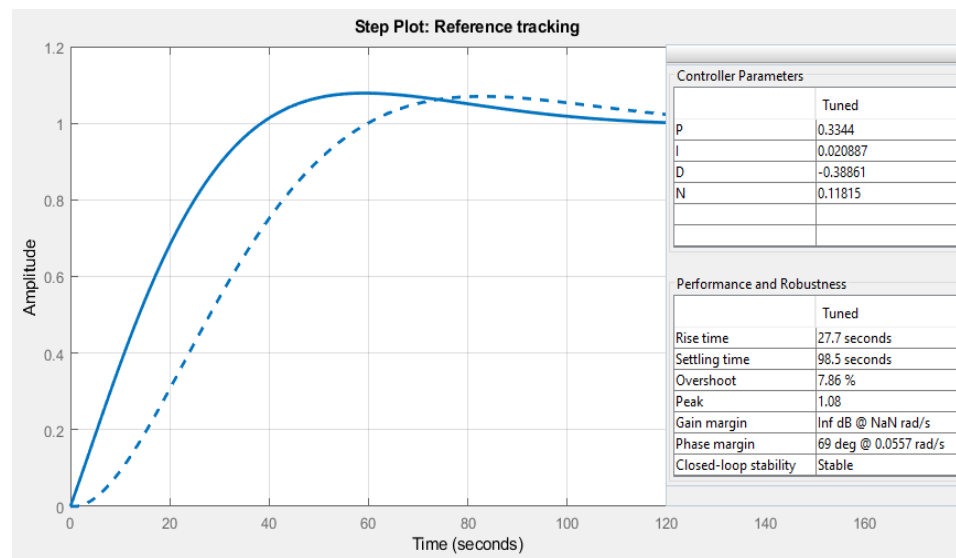
Teniendo en cuenta esos valores se realiza el control PID en Matlab con la función transferencia como se ve en la figura 4.46. Para que el control PID sea mejor controlado se tendrá en cuenta las referencias para los parámetros Kp, Ki, Kd como se muestra en la figura 4.61.

Figura 4.61 *Control lazo cerrado para la resistencia térmica.*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.62 *Parámetros de control.*

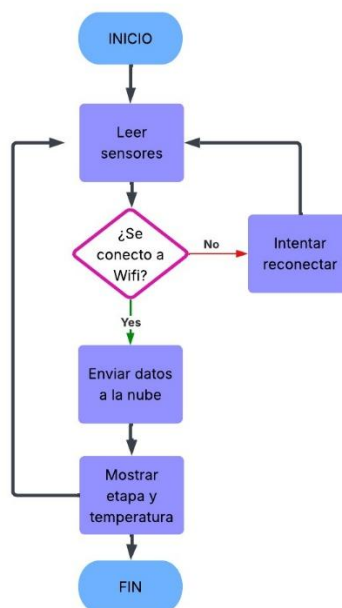


Fuente: Elaboración propia.

4.5.6 Sistema de monitoreo IoT

Dentro del sistema de monitoreo basado en IoT, el cual permitirá visualizar en tiempo real la etapa actual que se encuentra el proceso de compostaje y se mostrará parámetros internos del material compostado. Este esquema de funcionamiento se representa en la imagen 4.63.

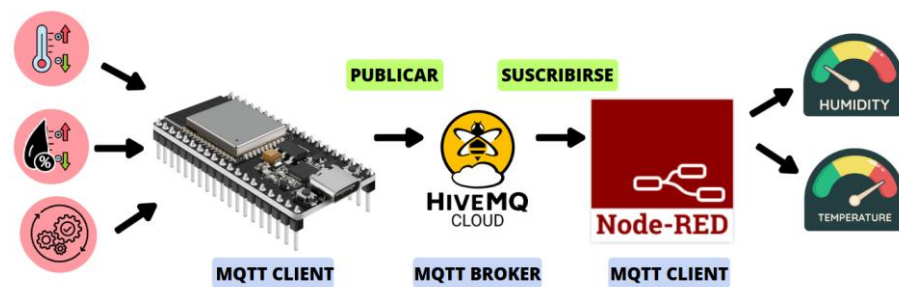
Figura 4.63 *Diagrama de flujo de sistema de monitoreo.*



Fuente: Elaboración propia.

Este sistema sigue una secuencia donde el microcontrolador es el encargado de recopilar las magnitudes físicas mediante sensores dentro del sistema, luego mediante el protocolo de comunicación Wifi se enviará los datos al servidor de MQTT Bróker. Posteriormente MQTT Bróker enviara los datos a Node-RED en cual recolectar y transformara los datos en gráficos. En la siguiente figura 4.64 se muestra la distribución de esta

Figura 4.64 *Distribución de sistema de monitoreo.*



Fuente: Elaboración propia.

Configuración de microcontrolador

Usando el lenguaje de programación Micro Python programaremos el microcontrolador ESP32, primero declaramos el nombre del cliente MQTT, juntamente con la identificación y los nombres de cada Topic.

Figura 4.65 *Declaración de variables para MQTT en Micropyhton.*

```
Compostadora_Python.py x
53 # ===== MQTT CONFIG =====
54 MQTT_CLIENT_ID = "compostadora-iot"
55 MQTT_BROKER = "broker.mqttdashboard.com"
56 MQTT_USER = ""
57 MQTT_PASSWORD = ""
58 MQTT_TOPIC_HUMEDAD = "proyecto/humedad"
59 MQTT_TOPIC_TEMPERATURA = "proyecto/temperatura"
60 MQTT_TOPIC_ESTADO = "proyecto/estado"
61 MQTT_TOPIC_TIEMPO = "proyecto/tiempo"
62 MQTT_TOPIC_CICLOS = "proyecto/ciclos"
63 MQTT_TOPIC_FILTRO = "proyecto/filtro"
64 MQTT_TOPIC_START = b"proyecto/start"
65 MQTT_TOPIC_STOP = b"proyecto/stop"
66 MQTT_TOPIC_WIFI = b"estado/wifi"
--
```

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, el microcontrolador tendrá la capacidad de enviar datos a través de la función `client.publish`, para poder visualizar aspectos del funcionamiento

de la maquina y de recibir datos desde el Broker MQTT utilizando la función `client.subscribe` con la finalidad de que la maquina se pueda encender y apagar remotamente.

Figura 4.66 Código de publicación a MQTT.

```
Compostadora_Python.py *  
337  
338 # ===== Lanzamiento A MQTT BROKER =====  
339 client.subscribe(MQTT_TOPIC_START)  
340 client.subscribe(MQTT_TOPIC_STOP)  
341 client.publish(MQTT_TOPIC_HUMEDAD, hum_str)  
342 client.publish(MQTT_TOPIC_TEMPERATURA, temp_str)  
343 client.publish(MQTT_TOPIC_ESTADO, estado)  
344 client.publish(MQTT_TOPIC_TIEMPO, tiempo_str)  
345 client.publish(MQTT_TOPIC_CICLOS, str(contador_ciclos))  
346 client.publish(MQTT_TOPIC_FILTRO, filtro)  
347 client.publish(MQTT_TOPIC_WIFI, mensaje_wifi)  
348  
349
```

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, después de enviar y recibir los datos desde el Broker MQTT, el microcontrolador continúa ejecutando la lógica de funcionamiento del sistema (Ver anexo C), tomando decisiones en función de los datos obtenidos, como activar o desactivar dispositivos, actualizar el estado del proceso y mantener a la par la sincronización de la información con la interfaz IoT.

Configuración de MQTT Bróker

La función principal es actuar como intermediario entre el microcontrolador y la interfaz de monitoreo Node-RED, permitiendo el envío y la recepción de mensajes a través de tópicos definidos. Para este proyecto se eligió HiveMQ Public Broker, debido a que se encuentra gratuitamente y se usara para el prototipado. Para su inicialización es necesario los parámetros de configuración como se muestra en la figura 4.67.

Figura 4.67 Configuración de MQTT.

Configuración de conexión MQTT ×

Anfitrión: **broker.hivemq.com**

Puerto TCP: **1883**

Puerto WebSocket: **8000**

Puerto TCP TLS: **8883**

Puerto WebSocket TLS: **8884**



Need a fully managed MQTT broker?
 Get your own Cloud broker and connect up to 100 devices for free.

[Get your free account](#)

Connection
connected

Host

Port

ClientID

Username

Password

Keep Alive

SSL
☒

Clean Session
☒

Last-Will Topic

Last-Will QoS

Last-Will Retain
☐

Last-Will Message

Fuente: Elaboración propia.

Luego se realiza las configuraciones de los Topics en base a la programación del microcontrolador, los cuales se encuentran en la siguiente tabla 4.12.

Tabla 4.12 *Tópicos de comunicación*

Tópico	Dirección	Tipo de mensaje
proyecto/humedad	Publicación	Número decimal (%)
proyecto/temperatura	Publicación	Número decimal (°C)
proyecto/estado	Publicación	Texto: "Estado actual"
proyecto/tiempo	Publicación	Formato tiempo: "HH:MM:SS"
proyecto/ciclos	Publicación	Número entero
proyecto/filtro	Publicación	Texto: "Cambio de filtro requerido" o similar
proyecto/start	Suscripción	"1"
proyecto/stop	Suscripción	"0"
estado/wifi	Publicación	"Conectado" / "Desconectado"

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.68 Tópicos de comunicación

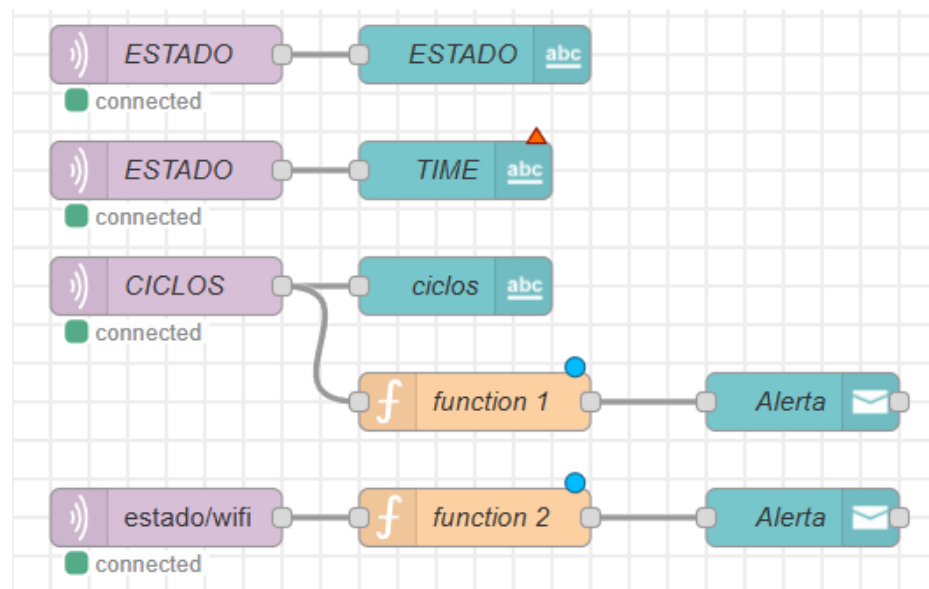
Subscriptions	Messages
Add New Topic Subscription Qos: 1 proyecto/humedad X Qos: 1 proyecto/temperatura X Qos: 1 proyecto/estado X Qos: 1 proyecto/tiempo X Qos: 1 proyecto/ciclos X Qos: 1 proyecto/start X Qos: 1 proyecto/stop X Qos: 1 proyecto/filtro X	2025-05-29 13:54:33 Topic: proyecto/filtro Qos: 0 Filtro OK 2025-05-29 13:54:33 Topic: proyecto/ciclos Qos: 0 1 2025-05-29 13:54:33 Topic: proyecto/tiempo Qos: 0 0h 0m 1s 2025-05-29 13:54:33 Topic: proyecto/estado Qos: 0 Triturado 2025-05-29 13:54:32 Topic: proyecto/filtro Qos: 0 Filtro OK 2025-05-29 13:54:32 Topic: proyecto/ciclos Qos: 0 1 2025-05-29 13:54:32 Topic: proyecto/tiempo Qos: 0 0h 0m 0s 2025-05-29 13:54:32 Topic: proyecto/estado Qos: 0 Fase 1

Fuente: Elaboración propia.

Configuración de Node-RED

En este proyecto, cumple la función de interfaz de monitoreo y control remoto, permitiendo al usuario visualizar el estado del sistema de compostaje, recibir datos en tiempo real y enviar comandos al ESP32 a través del protocolo MQTT. Para ello se configuro dentro del Node-RED el estado, tiempo y ciclos de funcionamiento del sistema; a su vez se realizó una notificación cuando se encuentre conectado con la máquina. Todos estos datos llegan desde el MQTT Broker mediante el bloque MQTT in como se observa en la figura 4.69.

Figura 4.69 Bloques de conexión de estado, tiempo y ciclos.



Fuente: Elaboración propia.

Los bloques función tienen su propia configuración interna. Como se observa en las figuras 4.70 y 4.71.

Figura 4.70 Código del bloque de función 1 Node_RED.

```
1 // Suponemos que el valor de conteo viene en msg.payload
2 var conteo = msg.payload;
3
4 // Verificamos si el conteo llegó a 10
5 if (conteo === 15) {
6     // Creamos un nuevo mensaje con la advertencia
7     return {
8         payload: "⚠ Advertencia: Se alcanzó el conteo de 15",
9         topic: "notificacion"
10    };
11 }
12
13 // Si no se cumple la condición, no hacemos nada
14 return null;
```

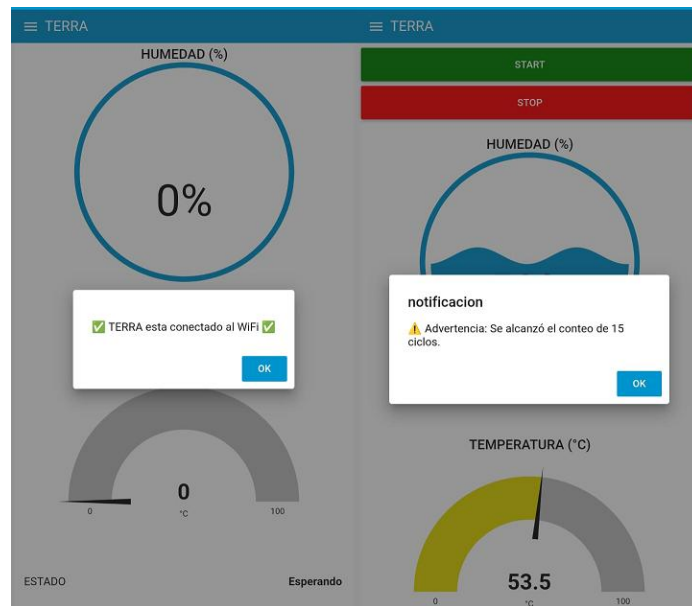
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.71 Código del bloque de función 2 Node_RED.

```
1 if (msg.payload === "1" || msg.payload === 1) {
2     node.status({ fill: "green", shape: "dot",
3     text: "ESP32 conectado" });
4
5     // Enviar mensaje al siguiente nodo
6     node.send({ payload: "✅ TERRA esta conectado al WiFi ✅",
7
8     // Luego de 2 segundos, enviar mensaje de limpieza
9     setTimeout(() => {
10         node.status({});
11         node.send({ payload: "" });
12     }, 2000);
13
14     // No retornamos nada directamente
15     return null;
16 } else {
17     return null;
18 }
```

Fuente: Elaboración propia.

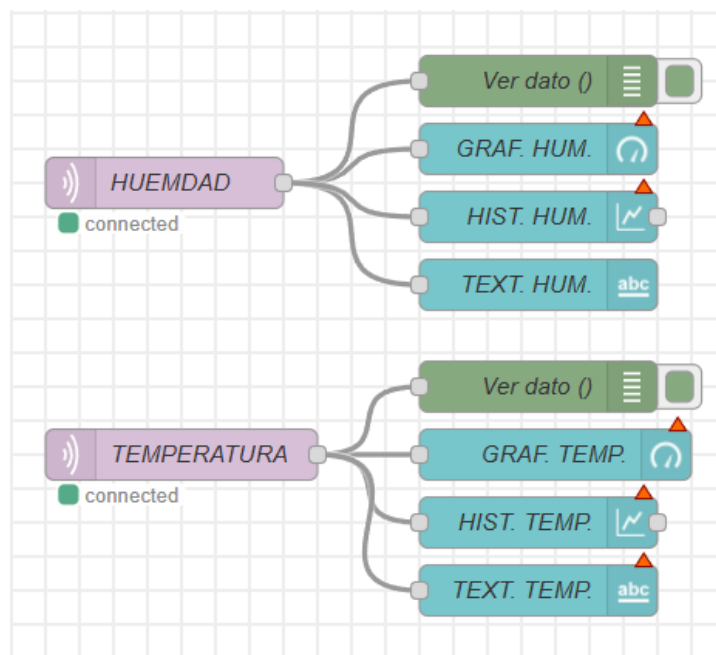
Figura 4.72 Visualización de alertas dentro de la interfaz.



Fuente: Elaboración propia.

También se implementarán graficas en tiempo real de las magnitudes actuales dentro del sistema, específicamente la temperatura y la humedad, así como una gráfica adicional para representar su evolución histórica durante el proceso de compostaje. Para ello se integró la librería Dashboard, el actual nos proporciona los bloques Gauge, Text y Chart. Todos estos elementos ayudaran la representación gráfica de los valores.

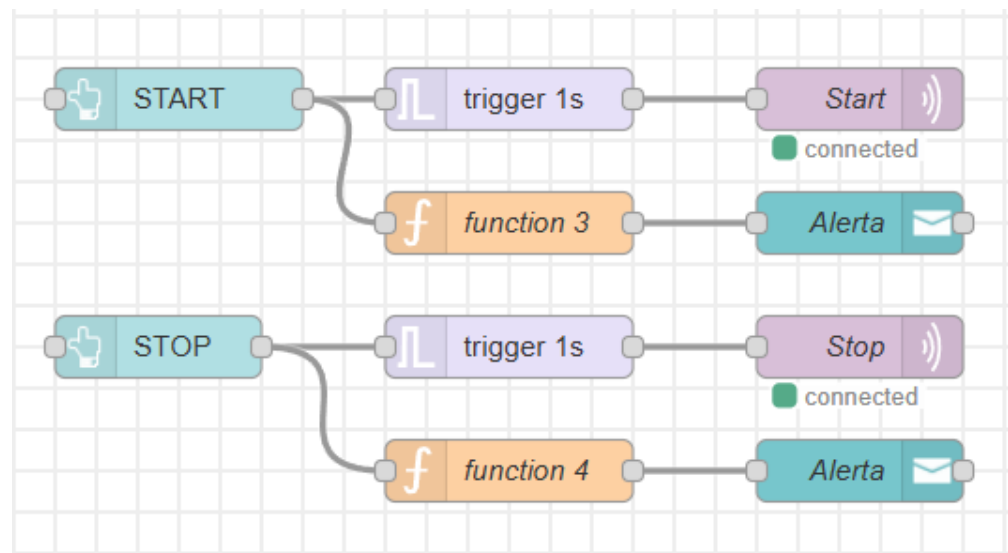
Figura 4.73 Bloques de conexión de temperatura y humedad.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, a diferencia de los nodos anteriores que solo reciben datos este bloque MQTT out se utiliza para enviar comandos desde Node-RED al broker MQTT, permitiendo el encendido y pagado remoto de la máquina. Se habilita los bloques Button que son condicionados por el bloque trigger que da una señal controlada.

Figura 4.74 Bloques de conexión de Start y Stop.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se muestra una alerta cuando la maquina está funcionando o este parado, para ello se configura los bloques función de la siguiente manera.

Figura 4.75 Código del bloque de función 3 y 4.

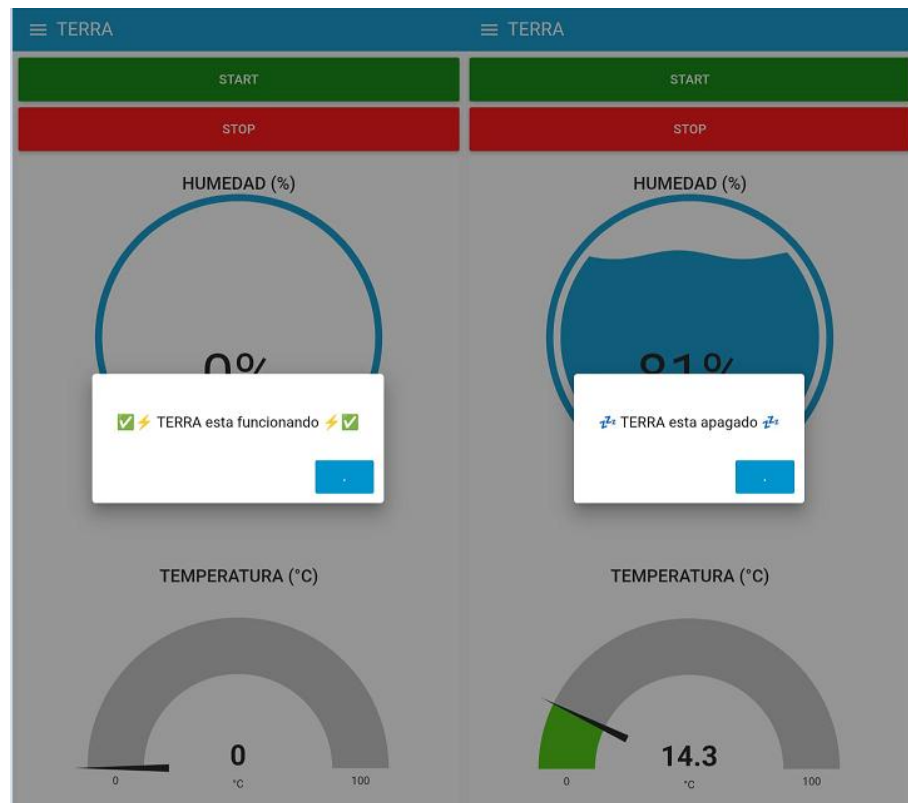
```

1  if (msg.payload === "1" || msg.payload === 1) {
2      node.status({ fill: "green", shape: "dot", text: "ESP32 conectado" })
3
4      // Enviar mensaje al siguiente nodo
5      node.send({ payload: "✅⚡ TERRA esta funcionando ⚡✅" });
6
7      // Luego de 2 segundos, enviar mensaje de limpieza
8      setTimeout(() => {
9          node.status({});
10         node.send({ payload: "" }); // o "Desactivado" si prefieres
11     }, 2000);
12
13     // No retornamos nada directamente (para evitar doble envío)
14     return null;
15 } else {
16     return null;
17 }

```

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.76 Visualización de alertas dentro de la interfaz.



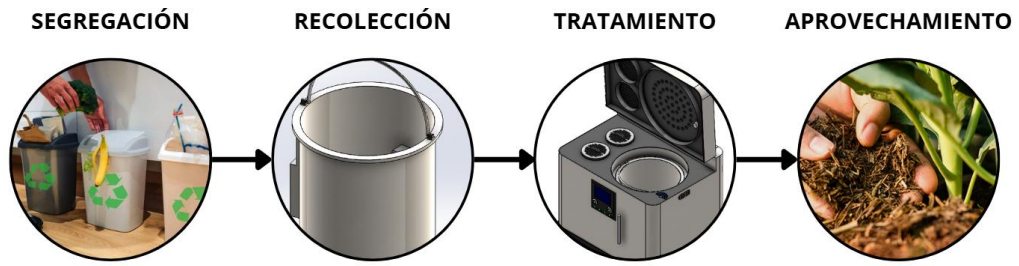
Fuente: Elaboración propia.

4.6 Diseño del sistema de gestión de residuos orgánicos domésticos

4.6.1 Introducción al sistema propuesto

El sistema propuesto no se limita únicamente al diseño de una compostadora doméstica, sino que se integra dentro de un esquema de gestión de residuos orgánicos a nivel del hogar. Este sistema busca transformar los desechos generados diariamente en un recurso aprovechable, siguiendo un proceso ordenado que abarca desde la separación en la fuente hasta la reutilización del compost como abono. El enfoque se centra en brindar autonomía a las familias de Huancayo, reduciendo la dependencia del recojo municipal de basura y fomentando un manejo sostenible de los residuos.

Figura 4.77 Etapas sobre la gestión de residuos orgánicos domésticos.



Fuente: Elaboración propia.

4.6.2 Etapas del sistema

El sistema se estructura en cuatro etapas principales:

Segregación en la fuente

Separación de los residuos orgánicos del resto de la basura en el mismo hogar. Las consideraciones para tener son:

Figura 4.78 Segregación de residuos.



Fuente: Elaboración propia.

Recolección interna

Traslado de los desechos segregados hacia la cubeta o depósito temporal antes del tratamiento.

Figura 4.79 *Recolección de residuos.*



Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento

Procesamiento en la compostadora doméstica diseñada, donde los residuos se transforman en compost mediante los procesos de trituración, mezclado y control de condiciones.

Figura 4.80 *Tratamiento de residuos.*



Fuente: Elaboración propia.

Aprovechamiento

Uso del compost obtenido en plantas ornamentales, jardines o huertos urbanos, cerrando el ciclo de aprovechamiento en el mismo domicilio.

Figura 4.81 *Uso de compost.*



Fuente: Elaboración propia.

4.6.3 Comparación con el manejo tradicional

En la ciudad de Huancayo, la gestión de residuos orgánicos se enmarca en un modelo lineal, donde los desechos generados en los hogares son depositados en bolsas plásticas, trasladados por los camiones recolectores y finalmente dispuestos en rellenos sanitarios o botaderos. Este esquema genera altos costos de operación, dependencia total del servicio municipal y un fuerte impacto ambiental por la emisión de gases de efecto invernadero y la generación de lixiviados.

En contraste, el sistema doméstico propuesto se basa en un modelo circular de valorización, en el que los residuos orgánicos son transformados dentro del mismo hogar mediante un proceso de segregación, trituración, compostaje y maduración. De este modo, se obtiene un producto útil para la fertilización y mejora de suelos, reduciendo la huella ambiental y otorgando mayor autonomía a las familias. La siguiente tabla muestra una comparación de ambos enfoques:

Tabla 4.13 *Comparativa de sistemas.*

Variable	Manejo tradicional (municipal)	Sistema doméstico propuesto
Costos	Pago de arbitrios y transporte municipal.	Inversión inicial; costos mínimos de operación.
Impacto ambiental	Alta emisión de gases y lixiviados.	Reducción significativa de emisiones y lixiviados.
Aprovechamiento	Nulo, los residuos terminan en relleno.	Compost de valor agronómico para el hogar.
Autonomía del hogar	Baja, dependencia del servicio de recojo.	Alta, manejo directo y autosuficiente.
Tiempo de disposición	Semanas hasta su disposición final.	Días, dentro del domicilio.

Fuente: Elaboración propia.

Para facilitar la representación gráfica, las variables cualitativas de la tabla se transformaron en una escala ordinal de 0 a 4, donde 0 representa un desempeño nulo y 4 un desempeño muy alto.

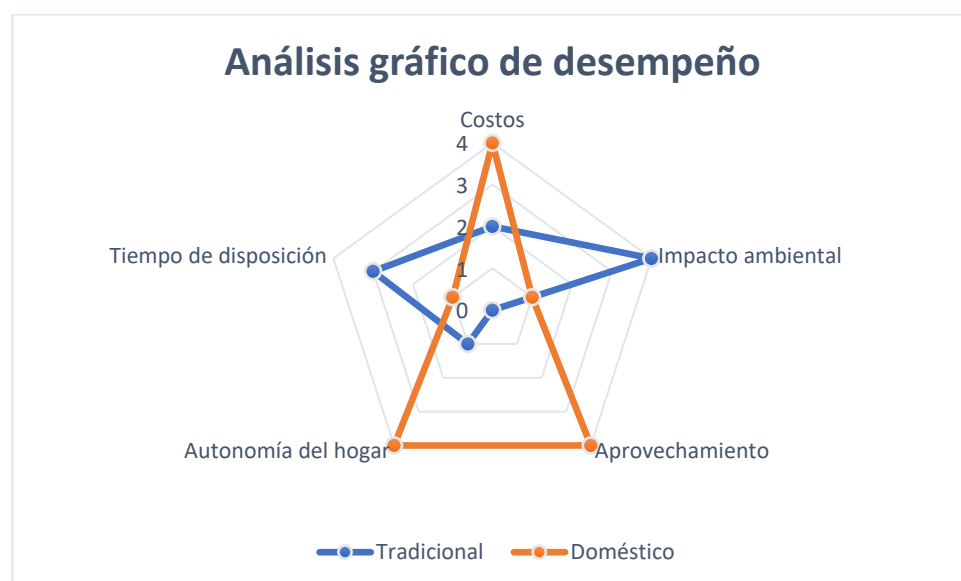
| 0 = Nulo | 1 = Bajo | 2 = Medio | 3 = Alto | 4 = Muy alto |

Tabla 4.14 *Resultados de desempeño.*

Variable	Tradicional	Doméstico
Costos	2	4
Impacto ambiental	4	1
Aprovechamiento	0	4
Autonomía del hogar	1	4
Tiempo de disposición	3	1

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.82 *Análisis gráfico de desempeño.*



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO V

5 Resultados

5.1 Presentación de los resultados

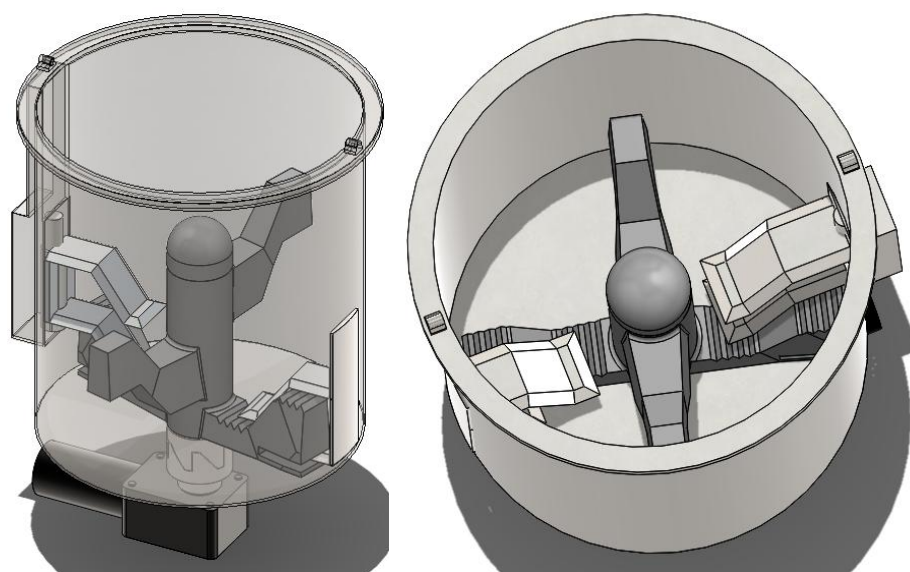
En esta sección se explicarán los resultados logrados en base con los objetivos específicos planteados para este proyecto de investigación.

Respecto al objetivo número uno, se elaboró un mecanismo capaz de realizar la trituración uniforme y la mezcla funcional de los residuos orgánicos durante el proceso de compostaje, con el propósito de favorecer su descomposición. Los principales resultados alcanzados en el sistema de trituración son los siguientes:

El proceso se desarrolla en el interior de una cámara de compostaje removible con capacidad de 5,1 L, fabricada en acero inoxidable AISI 304, seleccionado por sus propiedades de resistencia mecánica y a la corrosión. En su interior se dispone un eje central conectado a un acople helicoidal removible, lo que permite retirar la cubeta con fines de limpieza y extracción del compost generado.

El sistema de trituración se complementa con cuchillas de acero inoxidable AISI 420, distribuidas a 180° entre sí y dispuestas en diferentes niveles para garantizar un corte uniforme de la materia orgánica. Estas cuchillas actúan conjuntamente con unas paletas giratorias, acopladas al mismo eje central, cuya función es conducir y posicionar el material hacia las zonas de corte, asegurando una reducción homogénea del tamaño de partícula y, en consecuencia, una mejora en la eficiencia del proceso de compostaje.

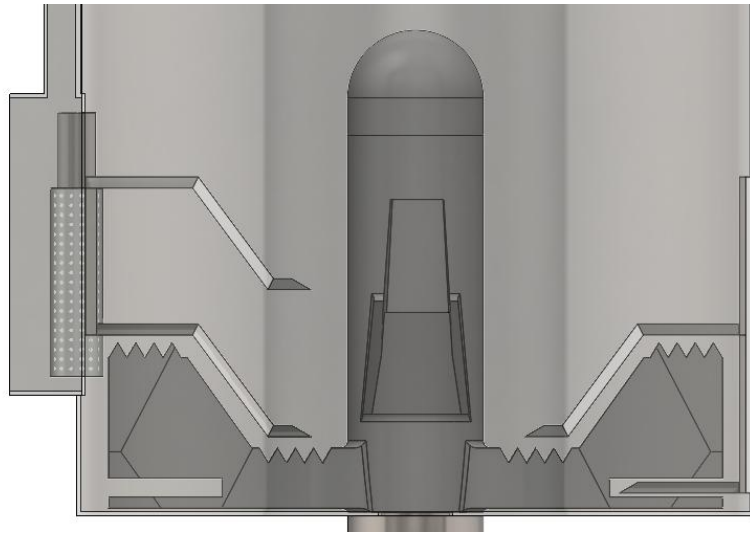
Figura 5.1 *Ensamblaje de sistema de trituración.*



Fuente: Elaboración propia.

La disposición de las cuchillas y las paletas se muestra en la **Figura 5.2**, donde puede apreciarse la separación entre ambos elementos, ubicados en niveles diferenciados dentro de la cámara de compostaje. Este diseño considera que, a medida que el material es triturado desde la parte inferior, su volumen se reduce progresivamente, por lo que no resulta necesario que el mecanismo cubra la totalidad del cilindro.

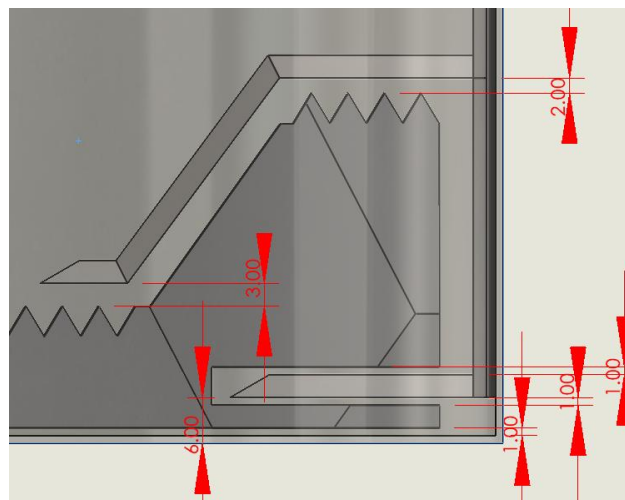
Figura 5.2 Vista frontal de cubeta.



Fuente: Elaboración propia.

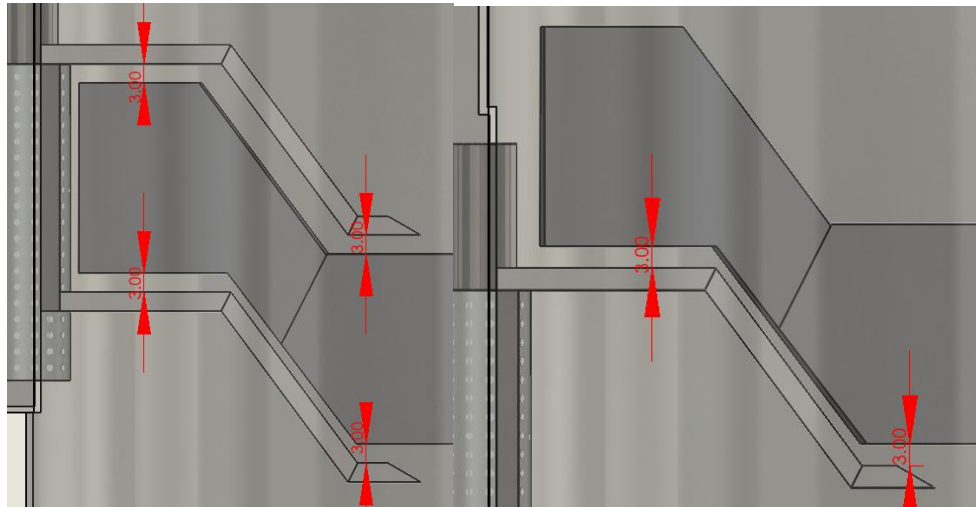
Considerando que no logren atrapar las paletas y las cuchillas se puede afirmar que el material quedara en una dimensión no mayor a 5 mm, que es el vacío que existe en el nivel inferior de la cuchilla y la base de la cámara de compostaje, lo que garantiza que el tamaño obtenido este dentro del rango esperado de 2 a 10mm, dado que ningún residuo puede pasar entre ellas sin ser fragmentado. Véase en la Figura 5.3 y 5.4.

Figura 5.3 Limite de corte de paleta inferior.



Fuente: Elaboración propia.

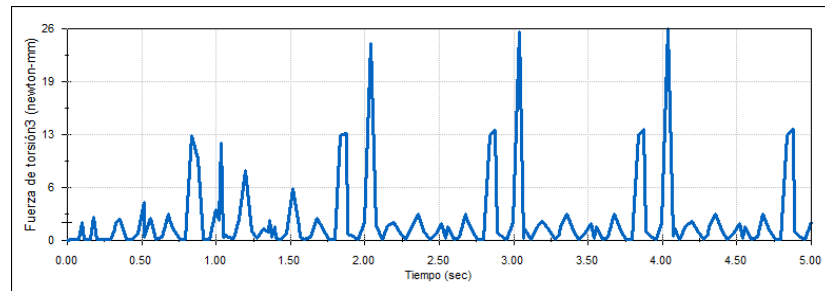
Figura 5.4 *Limite de corte de paleta media y superior.*



Fuente: Elaboración propia.

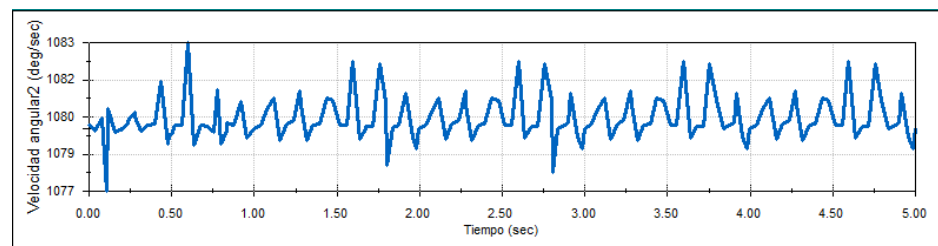
En condiciones de operación sin carga, se determinó que a una velocidad de 180 RPM el sistema requiere un torque aproximado de 0,026 Nm, tal como se muestra en las Figuras 5.5 y 5.6. Este valor corresponde al requerimiento mínimo necesario para vencer la inercia rotacional del conjunto de paletas, lo que permite el inicio del movimiento en ausencia de material a triturar.

Figura 5.5 *Relación entre la fuerza y el tiempo en condición de vacío.*



Fuente: Elaboración propia.

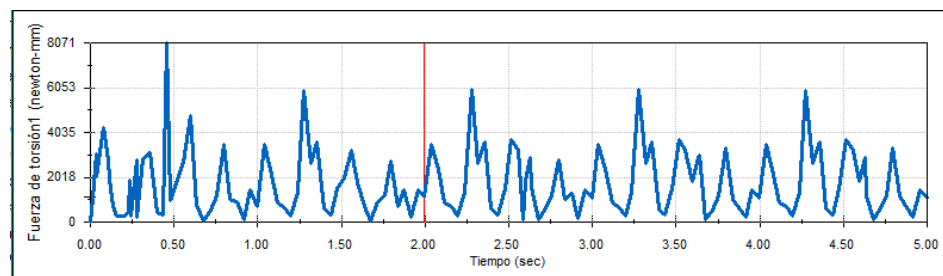
Figura 5.6 *Relación entre la velocidad y el tiempo en condición de vacío.*



Fuente: Elaboración propia.

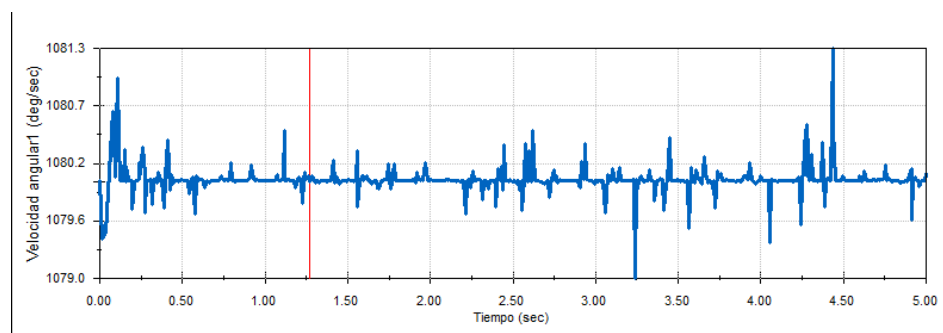
Con residuos simulados en la cámara a una velocidad de 180RPM, el sistema alcanzo un torque de un promedio máximo de 8 Nm que está cerca de los cálculos teóricos. El diagrama de torque vs tiempo se muestra en las Figuras 5.7 y 5.8, afirmando que el diseño satisface los requerimientos mecánicos previstos para el corte.

Figura 5.7 Relación entre la fuerza y el tiempo con condición de carga.



Fuente: Elaboración propia.

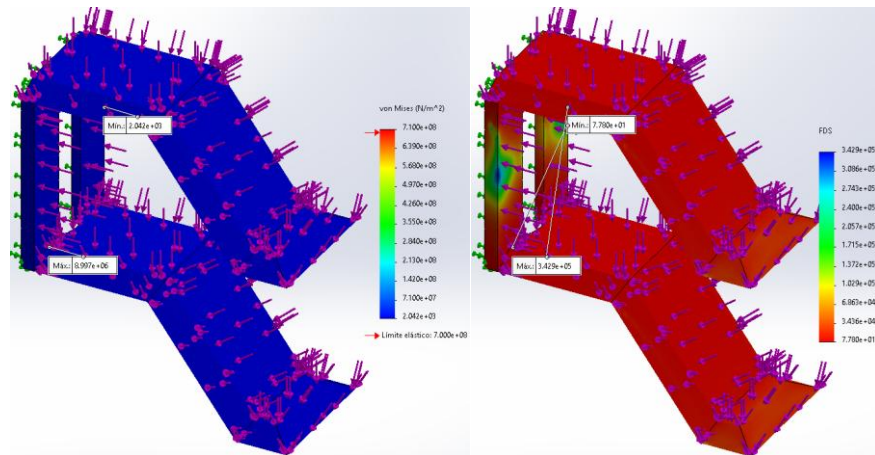
Figura 5.8 Relación entre la velocidad y el tiempo con condición de carga.



Fuente: Elaboración propia.

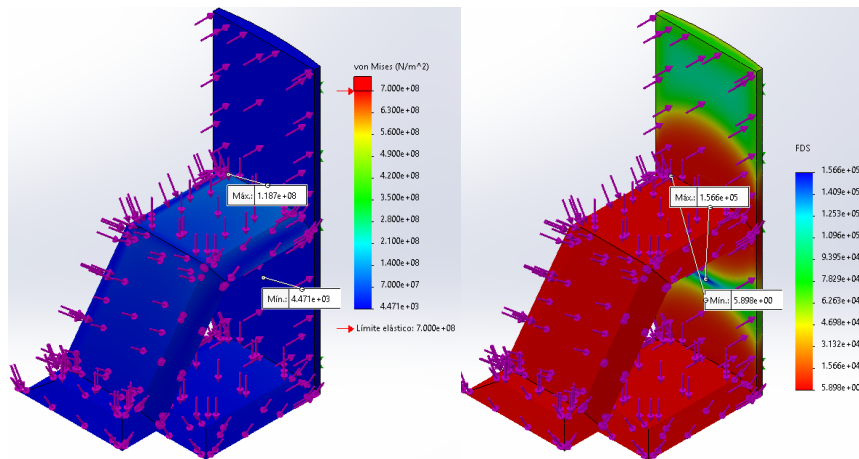
En el estudio estático, considerando una fuerza de presión de 12,56 N equivalente al peso del contenido y fuerzas aplicadas en los filos de 11,95 N, las cuchillas registraron un esfuerzo máximo de 124 MPa. Este valor se encuentra por debajo del límite elástico del acero inoxidable AISI 420 templado (700 MPa), lo que demuestra que el material trabaja dentro de un rango seguro de operación. El factor de seguridad mínimo obtenido fue de 5,6, confirmando la viabilidad estructural del sistema y garantizando su resistencia frente a las condiciones de trabajo previstas.

Figura 5.9 *Análisis estático de cuchilla principal.*



Fuente: Elaboración propia.

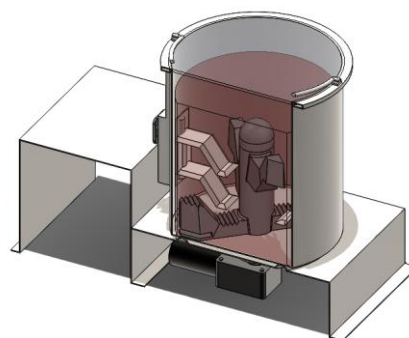
Figura 5.10 *Análisis estático de cuchilla secundaria.*



Fuente: Elaboración propia.

En la dinámica del funcionamiento de sistema se obtuvo de un análisis de comportamiento de flujo dentro de la cámara considerando un volumen real de aproximadamente 3.4 L, la cámara interna se observa en la Figura 5.11.

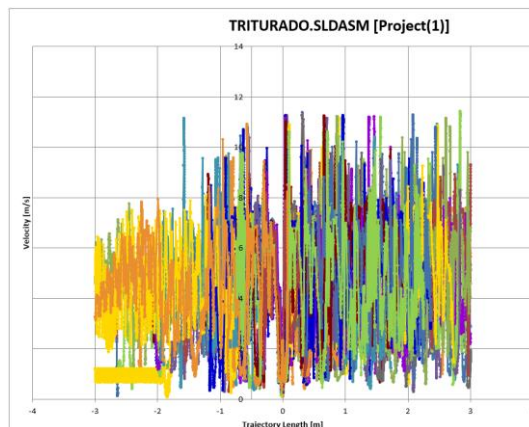
Figura 5.11 *Dinámica de funcionamiento.*



Fuente: Elaboración propia.

La rotación ocasionada en el fluido a 180RPM genera un comportamiento turbulento que lleva la materia desde la parte inferior hacia la superior, circulando a través de las cuchillas y de las paletas, como se retrata en la Figura 5.12.

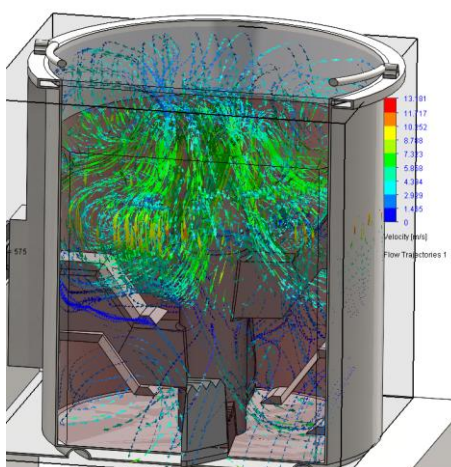
Figura 5.12 *Velocidades en la fase de trituración.*



Fuente: Elaboración propia.

La velocidad generada produce que los residuos orgánicos recirculen a lo alto de toda la cubeta. Este movimiento genera una velocidad promedio de 3.78 m/s, como se retrata en la Figura 5.13.

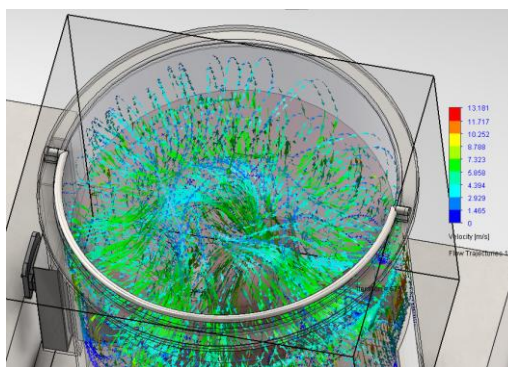
Figura 5.13 *Comportamiento de fluido en funcionamiento.*



Fuente: Elaboración propia.

Las velocidades máximas alcanzadas ocurren en las zonas inferiores y superiores, con un valor de 11.4 m/s, además de que el comportamiento muestra que a pesar de que la materia se desplaza de abajo hacia arriba ocurre una recirculación, lo que se muestra en la Figura 5.14.

Figura 5.14 *Comportamiento en la zona superior de trituración.*

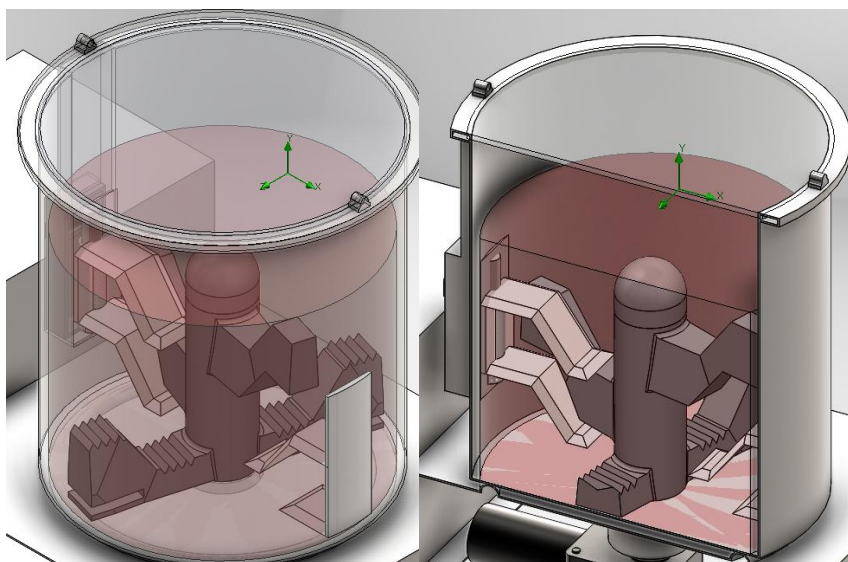


Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del sistema de mezclado son:

Esta parte del diseño viene a involucrar los mismos componentes que el sistema de trituración salvo que los agentes que interactúan en importancia son las paletas removedoras diseñadas de manera escalonada, movidas por un eje rotacional en el centro, impulsado por el mismo motor que el de triturado, salvo que la velocidad de mezclado será establecido en 90 RPM, puesto que el mezclado sucede después de la trituración de manera intermitente, por lo que no necesita de una velocidad alta para remover los residuos.

Figura 5.15 *Sistema de mezclado*

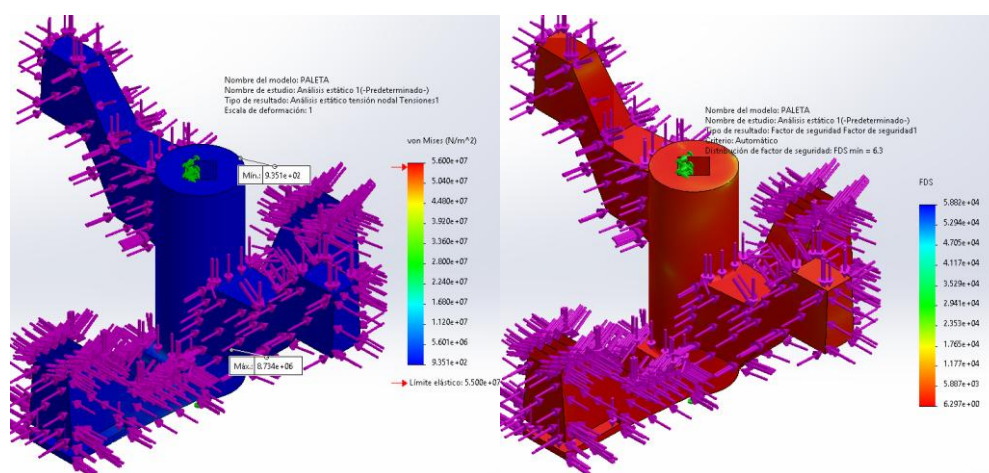


Fuente: Elaboración propia.

El sistema de mezclado está conformado por paletas escalonadas, diseñadas de manera que no interfieran con las cuchillas de trituración, pero que permitan arrastrar y desplazar la materia orgánica a lo largo de la cubeta. Estas paletas se encuentran distribuidas en tres niveles, cubriendo prácticamente todo el diámetro del recipiente, y son accionadas

desde el eje central con una velocidad angular de 9.4 rad/s. Para su fabricación se empleó polipropileno, material con buena resistencia térmica y un límite elástico de 55 MPa, garantizando la seguridad estructural con un factor de seguridad de 6.3. La configuración se aprecia en la Figura 5.16.

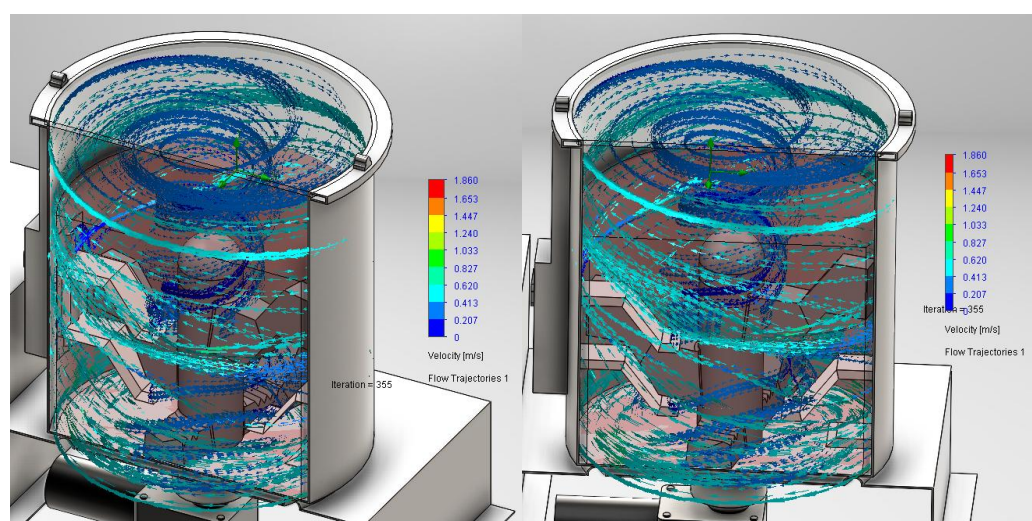
Figura 5.16 *Análisis estático de paletas.*



Fuente: Elaboración propia.

Para considerar el movimiento rotacional generado por las paletas frente a la materia dentro de la cámara, se utilizó la herramienta de SolidWorks Flow Simulation, que permite apreciar el comportamiento de la materia interna relacionada con el volumen y su velocidad de rotación. Asumiendo el volumen inicial de mezclado, se trabaja con 3.4 L y el comportamiento obtenido se observa en la Figura 5.17.

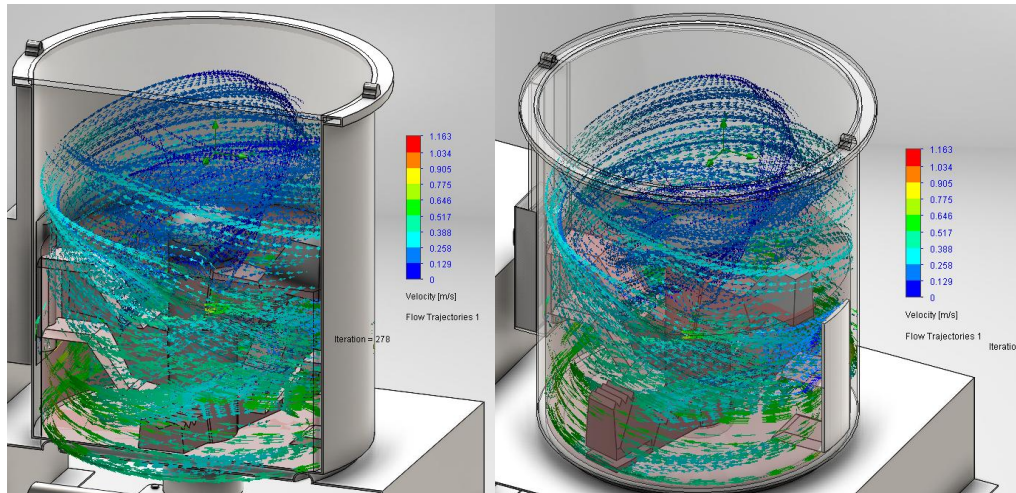
Figura 5.17 *Movimiento de mezclado con volumen inicial.*



Fuente: Elaboración propia.

Se considera que el volumen inicial no será igual al volumen final, por lo que la densidad aparente de la materia ira aumentando en relación con la reducción del volumen al igual que el comportamiento ira variando. En la figura 5.18 se muestra el comportamiento del sistema con 2.6 L.

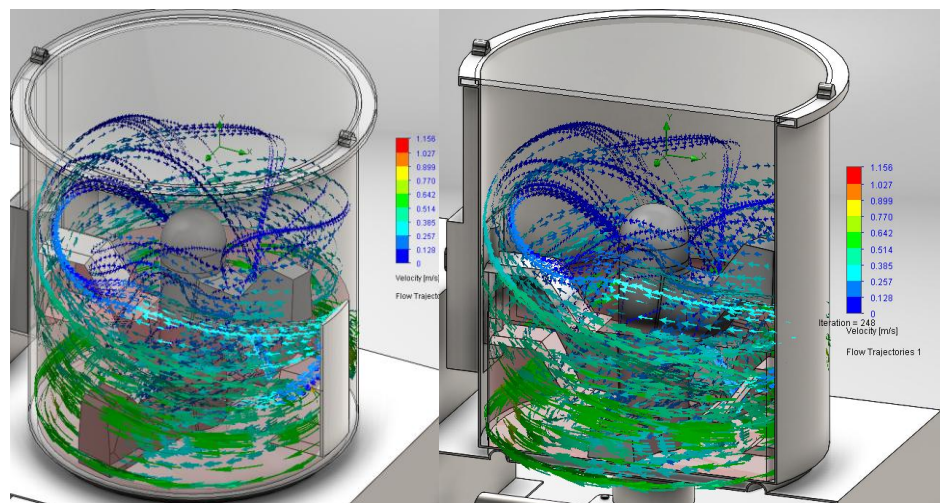
Figura 5.18 Comportamiento del mezclado con un volumen de 2.6 L



Fuente: Elaboración propia.

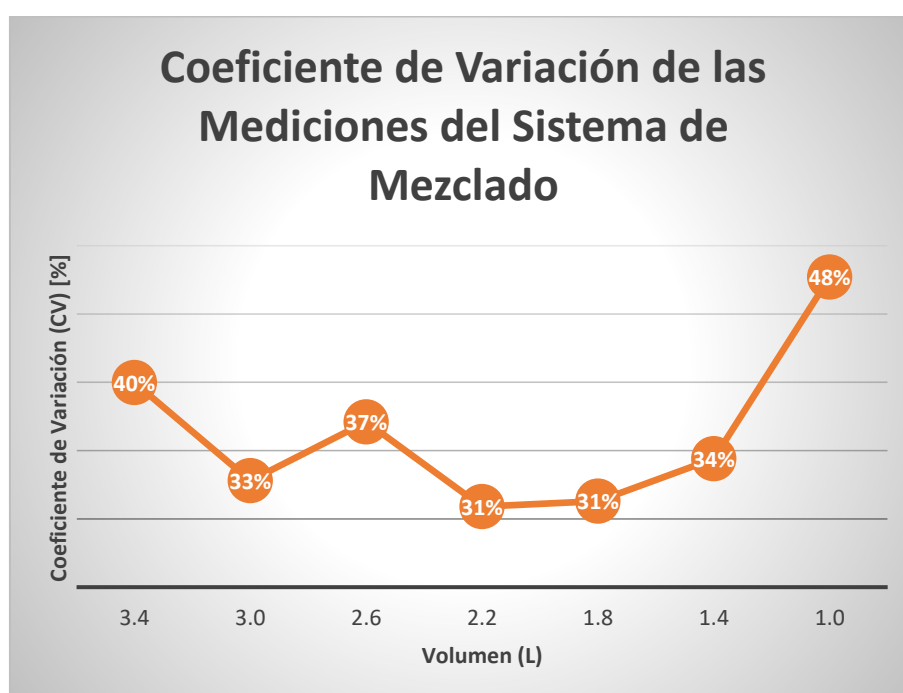
Se evaluó el desempeño del sistema con una reducción del volumen equivalente al 47,1%, debido a que existe una compactación de los residuos orgánicos tras la trituración de estos, por lo que se observa una reducción volumétrica. Como se aprecia en la Figura 5.19, este comportamiento es un indicador importante que permite evaluar la variabilidad del sistema, relacionando los parámetros obtenidos del Flow Simulation de SolidWorks.

Figura 5.19 Simulación del mezclado con un volumen de 1.8 L



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.20 Coeficiente de varianza en el sistema de mezclado



Fuente: Elaboración propia.

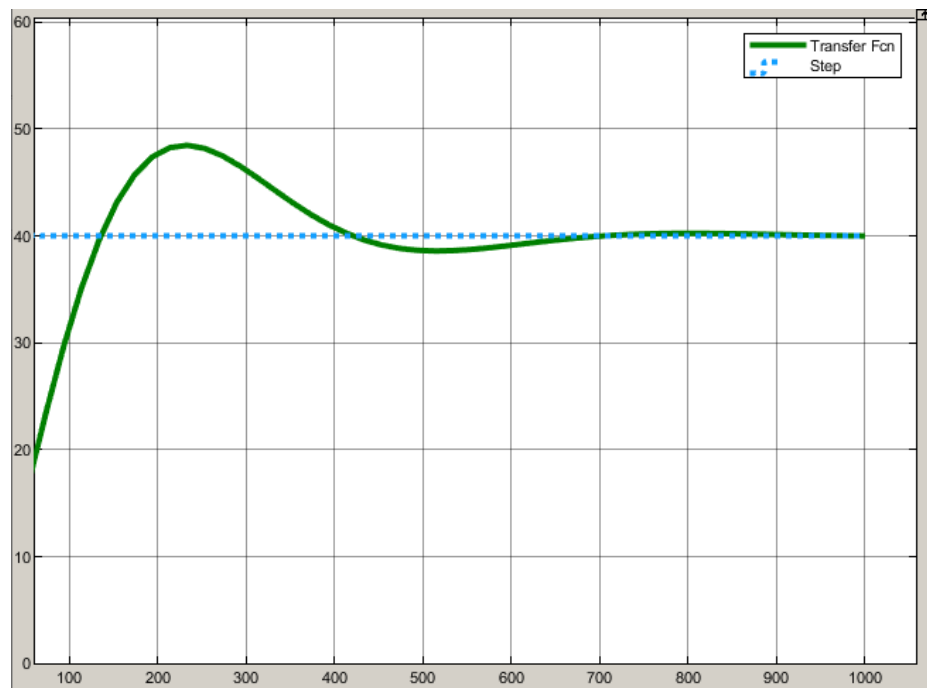
Se aprecia una tendencia decreciente del coeficiente de variación hasta alcanzar un volumen de 1,8 L, momento a partir del cual el sistema muestra un desempeño menos eficiente.

Según el objetivo número dos, se ha diseñado un sistema de control automático que se encarga de regular las condiciones internas del proceso de compostaje; la temperatura entre 50°C y 65°C, humedad relativa entre 45% y 60% y oxigenación superior al 10% y así generado un entorno óptimo para el desarrollo de la actividad microbiana y aceleración del proceso.

Resultados del sistema de control de temperatura, humedad y aireación:

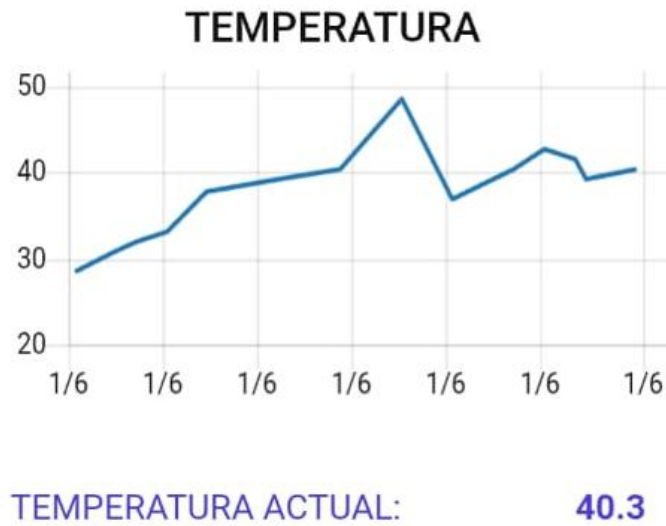
Para la temperatura se realizó el control por PID para mantener la temperatura dentro del margen requerido, entregando una temperatura de 40°C en la etapa de mesófila y una temperatura de 60°C en la etapa de termófila.

Figura 5.21 Control PID temperatura en la etapa mesofílica.



Fuente: Elaboración propia.

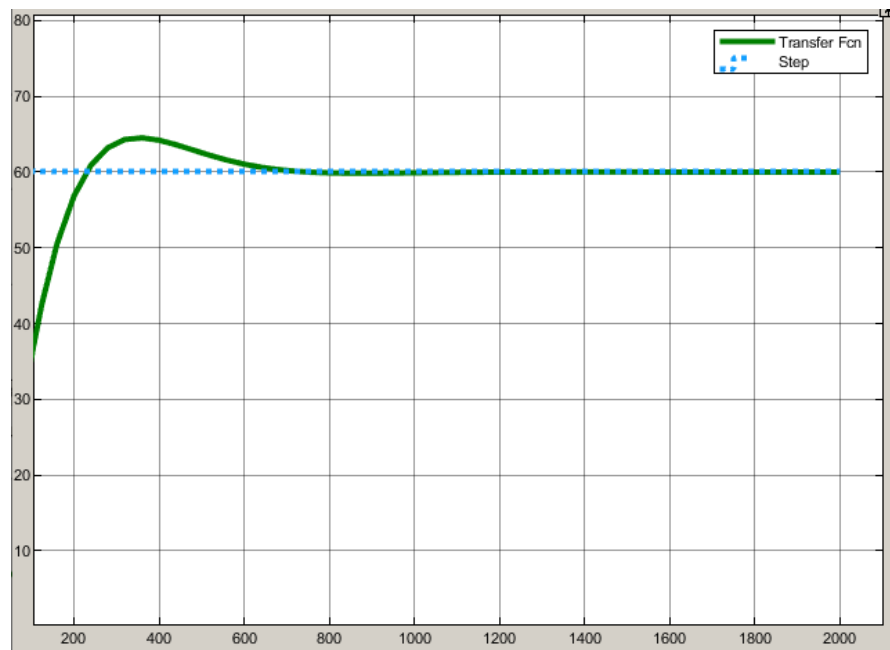
Figura 5.22 Simulación de la temperatura en el sistema en la etapa mesofílica.



Fuente: Elaboración propia.

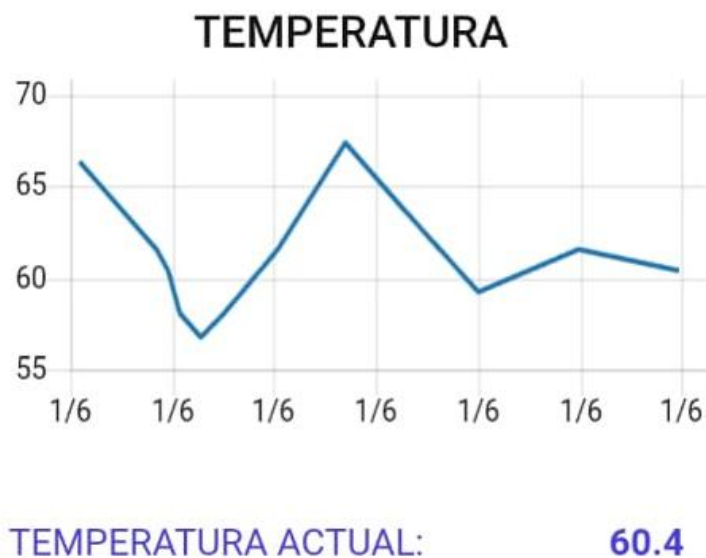
Teniendo en consideración la temperatura ambiental de Huancayo es de 20°C en promedio, entonces partimos desde esa temperatura y para poder pasar a la temperatura de 65°C se partirá desde la temperatura de 40°C como se observa en la figura 5.22.

Figura 5.23 Control PID temperatura en la etapa termofílica.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.24 Simulación de la temperatura en el sistema en la etapa termofílica.

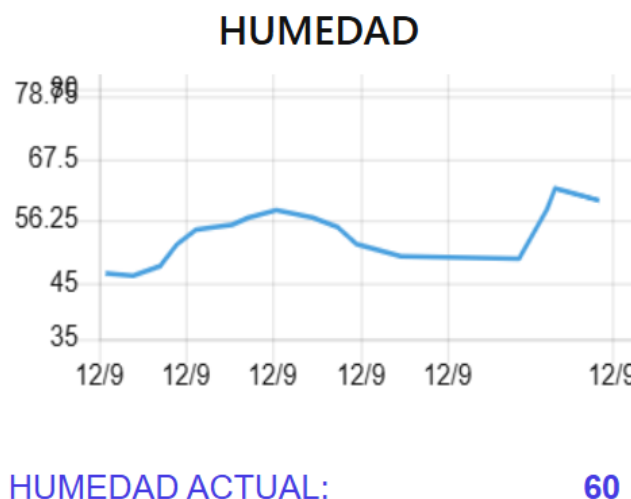


Fuente: Elaboración propia.

Dentro del control de la humedad, se determinó que no es necesario implementar un control PID y en su lugar un control ON OFF. Teniendo en cuenta que los residuos orgánicos presentan inicialmente un alto contenido de humedad, el cual disminuye progresivamente a medida que avanza el proceso debido al incremento de la temperatura y a la acción de la aireación. Sin embargo, es compensado mediante la activación del atomizador el cual aumenta el nivel de humedad, lo que mantiene los valores entre 45%-60% que es rango óptimo para el compostaje como se fundamenta en las bases teóricas

dentro del segundo capítulo. Cabe destacar que la humedad está directamente relacionada con la temperatura y la oxigenación, por lo que además de ser un parámetro regulado, se convierte en un indicador confiable para determinar la etapa del compostaje en la que se encuentra el proceso.

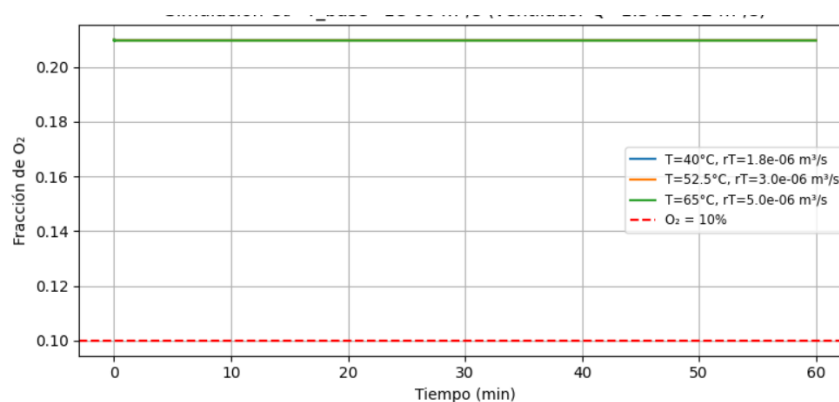
Figura 5.25 Simulación de la humedad en el sistema.



Fuente: Elaboración propia.

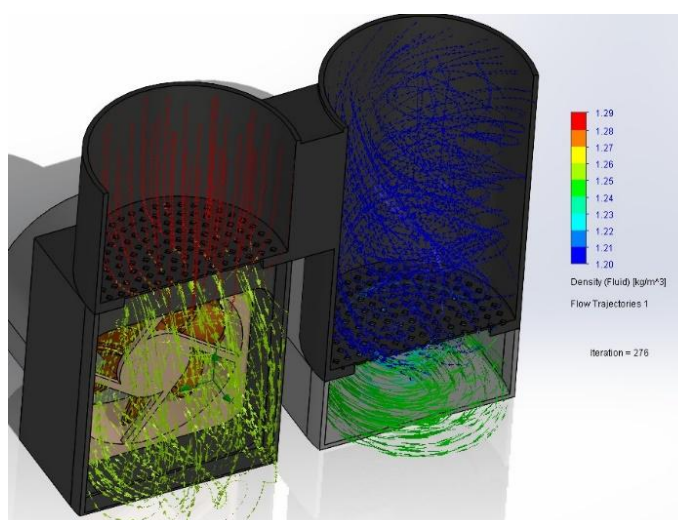
Finalmente, la oxigenación del sistema fue analizada mediante una simulación considerando un volumen de 5,1 L en la cámara de compostaje, con aire ambiente de concentración inicial de 21 % de oxígeno a condiciones normales. Los resultados muestran que, a medida que avanza el proceso, se produce un consumo progresivo de oxígeno debido a la actividad microbiana. Con el caudal de aire aportado por el ventilador, de 55,5 m³/h, se logró mantener la concentración interna por encima del 10 % teniendo en cuenta las temperaturas en cada etapa de compostaje, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5.26 Nivel de oxígeno.



Finalmente, la oxigenación del sistema está garantizada mediante un ventilador que opera en intervalos de tiempo, permitiendo la entrada y renovación del aire en el cilindro de mezclado. De esta manera, el aire que ingresa circula a través de un filtro de carbón activado antes de ser expulsado al exterior, reduciendo posibles emisiones contaminantes. Este mecanismo asegura una atmósfera controlada dentro del compostador, manteniendo los niveles adecuados de oxígeno para la biodegradación y contribuyendo al adecuado tratamiento de los gases generados.

Figura 5.27 Sistema de oxigenación.



Fuente: Elaboración propia.

Según el objetivo número tres, se ha diseñado e implementado un sistema de monitoreo y seguimiento en tiempo real mediante el sistema IoT con un margen de error de $\pm 0.3\%$, permitiendo al usuario poder observar el estado del proceso de compostaje sin la necesidad de intervención directa y desde cualquier ubicación conectada a internet.

Figura 5.28 Menú de opciones en la interfaz IoT.

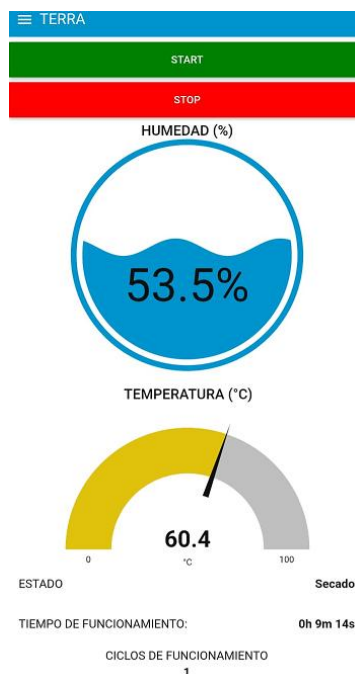


Fuente: Elaboración propia.

La interfaz de monitoreo IoT es sencillo e intuitivo donde esta dividido en tres apartados en los cuales se podrá acceder deslizando o también en el menú de opciones como se observa

en la figura 5.28. Donde la opción denominada TERRA muestra los valores de temperatura y humedad en tiempo real, juntamente con la cantidad de ciclos, tiempo de uso, estado del proceso y botones de encendido y apagado remoto.

Figura 5.29 Interfaz dentro de opción “TERRA”.



Fuente: Elaboración propia.

En la opción de REPORTE se visualiza las gráficas del comportamiento de la temperatura y humedad en todo el proceso. Finalmente, la opción SOBRE EL PRODUCTO nos redirigirá al manual de usuario que se ve en la figura 5.28.

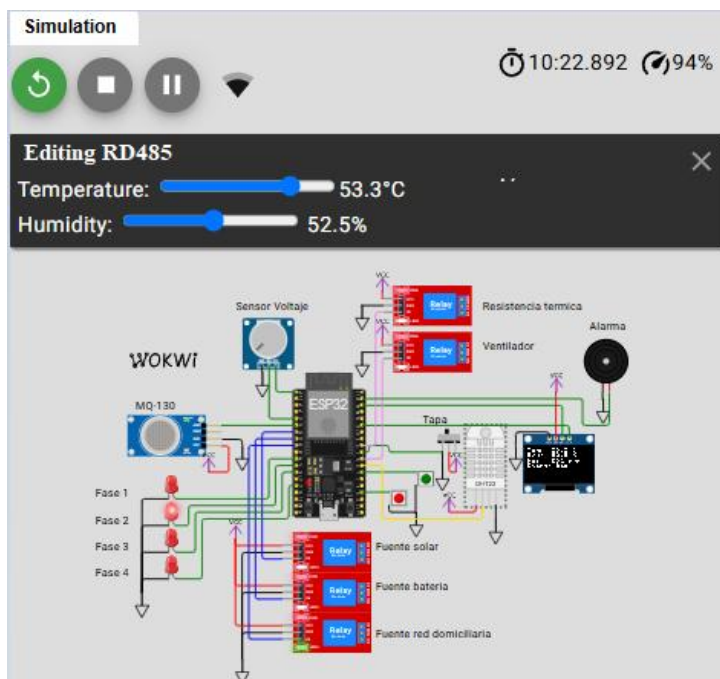
Figura 5.30 Interfaz dentro de opción “REPORTE”.



Fuente: Elaboración propia.

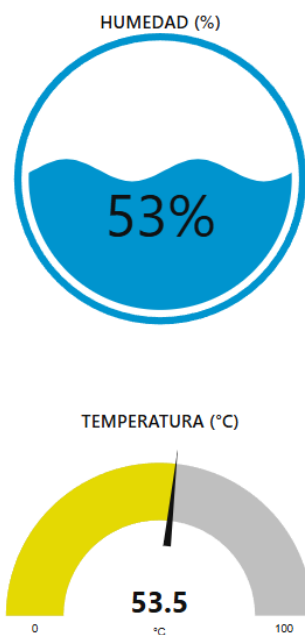
Desde el sistema se envía un valor de temperatura y humedad de 53.3°C y 52.5% relativamente como se ve en la figura 5.29. Que en el sistema IoT se visualiza un valor de 53.5°C y 53% como se visualiza en la figura 5.30. Teniendo error de $\pm 0.3\%$ frente a valores obtenidos dentro del proceso.

Figura 5.31 *Valores de Temperatura y humedad en el proceso.*



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.32 *Valores de Temperatura y humedad en IoT.*



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se realizó una tabla donde se recopila datos de temperatura y humedad durante un ciclo de trabajo dando como resultado un máximo de variación de margen de error hasta un 3%. Como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 5.1 *Valores reales de humedad y valores mostrados en el sistema IoT*

N.º de Prueba	Humedad sensor	Humedad IoT	Error (%)
1	45	46.3	2.90%
2	50	48.7	-2.60%
3	55	56.5	2.70%
4	60	61.8	3.00%
5	65	63.4	-2.50%
6	70	68.6	-2.00%
7	62	60.3	-2.70%
8	58	59.4	2.40%
9	53	54.2	2.30%
10	48	47.2	-1.70%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2 *Valores reales de temperatura y valores mostrados en el sistema IoT*

N.º de Prueba	Temperatura sensor	Temperatura IoT	Error (%)
1	28	28.6	2.10%
2	30	29.3	-2.30%
3	32	32.9	2.80%
4	35	34.2	-2.30%
5	38	39.1	2.90%
6	42	41	-2.40%
7	46	45.4	-1.30%
8	50	51.3	2.60%
9	55	53.6	-2.50%
10	60	58.5	-2.50%

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En relación con los resultados obtenidos tras desarrollar el presente trabajo de investigación, siguiendo los lineamientos establecidos por las metodologías adoptadas y respondiendo a los objetivos específicos que se plantearon en los anteriores capítulos.

Primero, se validaron las características de diseño mediante simulaciones realizadas en los distintos módulos del software SolidWorks, en conjunto con el desarrollo de la memoria matemática correspondiente. Estas simulaciones demostraron que la geometría del sistema de trituración permite obtener partículas con tamaños inferiores a 10 mm, cumpliendo con los requisitos funcionales del diseño. Además, se verificó que el torque aplicado es suficiente para cortar residuos orgánicos bajo condiciones realistas de operación, lo cual respalda la viabilidad mecánica del mecanismo.

En cuanto al análisis estructural, los resultados demuestran que las tensiones generadas en la estructura de los mecanismos de trituración se mantienen dentro de los límites admisibles para los materiales seleccionados, lo que demuestra la estabilidad y durabilidad del sistema.

En segundo lugar, el sistema de mezclado fue evaluado mediante simulaciones dinámicas y de flujo de partículas en los módulos SolidWorks Motion y SolidWorks Flow Simulation. La primera permitió analizar la cinemática del eje rotacional, verificando la velocidad angular y la trayectoria de las paletas, mientras que la segunda permitió modelar el flujo interno de partículas representativas de los residuos orgánicos. Estos análisis confirmaron que el movimiento generado por las paletas es suficiente para redistribuir el material dentro del recipiente y mantener una circulación adecuada durante el proceso de mezclado.

Los resultados obtenidos muestran que la variabilidad de la mezcla disminuyó hasta un valor mínimo de 31 % en un volumen de 1.8 L, manteniéndose dentro del umbral planteado en la hipótesis de alcanzar una variabilidad no mayor al 35 %. Esto evidencia que el mecanismo logra una mezcla funcional, confirmando de manera directa la hipótesis y validando el objetivo de desarrollar un sistema capaz de homogenizar los residuos durante el proceso de compostaje, favoreciendo así su descomposición y optimizando la eficiencia global del dispositivo.

En síntesis, los resultados obtenidos permiten validar la hipótesis planteada y avanzar en el cumplimiento del primer objetivo, confirmando la viabilidad del diseño propuesto. El sistema de trituración logró reducir el tamaño de partícula en un rango de 2 a 10 mm, lo cual favorece el posterior proceso de mezclado. Asimismo, se evidenció que el sistema mantiene un desempeño óptimo hasta un volumen aproximado de 1.8 L, lo que señala la

necesidad de futuros ajustes para incrementar su capacidad sin afectar la eficiencia de la mezcla.

Segundo, la parte de control la incorporación de un sistema de control automático para temperatura, humedad y oxigenación aporta directamente a las condiciones dentro del margen para el desarrollo del compostaje sin necesidad de intervención manual constante. Esto permite que el proceso este estable y continuo, incluso en ausencia del usuario, lo cual es esencial para un sistema doméstico que busca ser autónomo. El control térmico entre 20°C y 40°C asegura una etapa mesofílica correcta y controlar la temperatura entre 50 °C y 65 °C asegura una etapa termófila activa para la degradación microbiana, la reducción de patógenos y la aceleración del proceso. La autorregulación de la humedad y la aireación mediante el ventilador favorece condiciones óptimas para el compostaje aeróbico. En conjunto, estos mecanismos garantizan un compost de mejor calidad, reducen los tiempos del proceso y permiten cumplir con los estándares de funcionamiento para equipos de compostaje automático en hogares.

De manera general, los resultados obtenidos confirman la validez de la hipótesis y representan un avance significativo hacia el cumplimiento del segundo objetivo, lo que confirma la viabilidad de la automatización propuesta. El sistema de control llega a estabilizar la temperatura según lo requerido en cada etapa del compostaje, a su vez también los parámetros de la humedad y oxígeno dentro del proceso manteniendo un desempeño óptimo.

Tercero, la implementación de un sistema IoT basado en comunicación MQTT, gestión mediante Node-RED y respaldo en la nube a través de Azure permite que la compostadora automática doméstica mantenga un monitoreo estable. El monitoreo en tiempo real fue simulado y comparado, el cual alcanza a dar valores con un margen de error de ± 0.3 % asegura datos confiables sobre temperatura, humedad, oxigenación, estado del proceso, nivel de batería y conteo de ciclos, lo que no solo facilita la autorregulación de la máquina sin intervención manual constante, sino que también permite anticipar acciones de mantenimiento, como el reemplazo oportuno del filtro. Además, la posibilidad de acceder a la información desde cualquier dispositivo con conexión a Internet amplía la supervisión y el control remoto, garantizando un funcionamiento continuo y autónomo adaptado a las necesidades del usuario.

En conclusión, los resultados alcanzados permiten validar la hipótesis planteada y evidencian un progreso significativo hacia el cumplimiento del tercer objetivo, lo que confirma la viabilidad del sistema de monitoreo mediante IoT. El sistema IoT implementado demostró su capacidad para asegurar un monitoreo estable y confiable con

un margen de error de ± 0.3 %, y el conteo de ciclos para mantenimiento preventivo, garantizando así un desempeño óptimo y autónomo del proceso de compostaje.

RECOMENDACIONES

Se debe de operar la cámara de compostaje exclusivamente dentro del rango de volumen para el cual fue diseñada. Las pruebas experimentales evidenciaron que, al trabajar con volúmenes inferiores a 1.8 L, la variabilidad del sistema de mezclado se ve comprometida. Por ello, si se prevé operar con cargas menores, se sugiere rediseñar el sistema de mezclado y desarrollar un dispositivo adaptado específicamente para dichos volúmenes, a fin de garantizar una respuesta adecuada del proceso.

Se propone establecer un protocolo de mantenimiento predictivo para el sistema, utilizando sensores que permitan monitorear variables como vibración, temperatura del motor y consumo energético. Estos parámetros pueden ser analizados para identificar patrones de desgaste o funcionamiento anómalo, anticipando fallas antes de que ocurran.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA). *Perspectiva mundial de la gestión de residuos 2024* [en línea]. Nairobi: ONU Medio Ambiente, 2024. [Consulta: 2 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.unep.org/es/resources/perspectiva-mundial-de-la-gestion-de-residuos-2024>
- [2] EUROSTAT. *Municipal waste down by second consecutive year* [en línea]. Luxemburgo: Eurostat, 2025. [Consulta: 2 febrero 2025]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250213-1>
- [3] EUROSTAT. *Municipal waste statistics* [en línea]. Luxemburgo: Eurostat, 2025. [Consulta: 2 febrero 2025]. Disponible en: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics
- [4] PARLAMENTO EUROPEO. *El trabajo de la UE para la gestión sostenible de residuos* [en línea]. Bruselas: Parlamento Europeo, 2024. [Consulta: 2 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180328STO00751/el-trabajo-de-la-ue-para-la-gestion-sostenible-de-residuos>
- [5] FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, CLIMATE ACTION, NATURE CONSERVATION AND NUCLEAR SAFETY. *Federal Cabinet adopts National Circular Economy Strategy* [en línea]. Berlín: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2024. [Consulta: 2 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.bundesumweltministerium.de/en/pressrelease/federal-cabinet-adopts-national-circular-economy-strategy>
- [6] UMWELTBUNDESAMT. *Bioabfälle* [en línea]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2024. [Consulta: 5 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle#sammlung-von-bioabfall>

- [7] NACIONES UNIDAS. *Una ciudad japonesa lidera el camino hacia la economía circular* [en línea]. Ginebra: Oficina de las Naciones Unidas en Ginebra, 2024. [Consulta: 5 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.ungeneva.org/es/news-media/news/2024/04/92133/una-ciudad-japonesa-lidera-el-camino-hacia-la-economia-circular>
- [8] MINISTERIO DEL AMBIENTE (MINAM). *Más de 148 500 toneladas de residuos sólidos municipales son valorizados en el país* [en línea]. Lima: Ministerio del Ambiente, 2024. [Consulta: 5 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/955458-mas-de-148-500-toneladas-de-residuos-solidos-municipales-son-valorizados-en-el-pais>
- [9] MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE HUANCAYO (MPH). *Planta de tratamiento procesa hasta 5 toneladas de compost al año* [en línea]. Huancayo: Subgerencia de Comunicaciones, 2021. [Consulta: 5 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/munihuancayo/noticias/548360-planta-de-tratamiento-procesa-hasta-5-toneladas-de-compost-al-ano>
- [10] CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley N.º32212: Ley que modifica el Decreto Legislativo 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, y la Ley 26793, Ley de creación del Fondo Nacional del Ambiente, para fortalecer la gestión y el manejo de residuos sólidos [en línea]. Lima: Congreso de la República, 2024. [Consulta: 5 febrero 2025]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-que-modifica-decreto-legislativo-1278-decreto-legislativo-que>
- [11] MONAGO TRINIDAD, Jhordy Andersson; CONDORI DELZO, Luis Fernando; AYUQUE ESPINOZA, Rafael Jhonatan. Análisis de la valorización de los residuos orgánicos municipales en el mercado de abastos: “Modelo”, ubicada en la Municipalidad Provincial de Satipo, departamento de Junín - Perú [en línea]. Tesis (Ingeniero Ambiental). Huancayo: Universidad Continental, 2024. [Consulta: 5 febrero 2025]. Disponible

en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15423/3/IV_FIN_107_TE_Monago_Condori_Ayuque_2024.pdf

- [12] QUIROZ VALENCIA, Bladimir Denis. *Optimización de planta de valorización de residuos orgánicos en Pueblo Libre, Lima* [en línea]. Trabajo de suficiencia profesional (Ingeniero Forestal). Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2021. [Consulta: 5 febrero 2025]. Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5790f6f1-dd73-48c2-b065-412891ebd698/content>
- [13] JERÍ SILVA, Enzo. Diseño de un prototipo de máquina para generar compostaje a partir de residuos orgánicos de la empresa Inversiones Dramar S.A.C. [en línea]. Tesis (Ingeniero Mecatrónico). Lima: Universidad Ricardo Palma, 2021. [Consulta: 8 febrero 2025]. Disponible en: <https://repositorio.urp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c3765b96-bfbd-45f3-9853-819772dad833/content>
- [14] ÑAHUI GALA, Luz Maria; ACOSTA ROMERO, Diana Carolina. Efecto de la descarga de lixiviado del exbotadero El Edén en el cuerpo de agua adyacente, sector Yauris, distrito de El Tambo, Provincia de Huancayo, 2021 [en línea]. Tesis (Ingeniero Ambiental). Huancayo: Universidad Continental, 2021. [Consulta: 8 febrero 2025]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11464>
- [15] ARÍZAGA GAMBOA, Raúl; FERNÁNDEZ FLORÍN, Jean Vicente; VASCONEZ SORNOZA, Sammy Lizange. *Sistema de compostaje automatizado para desechos sólidos orgánicos generados en un mercado* [en línea]. *Polo del Conocimiento*, 2023, vol. 8, n.º 8, pp. 226-244. [Consulta: 8 febrero 2025]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9152362>
- [16] SITI, Fatima Zahra; AROUCH, Moha; BERAICH, Fatima Zahra; QANADLI, Salah Dine; FIHRI FASSI, Hicham. *Design of an autonomous solar rotary composter with shredder shaft* [en línea]. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2021, vol. 56, n.º 5. [Consulta: 8 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.56.5.33>

- [17] ANDAGOYA SÁNCHEZ, Erick Emilio. *Máquinas semiautomáticas de compostaje a partir de desechos orgánicos domiciliarios* [en línea]. Quito: Universidad Internacional del Ecuador, 2023. [Consulta: 8 febrero 2025]. Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/5767>
- [18] DSOUZA, Ajwal; KISELCHUK, Connor; LAWSON, Jamie A.; PRICE, Gordon W.; DIXON, Mike; GRAHAM, Thomas. Development of an automated, multi-vessel respirometric system to evaluate decomposition of composting feedstocks [en línea]. *Biosystems Engineering*, 2022, vol. 224, pp. 283–300. [Consulta: 8 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.10.014>
- [19] CHALACA VALLEJO, Bryan Aldair. *Diseño y fabricación de una máquina mezcladora de paletas con chopper para una capacidad de mezcla de 1000 kilogramos de sal* [en línea]. Informe de práctica. Medellín: Universidad de Antioquia, 2022. [Consulta: 10 febrero 2025]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/8472e895-6a0d-4cda-81cd-b36416d28c20/content>
- [20] MINISTERIO DEL AMBIENTE (MINAM). *Indicadores de Gestión de Residuos Sólidos SIGERSOL Municipal – Año 2023* [en línea]. Lima: MINAM, 2023. [Consulta: 10 febrero 2025]. Disponible en: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojY2I4Y2YwNmEtM2U0Zi00NTM2LTllZWVhZjFINDc5MWVkbMDQwIiwidCI6IjBlMmFiZjRlLWExZjUtNDFlZi1iOWE0LWM5YWE2ZGQ1NTE4MCI9&pageName=55c508f90ed25db0b4cb>
- [21] BEDOYA-PERALES, Noelia S.; DAL' MAGRO, Glenio Piran. *Quantification of Food Losses and Waste in Peru: A Mass Flow Analysis along the Food Supply Chain* [en línea]. *Sustainability*, 2021, vol. 13, n.º 5, art. 2807. [Consulta: 10 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052807>
- [22] AGUIAR, Santiago; ENRÍQUEZ ESTRELLA, Miguel; UVIDIA CABADIANA, Hernán. *Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento* [en línea]. *Axioma*, 2022, n.º 27. [Consulta: 10 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>

- [23] REPSOL. *Residuos orgánicos: ¿Qué son y cómo tratarlos?* [en línea]. s.f. [Consulta: 10 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/residuos-organicos/index.cshtml>
- [24] HASSAN POUR, Fatemeh; MAKKAWI, Yassir Taha. *A review of post-consumption food waste management and its potentials for biofuel production* [en línea]. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 7759-7784. [Consulta: 12 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.10.119>
- [25] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *On-farm composting methods: traditional methods (anaerobic decomposition)* [en línea]. 2020. [Consulta: 12 febrero 2025]. Disponible en: <https://teca.apps.fao.org/en/technologies/4293/>
- [26] RIAGBAYIRE, F.; NAYEM, Z. Biogas: an alternative energy source for domestic and small-scale industrial use in Nigeria [en línea]. *American Journal of Innovation in Science and Engineering*, 2023, vol. 2, n. ° 1, pp. 8-16. [Consulta: 12 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.54536/ajise.v2i1.1217>
- [27] ESPEJO ORDONIO, Diego. *[COP28] El mensaje del metano: entendiendo cambios climáticos y moldeando la política global* [en línea]. Lima: INTE-PUCP, 2023. [Consulta: 12 febrero 2025]. Disponible en: <https://inte.pucp.edu.pe/noticias-y-eventos/noticias/el-mensaje-del-metano-entendiendo-cambios-climaticos-y-moldeando-la-politica-global/>
- [28] CONTRALORÍA GENERAL DE LA REPÚBLICA. *Contraloría evidencia serias deficiencias en el servicio de limpieza pública en casi 700 municipalidades del país* [en línea]. 2022. [Consulta: 12 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/contraloria/noticias/607788-contraloria-evidencia-serias-deficiencias-en-el-servicio-de-limpieza-publica-en-casi-700-municipalidades-del-pais>

- [29] MINISTERIO DEL AMBIENTE (MINAM). *Advertencia: inadecuado manejo de residuos sólidos aumenta el riesgo para potenciales criaderos del zancudo del dengue* [en línea]. 2023. [Consulta: 12 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/720150-advertencia-inadecuado-manejo-de-residuos-solidos-aumenta-el-riesgo-para-potenciales-criaderos-del-zancudo-del-dengue>
- [30] MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE HUANCAYO (MPH). *Planta de tratamiento de residuos construida al 100%* [en línea]. 2022. [Consulta: 12 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/munihuancayo/noticias/671251-planta-de-tratamiento-de-residuos-construida-al-100>
- [31] CONGRESO DE LA REPÚBLICA. *Ley N.º 31896: Ley que modifica el Decreto Legislativo 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, e introduce la industrialización del reciclaje en su desarrollo* [en línea]. Lima: Ministerio del Ambiente (MINAM), 10 octubre 2023. [Consulta: 12 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/4728521-31896>
- [32] PENG, Wei; WANG, Yue; CUI, Guangyu; XU, Qiyong; ZHANG, Hua; HE, Pinjing; LÜ, Fan. Compost quality, earthworm activities and microbial communities in biochar-augmented vermicomposting of dewatered activated sludge: the role of biochar particle size [en línea]. *Biochar*, 2024, vol. 6, art. 73. [Consulta: 12 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00365-8>
- [33] TORRES V., M.; OCHOA-ÁLVAREZ, N. A.; NIETO-GARIBAY, A.; MURILLO-AMADOR, B.; LAVASTIDA P., G.; ALFONSO, P. *Inactivación de patógenos en residuos avícolas mediante el compostaje* [en línea]. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 2023, vol. 34, n.º 4, art. e24488. [Consulta: 18 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i4.24488>
- [34] MATSAKAS, L.; SARKAR, O.; JANSSEN, S.; ROVA, U.; CHRISTAKOPOULOS, P. *A novel hybrid organosolv-steam explosion pretreatment and fractionation method delivers solids with superior*

thermophilic digestibility to methane [en línea]. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 316, art. 123973. [Consulta: 18 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123973>

- [35] CHOQUELUQUE ATAMARI, Marycarmen Rosangelica; CONDORI CONDORI, Karen Yuiliana. *Análisis de la calidad del compost aplicando microorganismos eficaces en la provincia de Puno-2023* [en línea]. Tesis (Ingeniero Ambiental). Puno: Universidad Continental, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental, 2024. [Consulta: 18 febrero 2025]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/17015/1/IV_FIN_107_TE_Choqueluque_Condori_2024.pdf
- [36] PILLCO MAMANI, Katia. *Evaluación del proceso de compostaje de residuos orgánicos, aplicando microorganismos eficaces* [en línea]. Tesis (Licenciada en Biología). Puno: Universidad Nacional del Altiplano, Escuela Profesional de Biología, 2020. [Consulta: 18 febrero 2025]. Disponible en: https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/14508/Pillco_Mamani_Katia.pdf
- [37] CASTILLO HUAMAN, Lady Cely. *Evaluación de la calidad del compost obtenido a partir de residuos orgánicos y microorganismos eficaces (EM) en el distrito de Huayucachi, Huancayo, 2019* [en línea]. Tesis (Ingeniero Ambiental). Huancayo: Universidad Continental, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental, 2020. [Consulta: 24 febrero 2025]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8245/3/IV_FIN_107_TE_Castillo_Huaman_2020.pdf
- [38] CUMPA MONTEZA, Juan Francisco. *Propuesta de diseño de una planta de compostaje para disminuir el impacto ambiental en el distrito de Chiclayo* [en línea]. Tesis (Ingeniero Industrial). Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial, 2021. [Consulta: 24 febrero 2025]. Disponible

en: https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/3753/1/TL_CumpaMontezaJuanFrancisco.pdf

- [39] HUAPAYA CRUZ, Yury Hamilton. *Evaluación del compostaje a diferentes composiciones para aprovechar los residuos orgánicos domiciliarios de la ciudad de Puno para contribuir en contrarrestar el cambio climático* [en línea]. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 2024, vol. 26, n.º 1, pp. 24-35. [Consulta: 24 febrero 2025]. Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/ria/v26n1/2313-2957-ria-26-01-24.pdf>
- [40] BARRAGAN ANDRADE, Jerson Alexander; MERINO NOGALES, Cristian Paúl. *Diseño y simulación de una volteadora de compost impulsado por un sistema oleohidráulico como parte del diseño e implementación del proyecto de producción, transformación, comercialización y promoción de consumo de la quinua y sus derivados* [en línea]. Trabajo de titulación (Ingeniero Mecánico). Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, 2021. [Consulta: 24 febrero 2025]. Disponible en: <https://dspace.espoch.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/eb6c671d-6710-4b4f-893d-858b9696e07b/content>
- [41] VÁSQUEZ CASTRO, Ernestina Rosario; MILLONES CHANAMÉ, Carlos Eduardo. *Una revisión sobre la diversidad microbiana y su rol en el compostaje aerobio* [en línea]. *Aporte Santiaguino*, 2021, vol. 14, n.º 2, pp. 253-275. [Consulta: 24 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.32911/as.2021.v14.n2.822>
- [42] MORENO SOLAZ, Héctor. *Análisis y mejora del sistema integral de gestión de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Castelló de la Plana respondiendo a demandas de sostenibilidad y circularidad* [en línea]. Tesis doctoral. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2023. [Consulta: 24 febrero 2025]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=324531>

- [43] MONK, Simon. *Programming and Electronics for Beginners: Learn to Program an ESP32* [en línea]. 1a ed. 2023. [Consulta: 24 febrero 2025]. ISBN: 978-1-7394874-5-4. Disponible en: <https://simonmonk.org/esp32>
- [44] SMART, Gary. *Practical Python Programming for IoT: Build advanced IoT projects using a Raspberry Pi 4, MQTT, RESTful APIs, WebSockets, and Python 3* [en línea]. Birmingham: Packt Publishing, 2020. [Consulta: 24 febrero 2025]. ISBN: 978-1838982461
- [45] SANDOYA MEDRANO, Willy Jose; MENA LEDESMA, Marco Emanuel. *Diseño e implementación de un prototipo de monitoreo de temperatura, humedad y presión con comunicación vía radio e internet para mejorar la producción agrícola* [en línea]. Tesis (Grado). Quito: Universidad Politécnica Salesiana, 2022. [Consulta: 24 febrero 2025]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22634>
- [46] MEFTAH, El-Hadi; BENMAHMOUD, Slimane; RABEHI, Abdelhalim. *Innovative Wireless Solutions for Real-Time ECG Monitoring: Leveraging BLE, Wi-Fi, and LoRa Technologies* [en línea]. En: *2024 International Conference on Telecommunications and Intelligent Systems (ICTIS)*. Djelfa: IEEE, 2024. [Consulta: 24 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTIS62692.2024.10894056>
- [47] CRESWELL, John W. *A Concise Introduction to Mixed Methods Research* [en línea]. 2a ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2022. [Consulta: 24 febrero 2025]. ISBN: 978-1-5443-5575-7. Disponible en: https://perpustakaan.poltekkes-malang.ac.id/assets/file/ebook/A_Concise_Introduction_to_Mixed_Methods_Research.pdf
- [48] MENDOZA SOTO, Anthony Brayan; PEREZ GUEVARA, Miguel Eduardo. *Propuesta de un sistema de riego automatizado por microaspersión para las áreas verdes de la Universidad Nacional de Jaén* [en línea]. Tesis (Ingeniero Mecánico Electricista). Jaén: Universidad Nacional de Jaén, Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2024. [Consulta: 24 febrero 2025]. Disponible

en: https://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/777/5/T_Mendoza%20So%20to%20y%20Perez%20Guevara_IME_2024.pdf

- [49] HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; MENDOZA TORRES, Christian Paulina. *Metodología de la Investigación. Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta* [en línea]. 2a ed. Ciudad de México: McGraw Hill, 2023. [Consulta: 24 febrero 2025]. ISBN: 978-607-15-2031-9.
- [50] SERANI, A.; SCHOLCZ, T.P.; VANZI, V. *A Scoping Review on Simulation-Based Design Optimization in Marine Engineering: Trends, Best Practices, and Gaps* [en línea]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2024, vol. 31, pp. 4709-4737. [Consulta: 24 febrero 2025]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10127-1>
- [51] CHAVEZ CORREA, Kentner Aufder. *Diseño de un algoritmo de un sistema de control de sustratos mediante lógica de control difusa para incrementar la productividad en el proceso de producción de biogás* [en línea]. Tesis (Ingeniero Mecatrónico). Lima: Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Mecatrónica, 2023. [Consulta: 24 febrero 2025]. Disponible en: https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/7149/K.C_havez_Tesis_Titulo_Profesional_2023.pdf
- [52] ULRICH, Karl T.; EPPINGER, Steven D.; YANG, Maria C. *Product Design and Development* [en línea]. 7a ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020. [Consulta: 24 febrero 2025]. ISBN: 978-1-260-04365-5.

ANEXOS

Anexo A: Glosario de términos

Término	Definición
Aislamiento térmico	Material o técnica que reduce la transferencia de calor entre sistemas de distinta temperatura.
Análisis de elementos finitos	Método numérico que divide un modelo en elementos pequeños para analizar esfuerzos, deformaciones y fenómenos físicos.
Área transversal	Superficie de una sección perpendicular a un elemento estructural, sobre la que actúan esfuerzos.
Balance energético	Relación entre la energía que entra, se transforma y sale de un sistema, evaluando pérdidas y ganancias.
Biodegradabilidad	Propiedad de un material para descomponerse en compuestos más simples por acción biológica.
Carga crítica de pandeo	Esfuerzo axial que provoca inestabilidad lateral en columnas esbeltas.
Coeficiente de fricción	Relación entre la fuerza de fricción y la fuerza normal entre dos superficies en contacto.
Coeficiente de Poisson	Relación entre deformación transversal y longitudinal en un material sometido a carga.
Coeficiente de seguridad	Factor que asegura que una estructura soporte cargas mayores a las previstas.
Compresibilidad	Capacidad de un fluido para reducir su volumen bajo presión.
Conducción térmica	Transferencia de calor a través de un material sólido por gradiente de temperatura.
Convección térmica	Transferencia de calor debida al movimiento de un fluido.
Corrosión	Degradación de un material, generalmente metálico, por reacciones químicas o electroquímicas.
Ductilidad	Capacidad de un material de deformarse plásticamente sin romperse.
Elasticidad	Propiedad de un material de recuperar su forma original tras retirar la carga.
Esfuerzo	Fuerza interna por unidad de área en un material.
Esfuerzo cortante	Esfuerzo interno paralelo a la sección de un material.
Esfuerzo flexor	Esfuerzo debido a un momento flector que produce flexión.
Esfuerzo normal	Esfuerzo que actúa perpendicularmente a una sección transversal.
Fatiga de materiales	Debilitamiento por cargas cíclicas repetidas en el tiempo.
Fragilidad	Propiedad de los materiales que se rompen con escasa deformación plástica.
Fuerza cortante	Fuerza interna que actúa paralela a la sección de un material.

Límite elástico	Máximo esfuerzo que un material soporta sin deformación permanente.
Módulo de elasticidad	Relación entre esfuerzo y deformación en la zona elástica.
Momento flector	Esfuerzo interno que genera flexión en una viga o elemento estructural.
Momento de inercia	Magnitud que mide la resistencia de una sección a la flexión o torsión.
Plastificación	Estado en que un material comienza a deformarse permanentemente.
Potencia mecánica	Trabajo realizado por unidad de tiempo.
Radiación térmica	Transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas, sin necesidad de contacto directo.
Resonancia mecánica	Incremento de vibración cuando la frecuencia de excitación coincide con la natural del sistema.
Rendimiento solar	Relación entre la energía solar captada por un panel fotovoltaico y la energía eléctrica realmente entregada.
Tenacidad	Capacidad de un material para absorber energía antes de fracturarse.
Torque	Momento de fuerza que produce rotación alrededor de un eje.
Tracción	Esfuerzo que tiende a alargar un material aplicando fuerzas opuestas en dirección axial.
Viscoelasticidad	Comportamiento combinado elástico y viscoso de ciertos materiales.
Viscosidad	Resistencia interna de un fluido al movimiento o deformación.
Difusividad térmica	Relación entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica de un material.
Capacidad calorífica	Energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de un cuerpo.
Coeficiente de expansión térmica	Variación dimensional de un material por cambio de temperatura.
Número de Reynolds	Parámetro que clasifica un flujo como laminar o turbulento.
Mecánica de fluidos	Estudio del comportamiento de líquidos y gases en reposo o movimiento.
Ecuación de Bernoulli	Principio de conservación de energía en un fluido en movimiento.
Trabajo mecánico	Producto de una fuerza por la distancia recorrida en su dirección de aplicación.
Amortiguamiento	Disipación de energía en un sistema vibratorio.
Diseño asistido por computadora	Uso de software para crear y analizar modelos de ingeniería.
Transferencia simultánea	Proceso en el que calor y masa se transfieren al mismo tiempo.

Conductividad térmica	Capacidad de un material de conducir calor.
Carga térmica	Energía requerida para mantener la temperatura estable en un sistema.
Ciclo de histéresis	Pérdida de energía en materiales sometidos a cargas cíclicas.
Tensión de fluencia	Esfuerzo en el que un material comienza a deformarse plásticamente.
Coeficiente convectivo	Medida de la eficiencia de transferencia de calor por convección.

Anexo B: Matriz de consistencia

Título de la investigación: Diseño de un sistema Mecatrónico para la Gestión de Residuos Orgánicos en el Ámbito Doméstico en Huancayo, 2025					
Autor(es): - Carhuarica Chaca Jefferson B. - Soriano Huaman Ruben A.					
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente		
¿Cómo diseñar una máquina compostadora automática que controle los procesos de compostaje en entornos domésticos?	Diseñar una máquina compostadora automática que controle los procesos de compostaje en entornos domésticos.	El diseño de una máquina compostadora automática para entornos domésticos permitirá un control del proceso de compostaje con una efectividad del 99 %.	Residuos organicos	Grado de maduración	Enfoque mixto: VDI 2221 VDI 2206 MIT Big Picture
			Variable independiente	Sistema Mecánico	
			Diseño de un sistema Mecatrónico	Sistema Electrico	
				Sistema Electrónico	
				Sistema IoT	
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable intervinientes	Indicadores	Tipo de investigación:
			Factores normativos	Grado de maduración	
			Decreto Supremo N° 057-2004-PCM (Reglamento Ley General de Residuos Sólidos).	Tiempo de descomposición	
				Relación C/N final	
				Color y textura del compost	
¿Cómo lograr una trituración uniforme y una mezcla homogénea de los residuos?	Implementar paletas giratorias para la homogeneización de los residuos.	El diseño del sistema de trituración permitirá un tamaño de 2-10 mm de los residuos, optimizando su procesamiento y facilitando su control dentro del sistema de compostaje.	Normas técnicas peruanas 201.207:2020(Parámetros técnicos sobre el compost)	Parámetros químicos	Descriptivo-explicativo
				Porcentaje de Carbono	
				Dióxido de carbono	
				Amoniac	
				Factores ambientales	
¿Cómo mantener la temperatura, humedad y oxigenación según parámetros establecidos sin necesidad de una intervención manual?	Plantear un control PID para regular temperatura y gestione la humedad y oxigenación mediante lógica ON/OFF durante el proceso compostaje.	El diseño del sistema de mezclado permitirá la distribución homogénea de los residuos, reduciendo la variabilidad hasta en un 25% asegurando una integración eficiente de los componentes y optimizando el proceso.	Temperatura ambiental Humedad del entorno	Sistema Mecánico	Diseño:
				Capacidad máxima	
				Fuerza de torque (Nm).	
				Tipo de material (resistente a humedad y corrosión).	
				Nivel de aislamiento térmico (en porcentaje).	
¿Cómo monitorear y recopilar datos del compostaje en tiempo real?	Desarrollar un sistema de monitoreo y seguimiento en tiempo real mediante IoT.	El sistema de monitoreo y seguimiento en tiempo real mediante IoT proporcionará datos con un margen de error de +/- 0.3% sobre el estado del compostaje, permitiendo un monitoreo constante de la máquina y del producto.	Sistema Electrónico	Sistema Electrico	No experimental
				Sobre corriente(A)	
				Sobre Voltaje (V)	
				Potencia de alimentación	
				Precisión de los sensores (%)	
				Tiempo de respuesta de sensores (ms)	
				Margen de error de los sensores (%)	
				Sistema IoT	
				Tiempo de transmisión (en minutos).	
				Rapidez de transmisión y visualización (latencia en segundos).	
				Cantidad de información generada y almacenada (capacidad en MB).	

Anexo C: Evaluaciones de requerimiento de usuario

Entrevistado:	Rosa Castro Chihuan	Entrevistadores:	Jeferson Carhuaricra - Ruben Soriano
Direccion:	Jr. Junin 450 -Sicaya	Fecha:	06 de mayo del 2025
Teléfono:	-	Tipo de usuario:	Ama de casa
Pregunta	Lo que opina el cliente	Necesidad interpretada	
Usos típicos	Siempre tiro los residuos orgánicos a la basura porque no sé compostar.	Debe ser fácil de usar para usuarios sin experiencia.	
	Me gustaría reducir la cantidad de basura que saco cada semana.	Debe reducir significativamente el volumen de desechos.	
	Vivo en un departamento pequeño.	Debe ser compacta y apta para interiores.	
Le gusta: soluciones actuales	Me interesa todo lo que ayude al medio ambiente.	El producto debe ser claramente ecológico.	
	Me gusta cuando los dispositivos tienen sensores inteligentes.	Puede incluir sensores para humedad, temperatura, etc.	
No le gusta: soluciones actuales	No tengo espacio para una compostera grande.	Debe ocupar poco espacio.	
	Odio tener que limpiar contenedores con restos en descomposición.	El diseño debe ser fácil de limpiar.	
	No tengo tiempo para revisar si ya está listo el compost.	Puede notificar automáticamente cuando el compost está listo.	
Mejoras sugeridas	Debería tener una bandeja o cajón para sacar el compost limpio.	El diseño debe facilitar la recolección sin ensuciar.	
	Que se conecte al celular o tenga control desde app.	Puede incluir conectividad con app móvil.	
	Me gustaría que usara energía solar.	Puede considerar una fuente de energía renovable.	

Entrevistado:	Magnani Caldas Cruz	Entrevistadores:	Jeferson Carhuaricra - Ruben Soriano
Direccion:	Av San Carlos 458	Fecha:	02 de mayo del 2025
Teléfono:	929 365 449	Tipo de usuario:	Ama de casa
Pregunta	Lo que opina el cliente	Necesidad interpretada	
Usos típicos	Cocinamos mucho en casa y generamos cáscaras, restos de fruta, etc.	La máquina debe aceptar y procesar residuos comunes de cocina.	
	Tengo una familia grande y se genera bastante residuo diario.	Debe tener capacidad suficiente para residuos familiares diarios.	
	Me gustaría aprovechar los residuos sin tener que llevarlos lejos.	Debe permitir compostar en casa, sin transporte.	
Le gusta: soluciones actuales	Me interesa que algo funcione solo y no me exija estar pendiente.	Debe ser completamente automática o programable.	
	Me gusta la idea de producir abono para mis plantas.	El compost generado debe ser útil como fertilizante.	
No le gusta: soluciones actuales	No me gusta tener que revolver la composta manualmente.	El volteo del compost debe ser automático.	
	He tenido problemas con moscas en la composta tradicional.	El sistema debe prevenir plagas.	
	No quiero que mi cocina huela mal.	El sistema debe ser hermético y control de olores.	
Mejoras sugeridas	Sería genial que separara automáticamente los residuos no compostables.	Podría tener un sistema de separación o advertencia de materiales incorrectos.	
	Me gustaría que el diseño combinara con la cocina.	El diseño debe ser estético y moderno.	
	Que funcione de noche o sin hacer ruido.	Debe tener un funcionamiento silencioso.	

Entrevistado:	Diana Carolina Sanchez Flores	Entrevistadores:	Jeferson Carhuaricra - Ruben Soriano
Direccion:	Av. San Carlos 785	Fecha:	02 de mayo del 2025
Teléfono:	996500024	Tipo de usuario:	Ama de casa
Pregunta	Lo que opina el cliente	Necesidad interpretada	
Usos típicos	Me interesa reducir la cantidad de basura que genero.	La máquina debe reducir considerablemente el volumen de residuos.	
	Tengo poco tiempo para separar residuos.	Debe facilitar el proceso de selección o clasificar automáticamente.	
	Quiero algo práctico, no complicado.	El diseño debe ser simple y directo.	
Le gusta: soluciones actuales	Me gustan los productos que se ven bien y no parecen "máquinas".	El diseño debe ser discreto y moderno.	
	Me gusta saber que estoy haciendo algo útil para el planeta.	El producto debe educar o motivar al usuario con impacto ecológico.	
No le gusta: soluciones actuales	Odio los olores y líquidos que se filtran.	El sistema debe tener control de lixiviados y filtros.	
	No me gusta cuando algo se traba o deja de funcionar.	Debe ser confiable y resistente.	
	Me incomoda si tengo que leer mucho para usarlo.	Debe tener instrucciones visuales o guías rápidas.	
Mejoras sugeridas	Que tenga repuestos o soporte fácil de conseguir.	Puede tener piezas estándar y servicio técnico accesible.	
	Que se pueda usar en interiores sin problema.	Apto para uso dentro de la casa (sin ruido, olor ni humedad).	
	Que no consuma mucha electricidad.	Debe ser energéticamente eficiente.	

Entrevistado:	Britney Huamani Castro	Entrevistadores:	Jeferson Carhuaricra - Ruben Soriano
Direccion:	Jr. Junin 485	Fecha:	02 de mayo del 2025
Teléfono:	968 577 563	Tipo de usuario:	Ama de casa
Pregunta	Lo que opina el cliente	Necesidad interpretada	
Usos típicos	Vivo solo y no genero mucha basura, pero quiero compostar.	Debe ser adecuada para pequeños volúmenes de residuos.	
	No sé mucho sobre compostaje.	La interfaz debe guiar al usuario paso a paso de forma intuitiva.	
	Me olvido de vaciar los residuos a veces.	Debe mostrar el nivel de llenado con una luz o pantalla.	
Le gusta: soluciones actuales	Me gusta cuando los dispositivos tienen diseños modernos.	El diseño debe ser actual y atractivo.	
	Me agradan los aparatos que se manejan desde el celular.	Puede tener conexión con app móvil que muestre el estado del proceso.	
No le gusta: soluciones actuales	No quiero complicaciones técnicas.	La interfaz debe ser minimalista, clara y de fácil uso.	
	No me gusta ensuciarme manipulando compost.	El compost debe poder extraerse sin contacto directo.	
	Los aparatos ruidosos me molestan.	Debe ser silencioso y adecuado para interiores.	
Mejoras sugeridas	Que tenga una pantalla con indicadores.	Debe incluir una pantalla clara que muestre temperatura, humedad y progreso.	
	Que me diga si algo está mal (por ejemplo, si puse algo no compostable).	Debe tener advertencias visuales en caso de mal uso.	
	Que tenga un diseño elegante que combine con electrodomésticos.	El diseño debe integrarse visualmente en espacios domésticos modernos.	

Entrevistado:	Diana Paula Ramos Requena	Entrevistadores:	Jeferson Carhuaricra - Ruben Soriano
Dirección:	Jr. progreso 985 Huancan	Fecha:	02 de mayo del 2025
Teléfono:	962896486	Tipo de usuario:	Ama de casa
Pregunta	Lo que opina el cliente	Necesidad interpretada	
Usos típicos	Tengo niños pequeños en casa.	Debe ser segura, sin piezas accesibles peligrosas.	
	Queremos enseñarles a compostar.	La interfaz debe ser educativa, visual e interactiva.	
	No quiero que lo desarmen.	Debe tener seguro infantil o protección contra manipulación accidental.	
Le gusta: soluciones actuales	Me gusta cuando los aparatos hablan o hacen sonidos útiles.	Puede incluir audio o sonidos que informen estados.	
	Me gustan las luces de colores para saber si todo va bien.	Debe incluir indicadores visuales codificados.	
No le gusta: soluciones actuales	No tengo espacio para un compost tradicional, porque vivo en un	debe ser compacta y de buen diseño.	
Mejoras sugeridas	Que tenga dibujos o una carita que diga si todo va bien.	Puede usar íconos animados o indicadores con expresiones fáciles de entender.	
	Que se bloquee automáticamente si no se usa.	Debe tener modo de reposo con seguridad activada.	

Anexo D: Código de programación para ESP32

```
from machine import Pin, PWM, ADC, I2C
import time
import _thread
import network
import ujson
from dht import DHT22
from ssd1306 import SSD1306_I2C
from umqtt.simple import MQTTClient

# ===== OLED CONFIG =====
i2c = I2C(0, scl=Pin(22), sda=Pin(21))
oled = SSD1306_I2C(128, 64, i2c)

# ===== Pines =====
motor_pwm = PWM(Pin(19), freq=1000)
relay_resistencia = Pin(18, Pin.OUT)
ventilador = Pin(17, Pin.OUT)
dht_sensor = DHT22(Pin(16))
atomizador = Pin(26, Pin.OUT)
bateria_adc = ADC(Pin(34))
bateria_adc.atten(ADC.ATTN_11DB)
sensor_gas_adc = ADC(Pin(35))
sensor_gas_adc.atten(ADC.ATTN_11DB)

fuente_solar = Pin(32, Pin.OUT)
fuente_bateria = Pin(33, Pin.OUT)
fuente_red = Pin(25, Pin.OUT)

start_btn = Pin(4, Pin.IN, Pin.PULL_UP)
tapa_switch = Pin(5, Pin.IN)
stop_btn = Pin(15, Pin.IN, Pin.PULL_UP)

led_f1 = Pin(27, Pin.OUT)
led_f2 = Pin(14, Pin.OUT)
led_f3 = Pin(12, Pin.OUT)
led_f4 = Pin(13, Pin.OUT)

buzzer = Pin(23, Pin.OUT)

# ===== Variables globales =====
fase_actual = "Esperando..."
temperatura = 0
humedad = 0
gas_ppm = 0
estado_gases = False
energia = ""
iniciar_remoto = False
detener_remoto = False
start_time = 0
sistema_detenido = False
start_time = None

# ===== MQTT CONFIG =====
MQTT_CLIENT_ID = "compostadora-iot"
MQTT_BROKER = "broker.mqttdashboard.com"
MQTT_USER = ""
MQTT_PASSWORD = ""
MQTT_TOPIC_HUMEDAD = "proyecto/humedad"
MQTT_TOPIC_TEMPERATURA = "proyecto/temperatura"
```

```

MQTT_TOPIC_ESTADO = "proyecto/estado"
MQTT_TOPIC_TIEMPO = "proyecto/tiempo"
MQTT_TOPIC_CICLOS = "proyecto/ciclos"
MQTT_TOPIC_FILTRO = "proyecto/filtro"
MQTT_TOPIC_START = b"proyecto/start"
MQTT_TOPIC_STOP = b"proyecto/stop"
MQTT_TOPIC_WIFI = b"estado/wifi"

# ===== Funciones =====
def esperar_inicio():
    global fase_actual, start_time, iniciar_remoto
    print("Esperando que la tapa esté cerrada y se presione el
botón de inicio...")
    oled.fill(0)
    oled.text("Esperando inicio...", 0, 0)
    oled.text("Cierre tapa y", 0, 16)
    oled.text("presione boton", 0, 26)
    oled.show()

    while True:
        if tapa_switch.value() == 0:
            buzzer.value(1)
            print("[Alerta] ;Tapa abierta!")
            time.sleep(0.3)
            buzzer.value(0)
            time.sleep(0.7)
        elif start_btn.value() == 0 or iniciar_remoto:
            print("Inicio autorizado: ;Sistema activado!")
            fase_actual = "Fase 1"
            buzzer.value(0)
            oled.fill(0)
            oled.text("Sistema Iniciado", 0, 0)
            oled.show()
            start_time = time.time()
            time.sleep(1)
            break
        time.sleep(0.1)

# ===== Hilos =====
def monitorear_stop():
    global sistema_detenido, detener_remoto
    while True:
        if stop_btn.value() == 0 or detener_remoto:
            sistema_detenido = True
            print(" BOTÓN STOP PRESIONADO - Deteniendo sistema")
            oled.fill(0)
            oled.text(" STOP Activado", 0, 0)
            oled.text("Deteniendo todo...", 0, 16)
            oled.show()
            buzzer.value(1)
            time.sleep(0.2)
            buzzer.value(0)
            start_time = 0
            break
        time.sleep(0.1)

def motor_thread():
    global sistema_detenido, fase_actual
    while not sistema_detenido:
        fase_actual = "Triturado"
        motor_pwm.duty(int(1023 * 0.95))

```



```

print("[Motor] Triturado: 8 minutos al 95%")
time.sleep(480)

fase_actual = "Secado"
motor_pwm.duty(int(1023 * 0.5))
print("[Motor] Secado: Ciclos 20s cada 5min durante 3h")
for _ in range(36):
    motor_pwm.duty(int(1023 * 0.5))
    time.sleep(20)
    motor_pwm.duty(0)
    time.sleep(280)

fase_actual = "Fermentación"
print("[Motor] Fermentación: Ciclos 30s cada 20min
durante 7h")
for _ in range(21):
    motor_pwm.duty(int(1023 * 0.5))
    time.sleep(30)
    motor_pwm.duty(0)
    time.sleep(1170)

fase_actual = "Enfriamiento"
print("[Motor] Enfriamiento")
motor_pwm.duty(0)
break

def atomizador_thread():
    global humedad, fase_actual, sistema_detenido

    while not sistema_detenido:
        if fase_actual in ["Secado", "Fermentacion"]:
            if humedad < 40:
                atomizador.value(1)
                print("[Atomizador] Encendido (humedad < 40%)")
            elif humedad >= 60:
                atomizador.value(0)
                print("[Atomizador] Apagado (humedad >= 60%)")
            else:
                atomizador.value(0) # Apagado en otras fases

        time.sleep(2)

    atomizador.value(0) # Apagar si el sistema se detiene

def pid_resistencia_thread():
    global sistema_detenido, temperatura, humedad, fase_actual
    Kp, Ki, Kd = 2.0, 0.1, 1.0
    integral, last_error, last_time = 0, 0, time.time()

    while not sistema_detenido:
        try:
            dht_sensor.measure()
            temperatura = dht_sensor.temperature()
            humedad = dht_sensor.humidity()
        except:
            time.sleep(2)
            continue

        if fase_actual == "Fase 2":
            setpoint = 40
        elif fase_actual == "Fase 3":

```

```

        setpoint = 60
    else:
        relay_resistencia.value(0)
        time.sleep(1)
        continue

    now = time.ticks_ms()
    dt = time.ticks_diff(now, last_time) / 1000
    last_time = now

    error = setpoint - temperatura
    integral += error * dt
    derivative = (error - last_error) / dt if dt > 0 else 0
    output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative
    last_error = error

    output = max(0, min(output, 100))
    on_time = output / 100 * 5

    if on_time > 0:
        relay_resistencia.value(1)
        time.sleep(on_time)
    if on_time < 5:
        relay_resistencia.value(0)
        time.sleep(5 - on_time)

def gas_thread():
    global gas_ppm, estado_gases, sistema_detenido
    while not sistema_detenido:
        raw = sensor_gas_adc.read()
        voltaje = raw * (3.3 / 4095)
        gas_ppm = voltaje * 100
        estado_gases = gas_ppm > 600
        time.sleep(1)
    ventilador.value(0)

def ventilador_thread():
    global sistema_detenido, fase_actual, temperatura, estado_gases
    while not sistema_detenido:
        if fase_actual == "Fase 2":
            ventilador.value(1)
            time.sleep(35)
            ventilador.value(0)
            time.sleep(85)
        elif fase_actual == "Fase 3":
            if estado_gases:
                ventilador.value(1)
                time.sleep(35)
                ventilador.value(0)
            else:
                ventilador.value(0)
                time.sleep(10)
        elif fase_actual == "Fase 4":
            ventilador.value(temperatura > 20)
            time.sleep(5)
        else:
            ventilador.value(0)
            time.sleep(5)

def energia_thread():

```

```

global energia
while True:
    voltaje = bateria_adc.read() * (3.3 / 4095) * (24.0 /
3.3)
    if voltaje > 22.0:
        energia = "Solar"
        fuente_solar.value(1)
        fuente_bateria.value(0)
        fuente_red.value(0)
    elif 19.0 < voltaje <= 22.0:
        energia = "Batería"
        fuente_solar.value(0)
        fuente_bateria.value(1)
        fuente_red.value(0)
    else:
        energia = "Red"
        fuente_solar.value(0)
        fuente_bateria.value(0)
        fuente_red.value(1)
    time.sleep(10)

def monitor_thread():
    global sistema_detenido, temperatura, humedad, gas_ppm,
energia, fase_actual
    while not sistema_detenido:
        led_f1.value(fase_actual == "Triturado")
        led_f2.value(fase_actual == "Secado")
        led_f3.value(fase_actual == "Fermentación")
        led_f4.value(fase_actual == "Enfriamiento")
        oled.fill(0)
        oled.text(f"Temp: {temperatura:.1f} C", 0, 0)
        oled.text(f"Hum: {humedad:.1f} %", 0, 10)
        oled.text(f"Gas: {gas_ppm:.0f} ppm", 0, 20)
        oled.text(f"Energ: {energia}", 0, 30)

        oled.show()
        time.sleep(2)

    led_f1.value(0)
    led_f2.value(0)
    led_f3.value(0)
    led_f4.value(0)
    oled.fill(0)
    oled.text("Esperando inicio...", 0, 0)
    oled.text("Cierre tapa y", 0, 16)
    oled.text("presione boton", 0, 26)
    oled.show()

def mqtt_thread():
    global start_time, temperatura, humedad, fase_actual,
iniciar_remoto, detener_remoto

    def conectar_wifi():
        sta_if = network.WLAN(network.STA_IF)
        sta_if.active(True)
        sta_if.connect("Wokwi-GUEST", "")
        while not sta_if.isconnected():
            time.sleep(0.2)

    def mqtt_callback(topic, msg):

```

```

global iniciar_remoto, detener_remoto
topic = topic.decode()
msg = msg.decode()

if topic == "proyecto/start" and msg == "1":
    print(" Inicio remoto recibido")
    iniciar_remoto = True
elif topic == "proyecto/stop" and msg == "1":
    print(" Parada remota recibida")
    detener_remoto = True

conectar_wifi()
client = MQTTClient(MQTT_CLIENT_ID, MQTT_BROKER,
user=MQTT_USER, password=MQTT_PASSWORD)
client.set_callback(mqtt_callback)
client.connect()
mensaje_wifi = f"1"
client.publish(MQTT_TOPIC_WIFI, mensaje_wifi)
client.subscribe(MQTT_TOPIC_START)
client.subscribe(MQTT_TOPIC_STOP)

start_time = time.time()
ciclo_prev = False
contador_ciclos = 0
hum_prev = ""
temp_prev = ""

while True:
    try:
        client.check_msg() # Verifica si hay nuevos mensajes

        if start_time is not None:
            elapsed = int(time.time() - start_time)
            tiempo_str = "{}h {}m {}s".format(elapsed //
3600, (elapsed % 3600) // 60, elapsed % 60)
        else:
            tiempo_str = "0h 0m 0s"
        estado = fase_actual
        if fase_actual == "Esperando" and not ciclo_prev:
            contador_ciclos += 1
            ciclo_prev = True
        elif fase_actual != "Esperando":
            ciclo_prev = False

        filtro = "⚠ Cambiar filtro" if contador_ciclos >= 15
    else "Filtro OK"
    if contador_ciclos >= 15:
        contador_ciclos = 0

    temp_str = "{:.1f}".format(temperatura)
    hum_str = "{:.1f}".format(humedad)

    if temp_str != temp_prev:
        client.publish(MQTT_TOPIC_TEMPERATURA, temp_str)
        temp_prev = temp_str

    if hum_str != hum_prev:
        client.publish(MQTT_TOPIC_HUMEDAD, hum_str)
        hum_prev = hum_str

```

```

        client.publish(MQTT_TOPIC_ESTADO, estado)
        client.publish(MQTT_TOPIC_TIEMPO, tiempo_str)
        client.publish(MQTT_TOPIC_CICLOS,
str(contador_ciclos))
        client.publish(MQTT_TOPIC_FILTRO, filtro)

        time.sleep(1)
    except Exception as e:
        print("⚠ Error durante el bucle MQTT:", e)
        time.sleep(5)

# ===== Lanzamiento =====
_thread.start_new_thread(mqtt_thread, ())

while True:
    iniciar_remoto = False
    detener_remoto = False
    fase_actual = "Esperando"
    sistema_detenido = False
    start_time = 0

    esperar_inicio()

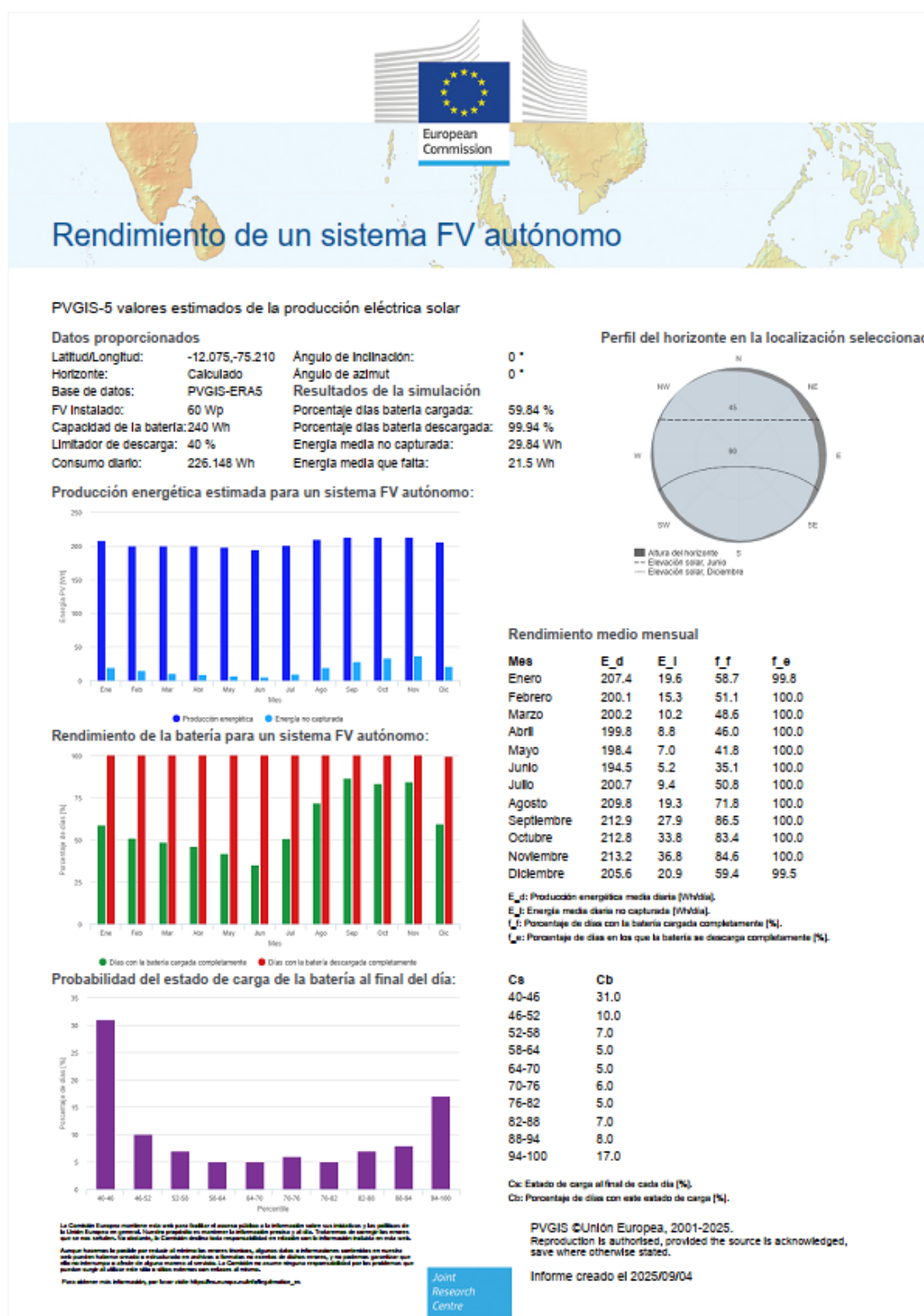
    _thread.start_new_thread(monitorear_stop, ())
    _thread.start_new_thread(motor_thread, ())
    _thread.start_new_thread(pid_resistencia_thread, ())
    _thread.start_new_thread(ventilador_thread, ())
    _thread.start_new_thread(gas_thread, ())
    _thread.start_new_thread(energia_thread, ())
    _thread.start_new_thread(monitor_thread, ())
    _thread.start_new_thread(atomizador_thread, ())

    while not sistema_detenido:

        time.sleep(1)

```

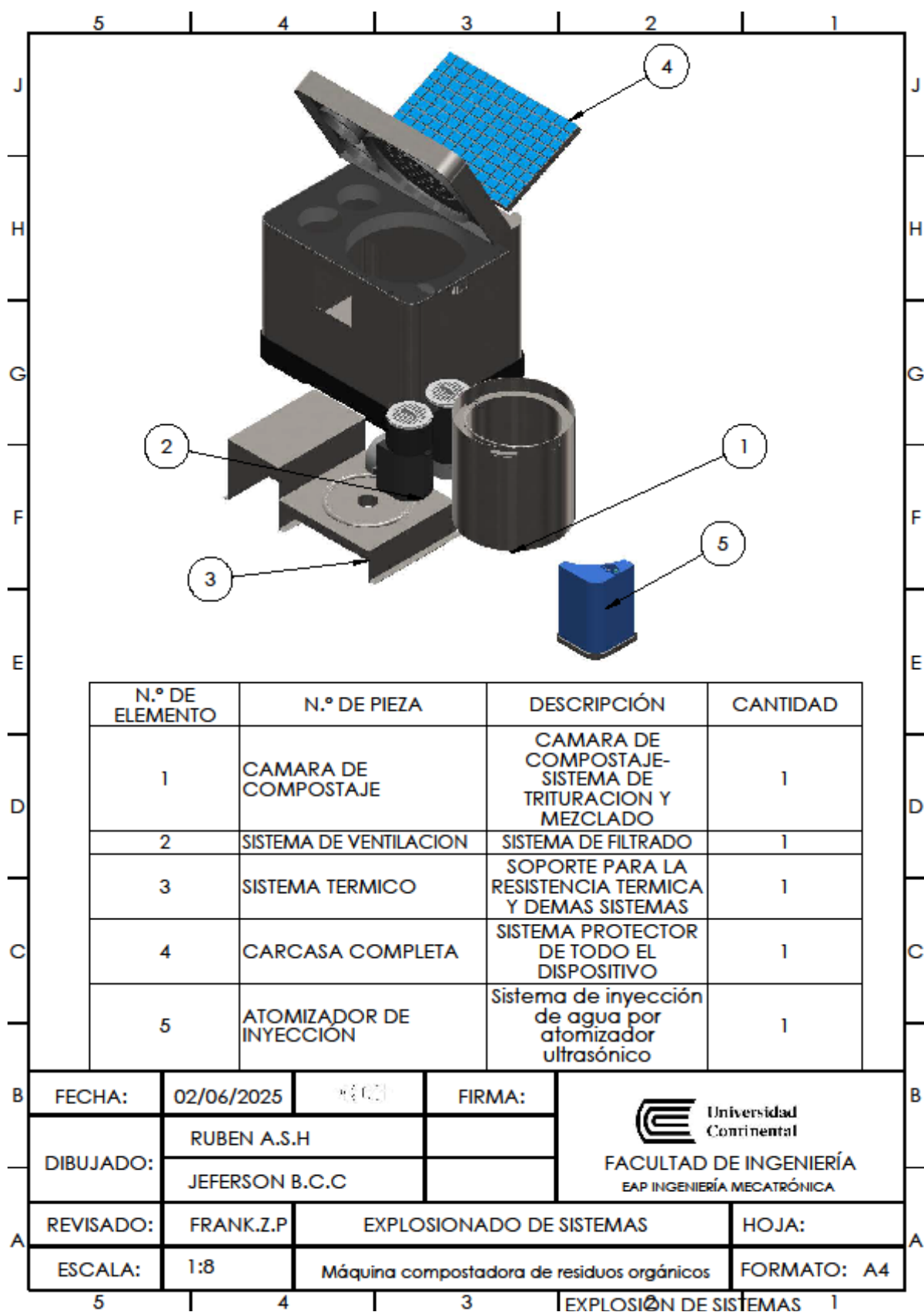
Anexo E: Radiación y rendimiento fotovoltaico en Huancayo

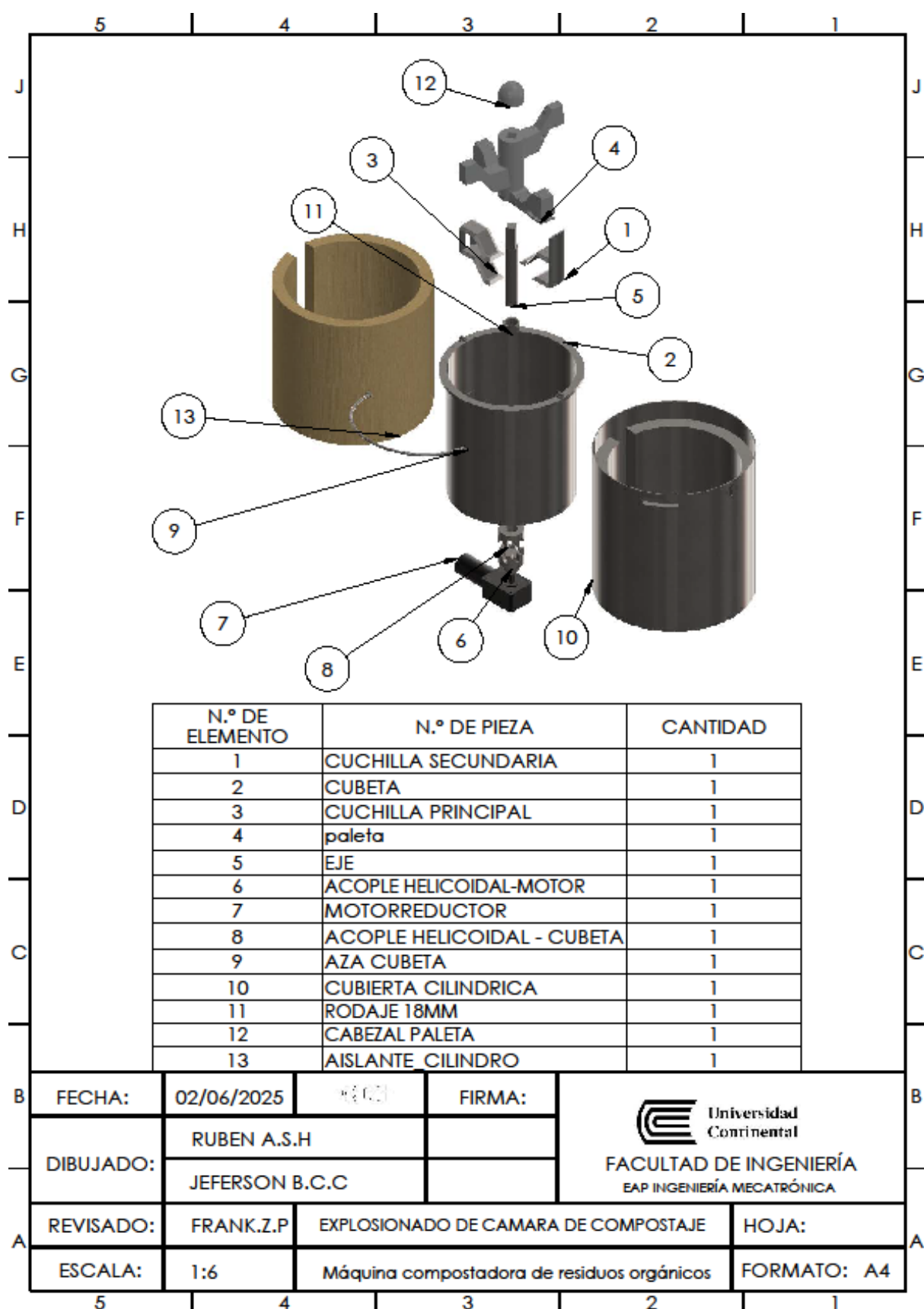


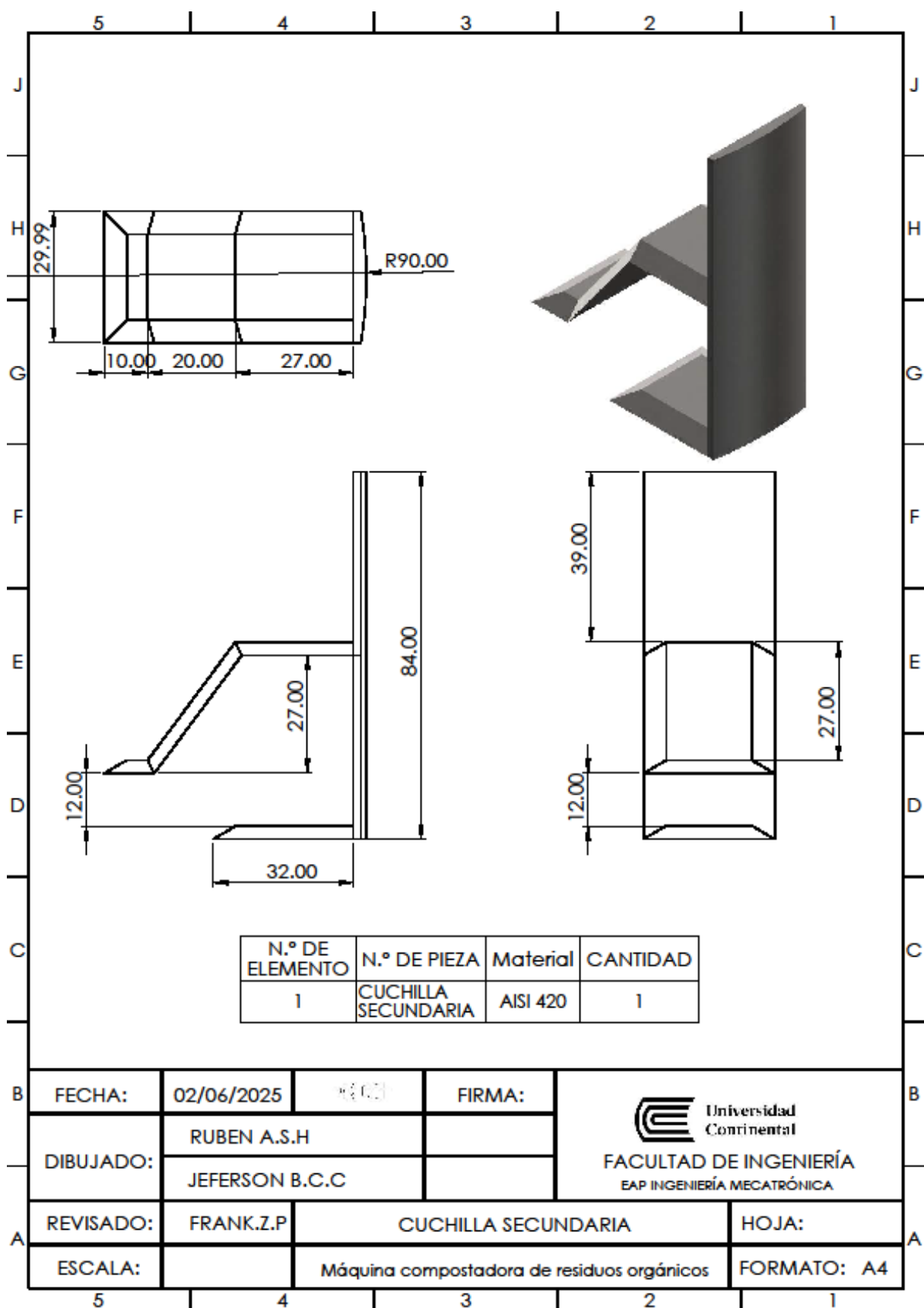
Anexo E: Costos y presupuestos

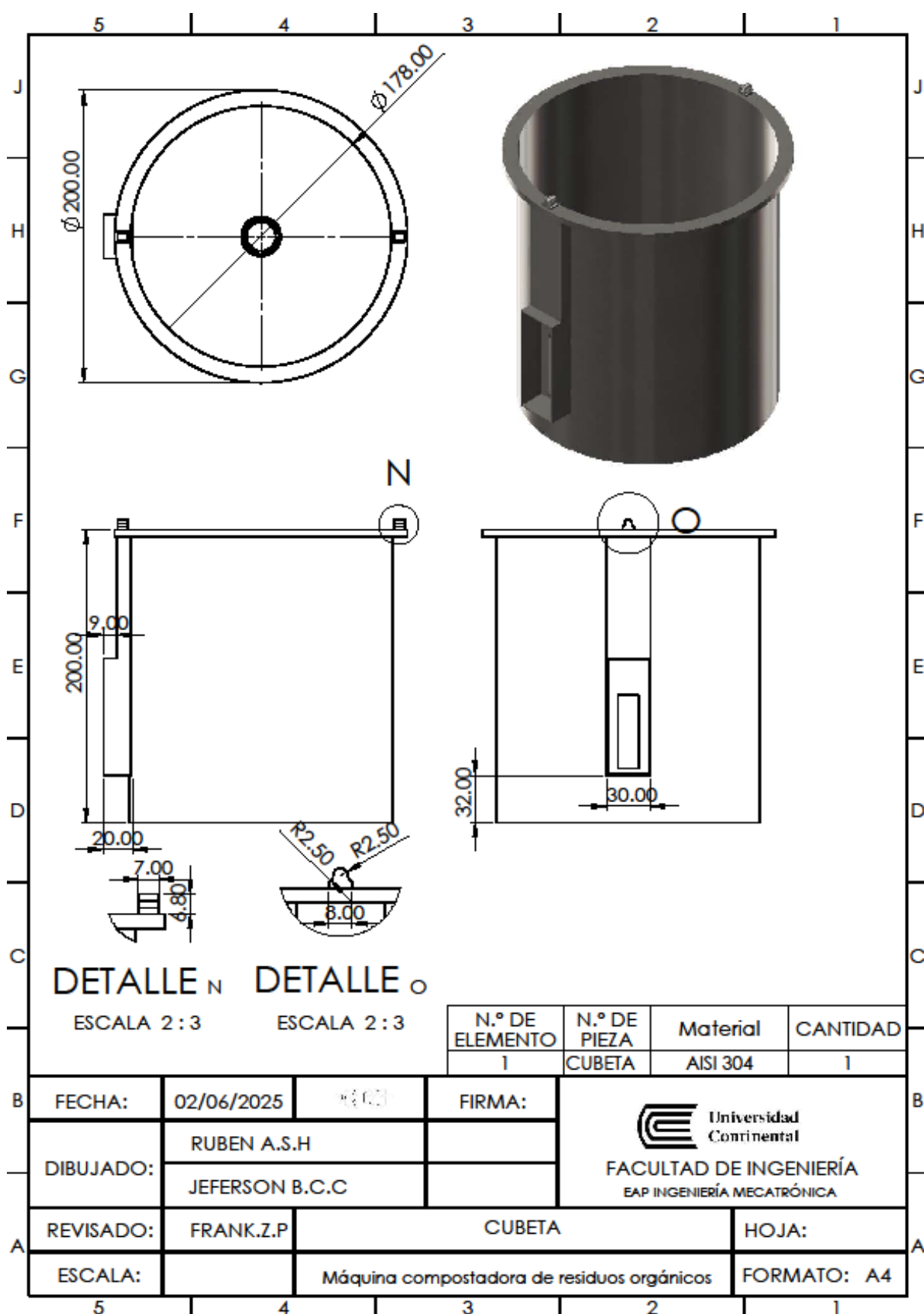
Descripción del sistema o proceso técnico	Detalle	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (S/.)	Precio Total (S/.)
1. Sistema Mecánico – Estructura y Transmisión					
Fabricación metalmecánica: estructura, cámaras, tapas, cuchillas, eje, rodamientos		unidad	1	S/ 280.00	S/ 280.00
	Material: chapa AISI 304 y perfiles	lote	1	S/ 150.00	S/ 150.00
	Mano de obra: corte, plegado y montaje	servicio	1	S/ 60.00	S/ 60.00
	Corte, plegado y mecanizado	servicio	1	S/ 40.00	S/ 40.00
	Cuchillas: fabricación y afilado	set	2	S/ 15.00	S/ 30.00
Sistema de transmisión: acoples, eje helicoidal, rodamientos, fijaciones		lote	1	S/ 47.00	S/ 47.00
	Acoples mecánicos	u	2	S/ 12.00	S/ 24.00
	Eje helicoidal	u	1	S/ 8.00	S/ 8.00
	Rodamientos (kits)	set	1	S/ 5.00	S/ 5.00
	Tornillería y fijaciones	lote	1	S/ 10.00	S/ 10.00
Subtotal Sistema Mecánico – Estructura y Transmisión					S/ 327.00
2. Sistema Energético – Alimentación y Potencia					
Energía solar y batería: panel solar 30W, batería 12V 20Ah		unidad	1	S/ 370.00	S/ 370.00
	Panel solar 30W (marco y diodos)	u	2	S/ 150.00	S/ 300.00
	Batería 12V 20Ah (AGM/gel)	u	1	S/ 70.00	S/ 70.00
Sistema térmico: resistencia eléctrica 75W, aislante, soporte térmico		unidad	1	S/ 80.00	S/ 80.00
	Resistencia eléctrica 75W	u	1	S/ 65.00	S/ 65.00
	Aislante térmico (panel/espuma)	m2	1	S/ 15.00	S/ 15.00
Sistema de potencia: relés, conectores, disipadores, PCB		unidad	1	S/ 25.00	S/ 25.00
	Relés (5 unidades) y bases	set	1	S/ 20.00	S/ 20.00
	Conectores y cables de potencia	lote	1	S/ 5.00	S/ 5.00
Subtotal Sistema Energético – Alimentación y Potencia					S/ 475.00
3. Sistema de Control y Electrónica					
Electrónica de control: ESP32, sensores (DHT22, MQ135, sensor voltaje), pantalla OLED		conjunto	1	S/ 74.00	S/ 74.00
	Microcontrolador ESP32	u	1	S/ 12.00	S/ 12.00
	Sensor RS485 (temp/humedad)	u	1	S/ 15.00	S/ 15.00
	Sensor MQ 135 (calidad de aire/gases)	u	1	S/ 12.00	S/ 12.00
	Sensor de voltaje / divisores y protección	u	1	S/ 5.00	S/ 5.00
	Pantalla OLED (0.96" o 1.3")	u	1	S/ 25.00	S/ 25.00
	Cables, conectores y accesorios electrónicos	lote	1	S/ 5.00	S/ 5.00
Interfaz y seguridad: botón START/STOP, LEDs, interruptor de tapa		lote	1	S/ 11.00	S/ 11.00
	Botón START/STOP (estanco)	u	1	S/ 8.00	S/ 8.00
	LEDs indicadores y porta leds	lote	1	S/ 1.00	S/ 1.00
	Interruptor de tapa / sensor de seguridad	u	1	S/ 2.00	S/ 2.00
Subtotal Sistema de Control y Electrónica					S/ 85.00
4. Sistemas Auxiliares – Soporte de Proceso					
Ventilación y filtrado: extractor axial, ducto, filtro de carbón activado		unidad	1	S/ 90.00	S/ 90.00
	Extractor axial (rpm y flujo indicado)	u	1	S/ 50.00	S/ 50.00
	Filtro de carbón activado (recambio)	u	2	S/ 20.00	S/ 40.00
Atomización de agua: atomizador ultrasónico, recipiente, tapa, soporte, hisopo		unidad	1	S/ 20.00	S/ 20.00
	Módulo atomizador ultrasónico	u	1	S/ 15.00	S/ 15.00
	Soporte y fijaciones	u	1	S/ 5.00	S/ 5.00
Impresión 3D (PP): paletas, tapas, soportes, elementos funcionales		unidad	2	S/ 100.00	S/ 200.00
	Paletas imprimidas (1 unidades)	u	1	S/ 20.00	S/ 20.00
	Tapas impresas (2 unidades)	u	2	S/ 12.00	S/ 24.00
	Soportes y fijaciones impresos	u	2	S/ 12.00	S/ 24.00
	Elementos funcionales menores	u	4	S/ 8.00	S/ 32.00
Subtotal Sistemas Auxiliares – Soporte de Proceso					S/ 310.00
TOTAL GENERAL DEL PROYECTO					S/ 1,197.00

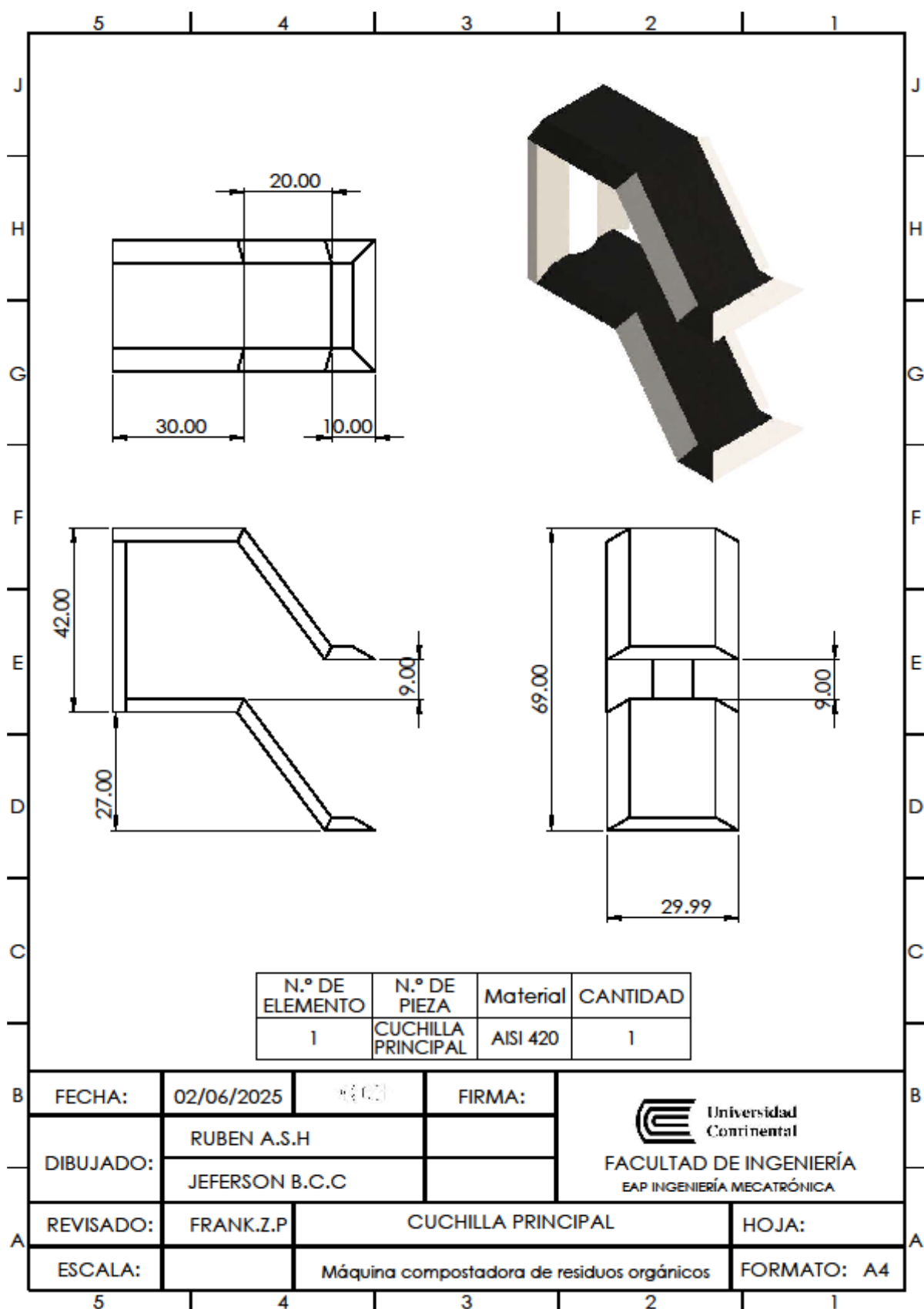
Anexo F: Planos

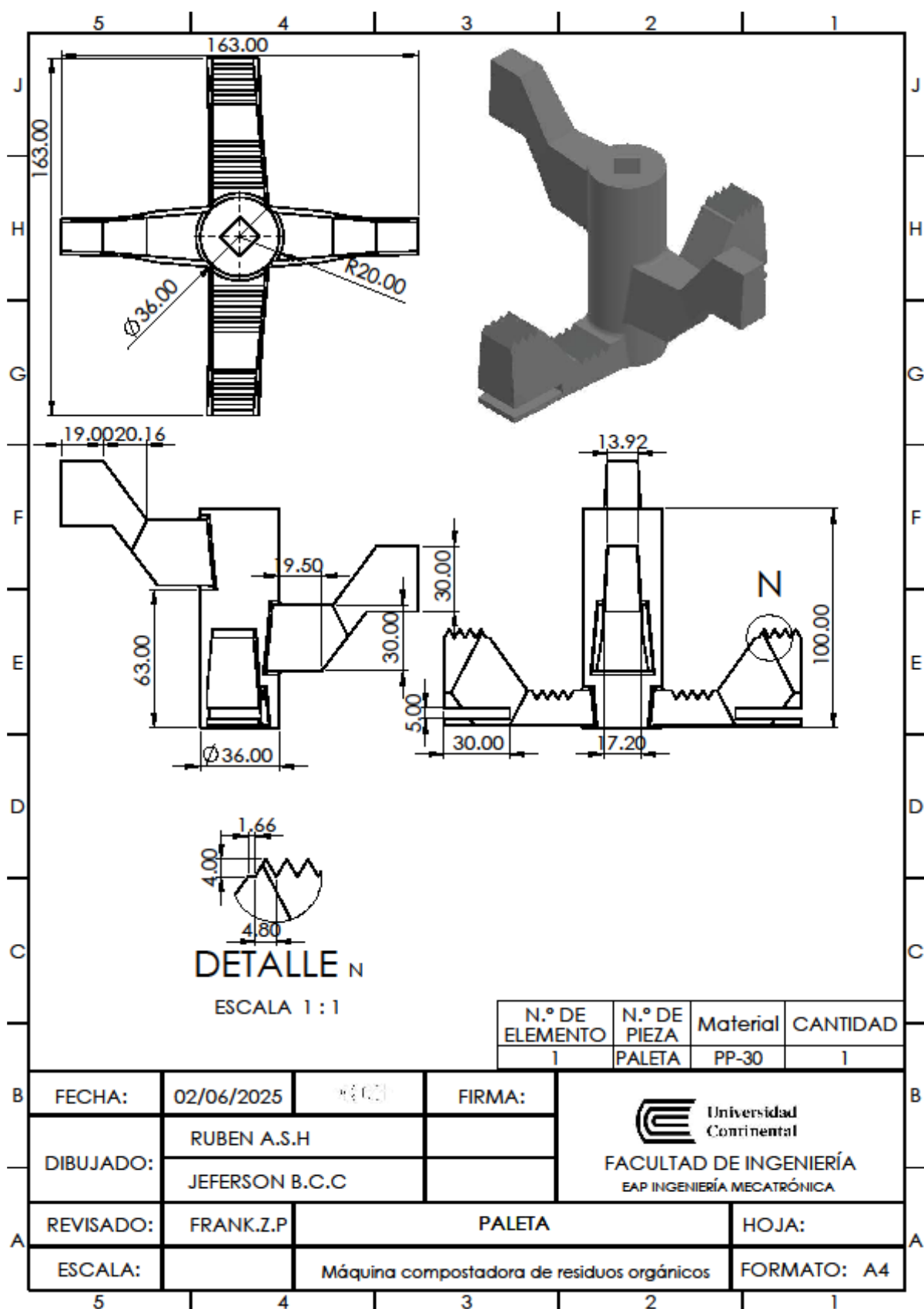


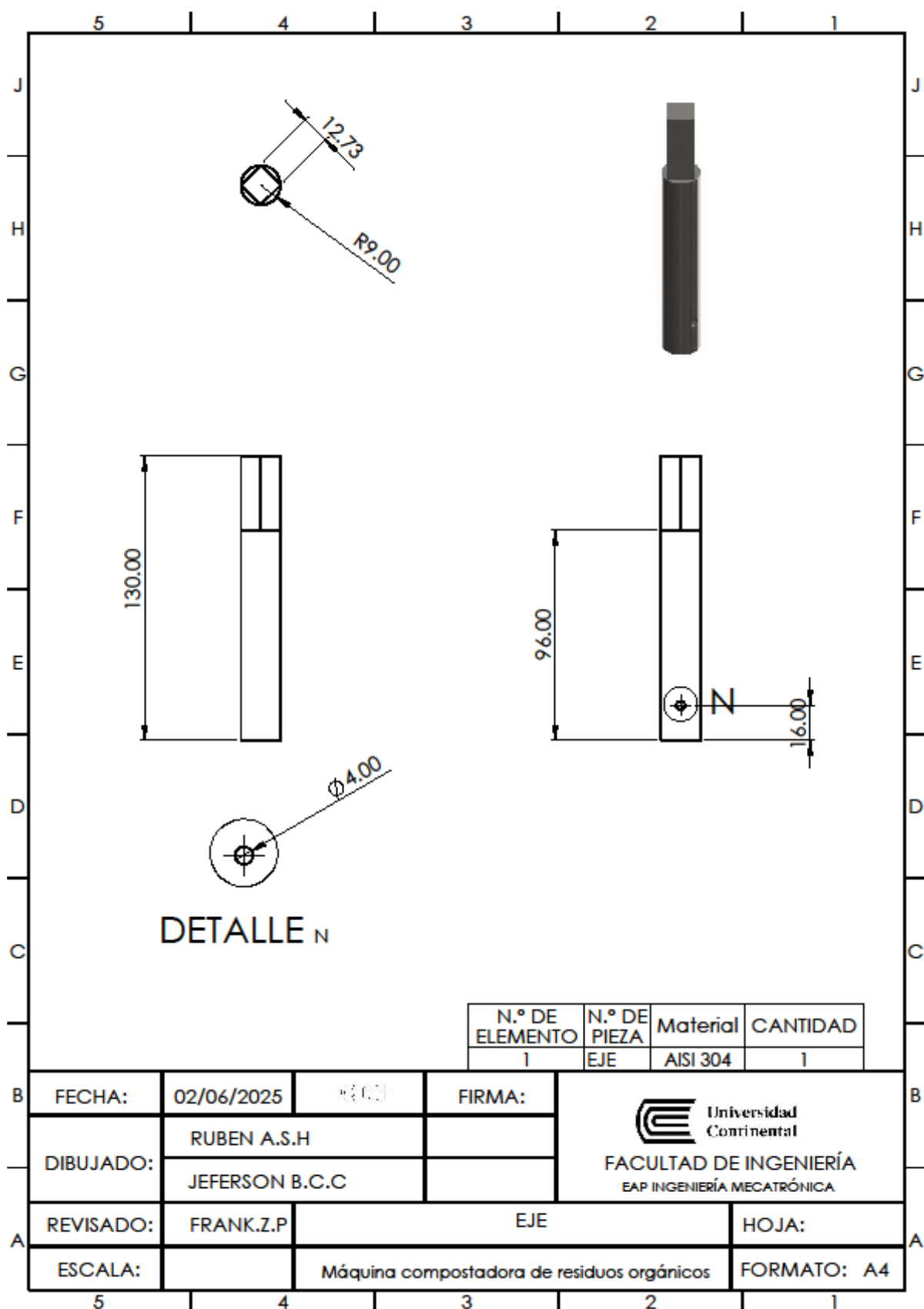


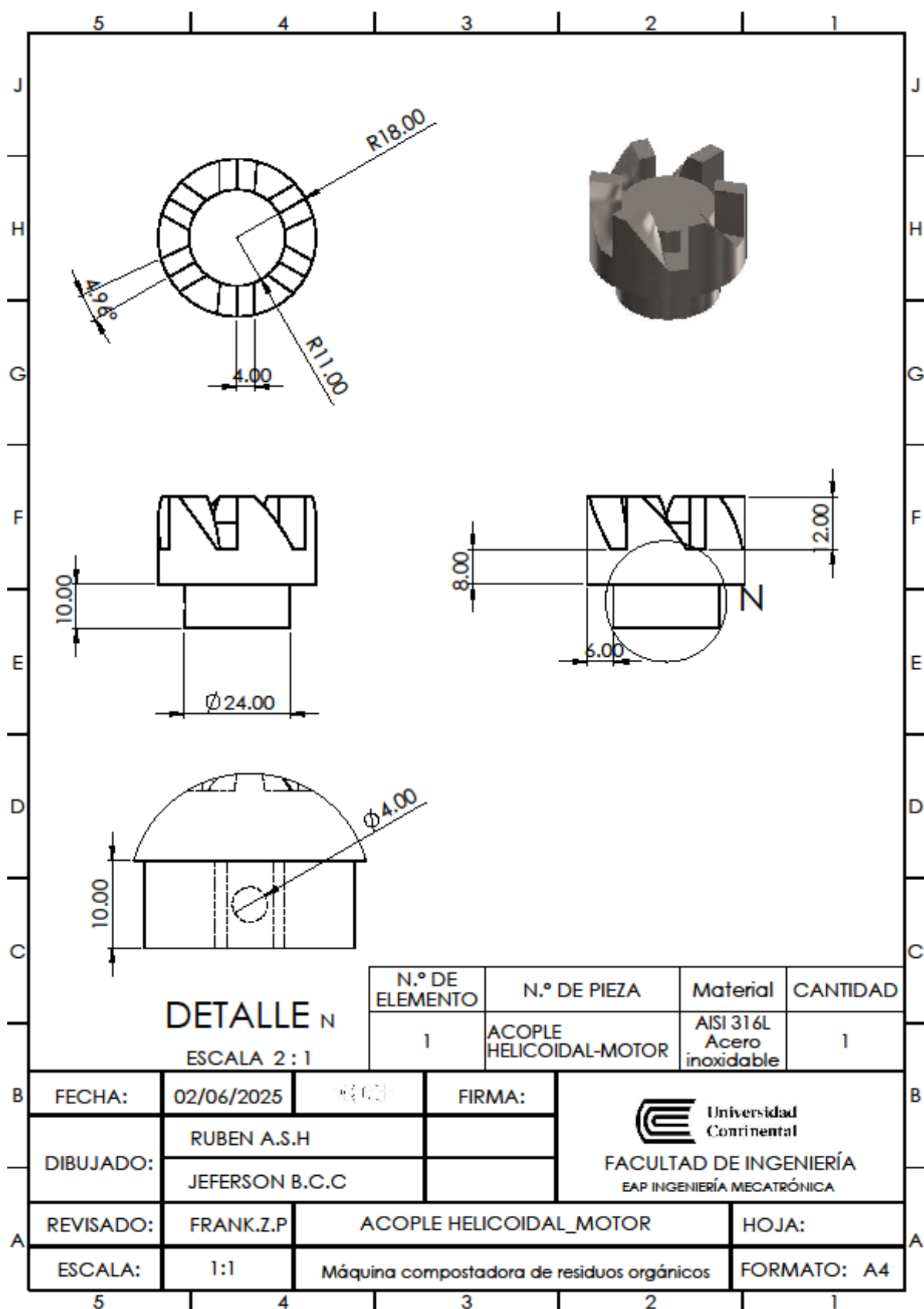


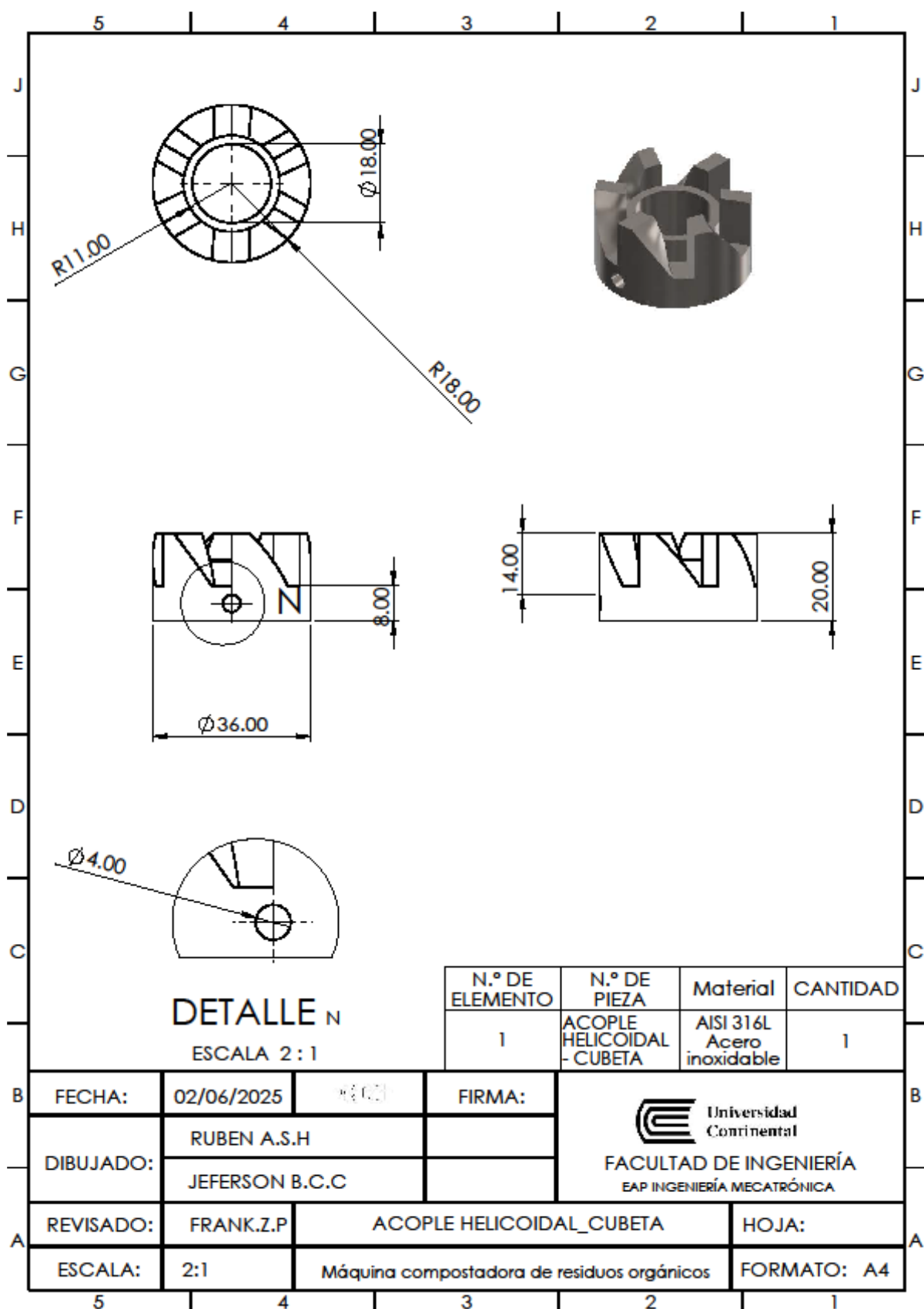


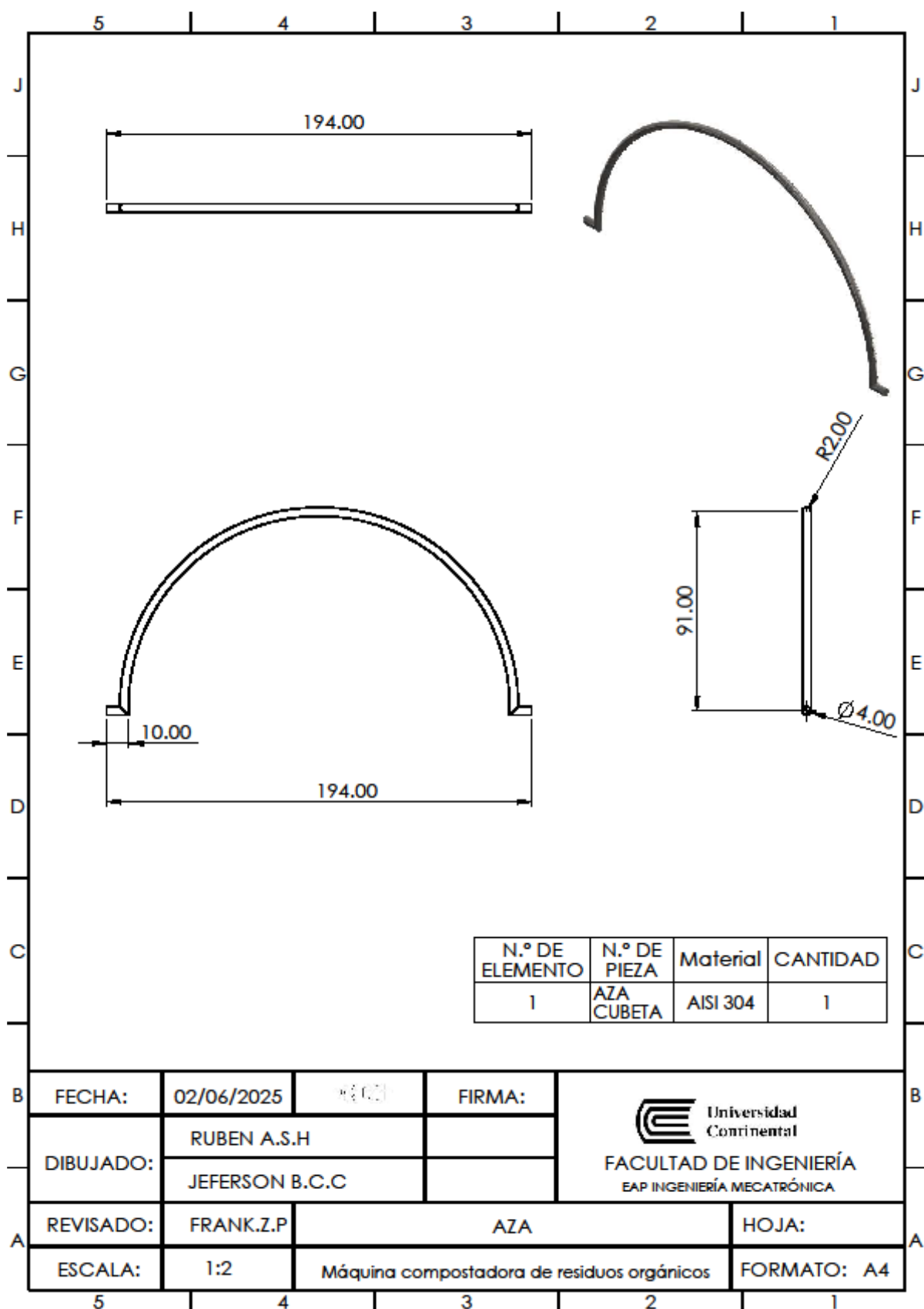


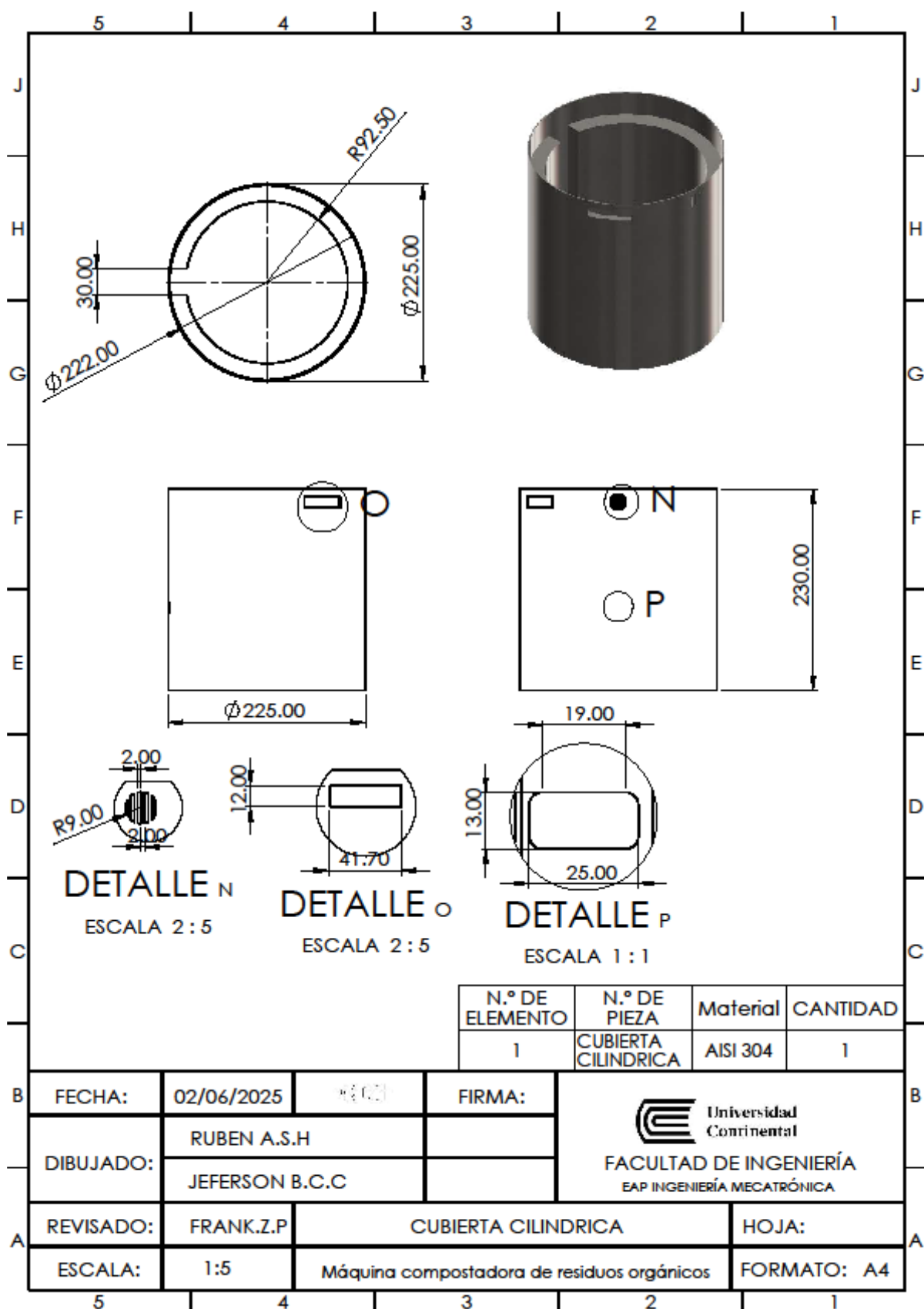


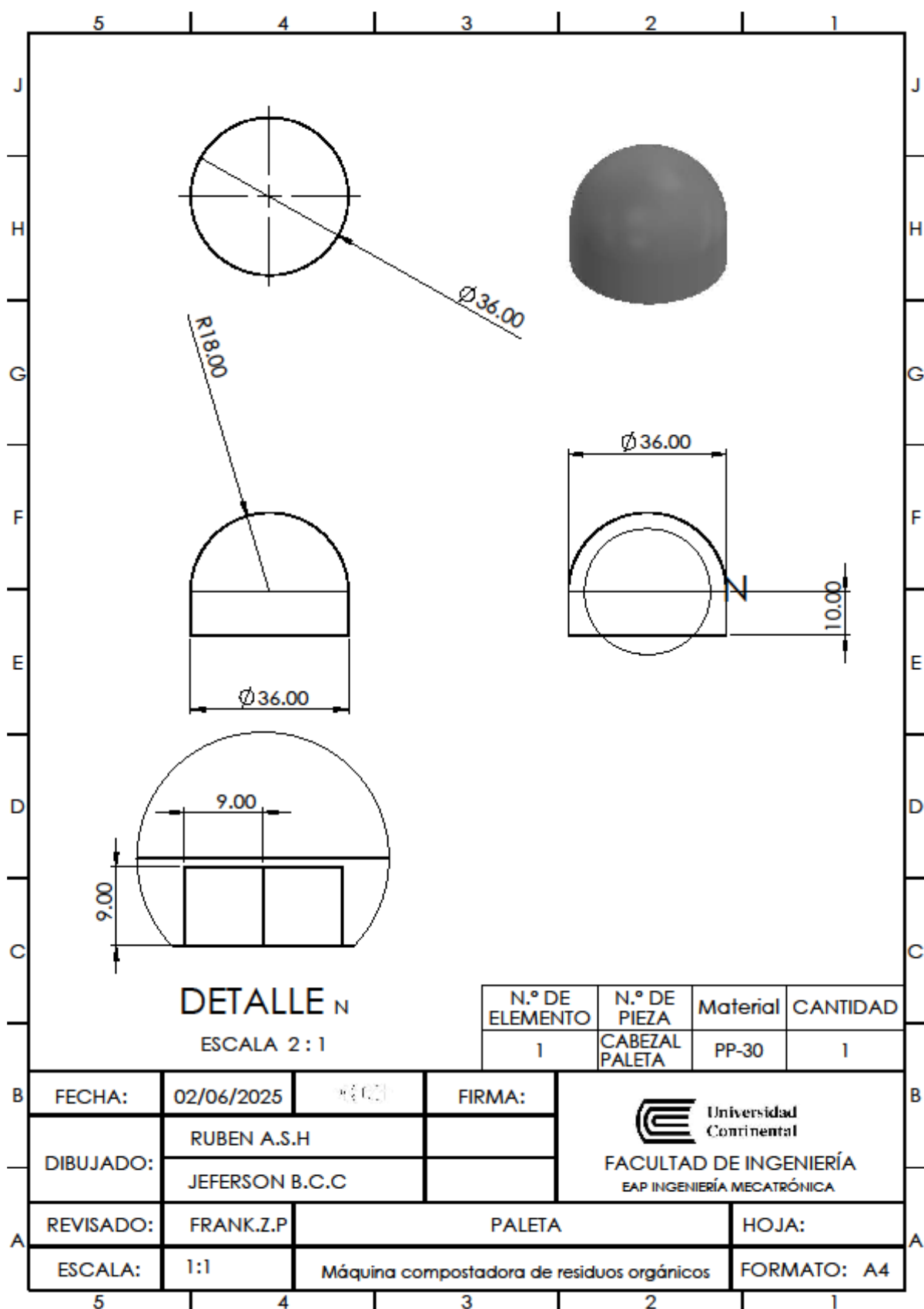


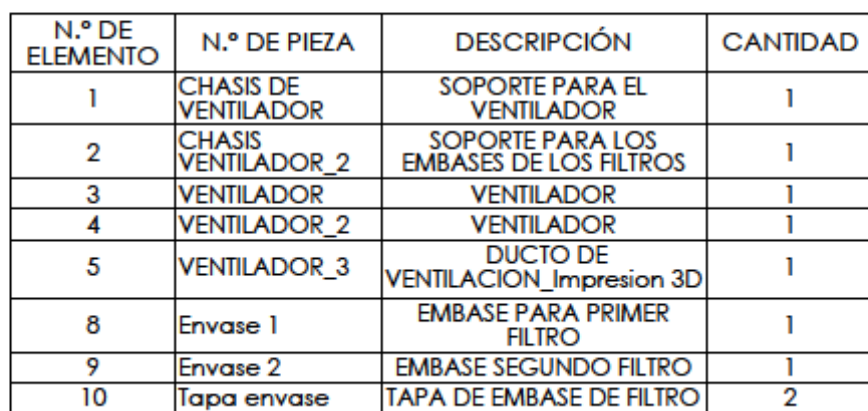


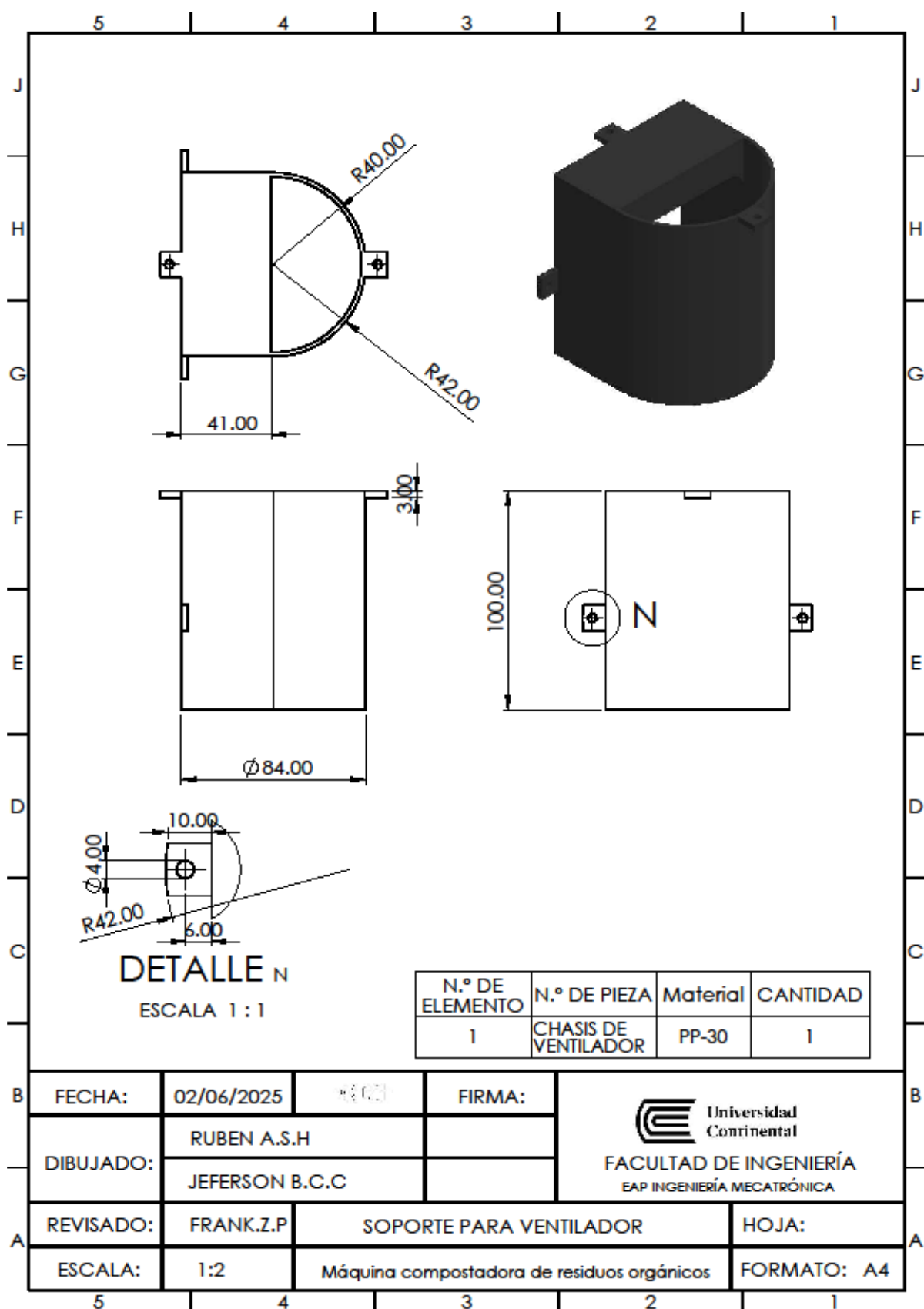


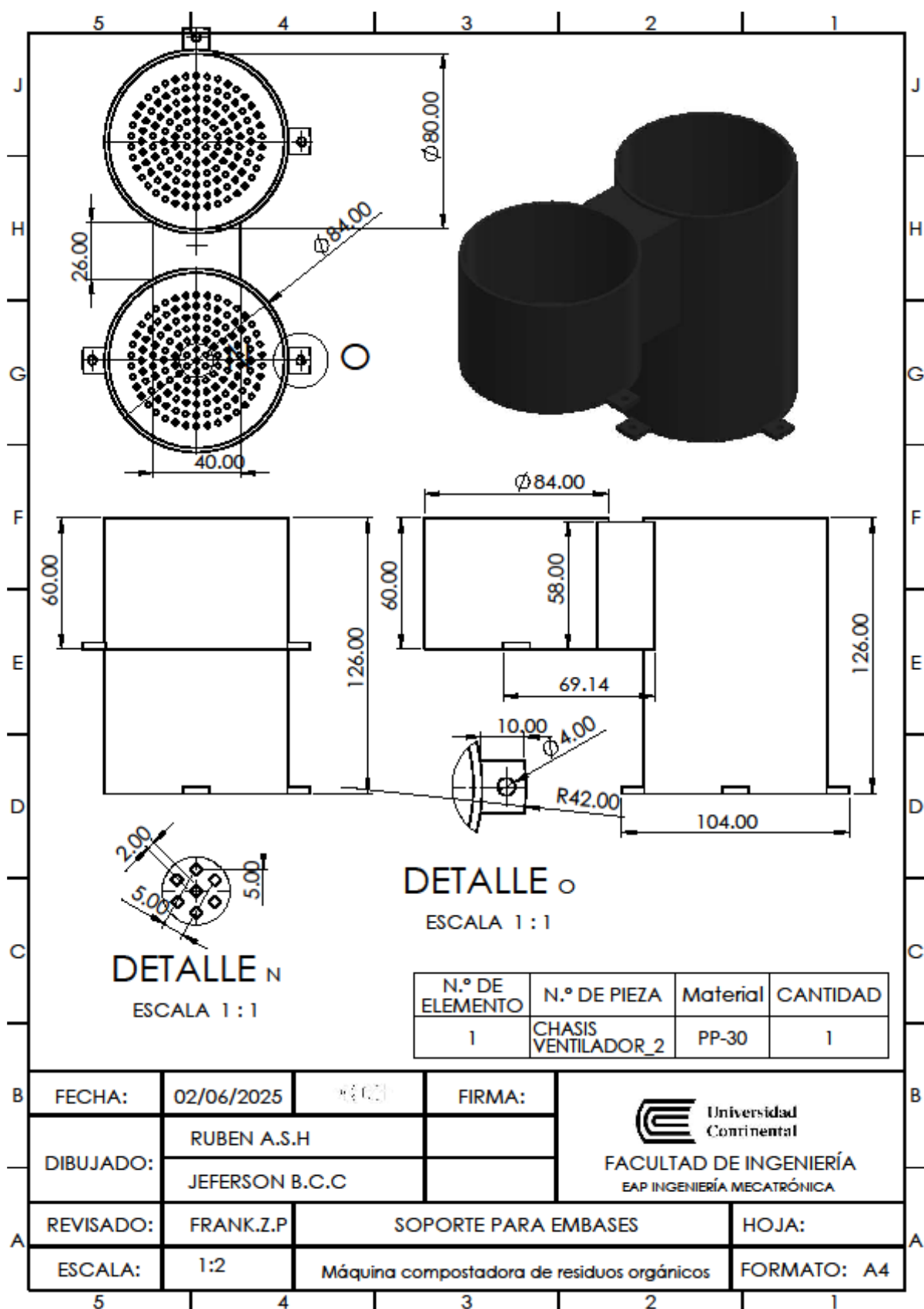


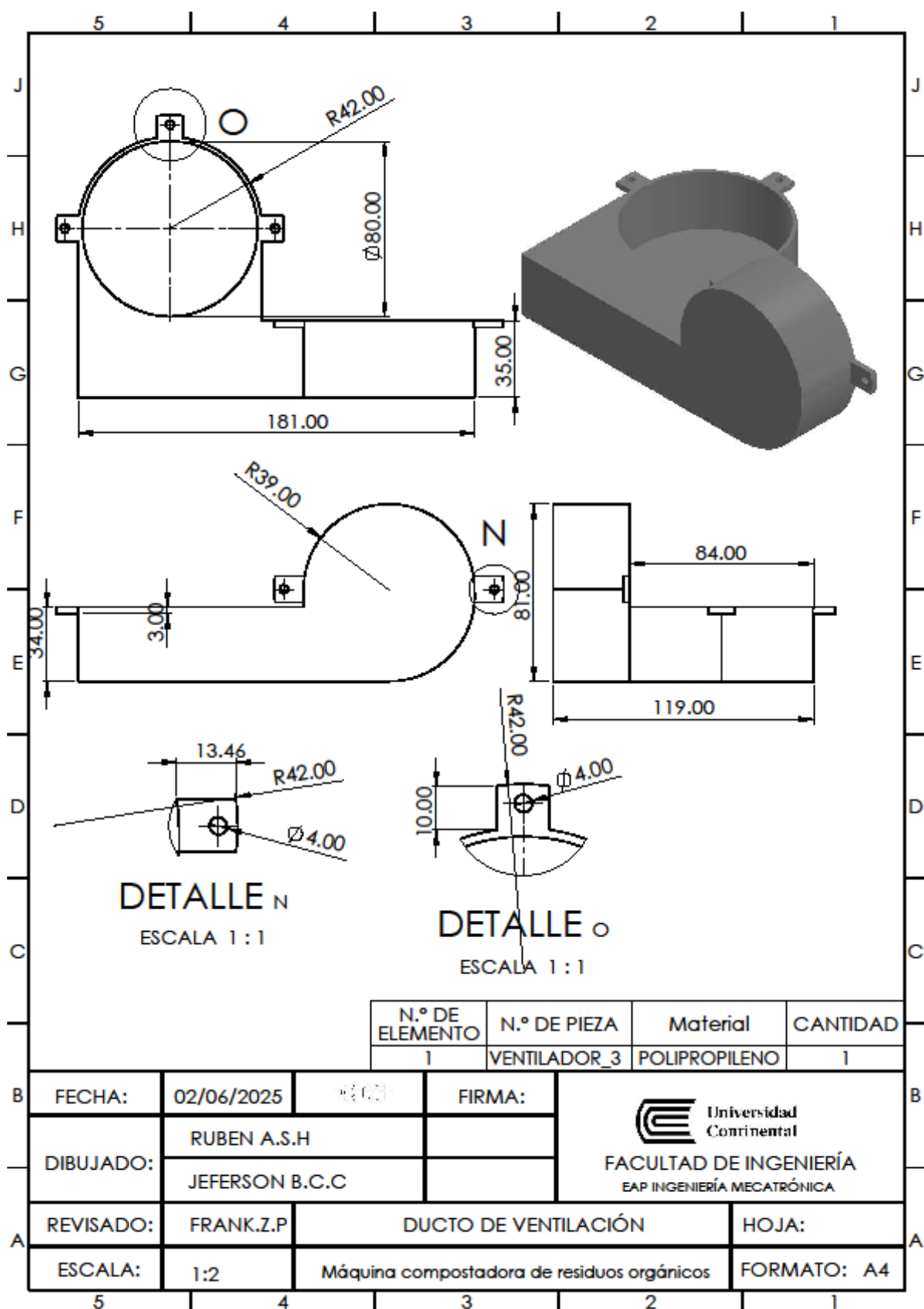


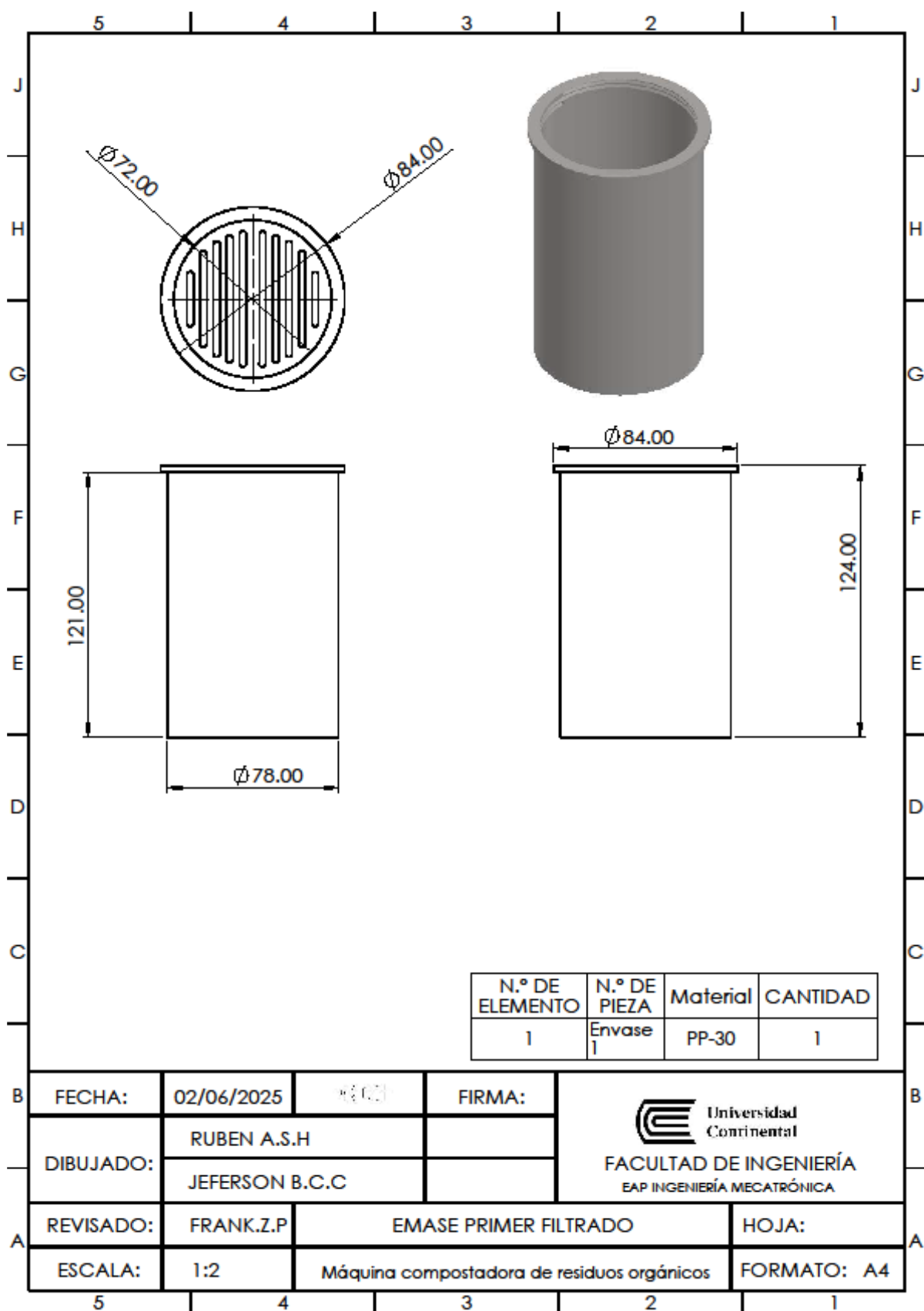


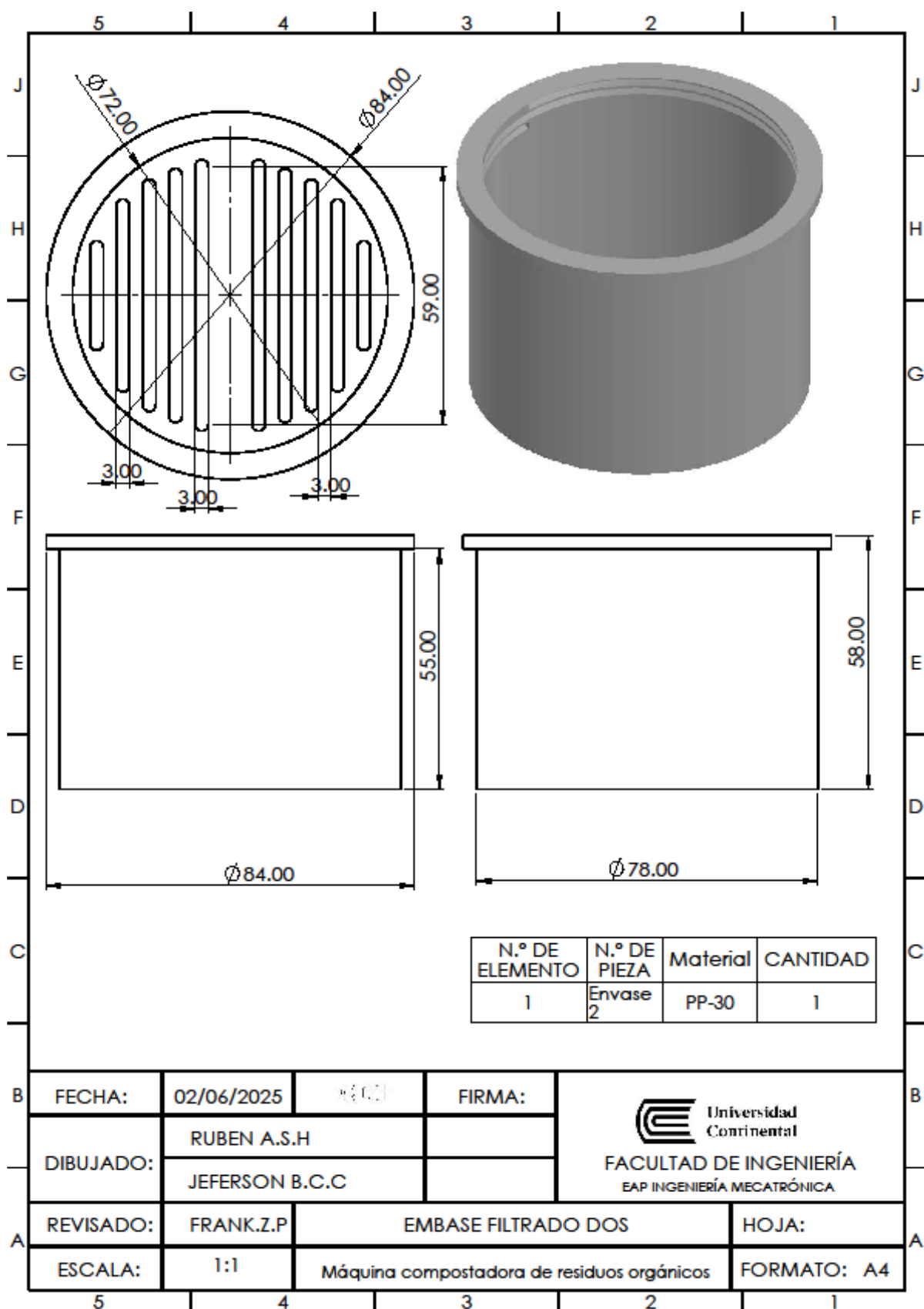
240

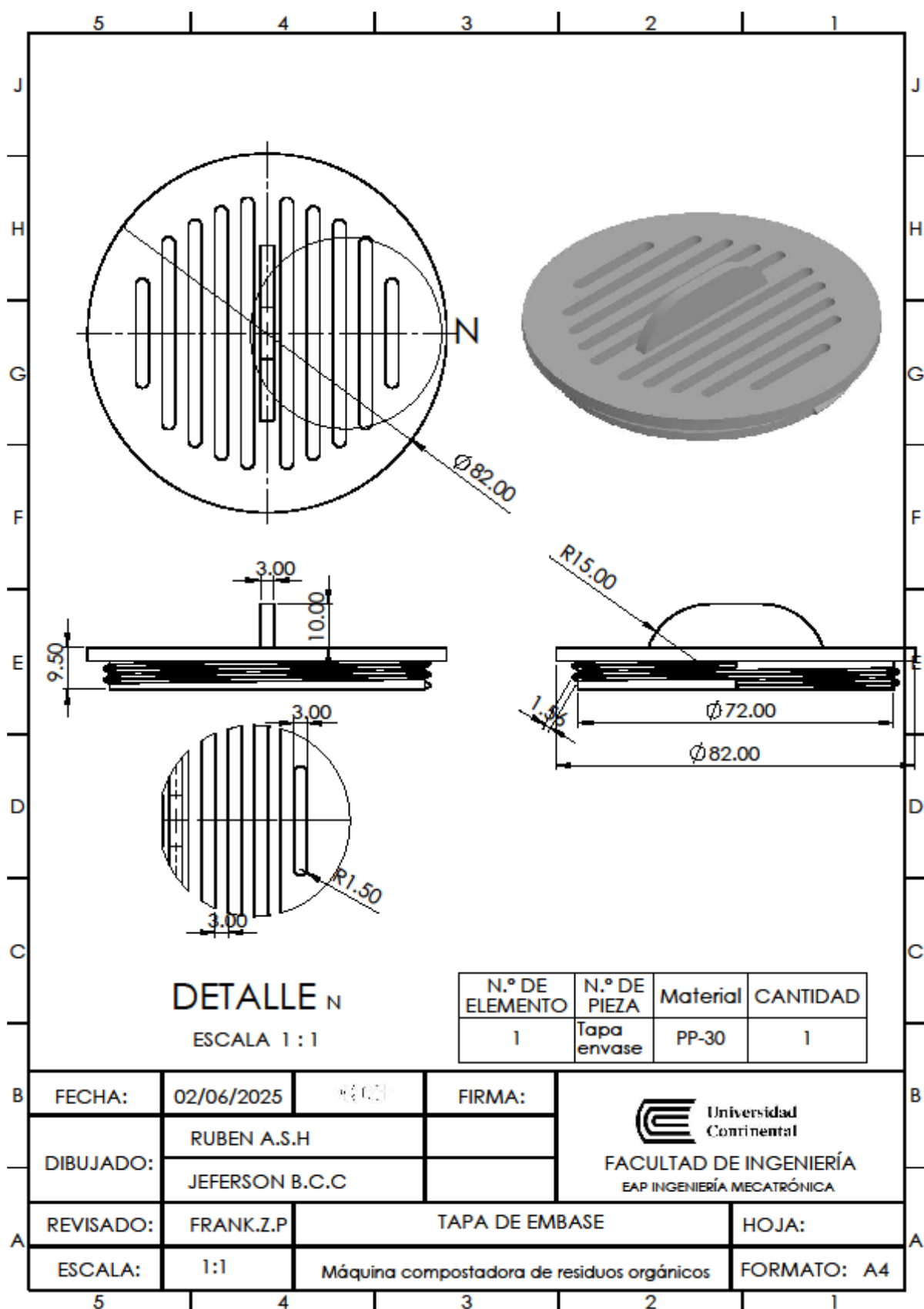


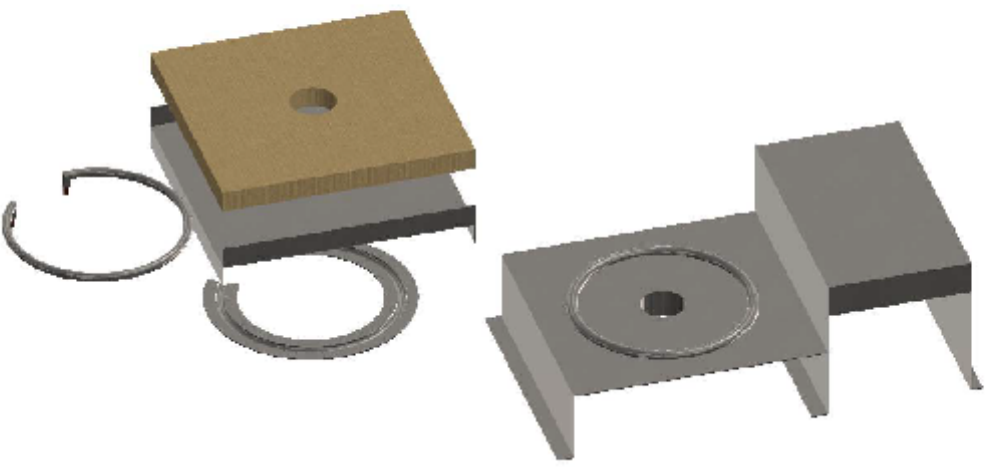






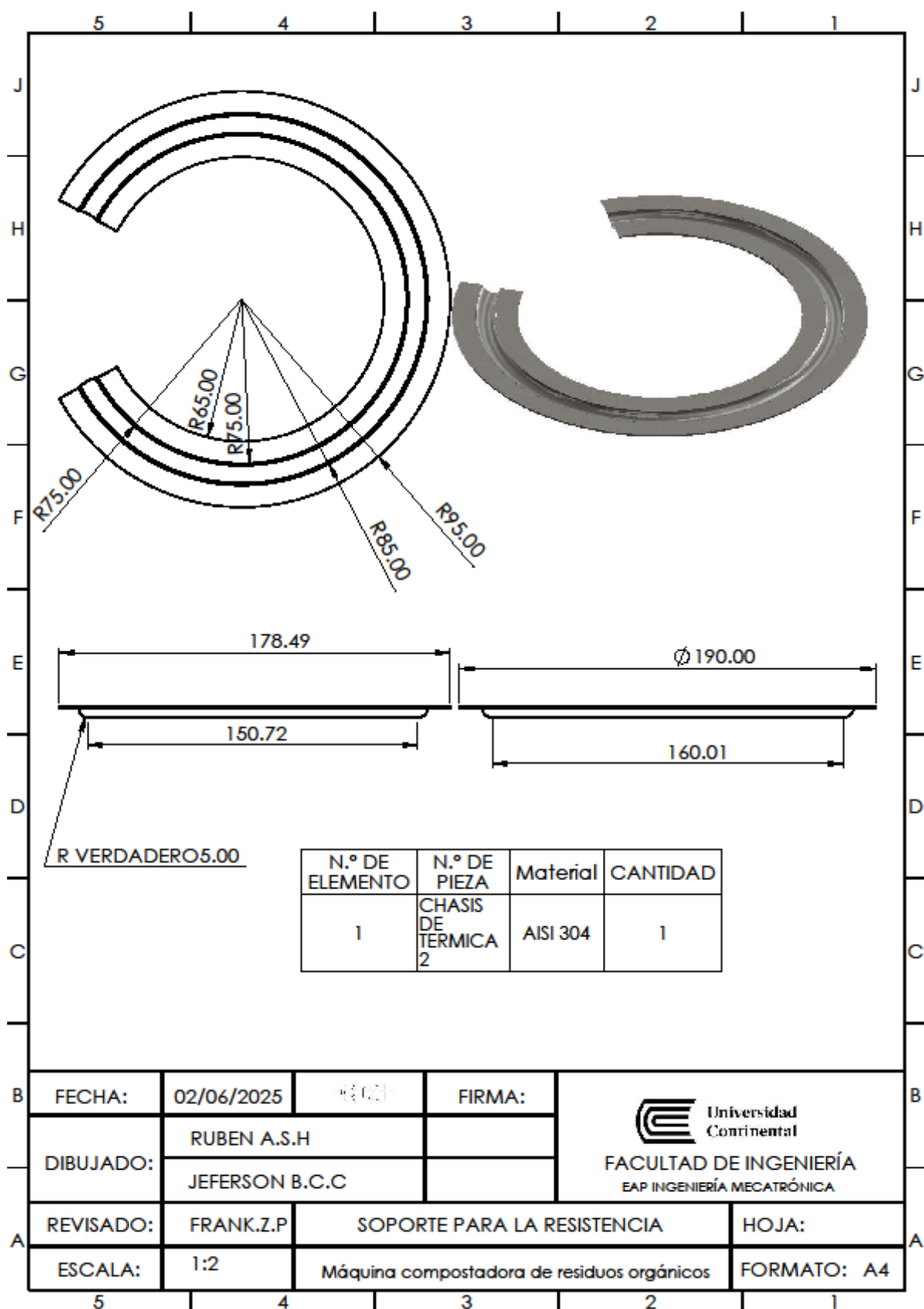


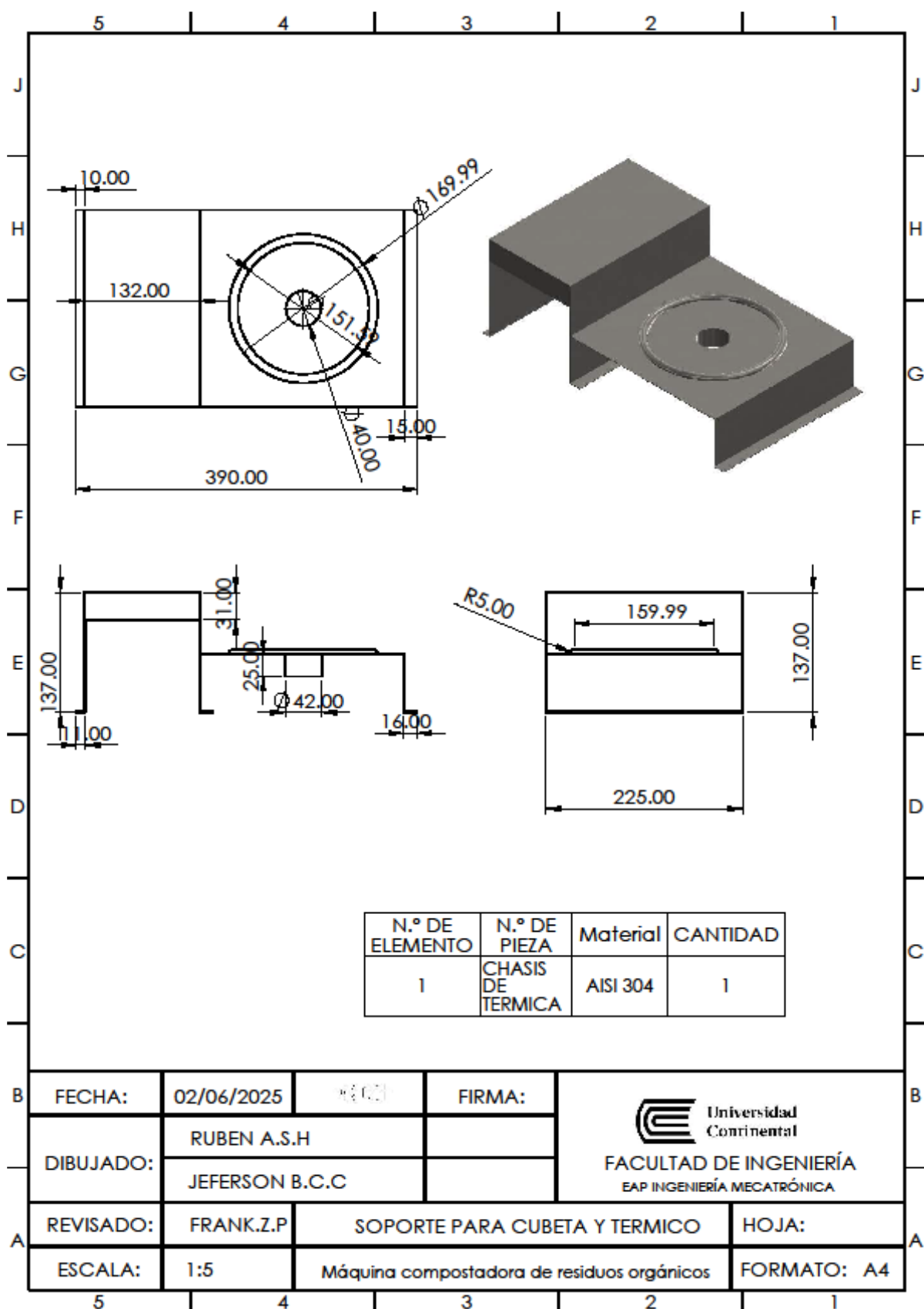


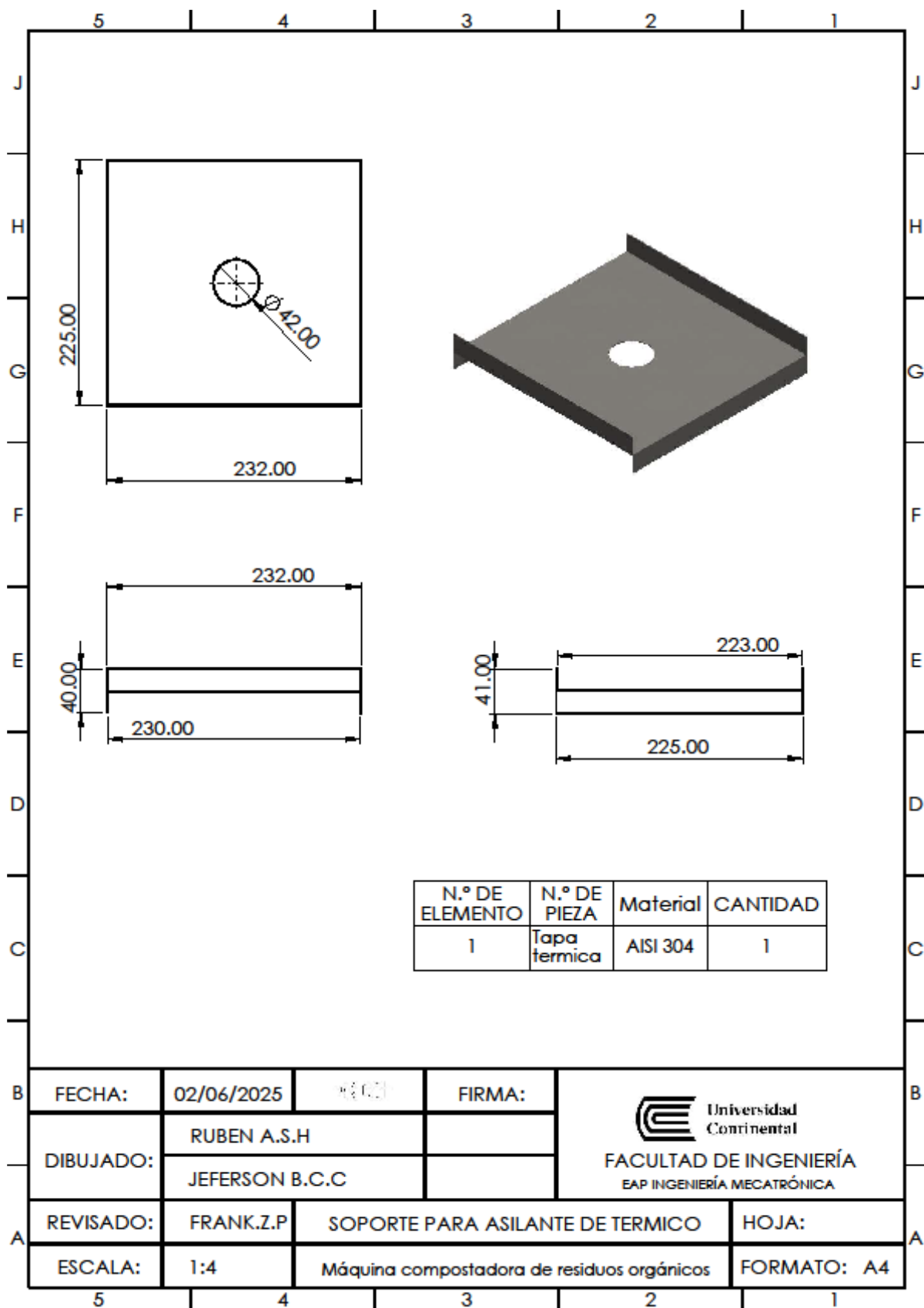
		5	4	3	2	1	
J							J
H							
G							
F							
E							
D							
C							
B							
A							
		5	4	3	2	1	

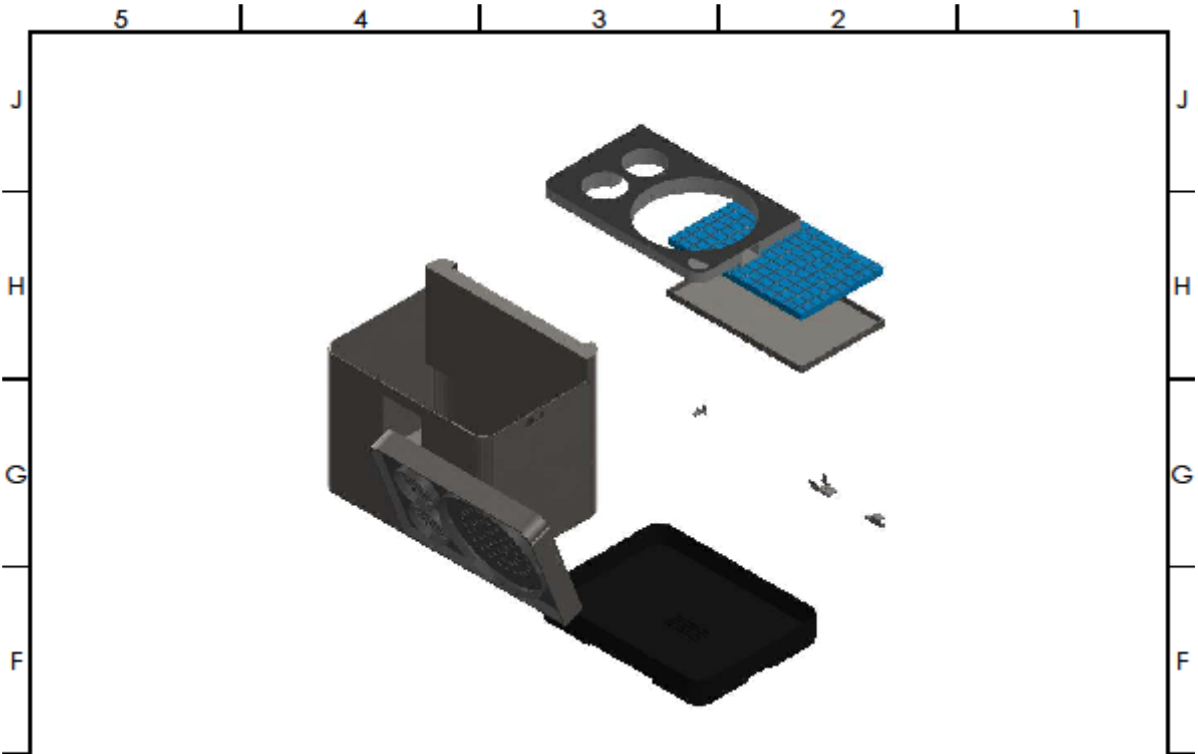
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	CHASIS DE TERMICA 2	SOPORTE PARA LA RESISTENCIA	1
2	RESISTENCIA ELECTRICA	RESISTENCIA PARA TEMPERATURA	1
3	CHASIS DE TERMICA	SOPORTE PARA CUBETA Y TERMICA	1
4	Tapa termica	SOPORTE PARA AISLANTE TERMICO	1
5	AISLANTE_CUA	AISLANTE PARA LA RESISTENCIA	1

FECHA:	02/06/2025	RECIBIDO:	FIRMA:	 Universidad Continental FACULTAD DE INGENIERÍA EAP INGENIERÍA MECATRÓNICA
DIBUJADO:	RUBEN A.S.H			
	JEFERSON B.C.C			
REVISADO:	FRANK.Z.P	SISTEMA TERMICO		HOJA:
ESCALA:	1:5	Máquina compostadora de residuos orgánicos		FORMATO: A4



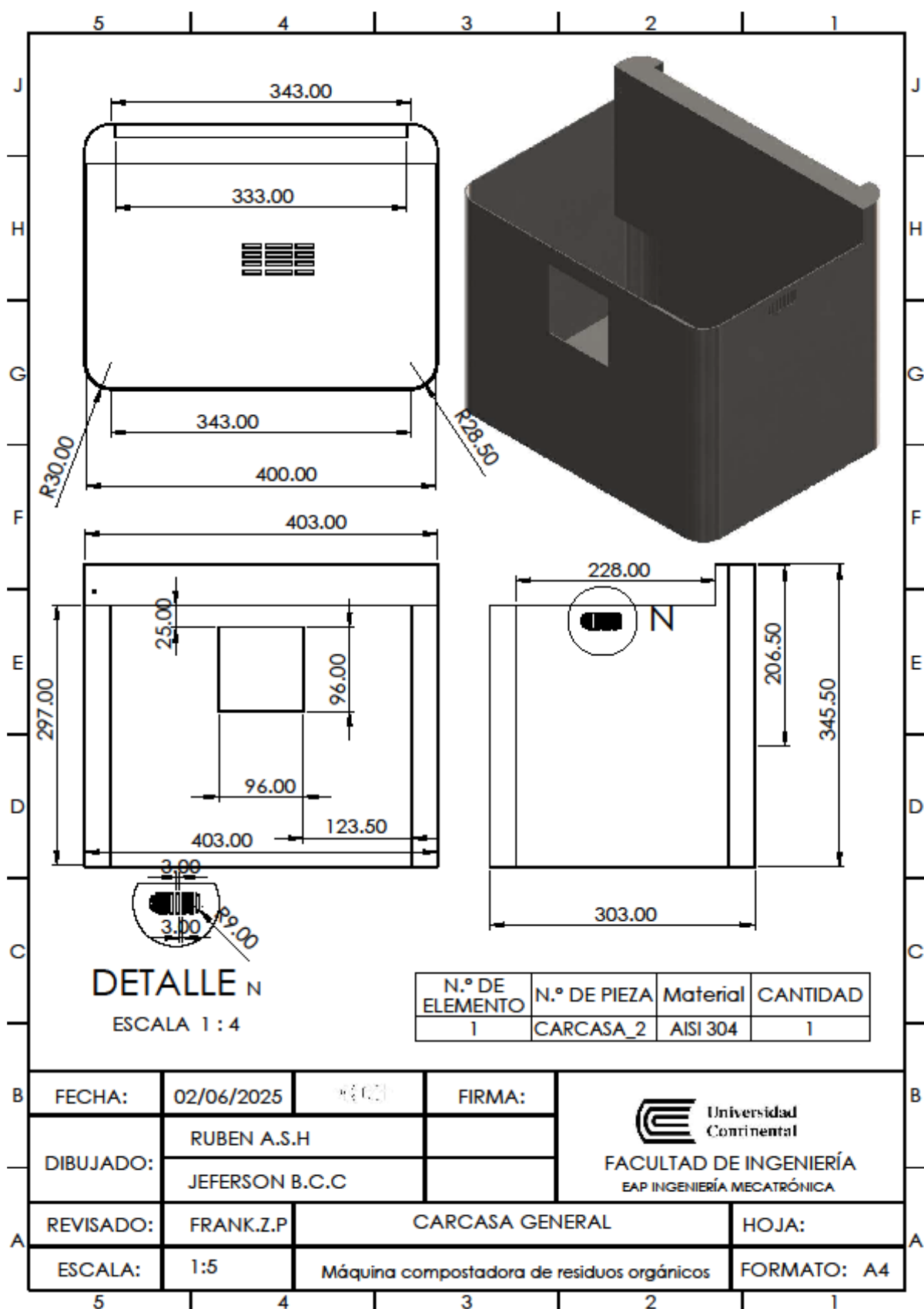


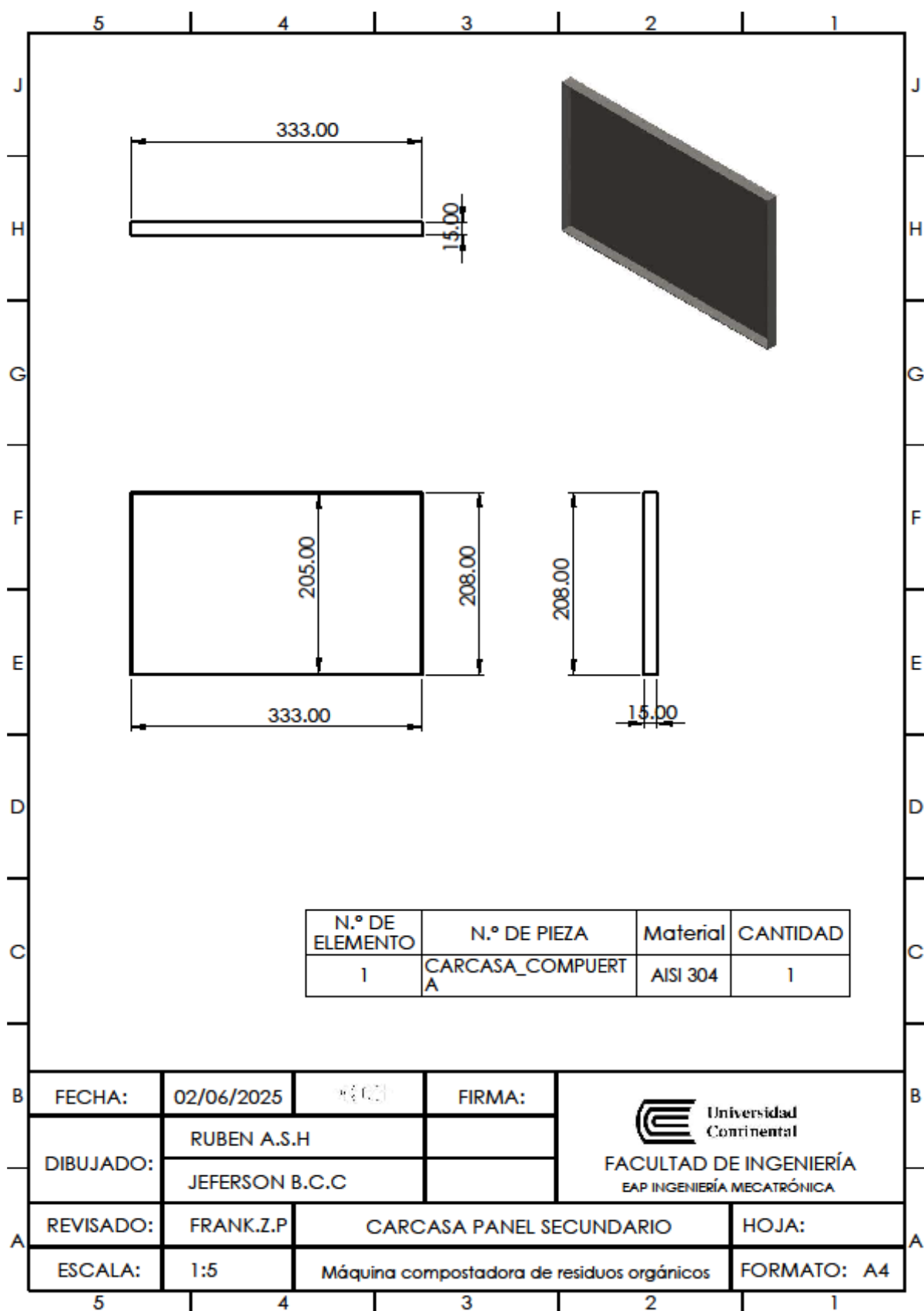


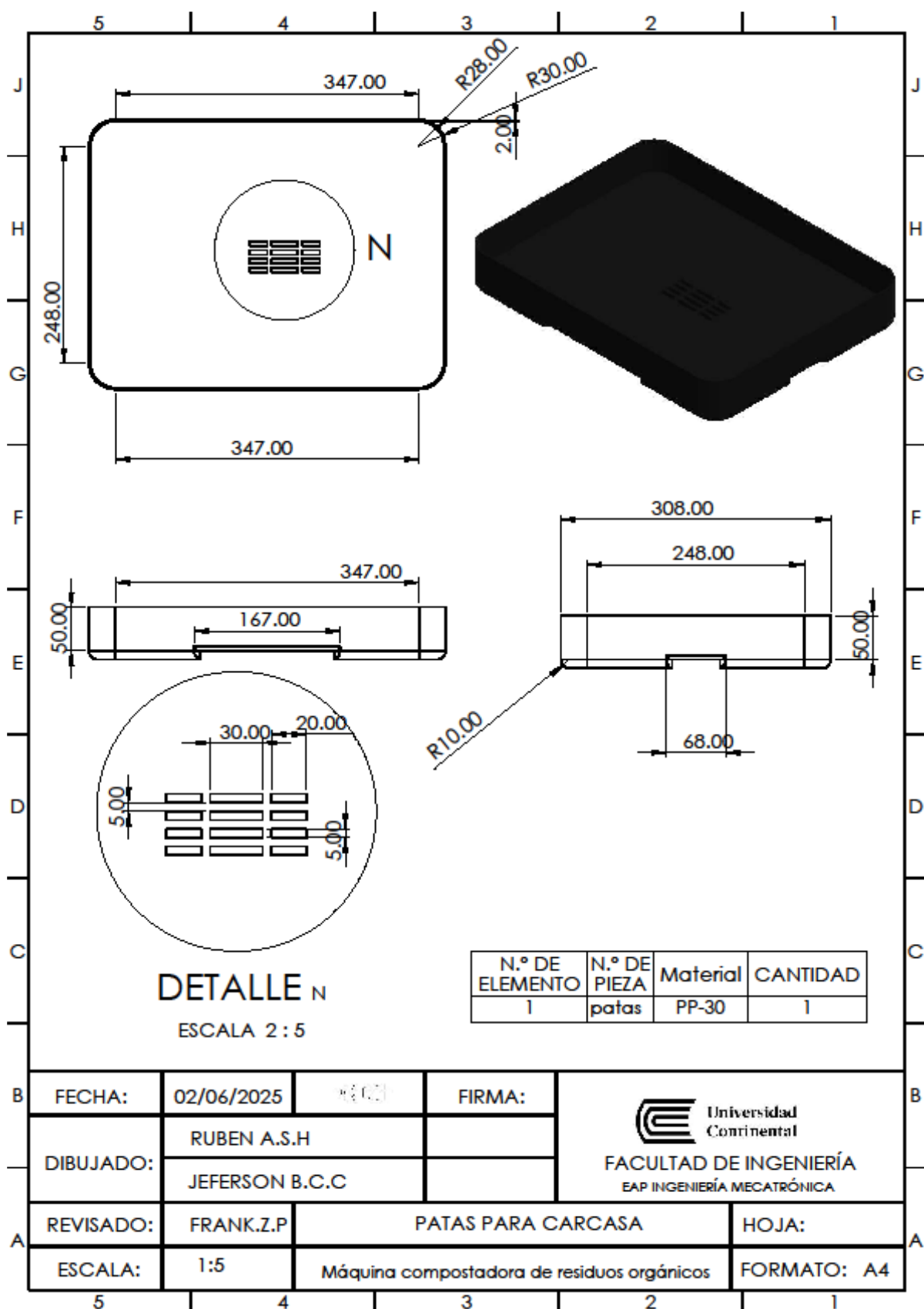


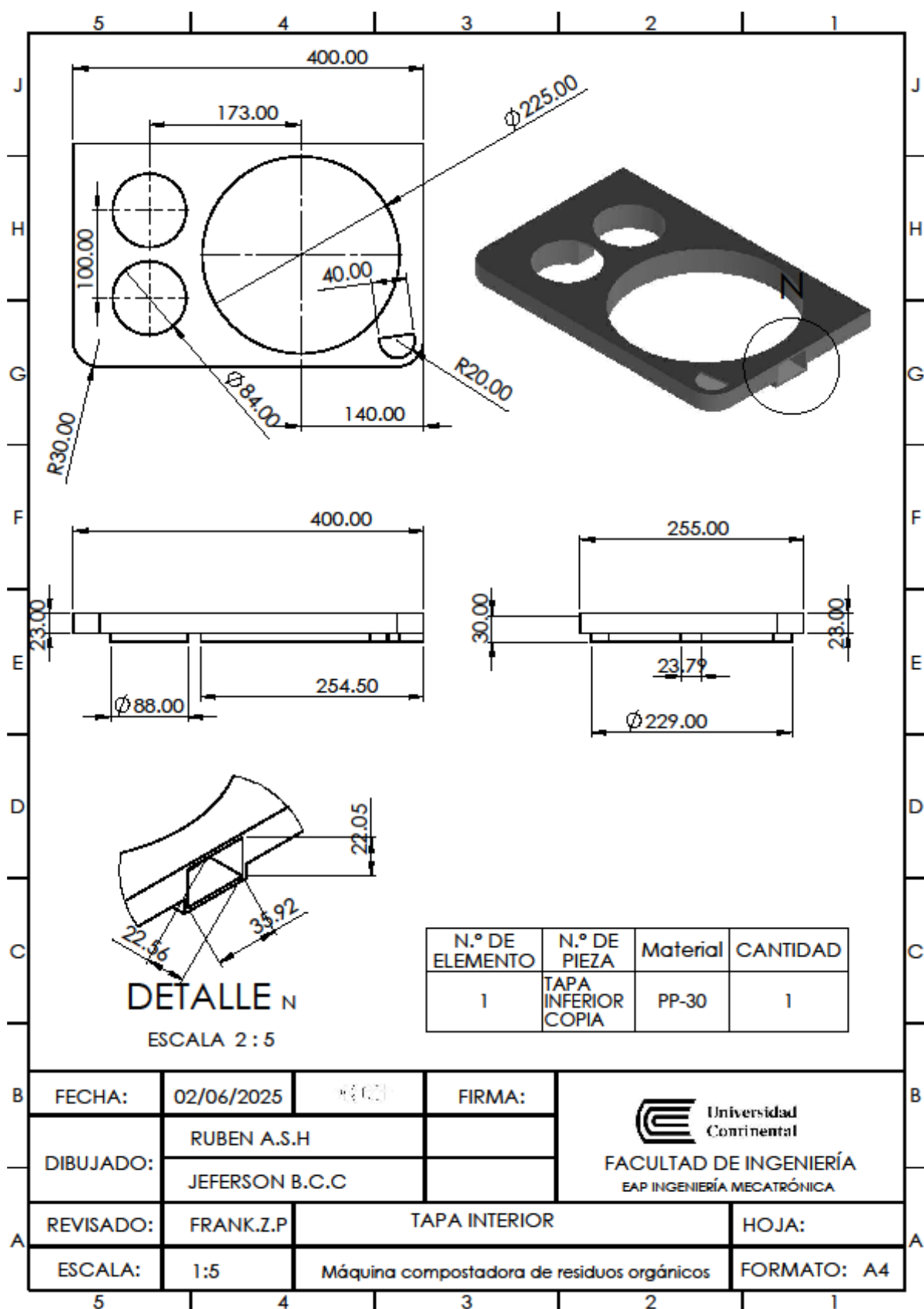
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	CARCASA_2	CARCASA GENERAL	1
2	CARCASA_COMPUERTA	SOPORTE PARA PANEL SECUNDARIO	1
3	PANEL	PANEL SECUNDARIO	1
4	BISAGRAS PANEL 2^CARCASA COMPLETA	BISAGRAS PARA PANEL SECUNDARIO	1
5	BISAGRA PANEL 1^CARCASA COMPLETA	BISAGRAS PARA PANEL PRIMARIO	1
6	patas	PATAS PARA TODO EL ENSAMBLE	1
7	TAPA INFERIOR COPIA	TAPA INTERIOR SEPARADOR	1
8	TAPA SUPERIOR CON PANEL	TAPA SUPERIOR CON PANEL SOLAR	1

B	FECHA:	02/06/2025		FIRMA:	 Universidad Continental FACULTAD DE INGENIERÍA EAP INGENIERÍA MECATRÓNICA	B
	DIBUJADO:	RUBEN A.S.H				
		JEFERSON B.C.C				
A	REVISADO:	FRANK.Z.P	ENSAMBLE DE CARCASAS CON PANELES		HOJA:	A
	ESCALA:	1:5	Máquina compostadora de residuos orgánicos		FORMATO: A4	
	5	4	3	2	1	





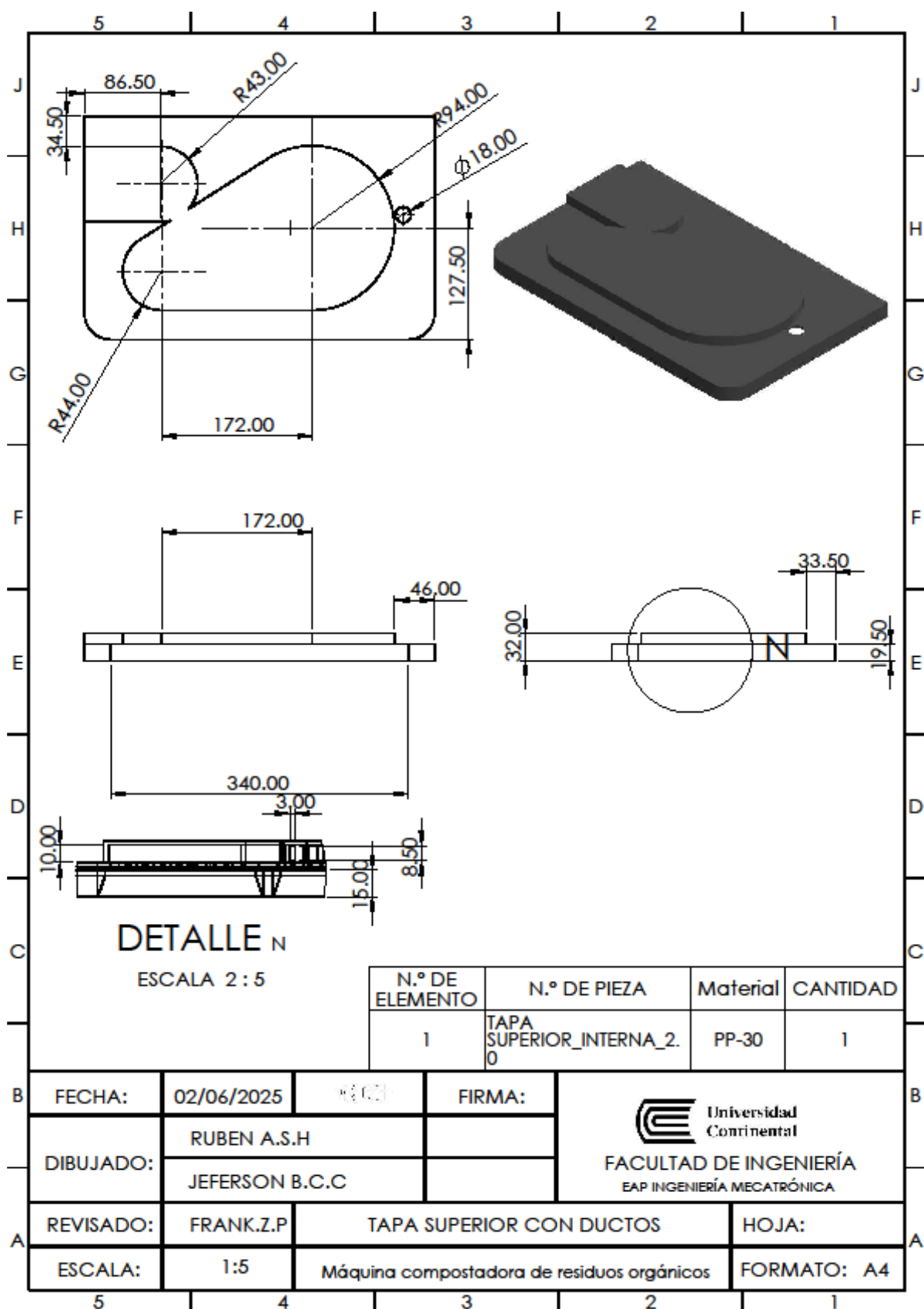


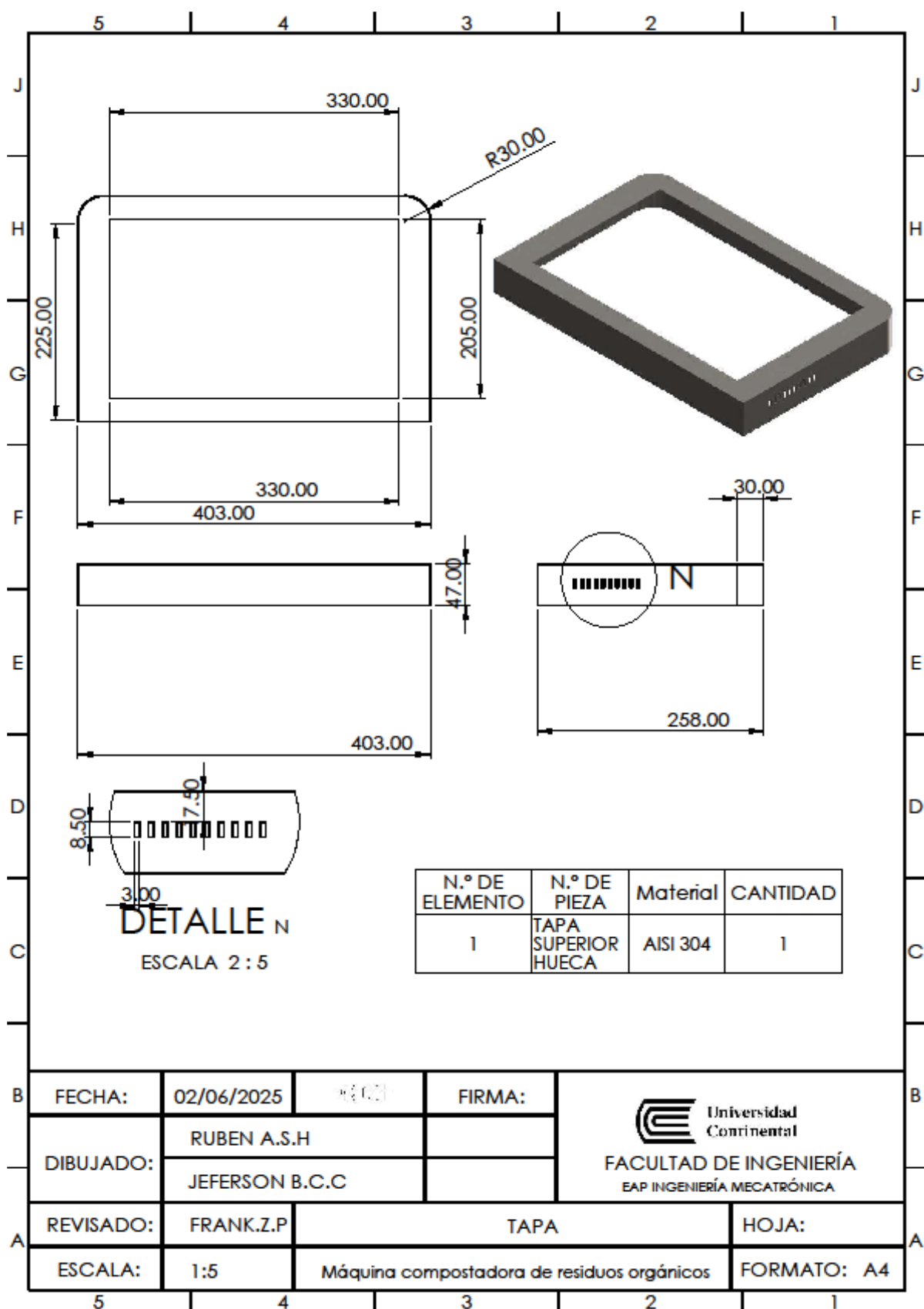


	5	4	3	2	1	
J						J
H						
G						
F						
E						
D						
C						
B						
A						
						5

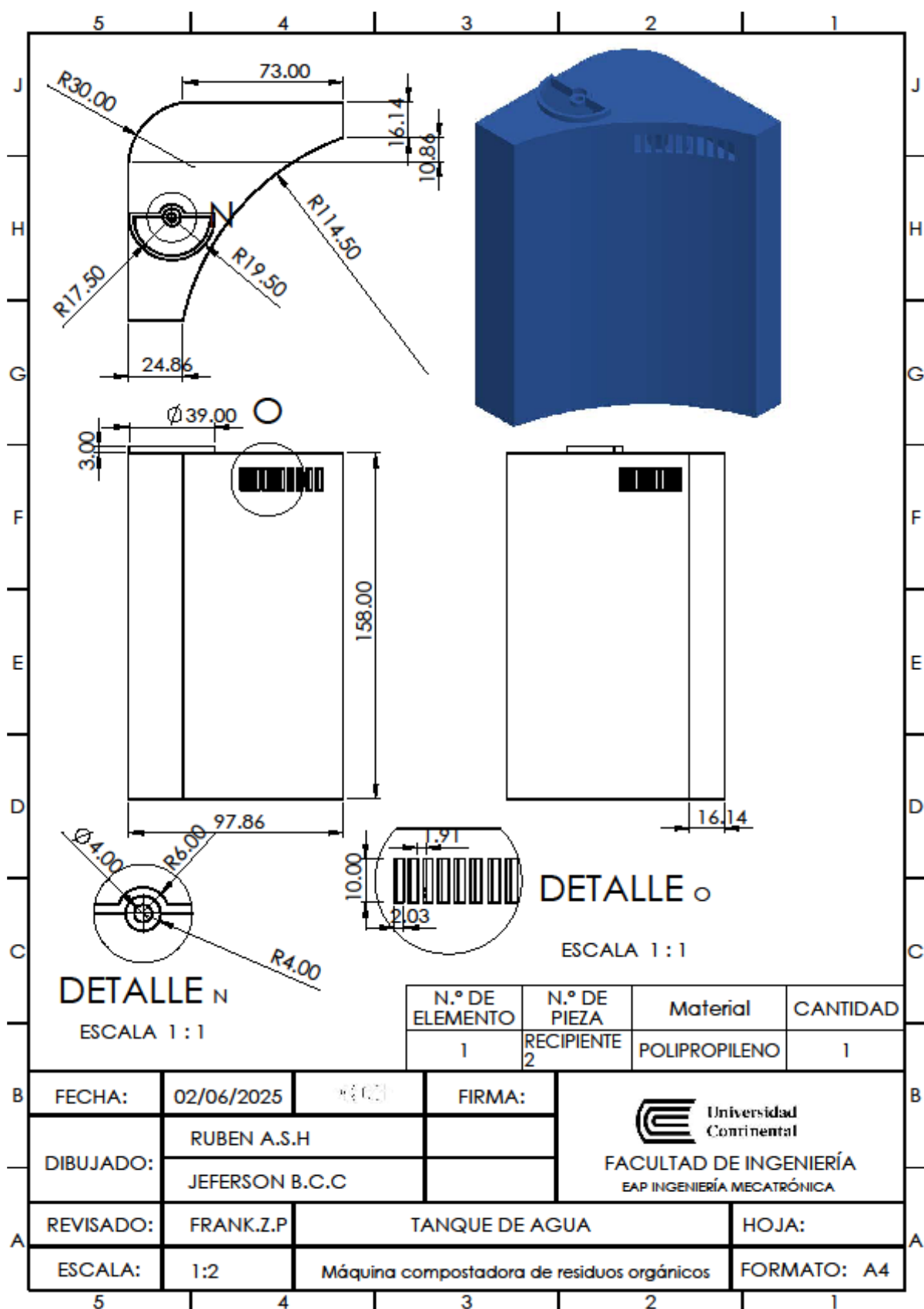
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	TAPA SUPERIOR_INTERNA_2.0	TAPA SUPERIOR CON DUCTOS	1
2	TAPA SUPERIOR HUECA	TAPA PARA PANEL	1
3	PANEL	PANEL SECUNDARIO	1

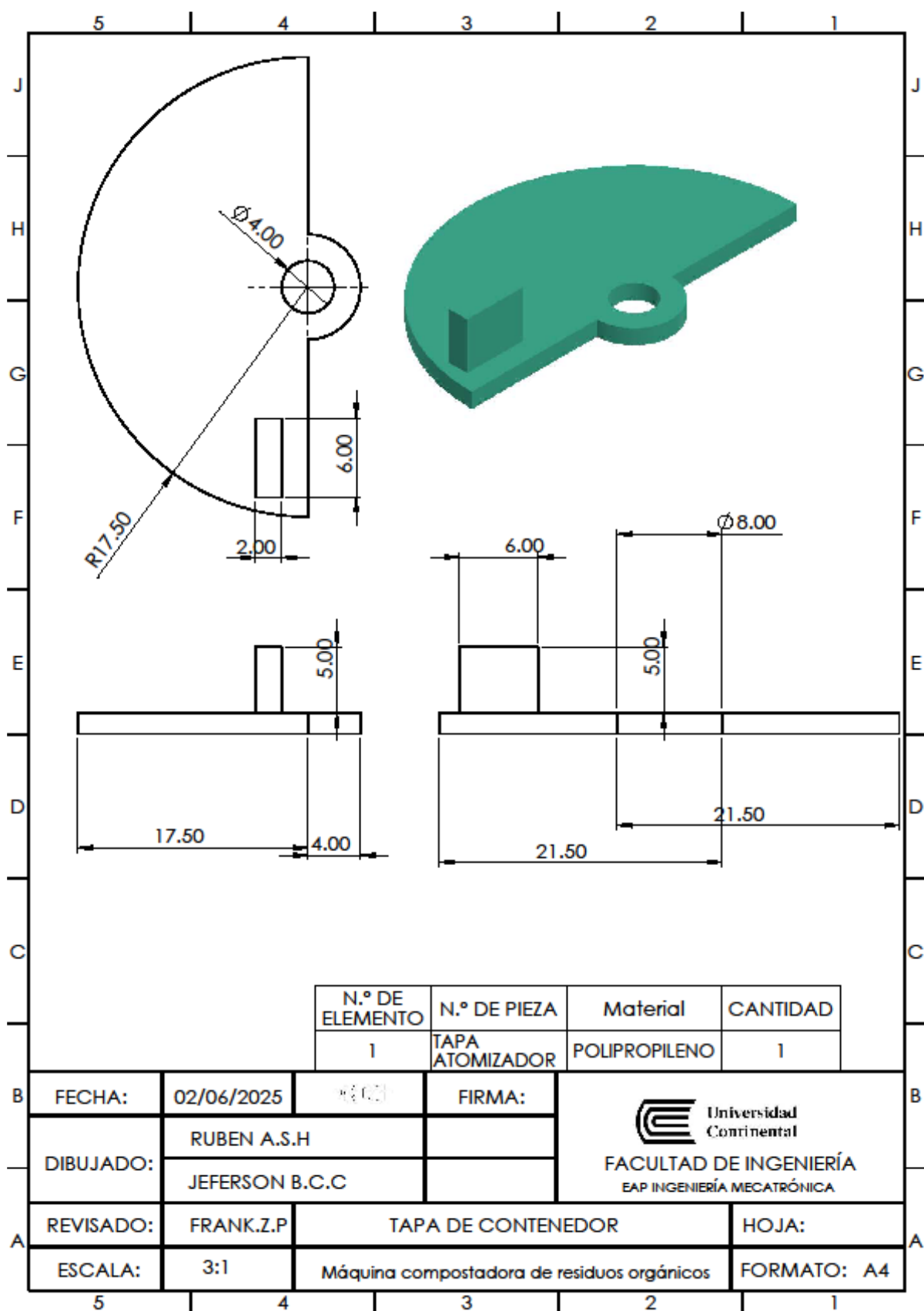
B	FECHA:	02/06/2025		FIRMA:	 Universidad Continental FACULTAD DE INGENIERÍA EAP INGENIERÍA MECATRÓNICA	B	
	DIBUJADO:	RUBEN A.S.H					
		JEFERSON B.C.C					
	REVISADO:	FRANK.Z.P	TAPA			HOJA:	A
	ESCALA:	1:5	Máquina compostadora de residuos orgánicos			FORMATO: A4	
	5	4	3	2	1		

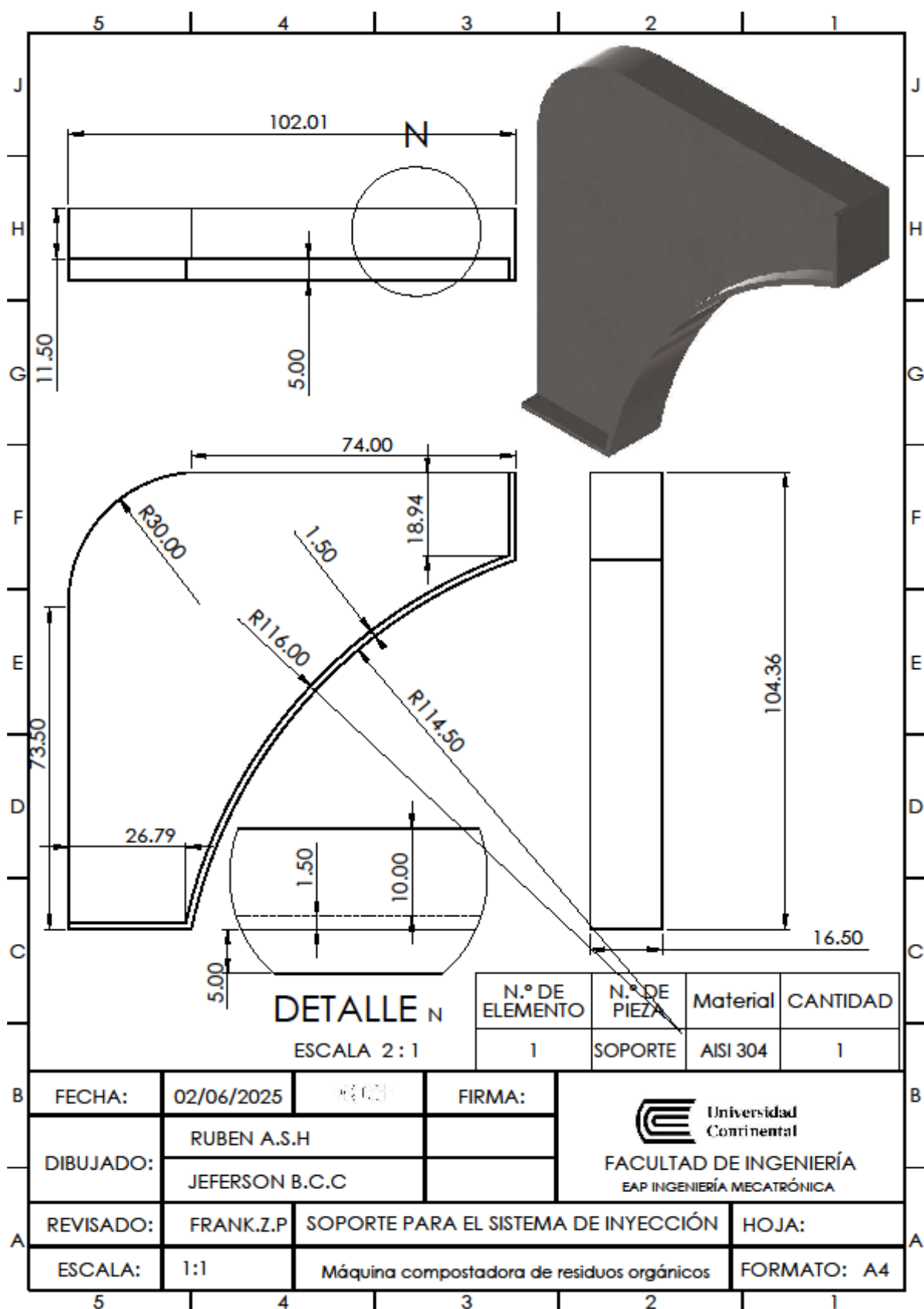




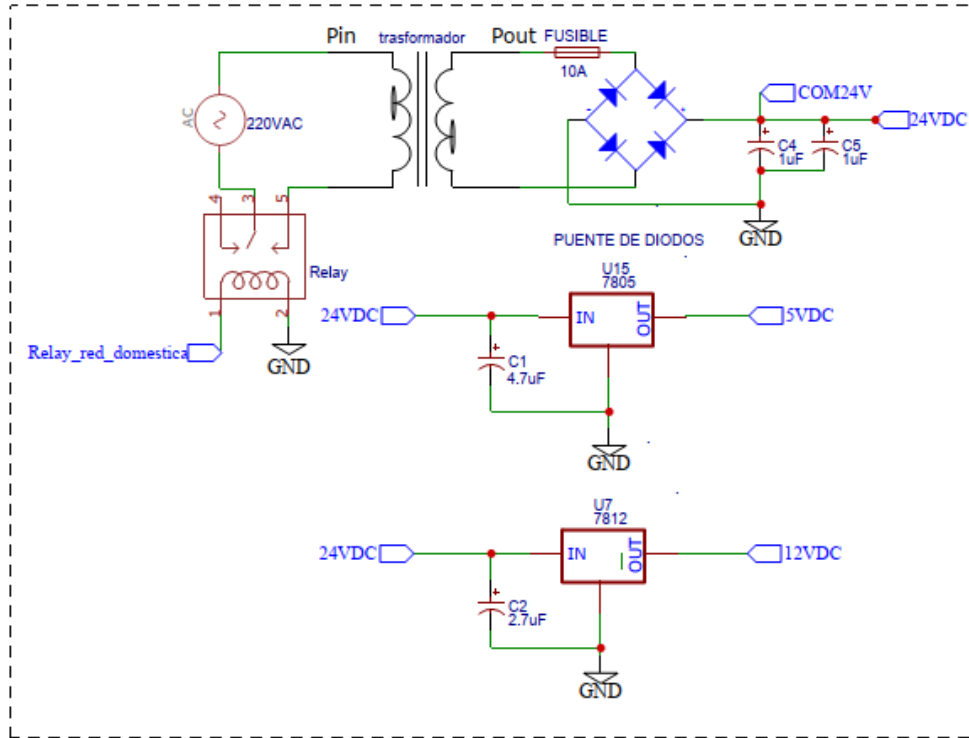
		5	4	3	2	1																												
J							J																											
H							H																											
G							G																											
F							F																											
E							E																											
D	<table border="1"> <thead> <tr> <th>N.º DE ELEMENTO</th> <th>N.º DE PIEZA</th> <th>DESCRIPCIÓN</th> <th>CANTIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>RECIPIENTE 2</td> <td>Tanque de agua</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>SOPORTE ATOMIZADOR</td> <td>SOPORTE DE ATOMIZADOR</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>ATOMIZADOR</td> <td>ATOMIZADOR ULTRASONICO</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>TAPA ATOMIZADOR</td> <td>TAPA PARA CONTENEDOR DE AGUA</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>REMACHE</td> <td>REMACHE</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>SOPORTE</td> <td>SOPORTE PARA EL SISTEMA DE INYECCIÓN</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>HISOPO</td> <td>HISOPO PARA ATOMIZADOR</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	1	RECIPIENTE 2	Tanque de agua	1	2	SOPORTE ATOMIZADOR	SOPORTE DE ATOMIZADOR	1	3	ATOMIZADOR	ATOMIZADOR ULTRASONICO	1	4	TAPA ATOMIZADOR	TAPA PARA CONTENEDOR DE AGUA	1	5	REMACHE	REMACHE	1	6	SOPORTE	SOPORTE PARA EL SISTEMA DE INYECCIÓN	1	7	HISOPO	HISOPO PARA ATOMIZADOR	1	D
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD																															
1	RECIPIENTE 2	Tanque de agua	1																															
2	SOPORTE ATOMIZADOR	SOPORTE DE ATOMIZADOR	1																															
3	ATOMIZADOR	ATOMIZADOR ULTRASONICO	1																															
4	TAPA ATOMIZADOR	TAPA PARA CONTENEDOR DE AGUA	1																															
5	REMACHE	REMACHE	1																															
6	SOPORTE	SOPORTE PARA EL SISTEMA DE INYECCIÓN	1																															
7	HISOPO	HISOPO PARA ATOMIZADOR	1																															
C		C																																
B	<table border="1"> <tr> <td>FECHA:</td> <td>02/06/2025</td> <td>RECIBIDO</td> <td>FIRMA:</td> <td rowspan="3">  Universidad Continental FACULTAD DE INGENIERÍA EAP INGENIERÍA MECATRÓNICA </td> </tr> <tr> <td rowspan="2">DIBUJADO:</td> <td>RUBEN A.S.H</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>JEFERSON B.C.C</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>REVISADO:</td> <td>FRANK.Z.P</td> <td colspan="2">ATOMIZADOR DE INYECCIÓN</td> <td>HOJA:</td> </tr> <tr> <td>ESCALA:</td> <td>1:2</td> <td colspan="2">Máquina compostadora de residuos orgánicos</td> <td>FORMATO: A4</td> </tr> </table>	FECHA:	02/06/2025	RECIBIDO	FIRMA:	 Universidad Continental FACULTAD DE INGENIERÍA EAP INGENIERÍA MECATRÓNICA	DIBUJADO:	RUBEN A.S.H			JEFERSON B.C.C			REVISADO:	FRANK.Z.P	ATOMIZADOR DE INYECCIÓN		HOJA:	ESCALA:	1:2	Máquina compostadora de residuos orgánicos		FORMATO: A4	B										
FECHA:	02/06/2025	RECIBIDO	FIRMA:	 Universidad Continental FACULTAD DE INGENIERÍA EAP INGENIERÍA MECATRÓNICA																														
DIBUJADO:	RUBEN A.S.H																																	
	JEFERSON B.C.C																																	
REVISADO:	FRANK.Z.P	ATOMIZADOR DE INYECCIÓN		HOJA:																														
ESCALA:	1:2	Máquina compostadora de residuos orgánicos		FORMATO: A4																														
A		A																																
		5	4	3	2	1																												



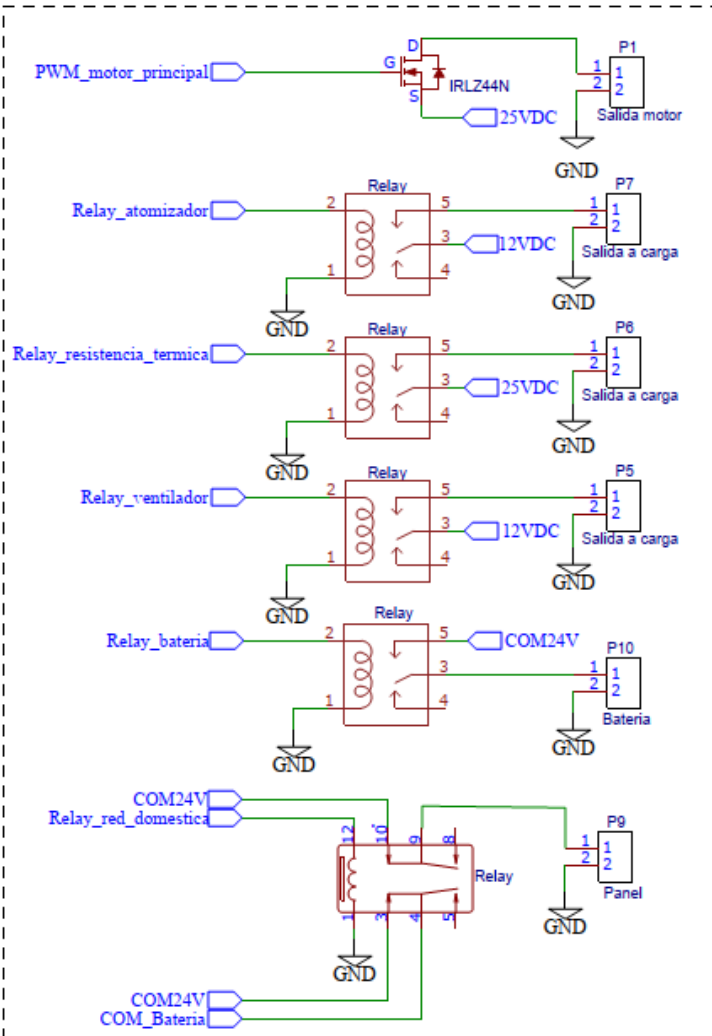




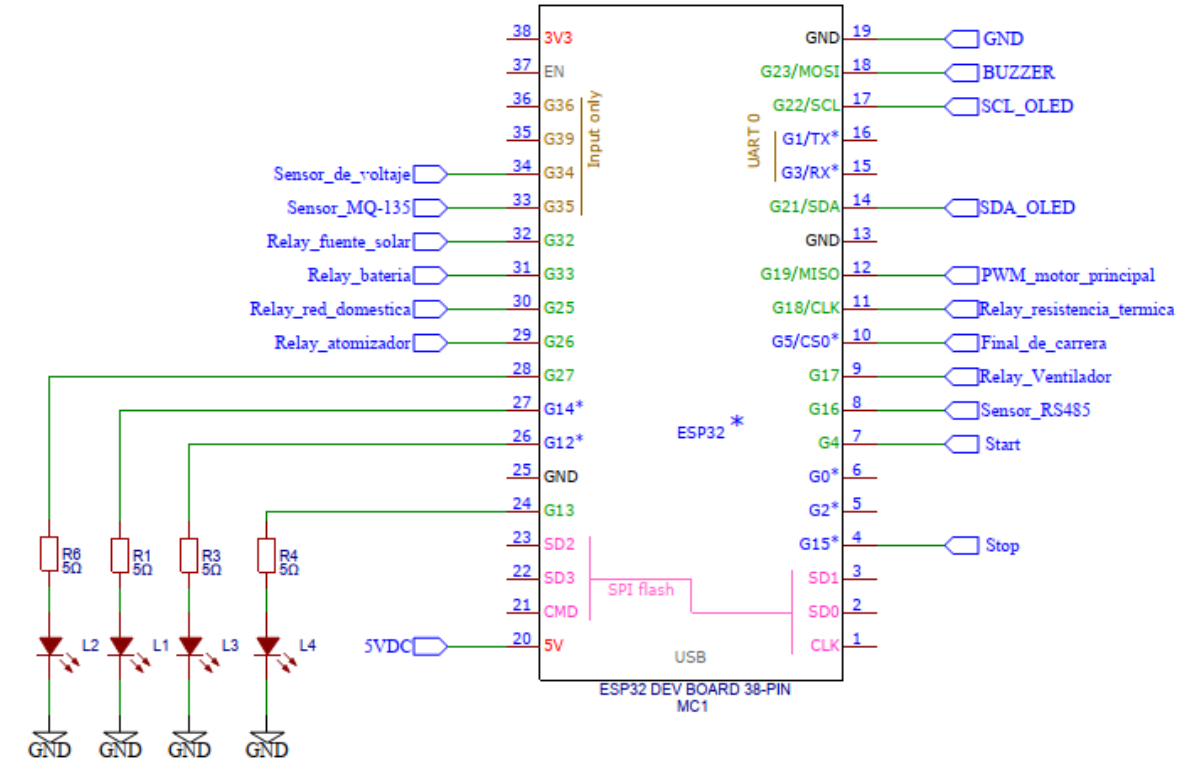
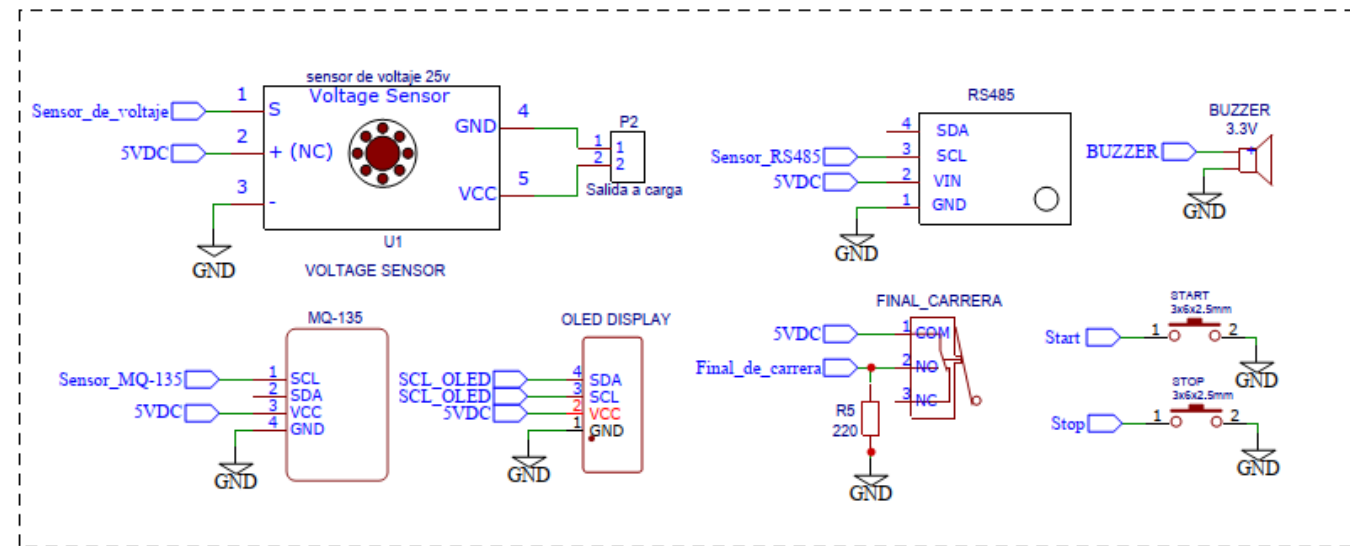
SISTEMA DUAL



ACTUADORES



ENTRADAS



FECHA:	02/06/2025	FIRMA:	 Universidad Continental FACULTAD DE INGENIERÍA EAP INGENIERÍA ELECTRONICA
DIBUJADO:	RUBEN A.S.H JEFFERSON B.C.C		
REVISADO:	FRANK.Z.P	CONEXIÓN GENERAL	HOJA:
		Máquina compostadora de residuos orgánicos	FORMATO: A3