



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TEMA:

“BIODIGESTOR AUTOMTIZADO”

Trabajo de grado previo a la obtención de título de Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Diseño y prototipado

Autor:

Jhony Alexander Pujota Gualsaqui

Director:

Diego Luis Ortiz Morales

Asesor:

Cosme Damián Mejía Echeverria

Ibarra, febrero de 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1726572512		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Pujota Gualsaqui Jhony Alexander		
DIRECCIÓN:	Pichincha, Pedro Moncayo, Tabacundo		
EMAIL:	japujotag@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	022365146	TELÉFONO MÓVIL:	0981294122

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Biodigestor automatizado
AUTOR (ES):	Jhony Alexander Pujota Gualsaqui
FECHA: DD/MM/AAAA	25/02/2026
PROGRAMA:	☒ GRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	Diego Luis Ortiz Morales

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 25. días del mes de febrero de 2026

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Jhony Alexander Pujota Gualsaqui



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 25 de febrero de 2026

MSc. Diego Luis Ortiz Morales

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)

MSc. Diego Luis Ortiz Morales

C.C.: 1758387383



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “BIODIGESTOR AUTOMATIZADO” elaborado por JHONY ALEXANDER PUJOTA GUALSAQUI, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f).....

MSc. Diego Luis Ortiz Morales

C.C.: 1758387383

(f).....

MSc. Cosme Damián Mejía Echeverria

C.C.: 1757898489

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado, en primer lugar, a Dios, fuente de luz, guía y fortaleza en cada etapa de este camino académico y personal.

A mi padre, José Pujota, ejemplo de esfuerzo incansable y de integridad. Gracias por tus consejos oportunos, por enseñarme el valor del trabajo constante y por ser el norte que orienta mi vida profesional.

A mi madre, María Gualsaqui, por su paciencia infinita, su fe inquebrantable en mis capacidades y su amor sin condiciones. Eres símbolo de fortaleza ante la adversidad y el refugio donde siempre encontré paz y consuelo.

A mis hermanos, por la alegría que supieron regalarme en los momentos más difíciles y por el ánimo que se convirtió en un impulso invaluable para seguir adelante.

A mis amigos, compañeros de retos y desvelos, por las largas noches de estudio y trabajo compartidas, por el respaldo y la compañía que hicieron de este proceso una experiencia más enriquecedora.

Finalmente, me dedico este logro a mí mismo, como reconocimiento a la perseverancia, a la firme decisión de no rendirme frente a los obstáculos y al empeño constante que hoy se refleja en la culminación de este sueño académico.

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte, institución que me brindó el espacio y las herramientas necesarias para construir mi camino profesional y crecer tanto en el ámbito académico como en el personal.

A mi tutor, MSc. Diego Ortiz, por su guía constante y su paciencia con la que compartió sus conocimientos. Sus observaciones y sugerencias fueron decisivas para culminar este proyecto con éxito.

De igual manera, extendo mi gratitud al MSc. Cosme Mejía, mi asesor, por su apoyo permanente, su mirada crítica y su disposición para orientarme en cada etapa de este proceso. Su experiencia y acompañamiento fueron un pilar fundamental en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, agradezco a todos los docentes que, de una u otra forma, contribuyeron a mi formación durante estos años de estudio. Cada enseñanza recibida ha dejado una huella significativa en mi preparación profesional y personal.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo el diseño, construcción y validación experimental de un biodigestor automatizado para la obtención de compost a partir de residuos orgánicos domiciliarios. El estudio se desarrolla bajo un enfoque aplicado y experimental, integrando criterios de diseño mecánico, control térmico y automatización mecatrónica. El sistema propuesto incorpora una tolva vertical con mecanismo de trituración y mezclado, controlado mediante un microcontrolador Arduino Mega, el cual gestiona sensores de temperatura y humedad, resistencias térmicas y ventilación forzada, permitiendo operar el proceso en diferentes etapas térmicas. La validación experimental se realizó mediante un ciclo continuo de 31 horas, alcanzando temperaturas máximas de hasta 65 °C, con una reducción del 25 % de la masa inicial de residuos. El compost obtenido presentó un pH de 7.17 y una relación carbono/nitrógeno de 10.5, valores compatibles con un material estabilizado. El consumo energético total del proceso fue de 1.30 kWh por ciclo. Los resultados demuestran la viabilidad técnica de un sistema automatizado de compostaje doméstico, evidenciando que la integración de control térmico y mecánico permite acelerar el proceso con bajo consumo energético, constituyéndose en una alternativa tecnológica replicable y alineada con criterios de sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: Biodigestor automatizado, compostaje doméstico, residuos orgánicos, control de procesos.

ABSTRACT

The objective of this degree project is the design, construction, and experimental validation of an automated biodigester for obtaining compost from domestic organic waste. The study is developed under an applied and experimental approach, integrating criteria of mechanical design, thermal control, and mechatronic automation. The proposed system incorporates a vertical hopper with a crushing and mixing mechanism, controlled by an Arduino Mega microcontroller, which manages temperature and humidity sensors, heating elements, and forced ventilation, allowing the process to operate in different thermal stages. The experimental validation was carried out through a continuous 31-hour cycle, reaching maximum temperatures of up to 65 °C, with a 25% reduction of the initial waste mass. The obtained compost presented a pH of 7.17 and a carbon/nitrogen ratio of 10.5, values compatible with a stabilized material. The total energy consumption of the process was 1.30 kWh per cycle. The results demonstrate the technical viability of an automated domestic composting system, evidencing that the integration of thermal and mechanical control allows accelerating the process with low energy consumption, constituting a replicable technological alternative aligned with environmental sustainability criteria.

Keywords: Automated Biodigester, Domestic Composting, Organic Waste, Process Control.

INDICE DE CONTENIDOS

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	ii
2. CONSTANCIAS.....	iii
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	iv
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INDICE DE CONTENIDOS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 General.....	3
1.2.2 Específicos.....	3
1.3 Alcance y delimitación	3
1.4 Justificación	4

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Bases Teóricas	8
2.2.1 Gestión de residuos orgánicos en Ecuador	8
2.2.2 Biodigestor	9
2.2.3 Aspectos generales del Compost	9
2.2.3.1 Características del compost de calidad	10
2.2.4 Proceso de compostaje.....	11
2.2.4.1 La fase mesófila:.....	12
2.2.4.2 Fase termófila	12
2.2.4.3 Fase de enfriamiento y maduración.....	13
2.2.5 Tipos de Biodigestores automatizados para la producción de compost	14
2.2.5.1 El compostador rotatorio	14
2.2.5.2 Termo compostador	14
2.2.5.3 Compostadores biomecánicos	15
2.2.6 Parámetros de control	16
2.2.5.4 Tamaño de partícula	16
2.2.5.5 Temperatura.....	16
2.2.5.6 Humedad:	17
2.2.5.7 Aireación	17

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO	19
3.1 Enfoque y tipos de investigación	19
3.2 Diseño de la Investigación	19
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS	23
4.1 Especificaciones del sistema.....	23
4.2 Diseño del sistema de biodigestión.....	24
4.2.1 Arquitectura de control	24
4.2.2 Sistema estructural.....	26
4.2.2.1 Geometría del reactor	26
4.2.2.2 Dimensiones de la tolva.....	27
4.2.2.3 Sistema de mezcla y cizallamiento	28
4.2.2.4 Estructura.....	30
4.3 Solución propuesta.....	31
4.4 Especificaciones del Biodigestor Automatizado	31
4.4.1 Metodología para la selección de componentes	31
4.4.2 Sistema de Control	32
4.4.2.1 Selección de Controlador.....	32
4.4.2.2 Arduino mega 2560	34
4.4.2.3 Selección de sensor de temperatura y humedad	35
4.4.2.4 Sensor DHT22.	37

4.4.3	Sistema eléctrico.....	39
4.4.3.1	Calculo potencia para selección de motor	39
4.4.3.2	Selección del Motor.....	43
4.4.3.3	Descripción del motor DC con reductor.....	45
4.4.3.4	Selección mecanismo de seguro de cierre compuerta de ingreso y salida.....	47
4.4.3.5	Descripción cerradura solenoide 12 V	48
4.4.3.6	Selección de resistencias térmicas.....	49
4.4.3.7	Descripción REA016 niquelina de temperatura	51
4.4.3.8	Selección fuente de alimentación para el sistema	52
4.4.3.9	Descripción sistema de alimentación modular	54
4.4.3.10	Gabinete de alojamiento para control y potencia	57
4.4.3.11	Aislante Térmico	58
4.5	Proceso de Construcción.....	59
4.4.1	Fabricación de la estructura modular autoportante.....	59
4.4.2	Fabricación de la Tolva Principal.....	61
4.4.3	Construcción del Sistema de Cizallamiento y Mezcla	62
4.4.4	Fabricación de dispositivo de filtrado	64
4.6	Integración e implementación del sistema.....	65
4.6.1	Programación del Sistema	66
4.6.1.1	Descripción de la Lógica de Control	67

4.6.1.2	Descripción Detallada del Algoritmo Operativo	68
4.6.1.3	Descripción Secuencial de Programación para Bio-Reactor	69
4.6.1.4	Esquema de Conexión de Componentes Electrónicos	71
4.6.2	Implementación del gabinete de control.....	71
4.6.3	Implementación de interfaz de Usuario (HMI)	76
4.6.4	Implementación sistema de aireación.....	76
4.7	Desarrollo de pruebas	77
4.7.1	Metodología y Configuración del Ensayo	78
4.7.2	Ejecución del Ciclo de Compostaje y Recolección de Datos	78
4.7.2.1	Análisis de Balance de Masa y Reducción de Residuos	78
4.7.2.2	Evolución de la Temperatura.....	79
4.7.2.3	Comportamiento de la Humedad Relativa	80
4.7.2.4	Análisis de consumo energético	81
4.7.2.5	Análisis de Potencia y Consumo Energético	83
4.8	Análisis de resultados compost obtenido.....	85
4.8.1	Análisis Organoléptico (Inspección Visual).....	85
4.8.2	Análisis Granulométrico.....	86
4.8.3	Análisis Químico	86
4.9	Análisis de Costos.....	88
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		90

5.1	Conclusiones	90
5.2	Recomendaciones	92
	REFERENCIAS	93
	ANEXOS	104
	Anexo A: Valoración de opciones de unidad de control.....	104
	Anexo B: Valoración de opciones del sensor de temperatura y humedad.	106
	Anexo C: Valoración de opciones de motor.	107
	Anexo D: Valoración de opciones del mecanismo de seguro de cierre	109
	Anexo E: Valoración de opciones de resistencias térmicas.	110
	Anexo F: Valoración de opciones del sistema de alimentación.....	111
	Anexo G: Código programación del Biodigestor Automatizado	113
	Anexo H: Resultados de laboratorio del compost obtenido Reporte No. 897	126
	Anexo I: Juego de tamices de malla 10 mm, 4 mm, 2 mm y 0.08 mm.	127
	Anexo J: Clasificación granulométrica del sustrato final.....	128
	Anexo K: Detalle de costos	129
	Anexo L: Planos del proyecto Biodigestor Automatizado.....	131
	Anexo M: Hojas de Trabajo	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Generación de residuos cada día (Ecuador) [2].	1
Fig. 2.1 Fases del proceso de compostaje[27]	11
Fig. 4.1 Diagrama de bloques de la arquitectura de control.	25
Fig. 4.2 Sistema mezclador y cizallador de paletas geometría escalonada y radial.	29
Fig. 4.3 Vista isométrica tolva vertical.	29
Fig. 4.4 Diseño general de estructura Biodigestor.	30
Fig. 4.5 Arduino Mega 2560 [38].	35
Fig. 4.6 Sensor de temperatura y humedad DHT22 [39].	38
Fig. 4.7 Motorreductor DC 24 V ,100 W.	46
Fig. 4.8 REA016 niquelina de temperatura.	52
Fig. 4.9 Fuente Slim 100W 24V IP20.	56
Fig. 4.10 Fuente genérica 12 V DC.	57
Fig. 4.11 Gabinete de termoplástico[49].	58
Fig. 4.12 Estructura modular autoportante.	61
Fig. 4.13 Tolva vertical con recubrimiento.	62
Fig. 4.14 Paletas soldadas a eje de acero inoxidable.	63
Fig. 4.15 Sistema de transmisión de poleas 2:1	64
Fig. 4.16 Mecanismo de cizallamiento y mezcla.	64
Fig. 4.17 Filtro de aire impresos en 3D.	65
Fig. 4.18 Diagrama de flujo del sistema.	67
Fig. 4.19 Diagrama de conexiones componentes electrónicos.	71
Fig. 4.20 Disposición física de los elementos en el gabinete de control.	72
Fig. 4.21 Diagrama de potencia.	73
Fig. 4.22 Ubicación de resistencias en el interior del chasis.	74
Fig. 4.23 Implementación de sensor DHT22	75
Fig. 4.24 Conexión de sensores y actuadores.	75
Fig. 4.25 Disposición final de la interfaz de usuario en el prototipo.	76
Fig. 4.26 Implementación sistema de aireación	77
Fig. 4.27 Evolución de la temperatura interna en el ciclo de 31 horas.	80
Fig. 4.28 Perfil de Humedad Relativa (ciclo de 31 horas).	81

Fig. 4.29 Perfil de corriente eléctrica total (ciclo de 31 horas).	82
Fig. 4.30 Perfil de potencia eléctrica (ciclo de 31 horas).	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Contenido N, P, K en el compost. [23].....	10
Tabla 4.1 Parámetros de materia orgánica.....	27
Tabla 4.2 Dimensiones para el contenedor.....	28
Tabla 4.3 Matriz de criterios ponderados para selección de controlador.	33
Tabla 4.4 Características técnicas de Controladores.	33
Tabla 4.5 Conclusión de evaluación criterios para la selección de Controlador	34
Tabla 4.6 Matriz de criterios ponderados para la selección de sensor de temperatura y humedad.	36
Tabla 4.7 Características técnicas sensores de temperatura y humedad.	37
Tabla 4.8 Conclusión de evaluación criterios para la selección de Sensor de Humedad y temperatura	37
Tabla 4.9 Especificaciones técnicas del sensor DHT22[39]	38
Tabla 4.10 Propiedades físicas para la materia orgánica	39
Tabla 4.11 Parámetros del sistema.	40
Tabla 4.12 Matriz de criterios ponderados para la selección del Motor.....	44
Tabla 4.13 Características técnicas de motores	44
Tabla 4.14 Conclusión de la evaluación de criterios para la selección del Motor.....	45
Tabla 4.15 Parámetros de Funcionamiento Sin Carga[43].....	46
Tabla 4.16 Parámetros de Funcionamiento a Máxima Eficiencia[43].	46
Tabla 4.17 Matriz de criterios ponderados para la selección Mecanismo de seguro de cierre.	47
Tabla 4.18 Característica técnicas de mecanismos de Seguro de cierre.....	48
Tabla 4.19 Conclusiones de evaluación criterios para la selección Mecanismo de seguro de cierre.	48
Tabla 4.20 Características técnicas de solenoide 12V[44]	49
Tabla 4.21 Matriz de criterios ponderados para la selección de resistencia térmica.	50
Tabla 4.22 Características técnicas de resistencias térmicas.	50
Tabla 4.23 Conclusiones de evaluación criterios para la selección de resistencia térmica.	50
Tabla 4.24 Características técnicas REA016 niquelina de temperatura[45].	51
Tabla 4.25 Matriz de criterios ponderados para la selección de Fuente.....	53

Tabla 4.26	Características técnicas de Fuentes de Alimentación	53
Tabla 4.27	Conclusiones de evaluación criterios para la selección de Fuente de poder	54
Tabla 4.28	Características técnicas Slim 60W 24V IP20[47].	55
Tabla 4.29	Características técnicas Fuente genérica 12 V DC a 1 A[48].	56
Tabla 4.30	Propiedades Técnicas del Aislante Prodex AD10[50].	59
Tabla 4.31	Especificaciones técnicas del Acero Galvanizado (DIPAC)[51].	60
Tabla 4.32	Datos de Balance de Masa del Ciclo de Prueba.	79
Tabla 4.33	Desglose de Corriente, Potencia y Tiempo por Estado Operativo	84
Tabla 4.34	Distribución Granulométrica del Compost.	86
Tabla 4.35	Parámetros Químicos del Producto Final	87
Tabla 4.36	Resumen de costos de fabricación del prototipo.	88

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

A nivel global, la gestión de residuos orgánicos representa un desafío ambiental y de salud pública [1]. En Ecuador, esta problemática es especialmente intensa en las áreas urbanas. Según los informes de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADM), el 50,5% de los municipios disponen de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, el 31,4% en celdas emergentes y el 18,2% en botaderos [2].

La separación en la fuente es un aspecto necesario para una gestión adecuada de los residuos, sin embargo, solo el 33,6% de los GADM han implementado o mantenido procesos de separación en la fuente, esto significa que una gran cantidad de residuos orgánicos se mezcla con residuos inorgánicos, lo que dificulta su manejo y tratamiento [3].

De acuerdo con datos del INEC (véase la Fig. 1.1) un ciudadano promedio produce aproximadamente 0,9 kg de residuos sólidos diarios, de los cuales un 56,20% son orgánicos, lo que demanda un manejo sostenible [2].

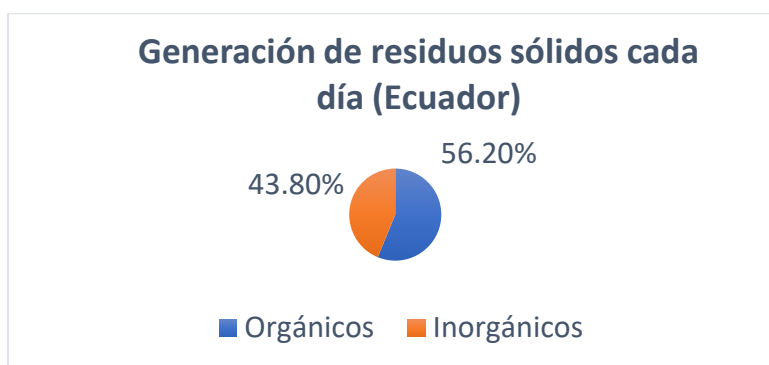


Fig. 1.1 Generación de residuos cada día (Ecuador) [2].

La disposición final de estos residuos orgánicos mediante vertederos convencionales constituye en una práctica que no solo implica un uso ineficaz del espacio, si no que contribuye significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano (CH_4), un gas con un potencial de calentamiento global de 25 veces mayor que el dióxido de carbono (CO_2) en un período de 100 años. Lo cual deteriora la calidad del aire y del agua, comprometiendo la salud pública y el equilibrio ecológico [4].

Si no se toman medidas, la situación empeora intensificando la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas dada la descomposición anaeróbica de los residuos, un proceso que puede extenderse por años. La persistencia de este problema impide la recuperación de recursos valiosos presentes en la biomasa y exacerba los efectos del cambio climático mediante la liberación continua de metano [5].

En el contexto ecuatoriano, diversas iniciativas, tales como la Alianza Basura Cero y los programas impulsados por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, se ha enfocado en fomentar el compostaje comunitario, el uso de biodigestores y la consolidación de un modelo de economía circular. Dichas iniciativas tienen por objeto minimizar el volumen de residuos dispuestos en rellenos sanitario, la implementación de la materia orgánica mediante procesos de compostaje y el fomento de un sistema económico de carácter sostenible y circular [6][7].

No obstante, la aplicabilidad de dichos métodos presenta limitaciones operativas significativas. Entre estas se incluyen su cierto nivel de complejidad, el consumo hídrico y la dificultad para el control de los parámetros necesarios del proceso, tales como la temperatura, la aireación y la

humedad. Al ser un proceso biológico una gestión inadecuada puede inhibir la actividad microbiológica por factores como el déficit de oxígeno, condiciones térmicas extremas o niveles de humedad no óptimos. Adicionalmente, estos métodos conllevan el riesgo de generar sustancias dañinas [8][9].

A partir de la problemática expuesta, se propone el desarrollo de un biodigestor con control de parámetros que facilite la generación de compost de manera eficaz, lo cual representaría una mejora significativa en la gestión de residuos orgánicos a nivel domiciliario.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Desarrollar un biodigestor con control de parámetros que permita la producción eficaz de compost a partir de residuos orgánicos domésticos.

1.2.2 Específicos.

- Evaluar modelos de biodigestión, con el fin de identificar parámetros de control.
- Diseñar el sistema mecatrónico de biodigestión.
- Construir un prototipo funcional de un biodigestor, basado en el control de parámetros, que facilite la producción de compost.
- Validar con pruebas de funcionalidad del prototipo y análisis de resultados.

1.3 Alcance y delimitación

Este proyecto se centra en el diseño y desarrollo de un biodigestor con control de parámetros. Su objetivo principal es la transformación de residuos orgánicos domésticos en compost. Inicialmente,

se realizará un análisis de modelos de biodigestión para definir las principales variables a ser controladas, lo que permitirá establecer el diseño para la obtención de compost. Posteriormente, se llevará a cabo el diseño mecatrónico del biodigestor para garantizar la generación de compost. Una vez diseñado, se construirá el prototipo. Finalmente, se realizarán pruebas de funcionalidad y se analizará el compost obtenido.

1.4 Justificación

El proyecto “Biodigestor automatizado” surge como una alternativa innovadora y sostenible para la gestión de residuos orgánicos a nivel del hogar. Este sistema no solo aborda la problemática actual, sino que también propone una estrategia proactiva para el futuro.

En lugar de simplemente abordar los síntomas del problema, sino tratar la raíz de este, transformando un desafío ambiental en una oportunidad de desarrollo sostenible, ya que, al tener control del proceso de biodigestión con un nivel de automatización, se logra una descomposición más rápida de los residuos orgánicos que en los procesos naturales o agrícolas.

Además, un biodigestor con control de parámetros tiene el potencial de convertirse en una herramienta educativa, sensibilizando a la población sobre la importancia de la gestión de residuos y la economía circular. Esto con el fin de fomentar un cambio de mentalidad y comportamiento en la sociedad, promoviendo prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

El prototipo desarrollado se constituye en una herramienta validada, cuyos procedimientos de diseño y construcción podrán ser replicados y escalados en proyectos similares, con el fin de permitir el abordaje de problemáticas ambientales mediante la aplicación de tecnologías sostenibles. De esta forma, la relevancia del presente trabajo reside en su contribución a la generación de un

impacto favorable a largo plazo, tanto en el ámbito ambiental, a través del tratamiento localizado de residuos orgánicos, como en el ámbito social, al proporcionar a los hogares una mayor capacidad en la gestión de sus residuos orgánicos domésticos.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En Latinoamérica, distintas investigaciones han evaluado el manejo de residuos orgánicos ante el aumento constante de su generación. En este ámbito, se han identificado limitaciones asociadas a los métodos tradicionales de compostaje, principalmente relacionadas con el espacio requerido y el tiempo prolongado del proceso, lo que ha motivado la búsqueda de soluciones tecnológicas más eficientes.

En una investigación aplicada al sector empresarial, la empresa Inversiones DRAMAR S.A.C. registró un volumen diario que hacía inviable seguir utilizando métodos artesanales de compostaje. El estudio revisado describe este escenario y plantea el uso de un sistema automatizado capaz de procesar la mezcla dentro de un biodigestor dividido por etapas térmicas. El enfoque se basa en datos operativos de la empresa y en la necesidad de transformar los residuos sin incrementar la manipulación directa[10]. En este contexto, si bien el término biodigestor se asocia tradicionalmente a procesos anaerobios para la producción de biogás, en dicho estudio se emplea el concepto en un sentido amplio para describir un reactor biológico controlado, que opera bajo condiciones aeróbicas, cuyo objetivo es la estabilización de residuos y la obtención de compost mediante un proceso automatizado.

Diversos estudios han abordado el desarrollo de biodigestores para la producción de compost semiautomatizados para uso urbano, integrando sensores de temperatura y humedad, así como actuadores para la regulación automática de estas variables. En otro estudio, Coleen M. desarrolló y validó un biodigestor aeróbico semiautomatizado que incorpora control ambiental y

procesamiento de imágenes para la estimación del grado de madurez del compost mediante análisis de color y textura, evidenciando una descomposición acelerada desde las primeras etapas del proceso [11].

De manera complementaria, una investigación de la Universidad de México implementó una arquitectura similar, logrando una precisión del 85.7% en la determinación de la madurez a través de técnicas de visión artificial, lo que demuestra el potencial de estas herramientas para mejorar el seguimiento del proceso[12].

Otra investigación presentada por Turvani G. muestra el diseño y validación de un biodigestor doméstico automatizado, en la que se utiliza una centrifugadora modificada como reactor de compostaje. El sistema integra una tarjeta electrónica multisensor basada en STM32WL55JC1 con conectividad LoRa, en conjunto con un sistema de imágenes por microondas (MWI), con el fin de permitir el monitoreo profundo y sin contacto de la temperatura y la humedad al interior del compost. Como resultados presenta la activación de las fases mesofílica, termofílica y de maduración del proceso, aunque se presentan desafíos en la regulación de la humedad inicial y la aireación [13].

En un reciente estudio llevado a cabo por Zamand B., se ha introducido una innovadora metodología para optimizar el proceso de biodigestión. Esta metodología incorpora un agente de carga y microorganismos estimulados en un biodigestor térmico, que funciona a 55 °C. El cual tiene la capacidad de mezclar, calentar y agitar los residuos de manera eficaz. Para acelerar el proceso, se identificó el porcentaje de carga adecuado utilizando diferentes proporciones de agentes de carga. Los resultados del estudio fueron bastante prometedores: se descubrió que la etapa activa del compostaje se completaba en tan solo un día. Además, el compost resultante era de alta calidad,

con un pH de 6.72, una conductividad eléctrica de 1148-1179 μScm^{-1} y una relación C/N de 20.38 [14].

Los estudios presentados demuestran la eficacia de estos sistemas en diferentes contextos, desde zonas rurales hasta áreas urbanas densamente pobladas. Sin embargo, también destacan los desafíos asociados con su implementación y mantenimiento, especialmente en lo que respecta a la seguridad y la gestión de gases potencialmente nocivos.

Además, el incorporar tecnologías como los sensores y las técnicas de imagen por microondas en estos sistemas permite un control óptimo y no invasivo del proceso de compostaje o de generación de biogás. Esto no solo mejora la eficiencia de estos sistemas, sino que también facilita su uso por parte de usuarios sin experiencia previa en la producción de compost.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Gestión de residuos orgánicos en Ecuador

La gestión de residuos en el Ecuador está relacionada de forma directa con la dinámica poblacional y a los patrones de consumo. De acuerdo con el Censo 2022, el país alcanzó los 16,9 millones de habitantes, concentrando el 45% de las viviendas en provincias de alta densidad como Guayas y Pichincha. Este crecimiento demográfico incrementa la carga sobre los sistemas de saneamiento, exigiendo un fortalecimiento de la infraestructura para el manejo de desechos [15].

En cuanto a la generación de residuos, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica reporta una producción diaria nacional de 14.000 toneladas. Al analizar esta cifra a nivel domiciliario, se calcula que un hogar promedio (4 integrantes) produce alrededor de

3,6 kg de residuos por día, de los cuales 2.02 kg corresponden a biomasa aprovechable. Esto indica una viabilidad significativa para la generación de subproductos, tales como el compost o biogás [16].

No obstante, los indicadores de gestión en fuente muestran una tendencia negativa en las prácticas sostenibles. Según el informe de Información Ambiental en Hogares 2023 del INEC [17], la clasificación de residuos orgánicos en las familias ha disminuido del 40,1% en 2019 al 37,7% en 2023. Este descenso sugiere que la problemática no es solo de infraestructura, sino también de falta de herramientas que faciliten al usuario la gestión de los residuos a nivel doméstico.

2.2.2 Biodigestor

Un biodigestor es un sistema diseñado para la degradación controlada de materia orgánica mediante actividad microbiana. Aunque comúnmente se asocia a procesos anaerobios destinados a la producción de biogás, en el presente estudio se emplea un reactor de configuración aerobia automatizada, orientado a la estabilización de residuos orgánicos y a la obtención de compost. En este sentido, el término biodigestor se utiliza para describir el contenedor o reactor biológico, sin que la generación de biogás constituya el objetivo principal del sistema [18], [19].

2.2.3 Aspectos generales del Compost

El compost es el producto resultante de la descomposición biológica aerobia de sustratos biodegradables, la cual se lleva a cabo por una comunidad diversa de microorganismos. Este proceso culmina en la obtención de un material estable, libre de compuestos fitotóxicos y rico en nutrientes, adecuado para su utilización como fertilizante [20].

2.2.3.1 Características del compost de calidad

De acuerdo con el Manual Técnico para el Registro y Control de Fertilizantes (Resolución 0218), un compost maduro se define por su inocuidad sanitaria, estabilidad biológica y valor agronómico. El producto final debe estar libre de fitotóxicos, pesticidas y microorganismos patógenos, cumpliendo estrictamente con los límites máximos permitidos de metales pesados para garantizar la seguridad ambiental. Químicamente, debe presentar un pH neutro o ligeramente alcalino (5.0 – 8.5) que favorezca la disponibilidad de nutrientes [21].

Respecto a su aporte fertilizante, se han establecido rangos de concentración para los macronutrientes esenciales que certifican su calidad agronómica, detallados en la Tabla 2.1, los cuales deben ser verificados mediante metodologías de ensayo validadas referidas en la NTE INEN 211[22].

Tabla 2.1 Contenido N, P, K en el compost. [23]

Elementos Mayores	% en compost
Nitrógeno	0,3% – 1,5% (3g a 15g por Kg de compost)
Fósforo	0,1% – 1,0% (1g a 10g por Kg de compost)
Potasio	0,3% – 1,0% (3g a 10g por Kg de compost)

Las características físicas generales óptimas para el compost incluyen la ausencia de cuerpos extraños, como metales, papeles, plásticos y vidrios. Procurando mantener una temperatura cercana a los 35 °C, una textura granulosa y un color similar al café oscuro [24].

Finalmente, el parámetro determinante de la madurez es la relación Carbono/Nitrógeno (C/N). El proceso debe concluir con una relación situada preferiblemente entre 10:1 y 25:1 según normativa[21]. Este valor refleja el equilibrio final entre el carbono (fuente energética) y el nitrógeno (base estructural). Dicha estabilidad garantiza que el material es maduro y que, al

ser aplicado al suelo, no generará inmovilización del nitrógeno edáfico por competencia microbiana, confirmando un alto grado de humificación[25].

2.2.4 Proceso de compostaje

El compostaje es un proceso biológico aeróbico, influenciado por factores físicos, químicos y biológicos, en el que los microorganismos, como bacterias y hongos, transforman la materia orgánica en compost.

El objetivo es acelerar la descomposición de los residuos para obtener un producto estable de alta calidad biológica y química, minimizando los riesgos ambientales, como la generación de gases y lixiviados que pueden contaminar el agua y el medio ambiente. El ciclo de proceso se divide en tres fases térmicas secuenciales, determinadas por la actividad metabólica de las poblaciones microbianas dominantes: fase mesófila inicial, fase termófila y fase de enfriamiento/maduración[26]. Estas fases se encuentran detalladas a continuación (véase la Fig. 2.2).

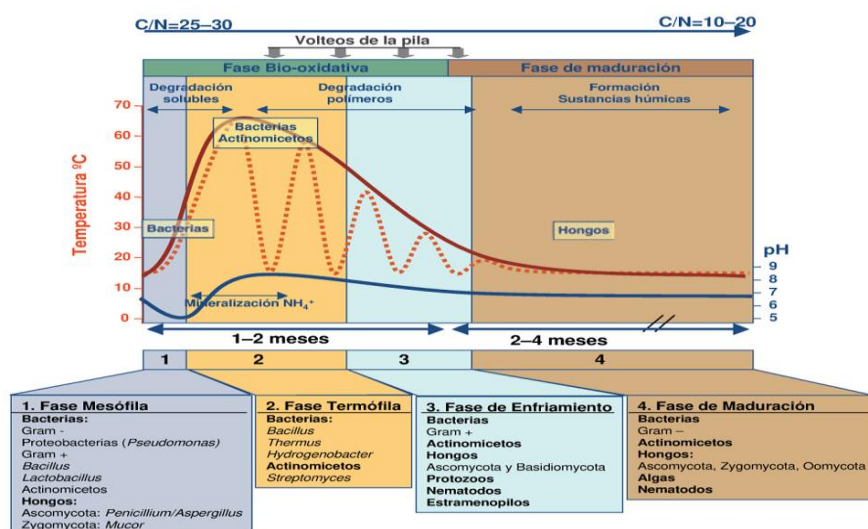


Fig. 2.2 Fases del proceso de compostaje[27]

2.2.4.1 La fase mesófila:

Esta fase inicial se caracteriza por una elevación térmica desde la temperatura ambiente hasta los 40 °C. El pH fluctúa considerablemente y los compuestos orgánicos más sencillos se descomponen. Al principio, los sustratos están a temperatura ambiente y comienzan a actuar bacterias y hongos mesófilos y termotolerantes. Estos microorganismos consumen rápidamente sustancias carbonadas solubles y fácilmente degradables, como azúcares y aminoácidos, lo que provoca una disminución en el pH debido a la producción de ácidos orgánicos. La actividad metabólica de los microorganismos en esta fase provoca un aumento de la temperatura. Al superar los 42 °C, la microbiota mesófila es inhibida, dando paso a la transición hacia organismos termófilos [28].

2.2.4.2 Fase termófila

La fase termófila es la segunda etapa del proceso de compostaje. Donde, se desarrollan microorganismos que toleran altas temperaturas, como los actinomicetos específicamente *Thermoactinomyces* sp, varios tipos de *Bacillus* termófilos y bacterias gram negativas como *Thermus* y *Hydrogenobacter*. Durante esta fase, los patógenos y parásitos se inhiben, y los hongos y levaduras disminuyen significativamente desde el inicio, siendo eliminados por completo a partir de los 60 °C. Al principio de esta fase, la microbiota mesófila (organismos que prosperan en condiciones moderadas) se ve afectada por la temperatura, mientras que las poblaciones de termófilos aún no alcanzan su rango óptimo de temperatura, lo que ralentiza el aumento de la temperatura en comparación con la fase inicial. Sin embargo, una vez que los microorganismos termófilos alcanzan un número suficiente, la temperatura aumenta nuevamente. Con el aumento de la temperatura, la biodiversidad disminuye. Los

actinomicetos, especialmente los estreptomicetos, comienzan a metabolizar proteínas, liberando amoníaco y alcalinizando el medio. La actividad microbiana es intensa, y la temperatura continúa aumentando hasta superar los 60 °C.

A temperaturas superiores a 60 °C, la degradación es realizada únicamente por bacterias termófilas. Entre estas, las bacterias no esporuladas como *Hydrogenobacter* spp. y *Thermus* spp, junto con algunas esporuladas del género *Bacillus*, son dominantes en el rango de temperatura de 70 a 82 °C. A medida que la temperatura aumenta hasta 66-70 °C, estas bacterias contribuyen a un incremento en la biodiversidad, aunque la actividad microbiana disminuye significativamente a esa temperatura. Además, el calor en sí mismo inhibe a los microorganismos y también limita el suministro de oxígeno. Esto conduce a una disminución general en la actividad microbiana y, como resultado, la temperatura disminuye. Así, se inicia la fase final, conocida como la fase de enfriamiento y maduración [27].

2.2.4.3 Fase de enfriamiento y maduración

Durante las etapas finales de enfriamiento y maduración, se desarrolla una nueva comunidad mesófila distinta de la fase inicial. En esta comunidad, los hongos y actinomicetos desempeñan un papel fundamental en la degradación de compuestos complejos. Estos microorganismos colonizan el material desde el entorno circundante o emergen de esporas que resistieron la fase termófila anterior.

Aunque las bacterias mesófilas son menos abundantes en esta etapa, su diversidad es mayor que en las fases anteriores. Estas bacterias no solo oxidan la materia orgánica, sino que también participan en procesos como la oxidación de hidrógeno, amonio, nitrito y sulfuros, la fijación de nitrógeno y la producción de exopolisacáridos. A medida que avanza la

maduración, la comunidad se vuelve más estable y compleja, similar a la de los suelos oligotróficos. Microorganismos como *Arthrobacter*, típicos de este hábitat, también contribuyen al proceso [27].

2.2.5 Tipos de Biodigestores automatizados para la producción de compost

2.2.5.1 El compostador rotatorio

Es un tipo de compostador ampliamente comercializado. Este compostador se caracteriza por su diseño único que incluye una base fija y una cámara, generalmente cilíndrica, donde se lleva a cabo todo el proceso de compostaje. El sistema está diseñado para permitir la oxigenación, mezcla y volteo del material, facilitando así la recolección de lixiviados y la conservación de las propiedades del compost [29].

Además, algunos modelos integran un sistema de microcontroladores para la lectura de sensores (humedad, temperatura) y la actuación sobre sistemas de ventilación y riego, permitiendo un control de lazo cerrado del proceso, asegurando la calidad del compost producido [30].

2.2.5.2 Termo compostador

En un estudio reciente se investigaron los efectos de la temperatura del reactor y la relación de alimentación en el compostaje de residuos de alimentos domésticos y residuos verdes mediante un proceso alimentado por lotes. Los hallazgos revelaron la viabilidad de utilizar reactores de compostaje alimentados por lotes para tratar estos residuos. Estos dispositivos emplean tecnología avanzada para esterilizar y secar los desechos a alta temperatura entre 70 ° C y 120° C empleados por ciertos proveedores [31] [32]. El termo compostador acelera la descomposición de los desechos orgánicos, convirtiéndolos en pedazos más pequeños.

Además, realiza un análisis de humedad para calcular el tiempo requerido para el procesamiento y, finalmente, convierte los desechos procesados en fertilizante orgánico natural [31].

2.2.5.3 Compostadores biomecánicos

En estudios recientes en China [33] y empresas como TKM [34], han desarrollado una solución innovadora para la gestión de residuos alimentarios en el hogar. Este dispositivo emplea microorganismos termófilos seleccionados por su capacidad para degradar diferentes componentes orgánicos a altas temperaturas. Entre estos microorganismos se incluyen cepas de *Staphylococcus hominis* (amilolítica), *Aspergillus fumigatus* (celulolítica), *Ralstonia* sp (lipolítica) y *Arthrinium arundinis* (proteolítica). La combinación de estas cepas mejora el proceso de compostaje, reduciendo el tiempo necesario para obtener compost maduro. Este tipo de dispositivos constan por lo general con un molinillo, un contenedor de compostaje de flujo de tapón, un calentador, un agitador, un desodorante y un sistema de control de operación. Su diseño permite triturar los residuos en partículas menores a 5 mm, facilitando la descomposición microbiana. Los residuos se trituran y calientan a 50 °C, acelerando el proceso de compostaje. Se utiliza un agente microbiano compuesto por cepas que degradan almidón, celulosa, lípidos y proteínas, optimizando la descomposición. El compostaje se completa en solo 4 días, produciendo compost de alta calidad adecuado para el suelo de plantación. Además, un sistema de desodorización UV elimina los olores durante el proceso.

2.2.6 Parámetros de control

2.2.5.4 Tamaño de partícula

El tamaño inicial de las partículas que componen la materia a compostar es una variable determinante para la optimización del proceso, ya que un incremento de la superficie específica favorece la actividad microbiana y acelera la velocidad de degradación.

Sin embargo, aunque la reducción del tamaño de partícula incrementa la reactividad biológica, un material excesivamente fino genera compactación, lo que limita la difusión de oxígeno y restringe la actividad microbiana[27]. En este sentido, investigaciones realizadas en el contexto andino de Ecuador validan que la trituración de residuos lignocelulósicos a un promedio de 1.8 cm, y de residuos blandos a < 5 cm, optimiza la tasa de degradación sin comprometer la permeabilidad necesaria para la aireación pasiva [35].

2.2.5.5 Temperatura

La temperatura actúa como la variable de estado principal para inferir la actividad biológica. Existe una correlación directa entre la tasa de degradación de la materia orgánica y la generación de calor metabólico. Por lo que, se debe gestionar este parámetro con mayor precisión que el pH o la relación C/N, dado que variaciones térmicas abruptas afectan drásticamente la eficiencia del proceso. De igual manera, existe una relación directa entre la degradación y el tiempo durante el cual la temperatura es alta. En condiciones extremas, un incremento excesivo de la temperatura puede inhibir la actividad microbiana, fenómeno conocido como inactivación térmica de la biomasa, lo que reduce significativamente la eficacia del proceso de compostaje. El control de temperatura debe mantener la temperatura dentro de los rangos óptimos para cada población microbiana: fase mesófila inicial ($T <$

45 °C), al final de la cual se producen ácidos orgánicos; fase termófila (45 °C — 65° C) y fase mesófila final, considerándose el proceso finalizado cuando se alcanza de nuevo la temperatura inicial. [27].

2.2.5.6 Humedad:

Siendo el compostaje un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica, la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos. El agua funciona como medio de transporte para nutrientes solubles y subproductos metabólicos. La gestión de la humedad es crítica, ya que influye directamente en la termodinámica del reactor y en la disponibilidad de oxígeno.

- Rango Óptimo: 50% — 70%.
- Límite Inferior (< 30%): La actividad biológica cesa por desecación celular.
- Límite Superior (> 70%): El agua satura los poros, desplazando el aire y provocando anaerobiosis, lo que deriva en la generación de malos olores y lixiviados.

En un reactor cerrado, el consumo de oxígeno y la evolución de la temperatura dependen de mantener este equilibrio hídrico. El exceso de humedad puede corregirse mediante el aumento de la tasa de aireación, aprovechando el calor latente de evaporación para secar la mezcla[27].

2.2.5.7 Aireación

El suministro de oxígeno es el factor limitante en el compostaje aerobio. En pilas estáticas o reactores no agitados, se generan gradientes de concentración: mientras la superficie mantiene niveles cercanos al ambiental (18% — 20%), el núcleo puede descender a niveles críticos (0.5% — 2%) a profundidades mayores a 60 cm. El sistema de aireación debe

garantizar una concentración mínima de oxígeno para evitar la ruta anaerobia (producción de metano y sulfuro de hidrógeno). Sin embargo, la sobre aireación conlleva desventajas técnicas; el enfriamiento excesivo de la biomasa y la desecación. Desde la perspectiva operativa, la aireación representa el mayor costo energético del proceso (32% — 46%) del total. Debido al costo elevado de los sensores de oxígeno disuelto, es común implementar estrategias de control inferencial basadas en las lecturas de temperatura y humedad. Durante la etapa final de maduración, se debe restringir el aporte de oxígeno para evitar la mineralización de los compuestos húmicos estabilizados[27].

El análisis de los parámetros de control del proceso de compostaje, tales como el tamaño de partícula, la temperatura, la humedad y la aireación, permite establecer los requerimientos funcionales del sistema automatizado. Estas variables justifican la incorporación de sensores y actuadores específicos, así como estrategias de control orientadas a mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana, constituyendo la base teórica para el diseño del prototipo desarrollado en los capítulos posteriores.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque y tipos de investigación

El presente trabajo de integración curricular tiene como objetivo el diseño y desarrollo de un prototipo automatizado para la obtención de compost a partir de residuos orgánicos domiciliarios. Para ello, se adopta un enfoque de investigación aplicada, dado que se busca resolver un problema concreto de gestión de residuos mediante una solución técnica y funcional.[30]

Adicionalmente, el estudio se enmarca dentro de una investigación documental, ya que la información empleada para su desarrollo se obtuvo a partir de libros, artículos, informes y otros materiales impresos o digitales [31]. Esta base documental permite sustentar conceptualmente el diseño del prototipo y la selección de sus parámetros de control.

Asimismo, la investigación se clasifica como descriptiva, puesto que se analizan y detallan las características del proceso de compostaje y la relación entre las variables que intervienen en el funcionamiento del prototipo.[32] Finalmente, el estudio adopta un enfoque experimental, dado que se realiza la intervención deliberada del investigador, quien manipula determinadas variables de operación con el fin de evaluar su efecto sobre el desempeño del sistema. Este enfoque permite validar la funcionalidad del dispositivo mediante pruebas operativas controladas.[31]

3.2 Diseño de la Investigación

Para el desarrollo del presente trabajo de titulación y el cumplimiento de los objetivos planteados, se estructuró una metodología secuencial basada en fases claramente definidas. Dichas fases describen el proceso seguido para el diseño, construcción y evaluación experimental de un

prototipo automatizado destinado a la producción de compost a partir de residuos orgánicos domésticos.

3.2.1. Fase 1 Adquisición de información

Mediante una investigación documental, se recopiló información técnica relacionada con el compostaje y los distintos métodos empleados para su producción. Esta información permitió analizar las características, ventajas y limitaciones de cada método, a partir de lo cual se definieron los parámetros de control y las especificaciones técnicas del prototipo a construir.

Actividad 1 Investigación aspectos generales del compost: se recopila información sobre las fases del compostaje y sus características, considerando los principales factores que influyen en el proceso.

Actividad 2 Investigación de tipos de biodigestores y su aplicación al proceso de compostaje: se analizan los distintos tipos de biodigestores utilizados en procesos de degradación biológica, evaluando sus características, ventajas y desventajas en relación con el compostaje.

Actividad 3 Identificación de parámetros de control: se determinan los parámetros de control relevantes del proceso de compostaje en función de los sistemas y métodos estudiados.

Actividad 4 Especificaciones del modelo a construir: se establecen las especificaciones técnicas que el prototipo debe cumplir para alcanzar los objetivos planteados, considerando restricciones técnicas y operativas.

3.2.2. Fase 2 Diseño mecatrónico y programación de funciones

En esta fase se adopta una investigación descriptiva para el diseño del prototipo, considerando criterios de diseño derivados de los parámetros previamente establecidos.

Actividad 5 Definición del modelo de biodigestor: una vez que se especifican las características del prototipo, se procede a diseñar una solución que cumpla con los objetivos y requisitos previamente establecidos.

Actividad 6 Diseño mecatrónico: se identifican e integran los componentes mecánicos, electrónicos y de control del sistema, considerando criterios de eficiencia, seguridad y funcionalidad.

Actividad 7 Diseño CAD: se modela la estructura del dispositivo mediante software de diseño asistido por computadora, en concordancia con el diseño mecatrónico definido.

Actividad 8 Selección de materiales y equipos: en esta actividad se toma en cuenta el diseño y el método de fabricación del prototipo para elegir los materiales y equipos a utilizar. Esto implica considerar factores como la disponibilidad, la durabilidad y el costo.

3.2.3. Fase 3 Construcción del Prototipo.

En esta fase se lleva a cabo la construcción del prototipo, a partir del diseño previamente establecido. Se fabrican las piezas necesarias, se ensambla la estructura y se configura el sistema de control, con el objetivo de obtener un dispositivo funcional para la evaluación experimental del proceso de compostaje.

Actividad 9 Construcción de sistema de control: se conectan los elementos eléctricos y electrónicos necesarios para monitorear y regular el proceso de compostaje.

Actividad 10 Construcción de estructura del dispositivo: aquí se construye la estructura física del prototipo. Esto implica el uso de materiales antes seleccionados.

Actividad 11 Programación de funciones para el dispositivo: se desarrolla el software necesario para gestionar el sistema de control, la adquisición de datos y la comunicación con el usuario.

Actividad 12 Ensamblaje del prototipo: se procede a la articulación de la estructura principal junto con el sistema de control y la mecánica de potencia. Este proceso abarca desde la fijación de sensores y actuadores hasta la verificación de la integridad física del sistema.

3.2.4. Fase 4 Pruebas de funcionalidad y análisis de resultados.

Para finalizar, con la ayuda de la investigación experimental se realizan pruebas de funcionamiento del biodigestor con residuos orgánicos domésticos.

Actividad 13 Realización de pruebas de Funcionamiento: se llevan a cabo pruebas del prototipo del biodigestor automatizado. Donde se verifica el correcto funcionamiento de los componentes, incluyendo el sistema de control, sensores, actuadores y la estructura física.

Actividad 14 Análisis de compost obtenido: se evalúa de manera cualitativa las características del compost producido, con el fin de realizar una comparación referencial con valores reportados en la literatura, sin que ello implique una certificación formal del producto.

Actividad 15 Redacción y escritura del documento: se documentan y redactan todos los aspectos del proyecto en el presente trabajo de titulación.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Especificaciones del sistema

Con base en la fundamentación expuesta en el marco teórico y la metodología descrita en el Capítulo III, se definieron los parámetros operativos del prototipo. El sistema se configura como un biodigestor aeróbico diseñado para garantizar las condiciones termodinámicas y mecánicas necesarias durante el proceso de compostaje. A continuación, se detallan los requerimientos técnicos:

Requerimientos Operativos y Mecánicos

- Procesamiento de lotes con una carga máxima de 2.5 kg de residuos orgánicos domésticos.
- Operación a bajas revoluciones entre 30 a 40 rpm
- Trituración de residuos a un tamaño de partícula promedio de 5 mm.
- Materiales resistentes a la corrosión y aptos para soportar temperaturas de operación continua de hasta 80 °C sin deformación ni liberación de sustancias tóxicas.

Requerimientos Térmicos y de Proceso

- Controlar temperatura de la biomasa dentro de un rango operativo de 45 °C a 70 °C, ajustable a las fases mesófila, termófila e higienización.
- Asegurar humedad relativa final del sustrato a un valor inferior al 75%, garantizando la estabilidad biológica del producto final.

- Sistema de oxigenación híbrido que combine ventilación forzada y volteo mecánico periódico para evitar condiciones anaerobias.

Seguridad y Gestión Ambiental

- Sistema de bloqueo que impida la apertura de la compuerta de acceso mientras los subsistemas de trituración o calefacción se encuentren activos.
- Control de emisiones con un sistema de filtración (tipo carbón activado) para neutralizar los gases y olores generados durante la descomposición.
- Arquitectura del chasis modular, facilidad en el acceso a los componentes internos para tareas de limpieza y sustitución de partes estándar.

4.2 Diseño del sistema de biodigestión

La definición de la arquitectura del prototipo de biodigestor se realizó con un enfoque de diseño enfocado en optimizar el proceso de compostaje.

A continuación, se describe la configuración del sistema y su base técnica.

4.2.1 Arquitectura de control

El diseño de esta etapa tiene como finalidad garantizar la transformación de residuos orgánicos domésticos en compost de alta calidad, mediante la regulación automática de las variables del proceso. Para la gestión del sistema, se definió una arquitectura de control centralizada que constituye el núcleo operativo del sistema.

La configuración del sistema se fundamenta en un microcontrolador que integra una red de sensores y actuadores, estructurados lógicamente para mantener las condiciones

fisicoquímicas óptimas requeridas para la biodigestión. La interacción entre estos componentes se detalla en el diagrama de bloques funcional (véase la Fig. 4.1).

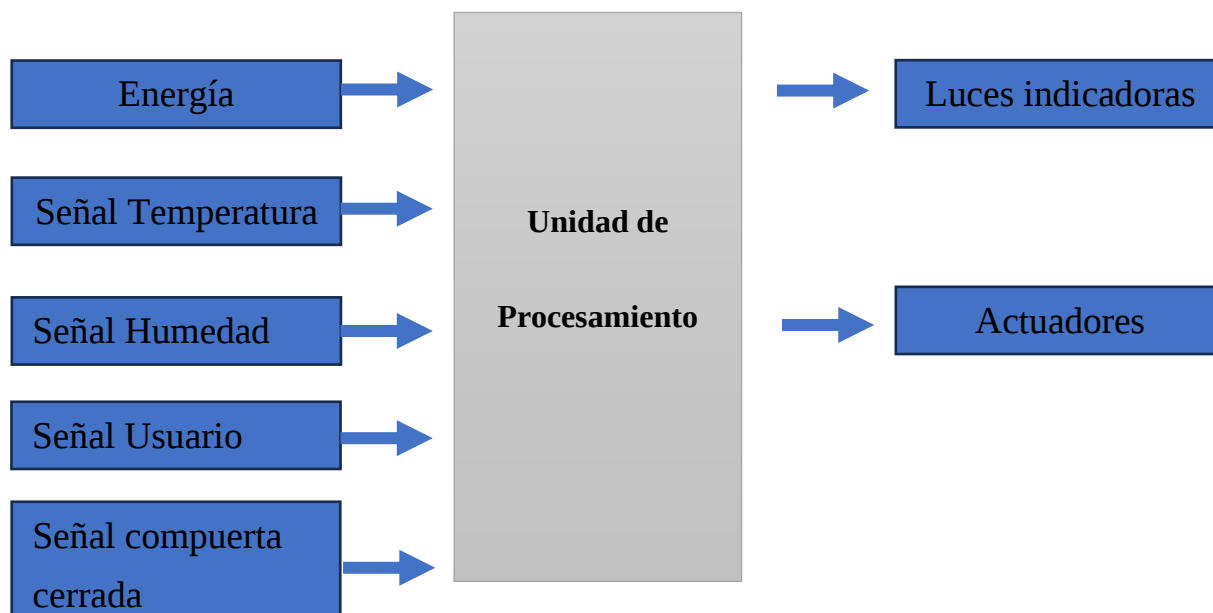


Fig. 4.1 Diagrama de bloques de la arquitectura de control.

Para cumplir con los requerimientos de diseño, se establecieron las siguientes funciones lógicas de control:

- **Monitoreo de Parámetros Críticos:** Mide en tiempo real la temperatura y la humedad del sustrato a través de sensores dedicados, enviando las señales al microcontrolador para su procesamiento.
- **Regulación Térmica:** Ajusta activamente la temperatura interna, accionando sistemas de calefacción o ventilación para mantener el proceso dentro de los rangos predefinidos de las fases mesófila y termófila.
- **Control de Humedad:** Mantiene la humedad relativa en el rango óptimo (50-70%) mediante la activación controlada de un sistema de ventilación forzada.

- **Acondicionamiento Mecánico:** Ejecuta ciclos programados de mezclado y trituración de los residuos mediante un actuador electromecánico, con el fin de homogeneizar el material y aumentar la superficie de contacto para los microorganismos.
- **Gestión de Seguridad:** Opera un mecanismo de bloqueo electromecánico que asegura la compuerta de acceso durante todo el ciclo operativo, previniendo su apertura accidental.
- **Interfaz de Usuario:** Gestiona la interacción con el operario a través de elementos como un pulsador para el inicio del ciclo e indicadores visuales que informan sobre el estado del proceso y emiten alertas.

4.2.2 Sistema estructural

4.2.2.1 Geometría del reactor

La definición morfológica de la cámara del biodigestor se estableció con base en dos requerimientos funcionales críticos:

- **Eliminación de Zonas Muertas:** Se requiere una geometría carente de vértices angulares para evitar la acumulación estática de material, evitando la formación de focos anaeróbicos indeseados.
- **Isotropía Térmica:** El diseño debe asegurar una transferencia de calor conductiva uniforme, eliminando la presencia de puntos fríos en el sustrato.

Considerando estos criterios, se determinó que la geometría cilíndrica es la configuración óptima. Esta forma geométrica elimina las áreas de estancamiento de biomasa y garantiza una distancia radial constante desde las paredes, lo que favorece la homogeneidad térmica y mecánica durante el ciclo de compostaje.

4.2.2.2 Dimensiones de la tolva

Para determinar la capacidad volumétrica de la tolva, se establecieron las propiedades físicas de la materia orgánica a procesar. Se consideró una densidad aparente de 291 kg/m³, valor característico para residuos de comida según estudios [36].

En la Tabla 4.1 se resumen los parámetros de diseño, considerando una masa máxima de 3 kg para garantizar un margen de seguridad operativa.

Tabla 4.1 Parámetros de materia orgánica

Producto	Masa <i>kg</i>	Densidad <i>kg/m</i>³
Residuos Orgánicos	3	291

El dimensionamiento de la tolva cilíndrica se basa en el cálculo del volumen diario de almacenamiento mediante la relación masa-densidad (ver Ecuación 1) [37].

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (1)$$

Donde:

ρ = densidad aparente del material (291 kg/m³)

m = masa (3 kg)

V = volumen requerido (m³)

Sustituyendo los valores de diseño:

$$V = 0.0103 \text{ m}^3$$

Este resultado define la capacidad mínima de la tolva.

Para lograr el volumen útil requerido, en la Tabla 4.2 se propone la siguiente configuración de altura y radio:

Tabla 4.2 Dimensiones para el contenedor.

Altura	Radio (m)	Volumen (m^3)
0.23	0.13	0.0122 m^3

Aunque esta configuración supera ligeramente el volumen estipulado, es necesario para prevenir desbordamientos.

4.2.2.3 Sistema de mezcla y cizallamiento

El diseño del sistema de mezcla y cizallamiento establece la operación a bajas revoluciones como un parámetro crítico, en concordancia con los fundamentos biológicos expuestos en el Capítulo 2. Esta decisión técnica procura mantener la integridad estructural de la biomasa, evitando su licuefacción, además de asegurar una reducción del tamaño de partícula, variable determinante para optimizar la superficie de contacto microbiana según lo analizado en el marco teórico.

Para satisfacer el requerimiento dual de homogeneización de la mezcla y reducción granulométrica, se definió una arquitectura mecánica basada en un rotor de paletas con geometría radial escalonada (véase la Fig. 4.2).

El diseño contempla la interacción dinámica entre este rotor móvil y un estator de cizallamiento (placa fija) anclado a la pared de la cámara (véase la Fig. 4.3). Esta configuración genera esfuerzos cortantes localizados (cizalla) y de compresión controlada en la interfase paleta-placa, permite reducir el tamaño de partícula de los residuos sólidos orgánicos sin requerir altas velocidades de impacto.

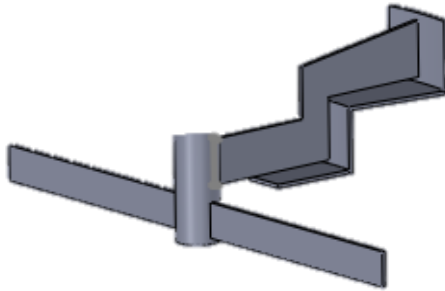


Fig. 4.2 Sistema mezclador y cizallador de paletas geometría escalonada y radial.

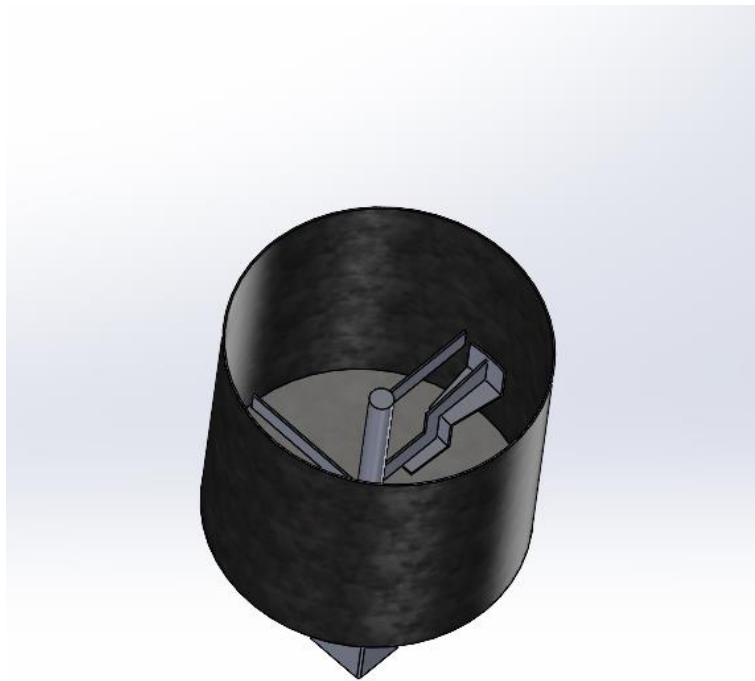


Fig. 4.3 Vista isométrica tolva vertical.

4.2.2.4 Estructura

El diseño estructural se concibió bajo un enfoque modular y autoportante, cuyas dimensiones detalladas y despiece mecánico se encuentran especificados en los planos técnicos del Anexo L.

La estructura fue diseñada para alojar y proteger todos sus componentes. En su interior, dispone de una cámara específica para las resistencias térmicas, donde se acopla una tolva extraíble para la carga de residuos. El diseño modular no solo protege los sistemas eléctricos y de control, sino que también facilita el mantenimiento y el reemplazo de piezas. La estructura está equipada con todas las aberturas necesarias para ventilación, acceso, cableado e interfaz de usuario (botones y LEDs), asegurando una operación segura (véase la Fig. 4.4).

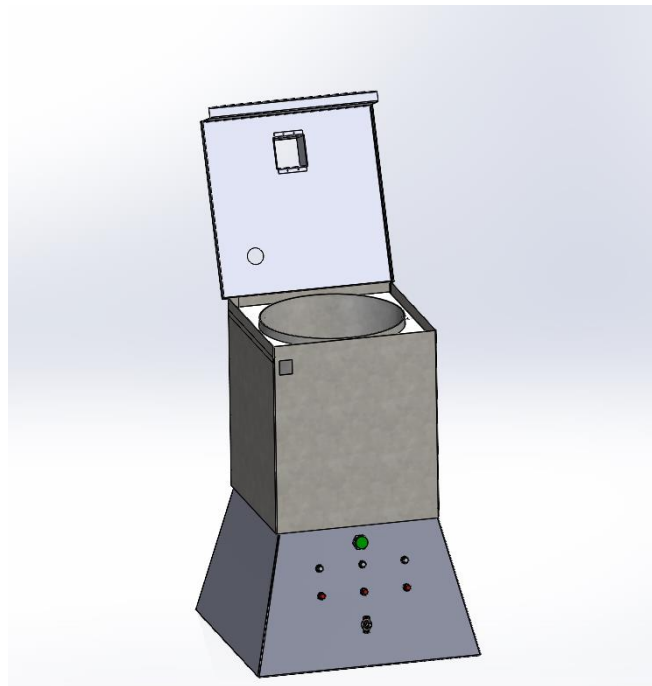


Fig. 4.4 Diseño general de estructura Biodigester.

4.3 Solución propuesta

Como resultado de las especificaciones del sistema y el análisis conceptual previo, se plantea el desarrollo de un biodigestor automatizado. El diseño contempla un contenedor cilíndrico para procesar 2.5 kg de residuos orgánicos domésticos, que integra un mecanismo de paletas escalonadas y radial, operando a bajas revoluciones para reducir la granulometría y airear la mezcla. Para la extracción del producto final, se dispone de una base modular extraíble que permite la descarga sin desmontar la transmisión. El control de las variables termodinámicas se realiza mediante un lazo cerrado que integra sensores de temperatura y humedad, ventilación forzada y calefacción resistiva, gestionado por un microcontrolador. En cuanto a la arquitectura física, se dispone de una estructura que integra una compuerta superior con mecanismo de cierre, asegurando la hermeticidad del reactor y la seguridad operativa.

4.4 Especificaciones del Biodigestor Automatizado

Se proporciona una descripción detallada de la solución propuesta para el Biodigestor Automatizado. Se describen los sistemas estructurales, de control y eléctricos implementados en la construcción del prototipo, se destacan los aspectos técnicos y funcionales que respaldan su diseño y operación.

4.4.1 Metodología para la selección de componentes

Para garantizar la selección adecuada de los componentes, se ha implementado un proceso de selección basado en criterios ponderados. Este enfoque permite analizar distintas alternativas considerando factores clave, asegurando una solución óptima que se ajuste a las necesidades del sistema.

Para seleccionar el componente adecuado, se han evaluado los requerimientos más esenciales. La comparación se realiza mediante una tabla que asigna valores para determinar la importancia relativa de cada factor. A continuación, se muestran los valores relativos a utilizar:

- 0: La fila tiene mayor importancia que la columna.
- 0,5: Ambos criterios son igualmente importantes.
- 1: La columna es más relevante que la fila

Este método facilita una evaluación estructurada y objetiva, permitiendo seleccionar la alternativa de componentes más adecuada para el biodigestor automatizado, equilibrando las necesidades técnicas y las limitaciones del proyecto.

4.4.2 Sistema de Control

4.4.2.1 Selección de Controlador

El sistema requiere una unidad central de procesamiento para ejecutar la lógica de control del biodigestor. Esta unidad leerá los datos de los sensores (temperatura, humedad, señal Usuario y señal de presencia), procesará esta información según el algoritmo definido y activará los actuadores correspondientes (motor, resistencias, actuador de compuerta, ventilador). Además, gestionará la interfaz de usuario. Para lo que se evaluaron en la Tabla 4.3 los criterios de procesamiento, entradas y salidas, dimensiones, comunicación con sensores y costo.

Tabla 4.3 Matriz de criterios ponderados para selección de controlador.

Criterio	Procesamiento	Entradas y salidas	Compatibilidad	Dimensiones	Costo	$\sum$	Ponderación
Procesamiento	-	0,5	0,5	1	1	4	0,27
Entradas y salidas	0,5	-	0,5	0,5	0	2,5	0,17
Compatibilidad	0,5	0,5	-	0	0	2	0,13
Dimensiones	0	0,5	1	-	0	2,5	0,17
Costo	0	1	1	1	-	4	0,27
Total						15	1,00

Para llevar a cabo la evaluación de diversas alternativas, considerando aspectos críticos como la potencia de procesamiento, el número de entradas/salidas, la sencillez de programación y el costo. La Tabla 4.4 presenta un resumen detallado de las especificaciones técnicas de los controladores examinados.

Tabla 4.4 Características técnicas de Controladores.

Características	Procesador	Salidas y Entradas	Protocolo de Comunicación	Dimensiones	Costo
Arduino Uno	ATmega 328P	14 E/S Digitales (6 PWM), 6 Entradas Analógicas	Serial (UART), I2C, SPI	68.6 x 53.4 mm	\$15
Arduino Mega	ATmega 2560	54 E/S Digitales (15 PWM), 16 Entradas Analógicas	4x Serial (UART), I2C, SPI	101.52 x 53.3 mm	\$22
PLC LOGO 6ED1052-1FB08-0BA2,	Módulo Lógico Siemens	8 entradas Digitales, 4 Salidas de Relé	Ethernet, MQTT	71.5 x 90 x 60 mm	\$168

Las puntuaciones finales presentadas en la Tabla 4.5. derivan de la aplicación sistemática de los criterios de diseño sobre las capacidades de cada dispositivo. Los cálculos detallados, junto con las matrices individuales de comparación para cada variable técnica, se encuentran documentados de forma en el **Anexo A**.

Tabla 4.5 Conclusión de evaluación criterios para la selección de Controlador

Conclusiones	Procesamiento	Entradas y salidas	Compatibilidad	Dimensiones	Costo	Σ
Arduino Uno	0.04	0.06	0.02	0.08	0.13	0.34
Arduino Mega	0.09	0.08	0.07	0.06	0.09	0.38
PLC LOGO 6ED1052-1FB08-0BA2,	0.13	0.03	0.04	0.03	0.04	0.28
Arduino Mega > Arduino Uno > PLC Logo						

Conforme a los resultados obtenidos, se seleccionó el Arduino Mega 2560 como la unidad central de procesamiento debido a que refleja un equilibrio óptimo entre versatilidad de comunicación, capacidad de procesamiento, compatibilidad con componentes electrónicos estándar y viabilidad económica para el desarrollo del prototipo.

4.4.2.2 Arduino mega 2560

Como unidad central de procesamiento se seleccionó la placa de desarrollo Arduino Mega 2560 (véase la Fig. 4.5), basada en el microcontrolador ATmega2560. se distingue por su extensa capacidad de interconexión, ofreciendo un total de 54 pines digitales de entrada/salida (I/O), de los cuales 15 permiten modulación por ancho de pulso (PWM), además de 16 canales para entradas analógicas.

A nivel de arquitectura, el dispositivo opera mediante un oscilador de cristal de 16 MHz y dispone de cuatro puertos UART para comunicación serial por hardware. Su integración al sistema es versátil gracias a la inclusión de un puerto USB, conector de alimentación externa (Jack DC), interfaz ICSP y botón de reinicio. Asimismo, su diseño físico mantiene la compatibilidad con la mayoría de las placas de expansión (shields) desarrolladas originalmente para las versiones Uno y Duemilanove [38].

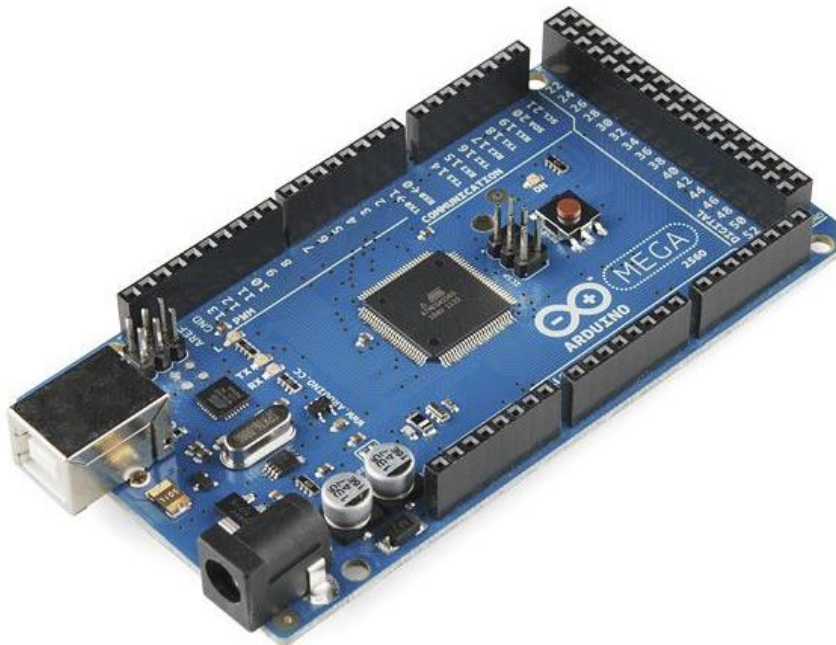


Fig. 4.5 Arduino Mega 2560 [38].

4.4.2.3 Selección de sensor de temperatura y humedad

Se dispone de una amplia variedad de sensores eléctricos y electrónicos para medir magnitudes físicas. Para la medición de temperatura, particularmente existen diversas tecnologías, incluyendo termopares, detectores resistivos de temperatura (RTD), termistores,

dispositivos bimetálicos y radiadores infrarrojos. La elección del sensor más adecuado depende directamente de la aplicación específica, las condiciones ambientales de operación y el criterio del ingeniero.

De acuerdo con los requerimientos expuestos, el sensor debe cumplir los siguientes. El y más importante es que opere de manera fiable en el rango de temperatura esperado (aproximadamente 0°C a 70°C) y en un ambiente húmedo dentro del biodigestor, y que además sea compatible con la placa Arduino, se propone una evaluación de las características de los sensores DHT11, DHT22 y SHT20. Estos sensores han sido elegidos por su capacidad de medir tanto temperatura como humedad, además de su disponibilidad en el mercado, lo que facilita su eventual reemplazo si fuera necesario.

En la Tabla 4.6 se presentan los criterios considerados en la selección del sensor de temperatura y humedad. En esta matriz, se otorgó la mayor relevancia a los rangos de medición de temperatura y humedad, dado que la precisión en estas variables es crítica para el éxito del proceso de biodigestión.

Tabla 4.6 Matriz de criterios ponderados para la selección de sensor de temperatura y humedad.

Criterio	Rango de medición temperatura	Rango de medición Humedad	Comunicación	Implementación	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Rango de medición temperatura	-	0.5	1	1	1	4.5	0.30
Rango de medición Humedad	0.5	-	1	1	1	4.5	0.30
Comunicación	0	0	-	1	1	3	0.20
Implementación	0	0	0	-	0.5	1.5	0.10
Costo	0	0	0	0.5	-	1.5	0.10
Total						15	1.00

En la Tabla 4.7 se presenta un resumen de las características técnicas a ser ponderados.

Tabla 4.7 Características técnicas sensores de temperatura y humedad.

	Rango de medición temperatura	Rango de medición Humedad	Comunicación	alimentación	Costo
DHT11	0 a 50 °C	20 a 90 %	Digital (I2C)	3 a 5 VDC	\$4
DHT22	-40 a 80 °C	0 a 100%	Digital (I2C)	3.3 a 6 VDC	\$7
SHT20	-40 a 125 °C	0 a 100%	Digital (I2C)	2.1 a 3.6VDC	\$10

Las puntuaciones finales presentadas en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** derivan de la aplicación sistemática de los criterios de diseño sobre las capacidades de cada sensor. Las matrices que las comparaciones específicas por cada variable técnica se encuentran documentados en el Anexo B.

Tabla 4.8 Conclusión de evaluación criterios para la selección de Sensor de Humedad y temperatura

Conclusión	Rango de medición temperatura	Rango de medición Humedad	Comunicación	Implementación	Costo	Σ
DHT11	0.05	0.06	0.07	0.04	0.04	0.26
DHT22	0.10	0.15	0.07	0.04	0.04	0.40
SHT20	0.15	0.09	0.07	0.02	0.02	0.34

$$DHT22 > SHT20 > DHT11$$

Se seleccionó el Sensor DHT22 como la mejor solución para el sistema. Esta elección se fundamenta en su equilibrio óptimo entre precisión, rangos de medición de ambas variables y costo, lo que garantiza un monitoreo fiable y una integración sencilla con la unidad central de procesamiento.

4.4.2.4 Sensor DHT22.

El DHT22 se presenta como un sensor apropiado para el seguimiento de temperatura y humedad en el biodigestor (véase la Fig. 4.6). Su fiabilidad y amplio rango operativo cubren

las condiciones típicas del compostaje (aproximadamente 0°C a 80°C y un ambiente húmedo).

La capacidad de este sensor para medir ambas variables simplifica la arquitectura del sistema de control además que su salida digital es compatible con Arduino.

A continuación, se presenta la Tabla 4.9 con las especificaciones técnicas del sensor DHT22[39]:

Tabla 4.9 Especificaciones técnicas del sensor DHT22[39]

Rango de Temperatura	Precisión Temperatura	Rango de Humedad	Precisión Humedad	Voltaje de Operación	Corriente de Operación	Frecuencia de Muestreo
-40°C a 80°C	±0.5°C	0% a 99.9% RH	±2% RH (típico)	3.3V a 5V DC	1-1.5 mA	Máximo 0.5 Hz (cada 2 segundos)

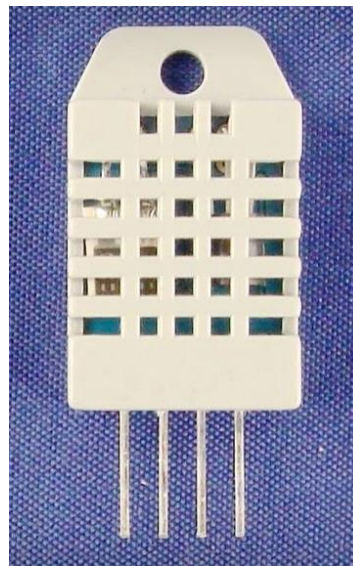


Fig. 4.6 Sensor de temperatura y humedad DHT22 [39].

Los pines que consta son: VCC, DATA, GND

4.4.3 Sistema eléctrico

4.4.3.1 Cálculo potencia para selección de motor

El biodigestor tiene doble función. Tritura residuos, lo que genera resistencia al corte. Además, actúa como deflector al mezclar, aumentando la turbulencia y el par. Por ello, los cálculos de trituración y mezcla consideran este componente esencial. Su forma y posición influyen directamente en la eficacia del corte y la potencia de la mezcla. En consecuencia, asumir que funciona como deflector resulta necesario para estimar el número de potencia (N_p) que permite relacionar la fuerza de resistencia con la fuerza de inercia. Para esto se establecieron las propiedades del material en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Propiedades físicas para la materia orgánica

Parámetro	Símbolo	Valor
Densidad	ρ	291 kg/m ³
Viscosidad Aparente Estimada	μ	0.3 Pa·s (300 cP)
Resistencia al Corte Estimada	τ_s	1.0 MPa

Para dimensionar adecuadamente el sistema de accionamiento del biodigestor automatizado, se requiere determinar la potencia necesaria para llevar a cabo las funciones de trituración de los residuos orgánicos y el mezclado homogéneo de la biomasa durante el proceso de compostaje. A continuación, se presenta el análisis y los cálculos realizados para estimar la potencia de diseño requerida. Selección de Parámetros Operacionales y Geométricos

En la Tabla 4.11 se definen los parámetros operacionales y geométricos del sistema, para realizar los cálculos.

Tabla 4.11 Parámetros del sistema.

Parámetro	Valor	Observaciones
Velocidad de Operación (N)	20 a 40 RPM	Velocidad optimizada
Diámetro del Impulsor ($D_{impulsor}$)	0.25 m	Dimensión clave para la mezcla
Nivel del Material (H_c)	0.23 m.	Capacidad de procesamiento por lote.

Cálculo del Número de Reynolds (NRe)

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que indica el régimen de flujo dentro del biodigestor (ver Ecuación 2)[40].

:

$$NRe = \frac{\rho \cdot N \cdot D_{impulsor}^2}{\mu} \quad (2)$$

Realizando la sustitución, se obtiene:

$$NRe \approx 30.31$$

El valor de $NRe \approx 30.31$ indica que el régimen de flujo dentro del biodigestor se encuentra en la zona de transición, lo que implica una combinación de fuerzas viscosas e inerciales actuando sobre el material

Estimación del Número de Potencia (N_p) es un coeficiente adimensional que relaciona la potencia requerida para la agitación con las propiedades del fluido y las características del impulsor Para un régimen de flujo transicional ($NRe \approx 30.31$) y asumiendo un coeficiente de arrastre (KL) conservador para paleta escalonada, se puede estimar N_p mediante la siguiente relación.

$$N_p \approx 1.98$$

Este valor de Np se utilizará para estimar la potencia requerida para el mezclado.

Cálculo de la Potencia para Mezclado ($P_{mezclado}$)

La potencia requerida para el mezclado se calcula (ver Ecuación 3) [41].

$$P_{mezclado} = Np \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D_{impulsor}^5 \quad (2)$$

Donde:

$P_{\{mezclado\}}$: Potencia requerida para el mezclado (en Watts).

Np : Número de potencia (adimensional, depende del tipo de impulsor y el régimen de flujo).

ρ : Densidad del fluido (en kg/m^3).

N : Velocidad de rotación del impulsor (en revoluciones por segundo, rev/s).

$D_{impulsor}$: Diámetro del impulsor (en metros, m).

Al sustituir los valores correspondientes, se obtiene que:

$$P_{mezclado} \approx 0.0561, W$$

La potencia estimada para el mezclado es relativamente baja.

Cálculo del Par para Mezclado ($T_{mezclado}$)

El par (torque) requerido para el mezclado se calcula mediante la siguiente relación (ver Ecuación 4) [42]:

$$T_{mezclado} = \frac{P_{mezclado}}{2 \cdot \pi \cdot N} \quad (4)$$

Donde:

$T_{mezclado}$: Representa el par requerido para el mezclado (torque) en

$P_{mezclado}$: Representa la potencia requerida para el mezclado en (W).

N : Representa la velocidad de rotación del impulsor en (rev/s).

Sustituyendo los valores:

$$T_{mezclado} \approx 0.0179, N \cdot m$$

Cálculo del Par para Trituración (Trituración)

Asumiendo una fuerza de corte estimada (F_{corte}) de 30 N y un radio efectivo (R_{paleta}) correspondiente al radio de las puntas de la paleta (0.12 m) (ver Ecuación 5)[42]:

$$T_{trituration} = F_{corte} \cdot R_{paleta} \quad (5)$$

Donde:

: Representa el par (torque) requerido para triturar los residuos orgánicos (en $N \cdot m$).

$F_{\{corte\}}$: Representa la fuerza de corte estimada necesaria para desmenuzar los residuos orgánicos (en N).

$R_{\{paleta\}}$: Representa el radio efectivo de la paleta del mezclador/triturador, que corresponde al radio de las puntas de la paleta (en m).

sustituyendo tenemos que

$$T_{trituracion} = 3,6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Este valor de par para la trituration es significativamente mayor que el par requerido para el mezclado, lo que indica que la trituration será la demanda dominante de torque.

Dado que el par y la potencia requerida para la trituration son considerablemente mayores que los valores correspondientes al mezclado, El par total de diseño del sistema de accionamiento se basará en la demanda de la trituration:

$$T_{\{diseno\}} \approx T_{\{trituracion\}} \approx 3,6 \text{ Nm}$$

4.4.3.2 Selección del Motor

Para el sistema de mezcla y cizallamiento del biodigestor, se requiere una unidad de potencia capaz de desplazar la carga orgánica de manera constante. Esta selección se realiza en función de los requerimientos de potencia y torque calculados previamente, los cuales determinan la fuerza necesaria para vencer la resistencia mecánica de la biomasa. Para cumplir con dichas especificaciones, se evaluaron tres tecnologías: Motor AC 120V, Motorreductor DC 24V y Motor a Pasos 24V.

La selección se basa en la metodología de criterios ponderados detallada en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..** En esta matriz, se identificó el torque como el factor determinante, debido a la resistencia mecánica que presenta la biomasa. En segundo orden de relevancia se situó el costo , seguido de la velocidad y la eficiencia.

Tabla 4.12 Matriz de criterios ponderados para la selección del Motor.

Criterio	(baja) Velocidad	Eficiencia	Torque	Control	Costo del Motor	$\sum +1$	Ponderación
(baja) Velocidad	-	0.5	0	1	0	2.5	0.17
Eficiencia	0.5	-	0	1	0	2.5	0.17
Torque	1	1	-	1	1	5	0.33
Control	0	0	0	-	1	2	0.13
Costo del Motor	1	1	0	0	-	3	0.20
Total						15	1

En la Tabla 4.13 se presenta una breve descripción de las características técnicas de las alternativas mencionadas, las cuales serán tomadas en cuenta para su evaluación.

Tabla 4.13 Características técnicas de motores

Alternativa	(baja) Velocidad (RPM)	Eficiencia a bajas velocidades	Torque	Control	Costo de Motor
Motor AC 120V	3600	Mala	Alto	VFD	110\$
Motor reductor DC 24V	90	Buena	Bueno	ON/OFF; PWM	65\$
Motor DC a Pasos 24V	Variable	Moderada	Moderado	Requiere driver	80\$

Las puntuaciones finales de la Tabla 4.14, resultan de la aplicación sistemática de los pesos asignados sobre las capacidades operativas de cada motor. El desglose de los cálculos y las comparaciones para cada variable se encuentran en el Anexo C.

Tabla 4.14 Conclusión de la evaluación de criterios para la selección del Motor

Conclusión	(baja) Velocidad	Eficiencia a bajas velocidades	Torque	Control	Costo del Motor	Σ
Motor Ac 110V	0.03	0.03	0.17	0.03	0.03	0.29
Motorreductor DC 24V	0.08	0.08	0.11	0.07	0.10	0.44
Motor DC a Pasos 24V	0.06	0.06	0.06	0.03	0.07	0.27

En función de los resultados presentados en la, Se seleccionó el Motorreductor DC de 24V como la alternativa para el sistema. Esta decisión se fundamenta en su elevado torque a bajas revoluciones y su facilidad de control mediante señales PWM, lo que permite satisfacer los requerimientos de torque del biodigestor con una alta eficiencia operativa y un costo menor.

4.4.3.3 Descripción del motor DC con reductor

El motorreductor de corriente continua sin escobillas (Brushless DC) de 24 V de la serie JK42BL (véase la Fig. 4.7), que ha sido seleccionado, ofrece una mayor eficiencia y vida útil en comparación con motores DC convencionales. Este actuador integra una caja reductora planetaria interna para entregar la potencia requerida a bajas revoluciones[43]. En la Tabla 4.15 y Tabla 4.16, se detallan sus características principales eléctricas basadas en la ficha técnica.



Fig. 4.7 Motorreductor DC 24 V ,100 W.

Tabla 4.15 Parámetros de Funcionamiento Sin Carga[43].

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Tensión de alimentación	V	24	Voltios (DC)	Voltaje nominal de operación.
Velocidad de Salida	N	66	r/min (RPM)	Revoluciones por minuto del eje
Corriente de Consumo	I	0.8	Amperios (A)	Corriente de consumo en vacío.

Tabla 4.16 Parámetros de Funcionamiento a Máxima Eficiencia[43].

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Tensión	V	24	Voltios (V)	Voltaje nominal.
Velocidad de Salida	N	60	r/min (RPM)	Revoluciones del eje
Corriente de Consumo	I	4	Amperios (A)	Corriente consumida
Torque de Salida	T	9.2	Nm (Newton-metro)	Fuerza de giro en el eje
Potencia de Salida	P_out	76	Vatios (W)	Potencia mecánica útil

Aunque a primeras instancias la velocidad salida del este motorreductor es superior al calculado, este se compensa mediante una relación de transmisión de fuerza de 2:1 a través de una polea, Esta solución reduce la velocidad a un rango de 30 RPM, lo cual entra en el rango operativo ideal del diseño. Esta configuración mecánica no solo ajusta la velocidad, sino que multiplica el torque disponible en el motor (9,20 Nm) por un factor de dos, resultando en un torque final aproximado de 18,4 Nm. Garantizando un funcionamiento

robusto y sin sobrecargas para el motor, ya que supera los requerimientos de diseño originales (13,7 Nm),

4.4.3.4 Selección mecanismo de seguro de cierre compuerta de ingreso y salida

Para garantizar un sellado hermético y prevenir aperturas accidentales durante el proceso de biodigestión, se requiere un sistema de bloqueo automático que facilite además la manipulación de la tolva removible. Se evaluaron tres alternativas tecnológicas: Cerradura solenoide de 12V, Cerradura con actuador y Pestillo manual.

La evaluación de estas opciones se fundamenta en la matriz de criterios ponderados de la Tabla 4.17. Tras analizarla la confiabilidad resultó ser el criterio más importante, seguido por la Facilidad de Integración, Fuerza de Retención y Costo. En resumen, la selección prioriza la confiabilidad y facilidad de integración para asegurar un funcionamiento seguro, con un costo razonable.

Tabla 4.17 Matriz de criterios ponderados para la selección Mecanismo de seguro de cierre.

Criterio	Fuerza Retención	Confiabilidad	Facilidad Integración	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Fuerza Retención	-	0	0	1	2	0.20
Confiabilidad	1	-	1	1	4	0.40
Facilidad Integración	1	0	-	1	3	0.30
Costo	0	0	0	0	1	0.10
Total					10	1.00

A continuación, la Tabla 4.18 presenta las características principales de los mecanismos del Seguro de cierre para evaluar la mejor opción.

Tabla 4.18 Característica técnicas de mecanismos de Seguro de cierre.

Alternativas	Fuerza Retención	Confiabilidad	Integración	Costo
Cerradura solenoide 12V	Alta	Media	Fácil de integrar	\$4
Cerradura con actuador	Muy Alta	Alta	Requiere adaptación	\$30
Pestillo Manual	Media	Media	Fácil de instalar	\$15

Las puntuaciones finales presentadas en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** derivan de la aplicación sistemática de los criterios de diseño sobre las capacidades de cada mecanismo. Los cálculos detallados y las comparaciones se encuentran en el Anexo D.

Tabla 4.19 Conclusiones de evaluación criterios para la selección Mecanismo de seguro de cierre.

Criterio	Fuerza Retención	Confiabilidad	Integración	Costo	Σ
Cerradura Solenoide 12V	0.07	0.17	0.15	0.05	0.43
Cerradura con actuador	0.10	0.17	0.05	0.02	0.33
Pesillo Manual	0.03	0.07	0.10	0.03	0.23

Cerradura Solenoide 12V > Cerradura con Actuador > Pestillo Manual

De acuerdo con la evaluación de criterios presentada, Se seleccionó la Cerradura Solenoide de 12V como la solución definitiva. Esta elección se fundamenta en que el dispositivo ofrece el equilibrio óptimo entre una alta confiabilidad operativa y una integración directa con el sistema de control, permitiendo actuar como un pestillo electromecánico eficiente para la seguridad de la compuerta con un costo de implementación reducido.

4.4.3.5 Descripción cerradura solenoide 12 V

Este es dispositivo electromecánico que transforma energía eléctrica en movimiento lineal. Su bobina interna, al energizarse, crea un campo magnético que desplaza un núcleo. Esta acción permite que funcione como mecanismo de cierre, bloqueo o activación en distintos sistemas. Este dispositivo electromecánico convierte la energía eléctrica en movimiento

lineal. Su funcionamiento se basa en una bobina interna que, al ser energizada con 12V DC, genera un campo magnético que desplaza un núcleo metálico. Este mecanismo es de tipo normalmente cerrado, lo que significa que el pasador permanece extendido bloqueando la apertura hasta que recibe la señal eléctrica para retraerse. Debido a su eje de forma triangular, es ideal para sistemas de seguridad y control de acceso en compartimientos en este caso al de la cámara de biodigestión[44]. Las características técnicas se presentan en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20 Características técnicas de solenoide 12V[44]

Parámetro	Alimentación	Corriente	Potencia	Impedancia de bobina
Valor	12V DC	0.7 A	7.5 W	20.4 Ohm

4.4.3.6 Selección de resistencias térmicas

Con la finalidad de alcanzar y mantener las temperaturas requeridas en las fases mesófila y termófila del compostaje (típicamente entre 45°C y 70°C), se incorporarán resistencias eléctricas calefactoras. Estas serán gestionadas por el sistema de control en función de las lecturas del sensor de temperatura. Se considera el uso de resistencias considerando estas características técnicas como temperatura, dimensiones, potencia y costo para adaptarse al sistema, todas estas deben funcionar a 110 V.

A continuación, se presenta la Tabla 4.21 de criterios ponderados para definir la importancia de las características mencionadas. Esta concluyó que las dimensiones son el factor más crítico, seguido por el consumo y la temperatura, siendo el costo el menos ponderado.

Tabla 4.21 Matriz de criterios ponderados para la selección de resistencia térmica.

Criterio	Temperatur	Dimensiones	Consumo	Costo	$\sum$+1	Ponderación
Temperatura	-	0	0	1	2	0.20
Dimensiones	1	-	1	1	4	0.40
Potencia	1	0	-	1	3	0.30
Costo	0	0	0	-	1	0.10
Total					10	1.00

A continuación, la Tabla 4.22 presenta las alternativas propuestas y sus características de acuerdo a los criterios mencionados.

Tabla 4.22 Características técnicas de resistencias térmicas.

Alternativas	Temperatura	Dimensiones	Costo	Consumo
Resistencia tubular REA013.- Niquelina de Temperatura	700	diámetro (12mm) x Largo 94mm	\$18	300W
REA016. Niquelina de temperatura	700	diámetro 18 cm	\$26	300W
	240	2.5 ancho, alto 9.5cm y espesor 4mm	\$7	50W

Las puntuaciones finales presentadas en la .

Tabla 4.23 resultan de la aplicación sistemática de los criterios de diseño sobre las capacidades de cada dispositivo. Las matrices detalladas se encuentran en el Anexo E.

Tabla 4.23 Conclusiones de evaluación criterios para la selección de resistencia térmica.

Conclusión	Temperatura	Dimensiones	Potencia	Costo	$\sum$
Resistencia tubular	0.10	0.13	0.08	0.02	0.33
REA013.- Niquelina de Temperatura	0.07	0.07	0.08	0.03	0.24
REA016. Niquelina de temperatura	0.03	0.20	0.15	0.05	0.43
REA016 > Resistencia Tubular > REA013					

Según la, tres resistencias evaluadas, se seleccionó la niquelina de temperatura REA016. Esta elección se justifica por su equilibrio óptimo entre dimensiones compactas y potencia adecuada, lo que permite una instalación eficiente dentro de la estructura autoportante del biodigestor, garantizando el incremento térmico necesario para el proceso de degradación de materia orgánica.

4.4.3.7 Descripción REA016 niquelina de temperatura

Este tipo de resistencia se compone de un elemento calefactor de cerámica PTC encapsulado en un tubo de aluminio (véase la Fig. 4.8), lo que les otorga una forma rectangular y robusta, ideal para diversas aplicaciones de calefacción [45], las características técnicas de este modelo de detallan en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24 Características técnicas REA016 niquelina de temperatura[45].

Principio de Funcionamiento	Materiales de Composición	Temperatura Máxima	Dimensión: Ancho	Dimensión: Alto	Dimensión: Espesor
Elemento Calefactor PTC (Coeficiente de Temperatura Positivo)	Elemento de calefacción de cerámica PTC y tubo de aluminio	270 °C	2.5 cm	9.5 cm	0.5 cm



Fig. 4.8 REA016 niquelina de temperatura

4.4.3.8 Selección fuente de alimentación para el sistema

Considerando que el sistema opera con corriente continua regulada, es necesario transformar la tensión de red de 120 VAC. Se requiere dos niveles de voltaje específicos para los elementos de potencia (motor y actuador) utilizan 24 VDC y la unidad de control que funciona con 12 VDC. Para resolver esta necesidad, se evaluaron alternativas entre las siguientes dos topologías de diseño:

- Arquitectura Centralizada (Fuente Única): Uso de una sola fuente con múltiples salidas y diversos voltajes. Aunque simplifica el montaje, concentra el calor y comparte la referencia de tierra (GND) entre componentes[46].
- Arquitectura de Cargas Segregadas (Fuentes Independientes): Conexión de dos fuentes en paralelo a la red de 120 VAC, pero con salidas DC aisladas físicamente.

Una fuente alimenta exclusivamente la etapa de potencia y la otra la etapa de control, minimizando el riesgo de que el ruido eléctrico de los motores afecte al microcontrolador[46].

La evaluación de estas alternativas se basa en la metodología de criterios ponderados detallada en la Tabla 4.25. En esta matriz, se definió la fiabilidad como el factor más crítico, con el objetivo de minimizar el riesgo de que el ruido eléctrico de la etapa de potencia afecte al microcontrolador. Seguidamente, se consideró el tipo de salida y las dimensiones.

Tabla 4.25 Matriz de criterios ponderados para la selección de Fuente.

Criterio	Potencia	Salida	Fiabilidad	Dimensiones	Costo	$\sum +1$	Ponderación
Potencia	-	0.5	0	0.5	0	2	0.13
Salida	0.5	-	0.5	1	1	4	0.27
Fiabilidad	1	0.5	-	1	1	4.5	0.30
Dimensiones	0.5	0	0	-	1	2.5	0.17
Costo	1	0	0	0	-	2	0.13
Total						15	1.00

La Tabla 4.26 presenta las características más importantes a evaluar para la configuración de la fuente del sistema, con el objetivo de ayudar a seleccionar la mejor opción.

Tabla 4.26 Características técnicas de Fuentes de Alimentación

Alternativa	Potencia	Salida	Fiabilidad	Dimensiones	Costo
Modular (Slim 100W 24V IP20, Fuente 12V-1A)	~72W (60W + 12W)	Aisladas: 24V a 2.5A 2. 12V a 1A	Muy Alta: Aislamiento eléctrico total entre salidas.)	53 x 90 x 55 ;70 x 50 x 30 mm	\$18
Fuente Mean Well QP-150D	~150W (Total)	Múltiple: 5V a 15A 12V a 3A 24V a 4A	Alta: Salidas dedicadas y estables, aunque comparten una tierra común.	215 x 115 x 50 mm	\$97
Fuente Mean Well RD-125B	~130W (Total)	Doble: 1. 5V a 15A 24V a 2.5A	Media: Requiere convertidor externo (buck) para 12V,	199 x 110 x 50 mm	\$35

Las puntuaciones finales presentadas en la Tabla 4.27 derivan de la aplicación sistemática de los criterios de diseño sobre las capacidades de cada configuración. Los cálculos detallados y las matrices de comparación correspondientes se encuentran documentados en el Anexo F.

Tabla 4.27 Conclusiones de evaluación criterios para la selección de Fuente de poder

Conclusión	Potencia	Salida	Fiabilidad	Dimensiones	Costo	Σ
Modular Slim 100W 24V IP20, Fuente 12V	0.02	0.09	0.15	0.08	0.07	0.41
Fuente Mean Well QP-150D	0.07	0.13	0.10	0.03	0.02	0.35
Fuente Mean Well RD-125B	0.04	0.04	0.05	0.06	0.04	0.24

Modular Slim > Mean Well QP-150D > Mean Well RD-125B

El análisis de la concluyó en la seleccion del Sistema de Alimentación Modular (Slim 100W 24V y fuente 12V). Esta elección se fundamenta en su capacidad para aislar eléctricamente las etapas de potencia y control mediante salidas físicamente separadas, lo que garantiza una alta fiabilidad ante perturbaciones electromagnéticas. Asimismo, esta configuración ofrece un diseño compacto y una eficiencia en costos superior a las opciones industriales centralizadas evaluadas.

4.4.3.9 Descripción sistema de alimentación modular

El sistema implementado consta de dos unidades de transformación AC/DC independientes. La principal ventaja de esta configuración es el aislamiento entre las cargas de alta potencia y los componentes electrónicos sensibles, lo que garantiza una operación robusta y libre de interferencias. A continuación, la Tabla 4.28 y Tabla 4.29 detallan las especificaciones técnicas de cada componente.

Fuente Principal (Slim 100W 24V IP20)

La fuente Slim 100W 24V IP20 (véase la

Fig. 4.9) se destinó a alimentar los componentes que realizan el trabajo pesado, como motorreductor, solenoide y ventilador[47].

Tabla 4.28 Características técnicas Slim 60W 24V IP20[47].

Tipo	Entrada	Salida	Protecciones	Índice de Protección	Dimensiones
Fuente de alimentación conmutada (SMPS) AC/DC, perfil delgado	Rango universal (típicamente 85-264VAC)	24V DC, con una corriente máxima de 4.2A (100W)	Sobrecarga, sobretensión y cortocircuito	IP20 (protección contra sólidos >12.5mm, sin protección contra líquidos)	53 x 90 x 55 mm



Fig. 4.9 Fuente Slim 100W 24V IP20.

Fuente Secundaria (12VDC)

Esta fuente compacta (véase la Fig. 4.10), provee una alimentación limpia y de bajo voltaje para la electrónica de control.

Tabla 4.29 Características técnicas Fuente genérica 12 V DC a 1 A[48].

Tipo	Tensión de Entrada	Salida	Dimensiones (mm)
Adaptador de pared o fuente de sobremesa AC/DC	Rango universal (típicamente 100-240VAC)	12 V DC, con una corriente máxima de 1A (12W)	70 x 50 x 30 mm



Fig. 4.10 Fuente genérica 12 V DC

4.4.3.10 Gabinete de alojamiento para control y potencia

Para la integración y protección de los componentes electrónicos (Microcontrolador, fuentes, relés), se optó por la implementación de un gabinete industrial estanco de la línea JSL Serie 200 (véase la Fig. 4.11). La selección de este envoltorio prefabricado priorizó la resistencia a condiciones ambientales adversas, A diferencia de los gabinetes metálicos, esta unidad está fabricada en termoplástico de ingeniería (ABS/Polycarbonato), lo que le confiere propiedades de aislamiento eléctrico y una alta resistencia a la corrosión química y a los impactos mecánicos. El gabinete seleccionado posee dimensiones de 220 x 170 x 105 mm, ofreciendo el volumen necesario para el ruteo ordenado del cableado. Asimismo, cumple con el estándar IEC 60529 que garantiza un grado de protección IP65. Esta certificación asegura la hermeticidad total contra la entrada de polvo y la protección contra chorros de agua a baja presión en todas las

direcciones, salvaguardando la integridad de la electrónica de control ante las condiciones de operación del prototipo[49].



Fig. 4.11 Gabinete de termoplástico[49].

4.4.3.11 Aislante Térmico

Para minimizar las pérdidas energéticas y mantener la estabilidad térmica durante la fase termófila, se seleccionó el material aislante reflectivo Prodex AD10. Este componente es una estructura compuesta que integra un núcleo de espuma de polietileno de celda cerrada con un espesor nominal de 10 mm, recubierto en ambas caras por láminas de aluminio puro.

La selección de este material responde a su baja emitancia (0.03), propiedad que le permite bloquear la transferencia de calor por radiación hacia el exterior. Asimismo, un factor determinante para su aplicación en este entorno húmedo es su resistencia biológica; de

acuerdo con las especificaciones del fabricante, el material es resistente y no promueve el crecimiento de hongos ni moho, evitando la contaminación cruzada en el área de procesamiento[50].

A continuación, en la Tabla 4.30 se detallan las especificaciones operativas del material:

Tabla 4.30 Propiedades Técnicas del Aislante Prodex AD10[50].

Propiedad Técnica	Valor / Característica
Composición	Espuma de polietileno + Aluminio (ambas caras)
Espesor Nominal	10 ± 0.70 mm
Rango de Temperatura Operativa	-20°C a 80°C
Índice de Inflamabilidad	(No propaga llama)
Emitancia	0.03 (Alta reflectividad térmica)
Resistencia Biológica	No promueve crecimiento de hongos

4.5 Proceso de Construcción

Este capítulo describe la fabricación e implementación del prototipo. Se detalla el método de construcción, ensamblaje de componentes y puesta en marcha, asegurando el cumplimiento de las especificaciones de diseño, fabricación y montaje del sistema estructural

En esta sección se describen los procedimientos de manufactura y ensamblaje de los componentes físicos que constituyen la estructura del biodigestor. La construcción se ejecutó siguiendo una secuencia metodológica, desde la fabricación de los componentes primarios hasta el ensamblaje modular, con el fin de garantizar la robustez estructural, la funcionalidad operativa y la correspondencia con el diseño CAD desarrollado.

4.4.1 Fabricación de la estructura modular autoportante

La estructura principal funciona como el elemento autoportante del prototipo. Su diseño soporta todos los componentes y resiste las condiciones operativas. Para su construcción, se utilizó acero laminado en frío y galvanizado (Norma NTE INEN 2221). Las propiedades del

material se detallan en la Tabla 4.31. La selección priorizó la alta resistencia a la corrosión del recubrimiento de zinc[51]. Esta protección es indispensable para tolerar la humedad constante y el pH ácido del proceso de compostaje.

Tabla 4.31 Especificaciones técnicas del Acero Galvanizado (DIPAC)[51].

Parámetro	Especificación Técnica
Material Base	Acero laminado en frío (Cold Rolled)
Normativa de Referencia	NTE INEN 2221 (Ecuador) / ASTM A653 (Internacional)
Tipo de Recubrimiento	Galvanizado por inmersión en caliente (Zinc)
Propiedad Principal	Alta resistencia a la corrosión por oxidación
Propiedades Mecánicas	Alta ductilidad y resistencia a la tracción
Aplicación en Prototipo	Chasis estructural y paneles de contención
Espesor	1.6 mm
Dimensiones	1220 x 2440 mm

La construcción del equipo se dividió en dos secciones. La Base Estructural de Alojamiento, diseñada para soportar el peso total del sistema y albergar el motor y los componentes electrónicos, se fabricó mediante soldadura por arco (electrodo E6013). Esto garantiza la rigidez necesaria para absorber las vibraciones mecánicas y proteger los sistemas de control. Por el contrario, para el ensamblaje de la cámara superior, se optó por uniones remachadas (véase la Fig. 4.12). Esta técnica permitió unir los paneles de la carcasa evitando las deformaciones térmicas asociadas a la soldadura, asegurando así la precisión dimensional del contenedor.



Fig. 4.12 Estructura modular autoportante.

4.4.2 Fabricación de la Tolva Principal

Para la fabricación de la tolva vertical, la cual aloja la materia orgánica, se seleccionó acero laminado en frío y galvanizado. Debido a las propiedades del material detalladas en la Tabla 4.29. El proceso de manufactura incluyó el corte de la plancha de acero, seguido del rolado para lograr la geometría cilíndrica requerida. Las uniones se ejecutaron soldadura por arco con electrodo E6013[52]. En la superficie exterior, se aplicó un acabado con pintura anticorrosiva estándar para proporcionar protección frente a las condiciones ambientales (véase la Fig. 4.13).



Fig. 4.13 Tolva vertical con recubrimiento.

4.4.3 Construcción del Sistema de Cizallamiento y Mezcla

El mecanismo realiza la reducción granulométrica y la aireación del material orgánico. Se fabricó íntegramente en acero inoxidable (eje, paletas y elemento fijo de cizallamiento). La selección de este material garantiza la inocuidad y resistencia a la corrosión. No requiere recubrimientos adicionales. El eje central se mecanizó en un torno convencional para asegurar su concentricidad. Por su parte, las paletas y el elemento fijo de cizallamiento, se fabricaron mediante métodos manuales. Se empleó corte abrasivo para el dimensionado general. Posteriormente, se realizó un proceso de limado para el ajuste final de la geometría según el diseño CAD.

El ensamblaje se realizó mediante soldadura por arco. Se utilizó el electrodo E316L[53] para preservar la resistencia química de la unión (Véase la Fig. 4.14).



Fig. 4.14 Paletas soldadas a eje de acero inoxidable

Para la transferencia de movimiento, se implementó un sistema de poleas y banda con una relación de transmisión de 2:1 (Véase la Fig. 4.15). Esta configuración física reduce la velocidad de giro y duplicar el torque aplicado al eje del mezclador. Para el montaje, se mecanizaron bujes de acople a medida en torno. Estos elementos garantizan la fijación solidaria entre las poleas y los ejes. Finalmente, se validó la alineación axial y la tensión de la banda para mitigar cargas vibratorias en la estructura (Véase la Fig. 4.16).



Fig. 4.15 Sistema de transmisión de poleas 2:1

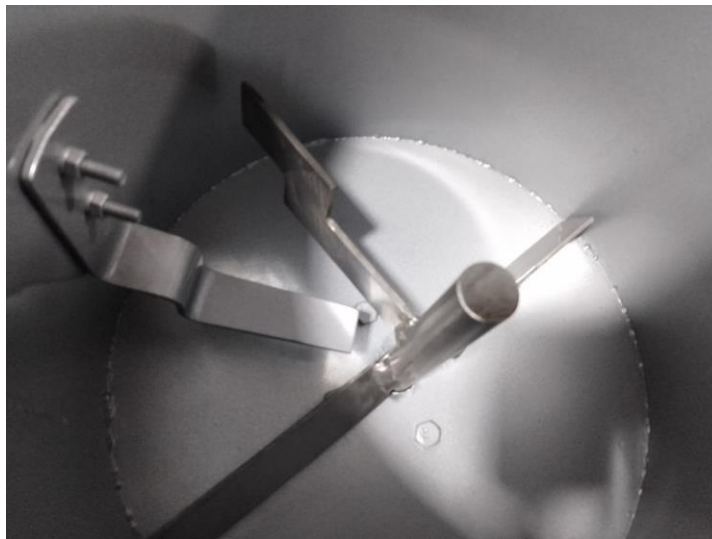


Fig. 4.16 Mecanismo de cizallamiento y mezcla.

4.4.4 Fabricación de dispositivo de filtrado

Para el desarrollo del sistema de filtrado, se empleó software de Diseño Asistido por Computadora (CAD), definiéndose una arquitectura modular compuesta por dos cuerpos

independientes. Esta configuración se seleccionó con el objetivo de optimizar las tareas de mantenimiento y facilitar el recambio del material filtrante (carbón activado).

La fabricación de la carcasa y tapa de cierre se realizó mediante manufactura aditiva utilizando tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM). Como material base se optó por ácido poliláctico (PLA) debido a su estabilidad dimensional y facilidad de impresión (véase la Fig. 4.17).

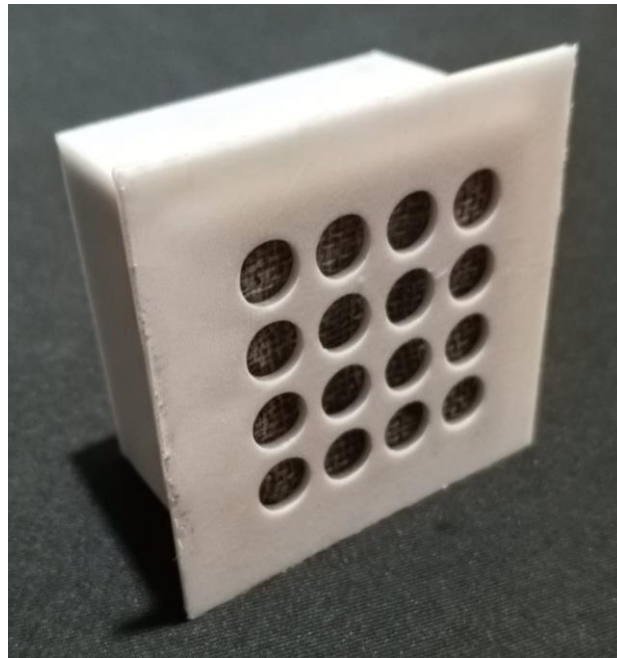


Fig. 4.17 Filtro de aire impresos en 3D

4.6 Integración e implementación del sistema

En esta sección se documenta el proceso constructivo y la puesta en marcha del prototipo. Se aborda la integración de los dispositivos de hardware definidos en el diseño, la programación de los algoritmos de gestión en el microcontrolador y la implementación del sistema de potencia y los dispositivos de protección.

4.6.1 Programación del Sistema

La programación de la unidad de control es fundamental para la gestión automática del proceso. A continuación, se detalla la arquitectura del software y la estrategia de control implementada, con un enfoque en la optimización de recursos computacionales y la seguridad ante fallos. El código fuente completo, desarrollado en lenguaje C++, se encuentra documentado en el Anexo G.

El esquema lógico principal que rige el funcionamiento del biodigestor se presenta en el diagrama de flujo (véase la

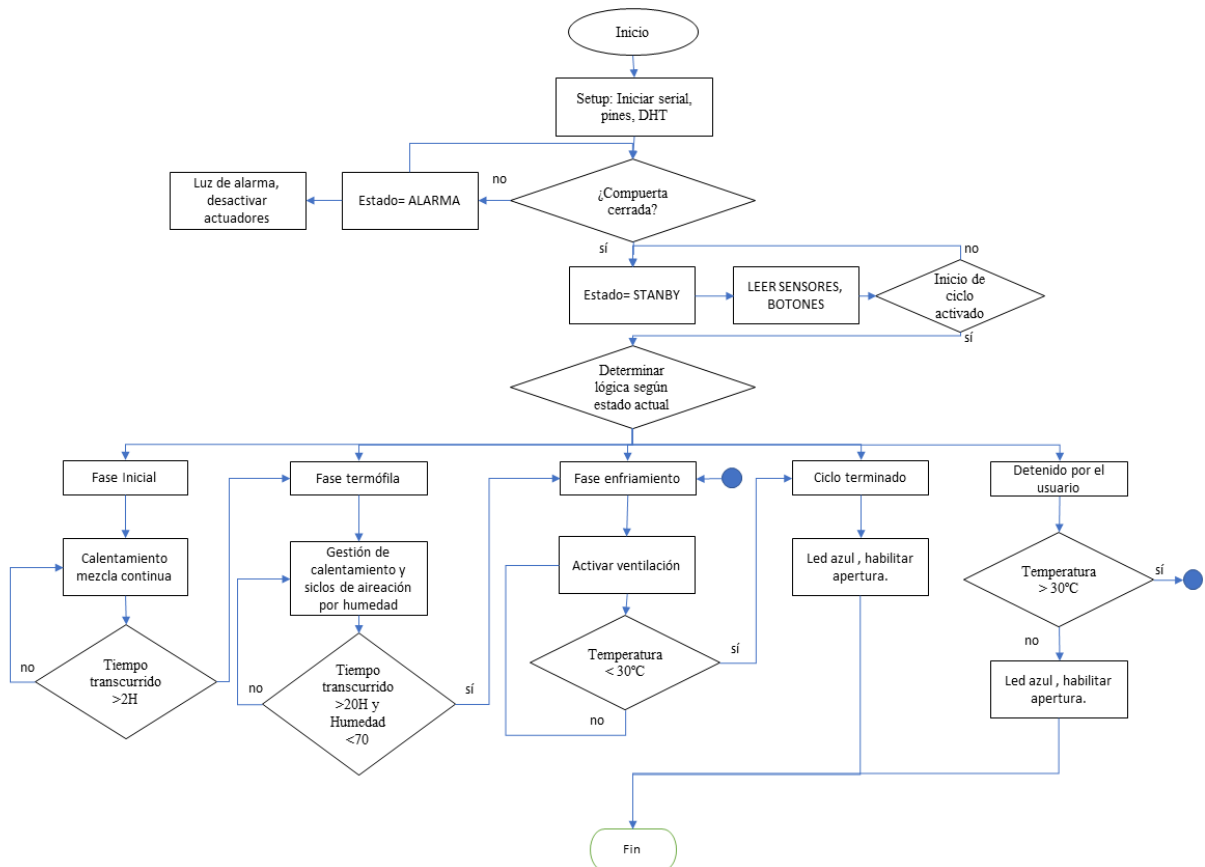


Fig. 4.18).

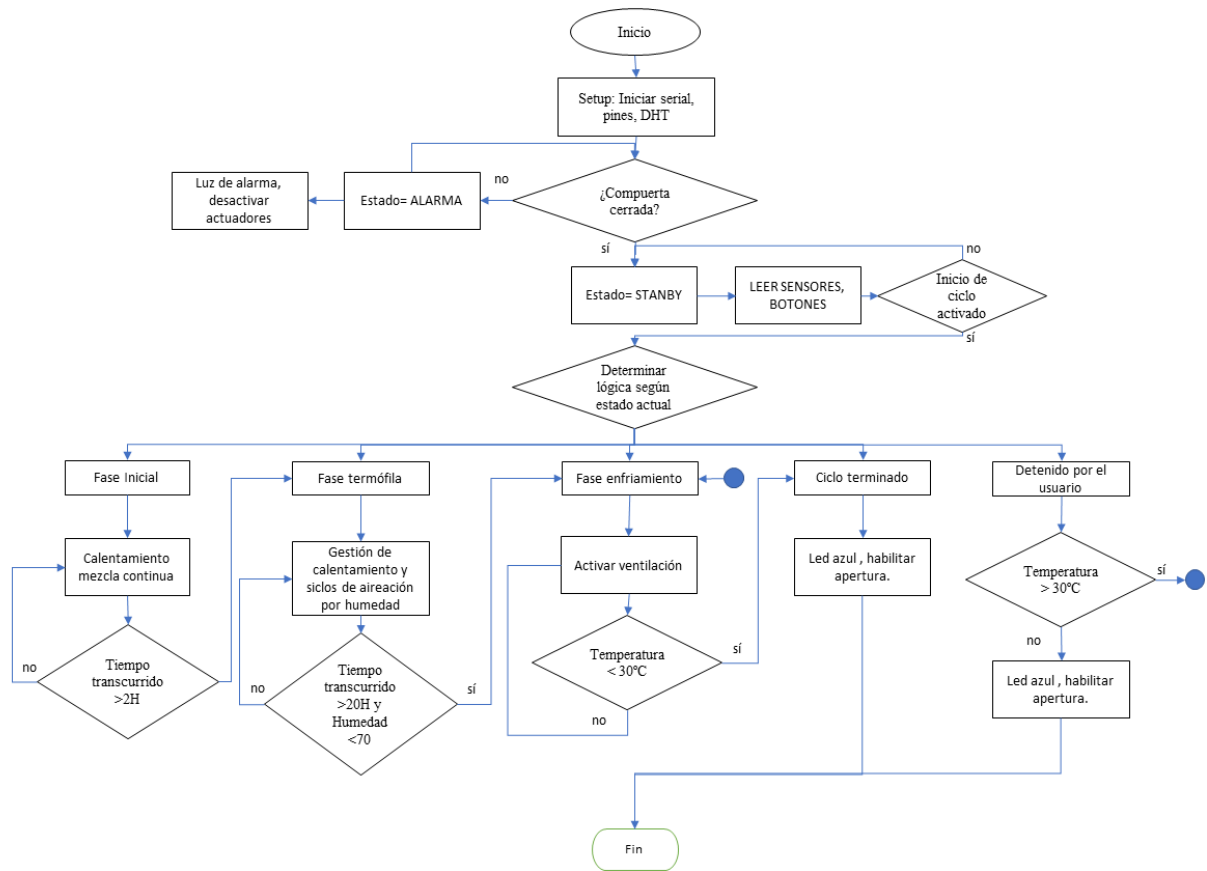


Fig. 4.18 Diagrama de flujo del sistema

4.6.1.1 Descripción de la Lógica de Control

Se instauró estados para gobernar la secuencia operativa del biodigestor, se diseñó e implementó una arquitectura de software basada en una Máquina de Estados Finitos. Esta permite gestionar las transiciones entre las distintas fases del proceso de compostaje de manera determinista, asegurando que el sistema responda únicamente a condiciones lógicas válidas y minimizando el riesgo de operaciones inseguras. El control del proceso se rige

mediante la definición de cinco estados operativos discretos, los cuales cubren el ciclo completo de tratamiento de la biomasa:

- Estado de Reposo (Standby): Etapa inicial de espera donde el sistema valida las condiciones de seguridad (cierre de compuerta) antes de permitir el arranque del ciclo.
- Fase Inicial (Mesófila): Etapa de acondicionamiento caracterizada por la trituración mecánica y el calentamiento controlado de la biomasa hasta alcanzar el setpoint operativo ($T < 65\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Fase Termófila: Etapa crítica de higienización y descomposición. El sistema regula la temperatura dentro del rango termófilo ($45^{\circ}\text{C} < T < 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) y gestiona la humedad mediante ciclos de aireación intermitentes.
- Fase de Enfriamiento: Periodo de estabilización térmica forzada, previo a la finalización del ciclo, destinado a reducir la temperatura de la biomasa para una descarga segura.
- Estado de Alarma/Parada: Estado de seguridad prioritario que bloquea el funcionamiento de los actuadores ante fallos de sensores, apertura indebida de la compuerta o activación de la parada de emergencia por parte del usuario.

4.6.1.2 Descripción Detallada del Algoritmo Operativo

Se implementó lazos de control cerrados diseñados para la inercia térmica de la biomasa y la seguridad del operador:

Control Térmico (Histéresis Asimétrica): Debido a la alta inercia térmica de la materia orgánica, se seleccionó un control ON/OFF con banda de histéresis $\Delta H = 4.0^{\circ}\text{C}$. Esto para

mitiga el ruido de medición del sensor y evita el desgaste prematuro de los relés electromecánicos por conmutación rápida.

Lógica de acción: La resistencia térmica se activa solo cuando se cumple la Ecuación (6)[54]

$$T_{actual} < (T_{setpoint} - \Delta H) \quad (6)$$

y se desactiva cuando $T_{actual} \geq T_{setpoint}$.

4.6.1.3 Descripción Secuencial de Programación para Bio-Reactor

La secuencia operativa programada en el microcontrolador se divide en los siguientes estados lógicos:

Paso 1. Verificaciones Iniciales y Estado de Reposo (Standby)

- Al energizar el sistema, el controlador ejecuta setup():
- Autochequeo de Sensores: Verifica la comunicación con el sensor DHT22.

Paso 2. Validación de Seguridad: Lee el estado del final de carrera de la compuerta.

- SI está CERRADA: Ingresa a modo STANDBY. El sistema queda a la espera del usuario con todos los actuadores apagados.
- SI está ABIERTA: Ingresa a modo ALARMA. Bloquea el inicio del ciclo y parpadea la luz roja hasta que se cierre la compuerta.

Paso 3. Secuencia de Operación Automática

Al presionar el botón "INICIO" (estando en Standby), se valida el cierre de la compuerta, se bloquea la función de apertura y comienza el ciclo:

Fase INICIAL: (Trituración y Calentamiento)

Duración: Fija (2 Horas).

Acción:

- Motorreductor: ON continuo (homogeneización inicial).
- Resistencia: Control ON/OFF para alcanzar 65 °C.
- Ventilador: OFF. Transición: Automática al cumplir el tiempo.

Fase TERMÓFILA: (Pasteurización y Secado Controlado)

Duración: Dinámica (Mínimo 20 Horas + Validación de Humedad).

Lógica de Actuadores:

- Protección Térmica: Si $T > 65\text{ °C}$, se fuerza el encendido del ventilador y motor para enfriar.
- Ciclos de Aireación: Si la temperatura es normal, se evalúa la humedad. Si está fuera de rango ($> 70\%$), se activan ciclos de mezcla (Motor + Ventilador) por 1 minuto después de cada hora.
- Criterio de Finalización (AND Lógico): El sistema avanza a la siguiente fase, si se cumplen dos condiciones simultáneamente: Han transcurrido al menos 20 horas de proceso y la humedad relativa es estable y menor al 70% durante un periodo de validación de 10 minutos sin interrupciones.

Fase ENFRIAMIENTO. Duración: Fija (2 Horas).

Acción:

- Resistencia y Ventilador apagados.
- Motor ON durante 3 minutos en intervalos de 30 minutos.

Fase FINALIZACIÓN:

Acción:

- Enciende la Luz Azul.
- Habilita la apertura de la compuerta.

4.6.1.4 Esquema de Conexión de Componentes Electrónicos

Esta sección se presenta el diagrama esquemático, las especificaciones de cableado y el diagrama de conexión final, asegurando la integridad de las señales y la robustez del ensamblaje electrónico del biodigestor (véase la Fig. 4.19).

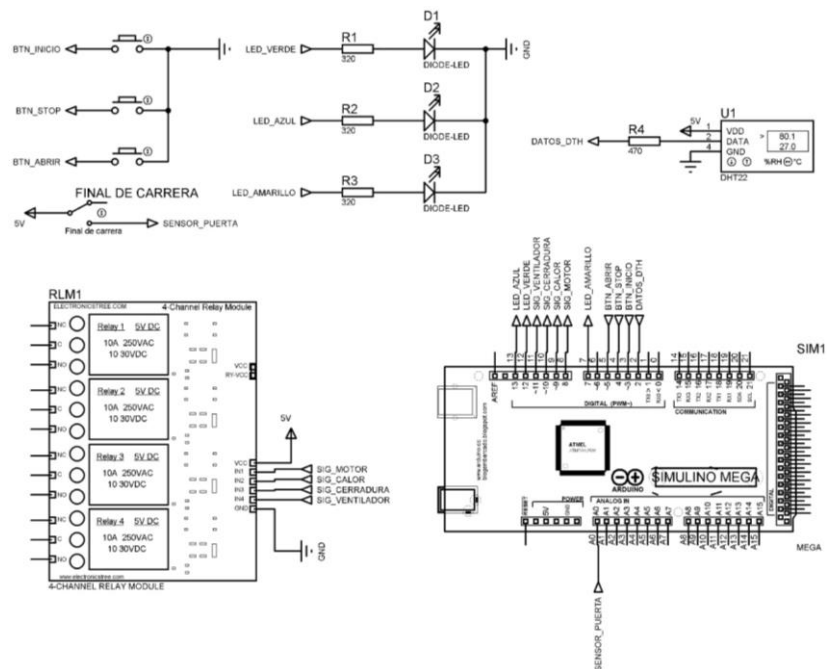


Fig. 4.19 Diagrama de conexiones componentes electrónicos

4.6.2 Implementación del gabinete de control

La integración del gabinete se realizó mediante anclaje mecánico a la estructura base, utilizando soportes anti vibratorios para proteger la electrónica. Internamente, La disposición de los elementos dentro del gabinete se diseñó considerando la gestión térmica, asegurando

la disipación de calor de las fuentes y relés para garantizar su fiabilidad operativa y durabilidad (véase la Fig. 4.20).

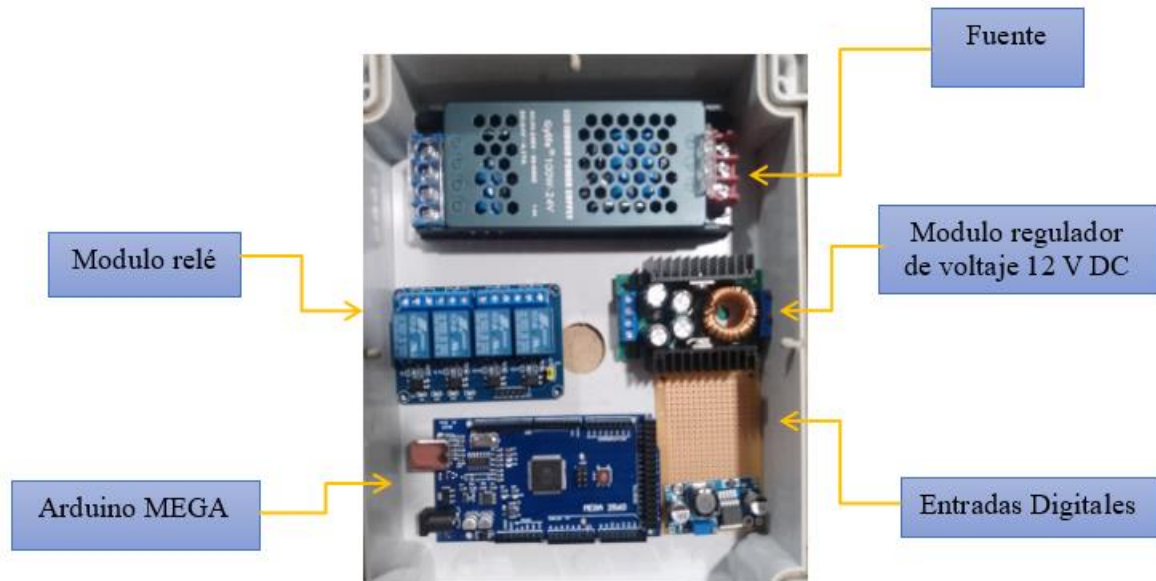


Fig. 4.20 Disposición física de los elementos en el gabinete de control

4.6.2.1 Diagrama de potencia

El diagrama de potencia documenta la arquitectura de distribución energética del sistema. Este esquema no solo representa la interconexión física, sino que define la estrategia de alimentación (véase la Fig. 4.21).

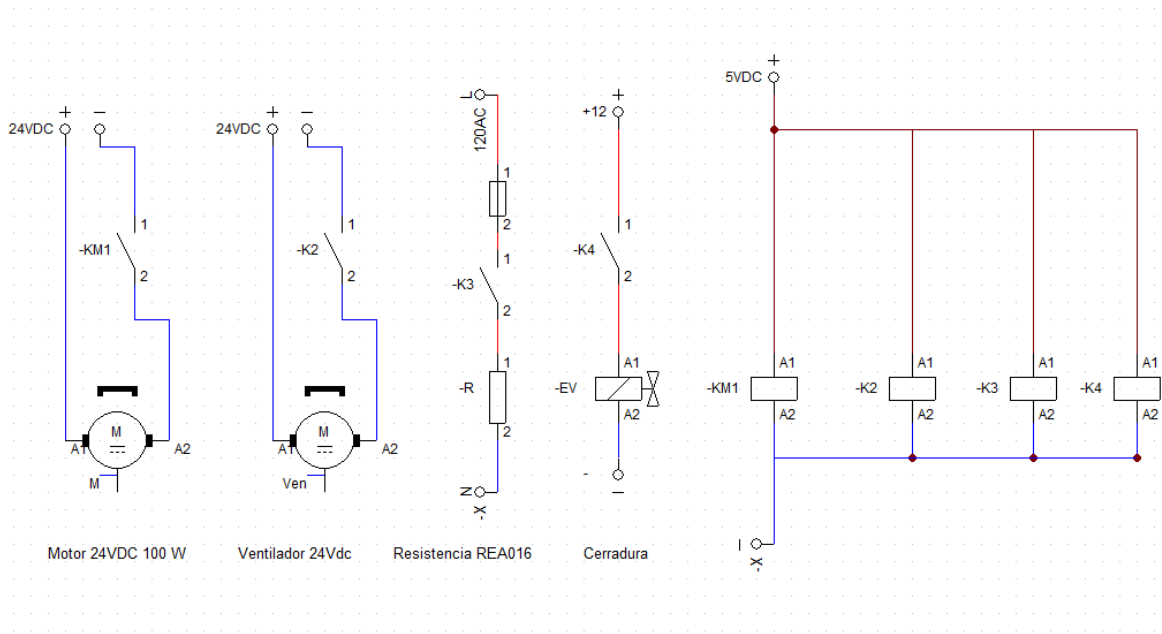


Fig. 4.21 Diagrama de potencia.

4.6.2.2 Instalación de Resistencias Térmicas

Para el sistema de calefacción, se emplearon resistencias térmicas modelo REA016 (50W). Estos elementos se instalaron en el interior de los perfiles estructurales laterales del chasis (véase la Fig. 4.22). Esta disposición asegura que, al insertar la tolva vertical extraíble, sus paredes queden adyacentes a la fuente de calor. De este modo se minimiza la resistencia térmica del aire y se facilita la transferencia energética hacia la biomasa contenida en el recipiente.

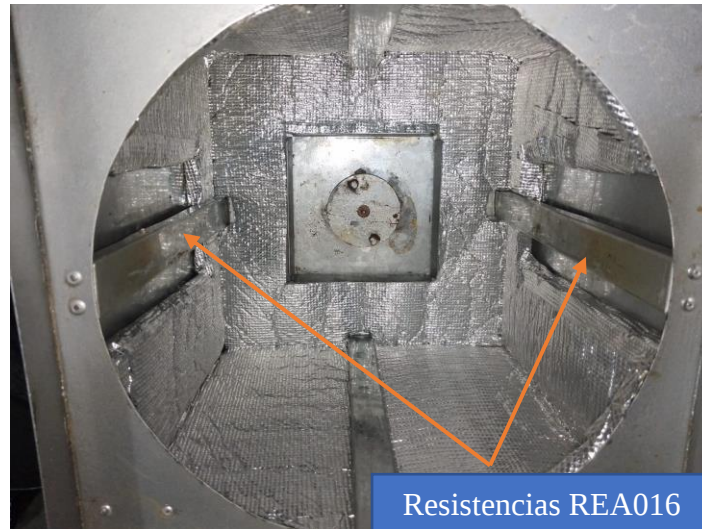


Fig. 4.22 Ubicación de resistencias en el interior del chasis.

4.4.6.1 Integración y Conexión de Sensores

Para el monitoreo de las variables de proceso, se integró el sensor DHT22. La conexión de datos incluye una resistencia pull-up externa para asegurar la estabilidad lógica de la señal y evitar lecturas flotantes.

El sensor se instaló en la compuerta superior, proyectado hacia el centro geométrico de la cámara para obtener lecturas representativas. Para proteger el elemento sensible contra el contacto directo con los residuos, se diseñó y fabricó un encapsulado en PLA mediante impresión 3D, optimizado para no afectar la inercia térmica (véase la Fig. 4.23).

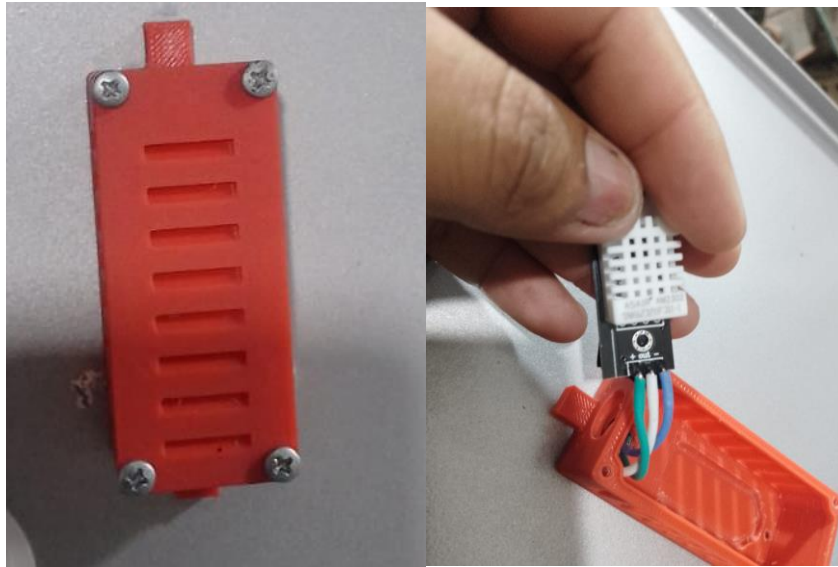


Fig. 4.23 Implementación de sensor DHT22

Al igual que en las resistencias, se empleó cable siliconado 20 AWG para la conexión del sensor. Esto previene la degradación del aislamiento por temperatura y evita fluctuaciones de impedancia que podrían derivar en datos erróneos.



Fig. 4.24 Conexión de sensores y actuadores.

4.6.3 Implementación de interfaz de Usuario (HMI)

La interfaz física se consolidó en el módulo base del prototipo (véase la Fig. 4.25), buscando un equilibrio entre accesibilidad y prevención de activaciones accidentales. Se conectaron los botones de "Inicio", "Stop" y "Apertura"

Se implementó un código de colores estandarizado mediante luces LED de bajo consumo:

- Verde: Ciclo en proceso.
- Azul: Fin de ciclo (Habilitación de apertura).
- Amarillo: Alarma o Parada de Emergencia.



Fig. 4.25 Disposición final de la interfaz de usuario en el prototipo.

4.6.4 Implementación sistema de aireación.

Para garantizar el suministro de oxígeno y la evacuación de gases metabólicos, se implementa un sistema de ventilación forzada por presión negativa. La admisión de aire hacia la cámara de biodigestión se gestionó mediante la instalación de una válvula de retención tipo membrana (véase la Fig. 4.26). Este componente pasivo actúa por diferencial de presión: permite el ingreso de aire oxigenado cuando el sistema genera succión, pero se sella ante cualquier contrapresión interna, evitando así la fuga no controlada de olores o gases por el puerto de entrada.

Para la extracción, se acopló un ventilador eléctrico en la salida de la cámara, el cual fuerza el paso del flujo gaseoso a través de un filtro de carbón activado. Esta configuración asegura que la totalidad del aire evacuado sea sometido a un proceso de adsorción en el lecho de carbón antes de ser liberado al ambiente, mitigando la emisión de olores característicos del proceso de compostaje.



Fig. 4.26 Implementación sistema de aireación

4.7 Desarrollo de pruebas

De acuerdo con la metodología experimental planteada en el Capítulo III, se ejecutaron pruebas de funcionamiento con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema durante un ciclo completo de compostaje. Las pruebas se realizaron utilizando residuos orgánicos domésticos previamente seleccionados. Durante el proceso se registraron variables de temperatura, humedad relativa, tiempo de operación y perfil de consumo energético.

4.7.1 Metodología y Configuración del Ensayo

Para llevar a cabo la validación funcional, se estableció una metodología de prueba estandarizada. Se empleó una carga de 2 kg de residuos orgánicos domésticos, compuesta por restos de frutas y verduras, para simular el uso típico en un hogar. La masa de la materia orgánica se registró al inicio y al final del proceso utilizando una balanza. El registro de los parámetros de control se basó en los datos proporcionados por los sensores integrados en el prototipo.

4.7.2 Ejecución del Ciclo de Compostaje y Recolección de Datos

El ensayo se inició con la introducción de la materia orgánica en la tolva de compostaje y la activación del ciclo automatizado. Durante la ejecución del proceso, se realizó un monitoreo continuo y registro de los siguientes parámetros clave:

- **Temperatura y Humedad:** Se registraron los datos del sensor DHT22 con la ayuda de un pseudo código que imprime estos datos a intervalos regulares de 10 minutos para trazar la evolución de las condiciones ambientales internas a lo largo de las fases de compostaje.
- **Consumo Eléctrico:** Se midió la corriente consumida por el sistema en sus diferentes etapas operativas (calentamiento, trituración, reposo) para determinar el perfil de consumo energético.

4.7.2.1 Análisis de Balance de Masa y Reducción de Residuos

Como indicador fundamental de la capacidad de reducción, se cuantificó la variación de la masa de los residuos sólidos orgánicos sometidos al ciclo de 31 horas. Se realizaron mediciones gravimétricas al inicio (carga) y al final (descarga) del proceso.

Tabla 4.32 Datos de Balance de Masa del Ciclo de Prueba.

Parámetro	Valor Medido
Masa Inicial	2.00 kg
Masa Final	1.51 kg
Masa Reducida	0.50 kg
Porcentaje de Reducción	25.0 %

De acuerdo con la Tabla 4.32, se obtuvo una reducción del 25% de la masa total en un ciclo de operación de 31 horas. Esta disminución de 0.49 kg se atribuye principalmente a dos factores:

- Evaporación de Agua: La fase termófila (>45 °C) combinada con la ventilación controlada facilitó la eliminación de la humedad contenida en la biomasa.
- Degradación de Materia Volátil: Aunque en menor proporción debido al corto tiempo, la oxidación de la materia orgánica durante la trituración y calentamiento contribuyó a la liberación de gases (vapor de agua y CO_2).

4.7.2.2 Evolución de la Temperatura

El perfil térmico (véase la Fig. 4.27) presentó tres comportamientos característicos:

- Ascenso Rápido (0 - 6 horas): Gracias a la acción combinada de la trituración (fricción mecánica) y las resistencias térmicas, la temperatura interna se elevó desde la temperatura ambiente (18 °C) hasta el rango termófilo (>45 °C) en menos de 3 horas. Esta rampa de calentamiento minimiza la fase de latencia bacteriana.
- Meseta Termófila (6- 29 horas): El sistema mantuvo una temperatura promedio oscilante entre 57 °C y 64 °C. Se alcanzó un pico máximo de 65.5 °C .
- Descenso Controlado (29 - 31 horas): se registró una pendiente negativa constante en la temperatura, disminuyendo desde los 65.5 °C hasta estabilizarse en 25 °C .

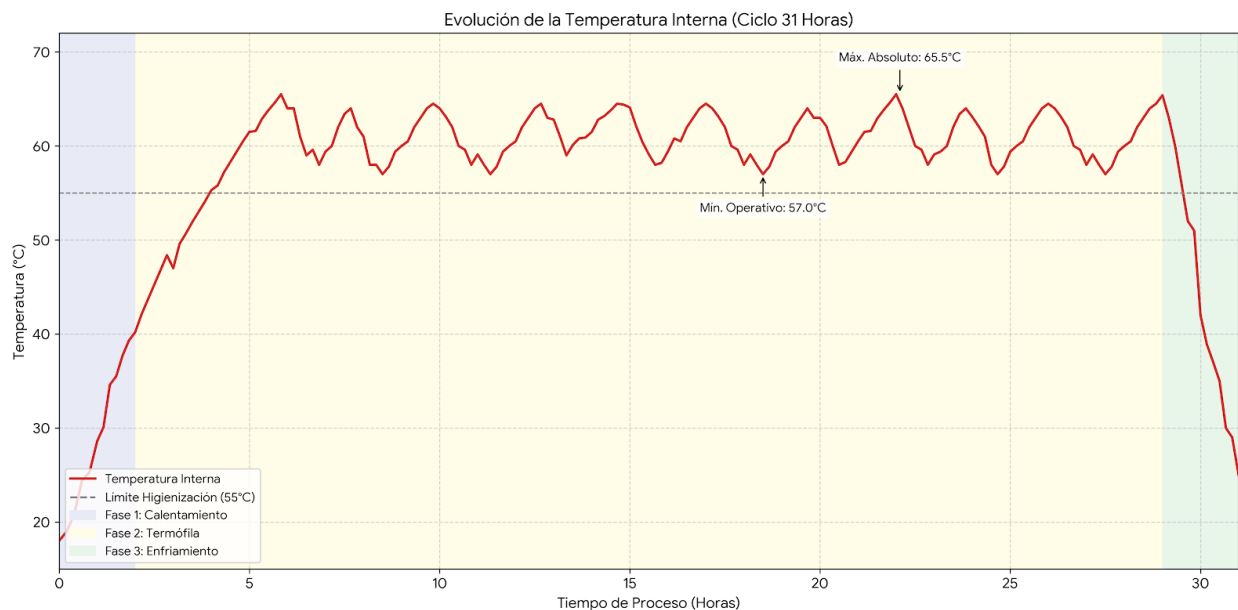


Fig. 4.27 Evolución de la temperatura interna en el ciclo de 31 horas.

4.7.2.3 Comportamiento de la Humedad Relativa

De acuerdo con el perfil de humedad relativa (véase la Fig. 4.28) muestra una correlación inversa con la capacidad de secado del aire:

- **Saturación Inmediata:** Debido al alto contenido de agua de los residuos orgánicos frescos (frutas y verduras), la humedad relativa alcanzó el punto de saturación (99.9%) en la primera hora de operación.
- **Retención de Humedad:** Durante la fase termófila, la humedad se mantuvo constante en niveles cercanos al 100%. Esto indica que, aunque hubo evaporación por temperatura, el vapor de agua se mantuvo dentro de la cámara favoreciendo la hidrólisis de la materia orgánica.
- **Deshidratación Final:** a partir de la hora 24, se registró una disminución sostenida desde el punto de saturación. Al alcanzar la hora 29, la humedad relativa descendió

hasta valores próximos al 70%, condición que marcó el inicio de la fase de enfriamiento. Durante esta última etapa se redujo la humedad remanente hasta un valor final del 67.5%.

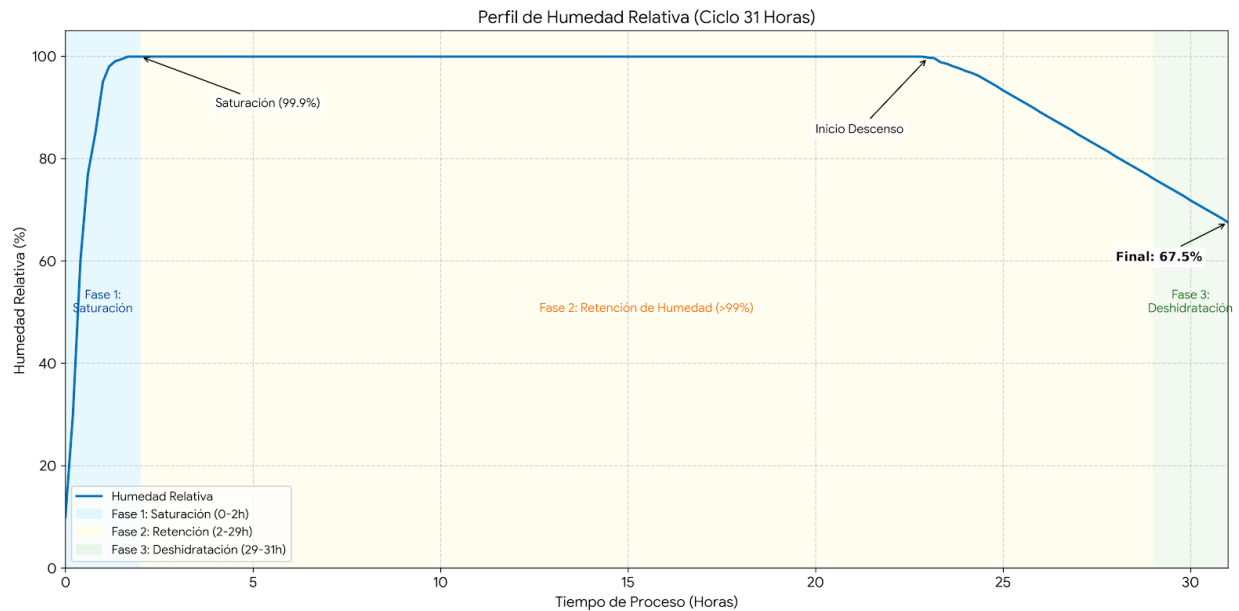


Fig. 4.28 Perfil de Humedad Relativa (ciclo de 31 horas).

4.7.2.4 Análisis de consumo energético

Al registrar el comportamiento energético del prototipo durante un ciclo operativo completo de 31 horas. La gráfica resultante, generada a partir de los datos sensados (véase la Fig. 4.29), se evidenció tres fases operativas con perfiles de carga claramente diferenciados:

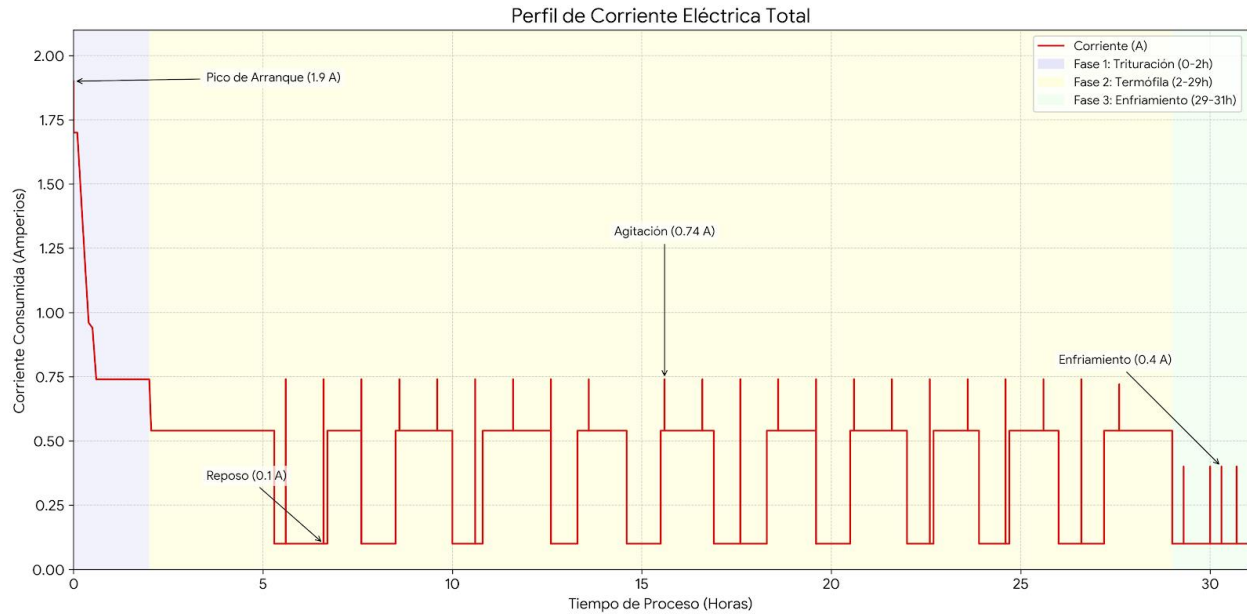


Fig. 4.29 Perfil de corriente eléctrica total (ciclo de 31 horas).

Fase 1: Trituración (0 - 2 horas)

Esta etapa representa la mayor demanda mecánica. En el instante $t = 0$, se registró un pico de arranque de 1.90 A , necesario para vencer la inercia del motorreductor a plena carga. Posteriormente, el consumo decae y se estabiliza cerca de 0.74 A , correspondiendo al trabajo continuo de trituración y mezcla inicial.

Fase 2: Etapa Termófila (2 - 29 horas)

Durante esta fase de 27 horas, el sistema opera bajo una lógica de control con histéresis, alternando entre cuatro estados discretos visibles en la gráfica:

- Estado de Calentamiento ($I \approx 0.54\text{ A}$): Representado por los bloques rectangulares anchos. Se observó la activación de las resistencias térmicas (60 W) para mantener la temperatura de proceso.

- Estado de Reposo ($I \approx 0.10 \text{ A}$): Ocurre cuando la temperatura y humedad están en rango; únicamente la electrónica de control permanece activa.
- Agitación Intermitente ($I \approx 0.74 \text{ A}$): Se observó picos periódicos que coinciden con la activación simultánea del motor y el ventilador para homogeneizar la mezcla y evitar la compactación.

Fase 3: Enfriamiento (29 - 31 horas)

En las últimas 2 horas, el sistema fuerza la reducción de temperatura para una descarga segura, inhabilitando las resistencias y se habilita el subsistema de agitación de manera intermitente, con una frecuencia de 3 minutos de operación cada 30 minutos. El perfil eléctrico mostró esta secuencia mediante picos de corriente de 0.74 A, correspondientes exclusivamente a la activación del motorreductor para la mezcla final.

4.7.2.5 Análisis de Potencia y Consumo Energético

Para cuantificar la demanda energética del prototipo, se discretizó el ciclo operativo de 31 horas en sus estados estacionarios. La potencia eléctrica instantánea (P) se determinó en función de la corriente promedio (I) registrada en cada etapa, considerando un voltaje de línea de 120 V[55] (véase la Fig. 4.30).

$$P_{[W]} = 120_{[V]} \cdot I_{[A]}$$

La Tabla 4.33 resume los parámetros eléctricos operativos, desglosando la corriente promedio y la duración exacta de cada estado para completar el ciclo total del proceso.

Tabla 4.33 Desglose de Corriente, Potencia y Tiempo por Estado Operativo

Etapas / Estado del Sistema	Corriente (I)	Potencia (P)	Tiempo (t)
Trituración y calefacción	0.74 A	88.8 W	2.00 horas
Calefacción (resistencias)	0.54 A	64.8 W	12.00 horas
Agitación intermitente	0.74 A	88.8 W	1.70 horas
Estado de reposo (control)	0.10 A	12.0 W	15.15 horas
Enfriamiento (extractor)	0.40 A	48.0 W	0.15 horas
Total del ciclo			31.00 horas

Una

vez definidos los perfiles de potencia y tiempo, se procedió al cálculo de la energía total acumulada (E_{total}) mediante la sumatoria del consumo en cada estado operativo:

$$E_{total} = \sum (P_i \cdot t_i)$$

$$E_{total} = 1.30 kWh$$

Con el valor de energía total establecido en 1.30 kWh, se determinó el costo económico del ciclo completo. Para ello, se utilizó como referencia la tarifa eléctrica para el sector residencial en Ecuador, fijada en 0.1285 USD/kWh [56].

$$Costo = E_{total} [kWh] \cdot Tarifa [USD/kWh]$$

$$Costo \approx 0.167 \text{ USD}$$

El análisis reveló que el costo energético para completar un ciclo de tratamiento de 31 horas es de aproximadamente 16.7 centavos de dólar, demostrando un bajo impacto en la facturación eléctrica del usuario final a pesar de la duración prolongada del proceso.

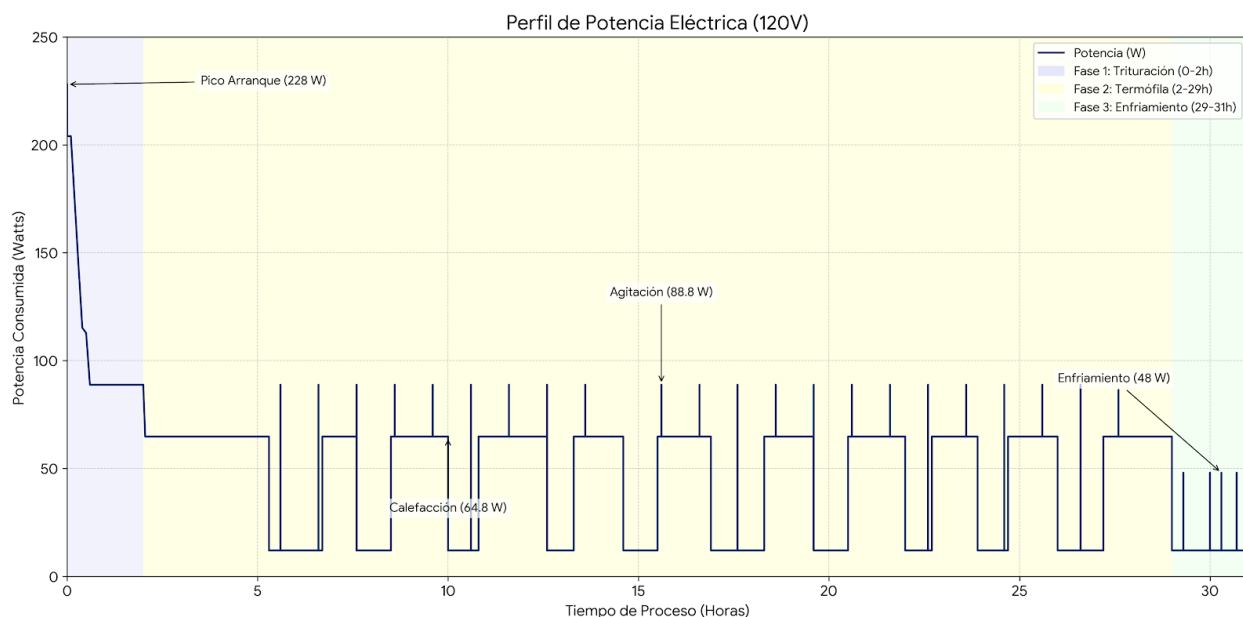


Fig. 4.30 Perfil de potencia eléctrica (ciclo de 31 horas).

4.8 Análisis de resultados compost obtenido

Para validar el desempeño del sistema automatizado, se realizó un análisis físico y químico del compost resultante tras un ciclo operativo de 31 horas. El estudio abarcó propiedades organolépticas, granulometría y análisis químico, tomando como referencia los criterios de calidad establecidos en el Manual Técnico para el Registro y Control de Fertilizantes (Resolución 0218) de Agrocalidad[21]. Cabe mencionar que esta evaluación tuvo un carácter descriptivo y no constituyó una certificación formal del producto.

4.8.1 Análisis Organoléptico (Inspección Visual)

Se realizó una inspección visual y sensorial de la muestra de 1.51 kg descargada del reactor.

Los resultados cualitativos indicaron la transformación física de los residuos:

- **Apariencia y Homogeneidad:** El material presentó un color marrón oscuro uniforme, indicativo de procesos de oxidación y degradación térmica. No se observó residuos originales identificables (cáscaras enteras o trozos grandes).

- Olor: Presentó un olor característico a tierra húmeda o mantillo, lo cual sugiere una higienización adecuada.
- Humedad al Tacto: El material presentó una textura semiseca, facilitando su manipulación y almacenamiento sin generación de lixiviados.

4.8.2 Análisis Granulométrico

Se tamizó la totalidad de la muestra 1.51 kg utilizando una serie de tamices estandarizados (10 mm, 4 mm, 2 mm y 0.08 mm)[57].

Tabla 4.34 Distribución Granulométrica del Compost.

Tamaño de Partícula (Tamiz)	Peso Retenido (kg)	Porcentaje (%)
> 10 mm	0.317	21.0 %
10 mm - 4 mm	0.332	22.0 %
4 mm - 2 mm	0.498	33.0 %
2 mm - 0.08 mm	0.211	14.0 %
< 0.08 mm	0.151	10.0 %
TOTAL	1.510	100.0 %

De acuerdo con la Tabla 4.34, la fracción predominante (33%) se sitúa en el rango de 2 mm a 4 mm. Este resultado cumple con los criterios citados en el capítulo 2, donde se sugiere el procesamiento de residuos blandos a tamaños < 5 cm [35].

4.8.3 Análisis Químico

Se remitió una muestra representativa al laboratorio de Análisis de Suelos de la Universidad Central del Ecuador (Reporte No. 897). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.35.

Tabla 4.35 Parámetros Químicos del Producto Final

Parámetro	Unidad	Valor	Interpretación Agronómica
pH	-	7.17	Neutro (Ideal para la mayoría de cultivos)
Materia Orgánica (MO)	%	25.14	Alto contenido
Carbono Orgánico (CO)	%	13.29	Fuente de energía para microbiota
Nitrógeno Total (N)	%	1.26	Alto
Relación C/N	-	10.5	Rango Óptimo de Madurez
Fósforo (P)	ppm	24.4	Alto
Potasio (K)	cmol/kg	13.62	Alto
Conductividad Eléctrica (C.E.)	dS/m	18.94	Muy Salino (Requiere dilución)

El cálculo de la relación Carbono/Nitrógeno arrojó un valor de 10.5. Este resultado se sitúa dentro del intervalo técnico de 10 a 25, definido en el Manual técnico para el registro y control de fertilizantes[58] Este valor sugiere que el proceso de degradación se completó adecuadamente, lo que garantiza la disponibilidad de nitrógeno para la planta y evita su inmovilización por competencia microbiana en el suelo.

El pH registrado fue de 7.17, este valor clasifica al producto como químicamente neutro, cumpliendo con el rango de 5.0 a 8.5 estipulado por la Resolución 0218 [21].

La concentración de macronutrientes (*N, P, K*) y el contenido de Materia Orgánica (25.14 %) confirman que el sistema conservó el valor agronómico de los residuos durante la reducción de volumen, cumpliendo los criterios de composición garantizada referidos en la norma NTE INEN 211 [22].

El análisis reporta una Conductividad Eléctrica de 18.94 dS/m . Este incremento significativo en la concentración de sales solubles es característico de los reactores de sistema cerrado donde no ocurre lavado por lixiviación. En consecuencia, se debe evitar estrictamente su aplicación directa como sustrato de germinación debido al riesgo de fitotoxicidad; su uso

recomendado es como mejorador de suelo, donde la mezcla con el terreno permite disipar el efecto salino[59].

4.9 Análisis de Costos

El análisis económico tiene como propósito determinar el costo real de fabricación del prototipo funcional, proporcionando una referencia financiera para el desarrollo de proyectos de carácter académico o experimental. Para esta estimación, se cuantificaron los costos directos asociados a componentes electrónicos, actuadores, materia prima estructural y servicios de manufactura externa.

El desglose pormenorizado de los componentes, precios unitarios se encuentra detallado en el Anexo K. A continuación, se presenta la consolidación de dichos rubros para determinar la inversión total ejecutada (véase la Tabla 4.36).

Tabla 4.36 Resumen de costos de fabricación del prototipo.

Rubro	Costo	Participación
Sistema de Control e Instrumentación	\$ 30.95	8.25%
Sistema de Potencia y Actuadores	\$ 135.22	36.04%
Estructura y Mecánica	\$ 119.00	31.72%
Servicios de Manufactura	\$ 90.00	23.99%
COSTO TOTAL DEL PROTOTIPO	\$ 375.17	100.00%

El costo de materialización asciende a \$375.17 USD. En términos de capacidad, el diseño propuesto destaca por procesar 2.5 kg de residuos, superando ampliamente a los modelos domésticos líderes. Por ejemplo, el FoodCycler FC-30 (costo local \$632.50 USD) solo procesa 1 kg por ciclo[60], y el Lomi 2 (\$599 USD + importación) tiene un límite de 1 kg[61].

El único competidor de alta capacidad es el GEME Terra 2, que procesa entre 2 kg y 5 kg diarios, pero con un costo de adquisición que supera los \$1,300 USD en plataformas de importación[62].

Esta relación costo capacidad posiciona al prototipo como una solución superior para hogares. El valor actual corresponde a una unidad única que absorbe cargos de ingeniería no recurrentes. En una producción en serie, se proyecta una reducción de costos del 20% al 30%, debido a la optimización de procesos y economías de escala[63], [64].

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El análisis documental de los modelos de biodigestión aerobia permitió identificar la temperatura, la humedad y la aireación como las variables críticas del proceso de compostaje acelerado. Esta fundamentación técnica sustentó la definición de los parámetros de diseño y control del prototipo, orientándolo hacia un sistema automatizado capaz de operar sin aditivos externos y adecuado para residuos orgánicos domiciliarios.

Se diseñó e integró un sistema mecatrónico funcional que combina una tolva vertical de carga superior, un mecanismo de trituración de alto par y un sistema de mezcla y cizallamiento mediante paletas escalonadas y lineales. La estructura fue modelada y verificada geométricamente mediante software CAD, lo que permitió garantizar la correcta integración de los componentes y la capacidad volumétrica requerida. Asimismo, el dimensionamiento mecánico y la selección de materiales aseguraron la resistencia estructural necesaria para procesar cargas de hasta 2.5 kg por ciclo, garantizando la durabilidad del equipo bajo condiciones reales de operación.

La implementación del sistema de control basado en un microcontrolador Arduino Mega permitió la gestión autónoma del proceso mediante la coordinación de sensores, actuadores y resistencias térmicas. La programación estructurada en etapas (trituración, fase termófila y enfriamiento) evidenció una integración estable entre los subsistemas mecánico, eléctrico y de control, validando la arquitectura propuesta.

La validación experimental mediante un ciclo continuo de 31 horas demostró el desempeño técnico y energético del prototipo. Se alcanzaron temperaturas máximas de hasta 65.5 °C, suficientes para la higienización del material, y una reducción del 25% de la masa inicial de residuos. El producto obtenido presentó un pH neutro (7.17), conductividad eléctrica de 18.94 dS/m y una relación C/N de 10.5, valores que confirman la madurez del compost y su aptitud como enmienda orgánica, con un consumo energético total de 1.30 kWh por ciclo.

El análisis global de resultados confirma que el biodigestor automatizado diseñado cumple con los objetivos planteados, demostrando que es técnicamente viable acelerar el proceso de compostaje doméstico mediante control térmico y mecánico. El diseño desarrollado constituye una solución funcional, replicable y de autoría propia, con potencial de optimización y escalamiento, manteniendo un bajo impacto energético y un costo competitivo frente a alternativas comerciales.

5.2 Recomendaciones

Para futuras iteraciones del prototipo, se recomienda sustituir el cableado manual y los módulos independientes por una tarjeta electrónica PCB de diseño específico que integre las etapas de control y potencia. Esta modificación técnica optimiza el proceso de ensamblaje, reduce los costos de manufactura y habilita la producción en serie del equipo.

Para mejorar la precisión del perfil térmico, se sugiere migrar de la lógica de control actual (ON/OFF con histéresis) a un algoritmo de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para la gestión de las resistencias térmicas. La implementación de un control PID permitiría modular la potencia entregada de forma proporcional al error, minimizando los picos de corriente, lo que resultaría en una mayor estabilidad térmica y vida útil de los actuadores.

Con el fin de reducir el consumo energético de red, se recomienda realizar un estudio de viabilidad para la integración de un sistema de alimentación híbrido que incorpore energía fotovoltaica destinada a la electrónica de control y ventilación. De manera complementaria, se sugiere optimizar el aislamiento térmico de la cámara de reacción mediante un análisis de transferencia de calor, minimizando pérdidas por convección y radiación.

Considerando la elevada conductividad eléctrica (18.94 dS/m) que reportó el producto final, se recomienda para futuras iteraciones del prototipo evaluar la incorporación de un sistema de drenaje de lixiviados. La implementación de este subsistema permitiría el lavado físico de las sales solubles durante el proceso, reduciendo significativamente la salinidad del sustrato.

REFERENCIAS

- [1] World Bank, “Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes”, dic. 2018. Consultado: el 11 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “Estadística de información ambiental económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Gestión de Residuos Sólidos 2020”, Quito, Ecuador, dic. 2021.
- [3] C. Cando, D. Salazar, y J. Muñoz, “Boletín Técnico No 04-2020-GAD Municipales”, dic. 2021.
- [4] Sostenibilidad para Todos, “Vertederos, un serio problema para el medio ambiente”. Consultado: el 7 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.sostenibilidad.com/medio-ambiente/vertederos-serio-problema-medio-ambiente/?_adin=01833301559
- [5] González Carmita y Tigua María, “Evaluación de los impactos generados en el vertedero de desechos Cañoso y propuesta de un plan de manejo en la Parroquia Alejo Lascano”, Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador, 2021. doi: 10.1109/CONIELECOMP.2011.5749343.
- [6] Alianza Basura Cero Ecuador, “Red de Compostaje”. Consultado: el 1 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.alianzabasuraceroecuador.com/red-de-compostaje/>

- [7] Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica, “Ecuador presentó la Estrategia Nacional de Economía Circular para impulsar un desarrollo sostenible e inclusivo”. Consultado: el 1 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.produccion.gob.ec/ecuador-lanza-la-estrategia-nacional-de-economia-circular-para-impulsar-un-desarrollo-sostenible-e-inclusivo/>
- [8] Forbes Ecuador, “El uso de los desechos orgánicos, una alternativa de reciclaje”. Consultado: el 7 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.forbes.com.ec/lifestyle/el-uso-desechos-organicos-una-alternativa-reciclaje-n7460>
- [9] Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica, “Ecuador impulsa la gestión adecuada de residuos orgánicos en las ciudades – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica”. Consultado: el 7 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-impulsa-la-gestion-adecuada-de-residuos-organicos-en-las-ciudades/>
- [10] J. Silva, “Diseño de un prototipo de máquina para generar compostaje a partir de residuos orgánicos de la empresa Inversiones Dramar S.A.C.”, Universidad Ricardo Palma, 2021.
- [11] M. C. N. Adique, A. J. L. Mandap, M. L. C. Guico, y J. K. A. Galicia, “Design and Development of a Semi-Automated Kitchen Waste Composter”, en *2023 9th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)*, IEEE, ago. 2023, pp. 120–125. doi: 10.1109/ICCCCE58854.2023.10246029.

- [12] G. Espinosa Antonio, C. García Arturo, y P. Aguirre Carlos, “DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMPOSTER FOR DOMESTIC USE”.
- [13] G. Turvani *et al.*, “Enabling High-Quality Compost for a Smart Domestic Production”, en *2023 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, IEEE, nov. 2023, pp. 837–841. doi: 10.1109/MetroAgriFor58484.2023.10424048.
- [14] B. Zaman, N. Hardyanti, Purwono, y B. S. Ramadan, “An innovative thermal composter to accelerate food waste decomposition at the household level”, *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 19, p. 101203, sep. 2022, doi: 10.1016/j.biteb.2022.101203.
- [15] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “Presentación de Resultados Nacionales”, Quito, Ecuador, 2022.
- [16] C. Pilataxi, A. Salazar, y C. Muñoz, “Módulo de Información Ambiental en Hogares – ENEMDU”, dic. 2023. Consultado: el 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: www.ecuadorencifras.gob.ec
- [17] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “Información Ambiental en Hogares 2023”, dic. 2023. Consultado: el 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Hogares/2023/PRIN_RESUL_INF_AMB_HOGARES_2023.pdf

- [18] S. Vásquez, “Dimensionamiento de biodigestor a partir de la caracterización y análisis de residuos sólidos orgánicos de la cafetería CETYS Universidad”, CETYS Universidad, Mexicali, México, 2020.
- [19] A. Carvalho y L. Casas, “Compostaje y biodigestores como solución al problema de los residuos orgánicos en el medio rural”, *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 6, núm. 4, pp. 990–1013, ago. 2022, doi: 10.37811/cl_rcm.v6i4.2641.
- [20] E. R. Oviedo-Ocaña *et al.*, “Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices”, *Waste Management*, vol. 44, pp. 63–71, oct. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.07.034.
- [21] Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario, “Manual técnico para el registro y control de fertilizantes, enmiendas de suelo y productos afines de uso agrícola”, Quito, Ecuador, feb. 2020. Consultado: el 11 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2024/10/Resolucion-218-manual_tecnico_para_el_registro_y_control_de_fertilizantes_aprobado.pdf-edicion-7.pdf
- [22] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “NTE INEN 211: 98 Fertilizantes o abonos. Tolerancias”, Quito, Ecuador, 1998.
- [23] P. Roman, M. Martínez, y A. Pantoja, “Manual de compostaje del agricultor-FAO”, ene. 2013. Consultado: el 4 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/311588749>
- [24] L. Gutiérrez-González, D. Ojeda-Barrios, G. Ávila-Quezada, y A. Hernández-Rodríguez, “Características cambiantes durante el compostaje y valores indicativos de calidad en el

- producto final”, *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, vol. 40, núm. 2, pp. 467–484, 2024, doi: 10.29393/CHJAAS40-39CFLO40039.
- [25] Red Española de Compostaje, *Aspectos biológicos de la estabilización aeróbica II.1*. Mundi-Prensa, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/55256>
- [26] W. Bohorquez Santana, *El proceso de compostaje*. Universidad de La Salle - Ediciones Unisalle, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/215010>
- [27] “Compostaje - MORENO CASCO, JOAQUÍN, MORAL HERRERO, RAÚL - Google Libros”. Consultado: el 7 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=APuzwas6rrcC&oi=fnd&pg=PA4&dq=Moreno+Casco,+Joaquin&ots=BTSSp5pqW9&sig=g8hdb3DV6oF49BxPEqljzSUxZ2k&redir_esc=y#v=onepage&q=Moreno%20Casco%2C%20Joaquin&f=false
- [28] A. Rivero, “Caracterización físico-química de compost Obtenido a partir de residuos orgánicos Alimenticios y de poda de la Facultad de ciencias y tecnología De la Universidad Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’, Presidente prudente, São Paulo, Brasil”, Universidad Nacional De Cuyo, São Paulo, Brasil, 2014.
- [29] M. Elalami, “Innovative Design and Realization of a Smart Rotary Composter with a Remote Management System”, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 8, núm. 7, pp. 3777–3783, jul. 2020, doi: 10.30534/ijeter/2020/141872020.
- [30] R. Arizaga, J. Fernández, y S. Lizange, “Sistema de compostaje automatizado para desechos sólidos”, *Pol. Con*, vol. 8, 2023, doi: 10.23857/pc.v8i8.

- [31] F. Wang, C. Chen, D. Fu, y R. P. Singh, “Effect of reactor temperature and feeding ratio on fed-batch composting of household food waste and green wastes”, *Biomass Bioenergy*, vol. 181, p. 107040, feb. 2024, doi: 10.1016/j.biombioe.2023.107040.
- [32] TKM, “Triturador de residuos de alimentos - Máquina de compostaje de alimentos para la cocina del hogar”, TOPMAKE ENVIRONMENT GROUP CO.,LTD. Consultado: el 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.tmkhb.com/LOS-PRODUCTOS/triturador-de-desperdicios-de-comida/>
- [33] X. Zhou *et al.*, “Rapid in-situ composting of household food waste”, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 141, pp. 259–266, sep. 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.05.039.
- [34] TKM, “TKM Smart Kitchen Composter”. Consultado: el 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: www.compostingsolution.com
- [35] B. Hanníbal *et al.*, “Obtención De Compost A Partir De Residuos Sólidos Orgánicos Generados En El Mercado Mayorista Del Cantón Riobamba”, *European Scientific Journal, ESJ*, vol. 12, núm. 29, p. 76, oct. 2016, doi: 10.19044/esj.2016.v12n29p76.
- [36] E. Alvaro y A. Olives, “Identificación del potencial aprovechable de los residuos sólidos orgánicos que se generan en mercados, supermercados, parques, jardines y diferentes sectores industriales de la zona sur del Distrito Metropolitano de Quito”, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2013.
- [37] T. L. . Brown, H. Javier. Escalona y García, y R. Luis. Escalona García, *Química : la ciencia central*, 9a ed. Pearson Educación, 2004.

- [38] Arduino, “Arduino® Mega 2560 Rev3”, nov. 2025. Consultado: el 26 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>
- [39] T. Liu, “Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)”, 2021.
- [40] R. Mott, *Applied fluid mechanics*, 6/e. Pearson Educación, 2006. Consultado: el 4 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com/books/about/Mecanica_de_Fluidos_6_e.html?hl=es&id=LbMTKJ4eK4QC
- [41] J. A. Tallmadge, “Unit operations of chemical engineering.”, *AIChE Journal*, vol. 3, núm. 1, mar. 1957, doi: 10.1002/aic.690030126.
- [42] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 9. McGraw-Hill/Interamericana, 2012.
- [43] Jkongmotor, “Especificaciones técnicas de motor DC sin escobillas (BLDC) con controlador integrado (12V-48V).” Consultado: el 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_jkongmotor/product_12V-24V-36V-48V-Brushless-DC-Motor-50W-75W-100W-150W-200W-with-Controller-Driver-Brake-Encoder-Integrated-BLDC-Gear-Motor-12-24-36-48V-PWM-Vsp_uoieeyrnuy.html?pv_id=1jci4qcad326&faw_id=1jci5b6g812f&bv_id=1jci5b6gdb40&pbv_id=1jci4qa0q359

- [44] Electronica JNC, “Cerradura Eléctrica 12v Chapa Puerta Solenoide - Electronica JNC”. Consultado: el 16 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.electronicajnc.com/web/producto/cerradura-electrica-12v-chapa-puerta-solenoide/>
- [45] Importaciones Camaleón, “Catálogo de Accesorio para Incubación de aves”, Quito, Ecuador, ago. 2025. Consultado: el 16 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://importacionescamaleonec.com/wp-content/uploads/2025/09/catalogo-de-incubacion-docx.pdf?srsltid=AfmBOop8RL7N-918DJXZzwKvCqIQ0X2h6yvS8OZS_h9KVQXHXkkgq-cY
- [46] B. Schweber, “Las fuentes de alimentación configurables ofrecen flexibilidad”. Consultado: el 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikey.com/es/articles/use-modular-multi-output-ac-dc-supplies-for-flexibility-and-configurability>
- [47] BARCELONA LED, “Fuente de alimentación Slim 100W 24V-4.2A-IP20 Ref. DY-100W-24-CF Datos del producto”. Consultado: el 25 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.barcelonaled.com/tiras-led/fuentes-de-alimentacion-para-tiras-led/fuente-alimentacion-24v-led/fuente-de-alimentacion-slim-100w-24v-42a-ip20.html?srsltid=AfmBOopN0v6TNda6QMiM6-YpmDvdxQnhRu5Irxjr7bC78599Z_aT2zS7#product-details

- [48] DCIM Ecuador, “Fuente de Poder para CCTV 12 Voltios 1 Amperio”, 2025. Consultado: el 25 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dcimecuador.com/producto/fuente-de-poder-para-cctv-12v-1a/>
- [49] Gonzaga & Rodriguez Cia. Ltda., “Cajas Plásticas lisas grises Serie 200 JSL”, 2025. Consultado: el 2 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://electricoindustrial.com.ec/producto/cajas-plasticas-lisas-grises-serie-200-jsl/>
- [50] PRODEX, “Aislamiento Térmico Reflectivo Prodex AD10”, 2025. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://aislantesprodex.com/img/cms/fichas-tecnicas-pdf/ficha-tecnica-aislamiento-ad10.pdf>
- [51] DIPAC, “Planchas Galvanizadas – DIPAC”. Consultado: el 25 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dipacmanta.com/producto/planchas/planchas-acero-negro/planchas-galvanizadas/>
- [52] Prosoldes, “¿Qué electrodo usar para soldar acero galvanizado?” Consultado: el 25 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://prosoldes.com/que-electrodo-usar-para-soldar-acero-galvanizado/>
- [53] ECA Electroodos, “ECA 316-L: Electrodo para soldadura de acero inoxidable”, Santa Elena, Guatemala, 2025. Consultado: el 27 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ecaelectroodos.com/electroodos/eca-316-l/>
- [54] A. G. J. MacFarlane, H. J. White, S. Tauber, y G. Oster, “Dynamical Systems Models and Systems Analysis”, *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 93, núm. 4, pp. 270–271, dic. 1971, doi: 10.1115/1.3426514.

- [55] CódigoCorpoCorporación Nacional de Electricidad (CNEL EP), “Manual para la instalación de la acometida y sistema de medición a los consumidores. de CNEL EP”, 2024. Consultado: el 17 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2020/08/MN-COM-AC-001-Manual-de-instalaciones-acometida-y-sistema-de-medici%C3%B3n-CNEL-EP-vf.pdf>
- [56] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, “Pliego tarifario del servicio público de energía eléctrica año 2025”, nov. 2024. Consultado: el 17 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2025/01/2.-Pliego-Tarifario-del-Servicio-Publico-de-Energia-Electrcia-ano-2025.pdf>
- [57] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “NTE INEN 696 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”, Quito, Ecuador, 2011.
- [58] Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario, “Manual técnico para el registro y control de fertilizantes, enmiendas de suelo y productos afines de uso agrícola”, Quito, Ecuador, jun. 2022.
- [59] A. Florián Silva, “Conductividad eléctrica en las enmiendas orgánicas (compost): Importancia, efecto y recomendaciones”. Consultado: el 19 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.fosacperu.com/conductividad-electrica-en-las-enmiendas-organicas-compost-importancia-efecto-y-recomendaciones/>
- [60] FoodCycle Science, “Compostador eléctrico de 2 kg FoodCycler FC-30 - Especificaciones técnicas”. Consultado: el 7 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.tventas.com/cocina/35784-compostador-2-l-foodcycler-fc-30.html>

- [61] Lomi, “Lomi 2 (Bloom) Kitchen Countertop Food Recycler: Technical Specifications”. Consultado: el 7 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://lomi.com/products/lomi-2?srsId=AfmBOopzm6XsEVttCFZWOErWbS-dvJKEpbVQhsZ3mSYtSm7HgDwpsRXh>
- [62] GEME, “GEME Terra 2 vs Mill Composter: The 2026 Decision Guide”, ene. 2026. Consultado: el 31 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.geme.bio/blog/geme-vs-mill-composter-2026>
- [63] Javis, “Prototype vs. Production: The Real Reason Your Per-Part Price Plummets”, ago. 2025. Consultado: el 31 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.zenithinmfg.com/prototype-vs-production-cost/>
- [64] PCB Trace, “Cost Comparison — Prototype vs. Volume PCB Production”, 2021. Consultado: el 31 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://pcbtrace.com/cost-comparison-prototype-vs-volume-pcb-production/>

ANEXOS

Anexo A: Valoración de opciones de unidad de control

	Arduino Uno	Arduino Mega	PLC L Ogo 6ED1052- 1FB08-0BA2,	$\Sigma+1$	Ponderación
Procesamiento					
Arduino Uno	-	0	0	1	0.17
Arduino Mega	1	-	0	2	0.33
PLC L Ogo 6ED1052-1FB08-0BA2,	1	1	-	3	0.50
Total				6	1.00

	Arduino Uno	Arduino Mega	PLC L Ogo 6ED1052- 1FB08-0BA2,	$\Sigma+1$	Ponderación
Entradas y Salidas					
Arduino Uno	-	0	1	2	0.33
Arduino Mega	1	-	1	3	0.50
PLC L Ogo 6ED1052-1FB08-0BA2,	0	0	-	1	0.17
Total				6	1.00

	Arduino Uno	Arduino Mega	PLC L Ogo 6ED1052- 1FB08-0BA2,	$\Sigma+1$	Ponderación
Compatibilidad					
Arduino Uno	-	0	0	1	0.17
Arduino Mega	1	-	1	3	0.50
PLC L Ogo 6ED1052-1FB08-0BA2,	1	0	-	2	0.33
Total				6	1

Dimensiones	Arduino Uno	Arduino Mega	PLC L Ogo 6ED1052- 1FB08-0BA2,	$\Sigma+1$	Ponderación
Arduino Uno	-	1	1	3	0.50
Arduino Mega	0	-	1	2	0.33
PLC L Ogo 6ED1052-1FB08-0BA2,	0	0	-	1	0.17
Total				6	1

Costo	Arduino Uno	Arduino Mega	PLC L Ogo 6ED1052- 1FB08-0BA2,	$\Sigma+1$	Ponderación
Arduino Uno	-	1	1	3	0.50
Arduino Mega	0	-	1	2	0.33
PLC L Ogo 6ED1052-1FB08-0BA2,	0	0	-	1	0.17
Total				6	1

Anexo B: Valoración de opciones del sensor de temperatura y humedad.

Rango de medición temperatura	DHT11	DHT22	SHT20	$\sum+1$	Ponderación
DHT11	-	0	0	1	0.17
DHT22	1	-	0	2	0.33
SHT20	1	1	-	3	0.50
Total				6	1.00

Rango de medición Humedad	DHT11	DHT22	SHT20	$\sum+1$	Ponderación
DHT11	-	0	0	1	0.20
DHT22	1	-	0.5	2.5	0.50
SHT20	0	0.5	-	1.5	0.30
Total				5	1.00

Comunicación	DHT11	DHT22	SHT20	$\sum+1$	Ponderación
DHT11	-	0.5	0.5	2	0.33
DHT22	0.5	-	0.5	2	0.33
SHT20	0.5	0.5	-	2	0.33
Total				6	1.00

implementación	DHT11	DHT22	SHT20	$\sum+1$	Ponderación
DHT11	-	0.5	1	2.5	0.42
DHT22	0.5	-	1	2.5	0.42
SHT20	0	0	-	1	0.17
Total				6	1

Costo	DHT11	DHT22	SHT20	$\sum+1$	Ponderación
DHT11	-	1	1	3	0.50
DHT22	0	-	1	2	0.33
SHT20	0	0	-	1	0.17
Total				6	1.00

Anexo C: Valoración de opciones de motor.

Velocidad(baja)	Motor Ac 110V	Motorreductor DC 24V	Motor a Pasos	$\Sigma+1$	Ponderación
Motor Ac 110V	-	0	0	1	0.17
Motoreductor DC 24V	1	-	1	3	0.50
Motor DC a Pasos 24V	0	1	-	2	0.33
Total				6	1

Eficiencia a bajas velocidades	Motor Ac 110V	Motorreductor DC 24V	Motor a Pasos	$\Sigma+1$	Ponderación
Motor Ac 110V	-	0	0	1	0.17
Motorreductor DC 24V	1	-	1	3	0.50
Motor DC a Pasos 24V	1	0	-	2	0.33
Total				6	1.00

Torque	Motor Ac 110V	Motorreductor DC 24V	Motor a Pasos	$\Sigma+1$	Ponderación
Motor Ac 110V	-	1	1	3	0.50
Motoreductor DC 24V	0	-	1	2	0.33
Motor DC a Pasos 24V	0	0	-	1	0.17
Total				6	1

Control	Motor Ac 110V	Motorreductor DC 24V	Motor a Pasos	$\Sigma+1$	Ponderación
Motor Ac 110V	-	0	0.5	1.5	0.25
Motoreductor DC 24V	1	-	1	3	0.50
Motor DC a Pasos 24V	0.5	0	-	1.5	0.25
Total				6	1.00

Costo	Motor Ac 110V	Motorreductor DC 24V	Motor a Pasos	$\Sigma+1$	Ponderación
Motor Ac 110V	-	0	0	1	0.17
Motorreductor DC 24V	1	-	1	3	0.50
Motor DC a Pasos 24V	1	0	-	2	0.33
Total				6	1.00

Anexo D: Valoración de opciones del mecanismo de seguro de cierre

Confiabilidad	Solenoides	Cerradura con Actuador	Pestillo Manual	$\Sigma+1$	Ponderación
Solenoides	-	0.5	1	2.5	0.42
Cerradura con Actuador	0.5	-	1	2.5	0.42
Pestillo Manual	0	0	-	1	0.17
Total				6	1.00

Facilidad Integración	Solenoides	Cerradura con Actuador	Pestillo Manual	$\Sigma+1$	Ponderación
Solenoides	-	1	1	3	0.50
Cerradura con Actuador	0	-	0	1	0.17
Pestillo Manual	0	1	-	2	0.33
Total				6	1

Costo	Solenoides	Cerradura con Actuador	Pestillo Manual	$\Sigma+1$	Ponderación
Solenoides	-	1	1	3	0.50
Cerradura con Actuador	0	-	0	1	0.17
Pestillo Manual	0	1	-	2	0.33
Total				6	1

Anexo E: Valoración de opciones de resistencias térmicas.

Temperatura	Resistencia tubular	REA013.- Niquelina de Temperatura	REA016. Niquelina de temperatura	$\sum+1$	Ponderación
Resistencia tubular	-	1	1	3	0.50
REA013.- Niquelina de Temperatura	0	-	1	2	0.33
REA016. Niquelina de temperatura	0	0	-	1	0.17
Total				6	1.00

Dimensión	Resistencia tubular	REA013.- Niquelina de Temperatura	REA016. Niquelina de temperatura	$\sum+1$	Ponderación
Resistencia tubular	-	1	0	2	0.33
REA013.- Niquelina de Temperatura	0	-	0	1	0.17
REA016. Niquelina de temperatura	1	1	-	3	0.50
Total				6	1.00

Consumo	Resistencia tubular	REA013.- Niquelina de Temperatura	REA016. Niquelina de temperatura	$\sum+1$	Ponderación
Resistencia tubular	-	0.5	0	1.5	0.25
REA013.- Niquelina de Temperatura	0.5	-	0	1.5	0.25
REA016. Niquelina de temperatura	1	1	-	3	0.50
Total				6	1

Costo	Resistencia tubular	REA013.- Niquelina de Temperatura	REA016. Niquelina de temperatura	$\sum+1$	Ponderación
Resistencia tubular	-	0	0	1	0.17
REA013.- Niquelina de Temperatura	1	-	0	2	0.33
REA016. Niquelina de temperatura	1	1	-	3	0.50

Total	6	1
-------	---	---

Anexo F: Valoración de opciones del sistema de alimentación

Potencia	Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	Fuente Mean Well QP-150D	Fuente Mean Well RD-125B	$\Sigma+1$	Ponderación
Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	-	0	0	1	0.17
Fuente Mean Well QP-150D	1	-	1	3	0.50
Fuente Mean Well RD-125B	1	0	-	2	0.33
			Total	6	1.00

Salida	Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	Fuente Mean Well QP-150D	Fuente Mean Well RD-125B	$\Sigma+1$	Ponderación
Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	-	0	1	2	0.33
Fuente Mean Well QP-150D	1	-	1	3	0.50
Fuente Mean Well RD-125B	0	0	-	1	0.17
			Total	6	1.00

Fiabilidad	Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	Fuente Mean Well QP-150D	Fuente Mean Well RD-125B	$\Sigma+1$	Ponderación
Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	-	1	1	3	0.50
Fuente Mean Well QP-150D	0	-	1	2	0.33
Fuente Mean Well RD-125B	0	0	-	1	0.17
			Total	6	1

	Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	Fuente Mean Well QP-150D	Fuente Mean Well RD-125B	$\Sigma+1$	Ponderación
Dimensiones					
Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	-	1	1	3	0.50
Fuente Mean Well QP-150D	0	-	0	1	0.17
Fuente Mean Well RD-125B	0	1	-	2	0.33
			Total	6	1

	Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	Fuente Mean Well QP-150D	Fuente Mean Well RD-125B	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo					
Slim 60W 24V IP20; Fuente 12V-1A	-	1	1	3	0.50
Fuente Mean Well QP-150D	0	-	0	1	0.17
Fuente Mean Well RD-125B	0	1	-	2	0.33
			Total	6	1

Anexo G: Código programación del Biodigestor Automatizado

```
//Código de Control para Biodigestor Automatizado
```

```
// Autor: Pujota J.
```

```
#include <DHT.h>
```

```
// --- 1. DEFINICIONES DE LÓGICA ---
```

```
#define RELE_ON LOW
```

```
#define RELE_OFF HIGH
```

```
#define LUZ_ON HIGH
```

```
#define LUZ_OFF LOW
```

```
// --- 2. PINES ---
```

```
#define DHTPIN 2
```

```
#define PIN_FINAL_CARRERA A0
```

```
// Botones
```

```
#define PIN_BOTON_INICIO 3
```

```
#define PIN_BOTON_STOP 4
```

```
#define PIN_BOTON_APERTURA 5
```

```
// Actuadores
```

```
#define PIN_MOTOREDUCTOR 8
```

```
#define PIN_RESISTENCIA 9
```

```
#define PIN_SOLENOIDE 10
```

```
#define PIN_VENTILADOR 11
```

```
// Luces
```

```
#define PIN_LUZ_VERDE 12
```

```
#define PIN_LUZ_AZUL 13
```

```
#define PIN_LUZ_AMARILLA 7
```

```

// --- 3. PARÁMETROS ---

#define TEMP_OBJETIVO_FASE1 55.0

#define TEMP_MAX_FASE2 65.0

#define TEMP_SEGURIDAD_STOP 30.0

#define HISTERESIS_TEMP 2.0

#define HUM_MIN_FASE2 50.0

#define HUM_MAX_FASE2 70.0

#define HUMEDAD_OBJETIVO_FIN 70.0


// Tiempos Globales

const unsigned long DURACION_FASE_1 = 2UL * 60 * 60 * 1000;

const unsigned long TIEMPO_MINIMO_FASE_2 = 20UL * 60 * 60 * 1000;

const unsigned long DURACION_FASE_3 = 2UL * 60 * 60 * 1000;


const unsigned long TIEMPO_ACTIVACION_SOLENOIDE = 5000; // 5 Segundos


// Enfriamiento por Volteo

const unsigned long INTERVALO_CICLO_ENFRIAMIENTO = 30UL * 60 * 1000;

const unsigned long DURACION_MOTOR_ENFRIAMIENTO = 3UL * 60 * 1000;


const unsigned long DURACION_AIREACION = 3UL * 60 * 1000;

const unsigned long TIEMPO_ESTABILIDAD_REQUERIDO = 10UL * 60 * 1000;

const unsigned long PERIODO_PARPADEO_ALARMA = 500;

const unsigned long INTERVALO_REPORTE_SERIAL = 5UL * 60 * 1000;

const unsigned long TIEMPO_CICLO_AIREACION_SECO = 4UL * 60 * 60 * 1000;

const unsigned long TIEMPO_CICLO_AIREACION_HUMEDO = 2UL * 60 * 60 * 1000;


// --- 4. VARIABLES ---

#define DHTTYPE DHT22

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

```

```

enum EstadoBioReactor {
    STANDBY, FASE_INICIAL, FASE_TERMOFILIA, FASE_ENFRIAMIENTO,
    CICLO_FINALIZADO, DETENIDO_POR_USUARIO, ALARMA
};

EstadoBioReactor estadoActual = STANDBY;

float temperatura = 0.0;

float humedad = 0.0;

bool compuertaCerrada = false;

unsigned long tiempoInicioFase = 0;
unsigned long tiempoUltimaOperacion = 0;
unsigned long tiempoUltimoParpadeo = 0;
unsigned long tiempoUltimoReporte = 0;
unsigned long tiempoInicioEstabilidad = 0;

bool solenoideActivo = false;
unsigned long tiempoInicioSolenoid = 0;
bool enfriamientoForzadoActivo = false;

// --- 5. FUNCIONES AUXILIARES (MOVIDAS ARIIBA PARA EVITAR ERROR) ---

// Esta función apaga Motor, Resistencia y Ventilador. NO EL SOLENOIDE.
void apagarActuadores() {
    digitalWrite(PIN_MOTOREDUCTOR, RELE_OFF);
    digitalWrite(PIN_RESISTENCIA, RELE_OFF);
    digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_OFF);
    // PIN_SOLENOIDE NO SE TOCA AQUÍ PARA NO CORTAR LA APERTURA
}

// Esta función apaga TODO (incluido solenoide). Para emergencias o inicio.

```

```

void apagarTodo() {
    digitalWrite(PIN_MOTOREDUCTOR, RELE_OFF);
    digitalWrite(PIN_RESISTENCIA, RELE_OFF);
    digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_OFF);
    digitalWrite(PIN_SOLENOIDE, RELE_OFF);
}

void activarSolenoid() {
    solenoideActivo = true;
    tiempoInicioSolenoid = millis();
    digitalWrite(PIN_SOLENOIDE, RELE_ON);
}

void iniciarNuevoCiclo() {
    estadoActual = FASE_INICIAL;
    tiempoInicioFase = millis();
    solenoideActivo = false;
    digitalWrite(PIN_SOLENOIDE, RELE_OFF);
    apagarActuadores();
}

// --- 6. SETUP ---

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println(">>> BIO-REACTOR V5.7 (COMPILACION OK) <<<");

    pinMode(PIN_MOTOREDUCTOR, OUTPUT);
    pinMode(PIN_RESISTENCIA, OUTPUT);
    pinMode(PIN_VENTILADOR, OUTPUT);
    pinMode(PIN_SOLENOIDE, OUTPUT);
    pinMode(PIN_LUZ_VERDE, OUTPUT);
}

```

```

pinMode(PIN_LUZ_AZUL, OUTPUT);

pinMode(PIN_LUZ_AMARILLA, OUTPUT);


pinMode(PIN_FINAL_CARRERA, INPUT_PULLUP);
pinMode(PIN_BOTON_INICIO, INPUT_PULLUP);
pinMode(PIN_BOTON_APERTURA, INPUT_PULLUP);
pinMode(PIN_BOTON_STOP, INPUT_PULLUP);


apagarTodo();


digitalWrite(PIN_LUZ_VERDE, LUZ_OFF);
digitalWrite(PIN_LUZ_AZUL, LUZ_OFF);
digitalWrite(PIN_LUZ_AMARILLA, LUZ_OFF);


dht.begin();


// LOGICA V5.3 (LOW = CERRADA)
compuertaCerrada = (digitalRead(PIN_FINAL_CARRERA) == LOW);


if (compuertaCerrada) {
    estadoActual = STANDBY;
    Serial.println("Estado: STANDBY.");
} else {
    estadoActual = ALARMA;
    Serial.println("¡ALARMA! Compuerta abierta.");
}
}


// --- 7. FUNCIONES DE ESTADO ---

// (Necesitamos declararlas antes del loop o el compilador puede quejarse en algunos IDEs,
// pero Arduino suele manejar esto bien. Por seguridad, las funciones de estado abajo están bien

```

```
// si las llamamos desde el loop y ya definimos las auxiliares arriba).
```

```
void gestionarEstadoStandby() {
```

```
    apagarActuadores();
```

```
}
```

```
void gestionarFaseInicial() {
```

```
    digitalWrite(PIN_MOTOREDUCTOR, RELE_ON);
```

```
    if (temperatura < (TEMP_OBJETIVO_FASE1 - HISTERESIS_TEMP)) {
```

```
        digitalWrite(PIN_RESISTENCIA, RELE_ON);
```

```
    } else if (temperatura >= TEMP_OBJETIVO_FASE1) {
```

```
        digitalWrite(PIN_RESISTENCIA, RELE_OFF);
```

```
    }
```

```
    if (millis() - tiempoInicioFase >= DURACION_FASE_1) {
```

```
        estadoActual = FASE_TERMOFILA;
```

```
        tiempoInicioFase = millis();
```

```
        tiempoUltimaOperacion = millis();
```

```
        tiempoInicioEstabilidad = 0;
```

```
        apagarActuadores();
```

```
    }
```

```
}
```

```
void gestionarFaseTermofila() {
```

```
    digitalWrite(PIN_RESISTENCIA, RELE_OFF);
```

```
    if (temperatura > TEMP_MAX_FASE2) {
```

```
        digitalWrite(PIN_MOTOREDUCTOR, RELE_ON);
```

```
        digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_ON);
```

```
        tiempoUltimaOperacion = millis() - DURACION_AIREACION;
```

```

}

else {

    bool aireacionEnCurso = (millis() - tiempoUltimaOperacion < DURACION_AIREACION);

    if (aireacionEnCurso) {

        digitalWrite(PIN_MOTOREDUCTOR, RELE_ON);

        digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_ON);

    } else {

        digitalWrite(PIN_MOTOREDUCTOR, RELE_OFF);

        digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_OFF);

        bool tocaAirear = false;

        if (humedad < HUM_MIN_FASE2 && (millis() - tiempoUltimaOperacion >= TIEMPO_CICLO_AIREACION_SECO)) {

            tocaAirear = true;

        } else if (humedad > HUM_MAX_FASE2 && (millis() - tiempoUltimaOperacion >=
TIEMPO_CICLO_AIREACION_HUMEDO)) {

            tocaAirear = true;

        }

        if (tocaAirear) tiempoUltimaOperacion = millis();

    }

}

bool tiempoMinimoCumplido = (millis() - tiempoInicioFase >= TIEMPO_MINIMO_FASE_2);

bool humedadEstable = false;

if (humedad < HUMEDAD_OBJETIVO_FIN) {

    if (tiempoInicioEstabilidad == 0) tiempoInicioEstabilidad = millis();

    else if (millis() - tiempoInicioEstabilidad >= TIEMPO_ESTABILIDAD_REQUERIDO) humedadEstable = true;

} else {

    tiempoInicioEstabilidad = 0;

    humedadEstable = false;

}

```

```

    if (tiempoMinimoCumplido && humedadEstable) {

        estadoActual = FASE_ENFRIAMIENTO;

        tiempoInicioFase = millis();

        apagarActuadores();

    }
}

// FASE ENFRIAMIENTO (VOLTEO, SIN VENTILADOR)
void gestionarFaseEnfriamiento() {

    digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_OFF);

    digitalWrite(PIN_RESISTENCIA, RELE_OFF);

    unsigned long tiempoTranscurrido = millis() - tiempoInicioFase;

    if (tiempoTranscurrido >= DURACION_FASE_3) {

        estadoActual = CICLO_FINALIZADO;

        apagarActuadores();

        return;

    }

    unsigned long tiempoEnCicloActual = tiempoTranscurrido % INTERVALO_CICLO_ENFRIAMIENTO;

    if (tiempoEnCicloActual < DURACION_MOTOR_ENFRIAMIENTO) {

        digitalWrite(PIN_MOTOREDUCTOR, RELE_ON);

    } else {

        digitalWrite(PIN_MOTOREDUCTOR, RELE_OFF);

    }

}

void gestionarCicloFinalizado() {

    apagarActuadores();
}

```

```

}

void gestionarEstadoDetenido() {
    if (enfriamientoForzadoActivo) {
        // Si está caliente, Ventilador ON (Seguridad)
        digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_ON);

        if (temperatura <= TEMP_SEGURIDAD_STOP) {
            enfriamientoForzadoActivo = false;
            digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_OFF);
        }
    } else {
        apagarActuadores();
    }
}

void gestionarAlarma() {
    apagarTodo(); // Aquí apagamos TODO por seguridad
    if(compuertaCerrada) estadoActual = STANDBY;
}

// --- AUXILIARES (SENSORES Y BOTONES) ---

void leerSensores() {
    humedad = dht.readHumidity();
    temperatura = dht.readTemperature();
    if (isnan(humedad)) humedad = 0.0;
    if (isnan(temperatura)) temperatura = 0.0;
    compuertaCerrada = (digitalRead(PIN_FINAL_CARRERA) == LOW);
}

```

```

void vigilarSeguridadCompuerta() {
    if (!compuertaCerrada) {
        if (estadoActual == FASE_INICIAL || estadoActual == FASE_TERMOFILIA || estadoActual == FASE_ENFRIAMIENTO)
        {
            estadoActual = ALARMA;
            apagarTodo();
        }
        // Si estamos en reposo, vamos a Alarma pero NO cortamos solenoide si estamos abriendo
        else if (estadoActual != ALARMA && !solenoideActivo) {
            estadoActual = ALARMA;
        }
    }
}

void gestionarSolenoide() {
    if (solenoideActivo) {
        if (millis() - tiempoInicioSolenoide >= TIEMPO_ACTIVACION_SOLENOIDE) {
            solenoideActivo = false;
            digitalWrite(PIN_SOLENOIDE, RELE_OFF);
            Serial.println(">> Solenoide OFF (Tiempo)");
        }
    }
}

void gestionarLuces() {
    digitalWrite(PIN_LUZ_VERDE, LUZ_OFF);
    digitalWrite(PIN_LUZ_AZUL, LUZ_OFF);
    digitalWrite(PIN_LUZ_AMARILLA, LUZ_OFF);

    switch(estadoActual) {
        case FASE_INICIAL: case FASE_TERMOFILIA: case FASE_ENFRIAMIENTO:
            digitalWrite(PIN_LUZ_VERDE, LUZ_ON);

```

```

        break;
    case CICLO_FINALIZADO:
        digitalWrite(PIN_LUZ_AZUL, LUZ_ON);
        break;
    case ALARMA:
        if ((millis() - tiempoUltimoParpadeo) > PERIODO_PARPADEO_ALARMA) {
            static bool st = false; st=!st;
            digitalWrite(PIN_LUZ_AMARILLA, st ? LUZ_ON : LUZ_OFF);
            tiempoUltimoParpadeo = millis();
        }
        break;
    case DETENIDO_POR_USUARIO:
        if (enfriamientoForzadoActivo) {
            digitalWrite(PIN_LUZ_AZUL, LUZ_ON);
        } else {
            digitalWrite(PIN_LUZ_AMARILLA, LUZ_ON);
        }
        break;
    case STANDBY: break;
}

}

void gestionarBotones() {
    // INICIO
    if (digitalRead(PIN_BOTON_INICIO) == LOW) {
        if (compuertaCerrada) {
            bool cicloCorriendo = (estadoActual == FASE_INICIAL || estadoActual == FASE_TERMOFILIA || estadoActual == FASE_ENFRIAMIENTO);
            if (!cicloCorriendo) {
                Serial.println(">> INICIO DETECTADO.");
                iniciarNuevoCiclo();
                delay(500);
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    } else {

        estadoActual = ALARMA;

    }

}

// APERTURA

if (digitalRead(PIN_BOTON_APERTURA) == LOW) {

    bool estadoPermitido = (estadoActual == STANDBY || estadoActual == CICLO_FINALIZADO || estadoActual ==
DETENIDO_POR_USUARIO);

    bool temperaturaSegura = (temperatura <= TEMP_SEGURIDAD_STOP);

    if (estadoPermitido && temperaturaSegura) {

        Serial.println(">> APERTURA (5s).");

        activarSolenoid();

        delay(200);

    }

}

// STOP

if (digitalRead(PIN_BOTON_STOP) == LOW) {

    if (estadoActual == FASE_INICIAL || estadoActual == FASE_TERMOFILIA || estadoActual == FASE_ENFRIAMIENTO)
{

        Serial.println(">> STOP.");

        apagarTodo();

        if (temperatura > TEMP_SEGURIDAD_STOP) {

            enfriamientoForzadoActivo = true;

            digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_ON);

        } else {

            enfriamientoForzadoActivo = false;

            digitalWrite(PIN_VENTILADOR, RELE_OFF);

        }

    }

}

```

```

        estadoActual = DETENIDO_POR_USUARIO;

        delay(200);
    }
}

// --- 8. LOOP (Al final, para que todo lo demás ya esté definido) ---
void loop() {
    leerSensores();
    vigilarSeguridadCompuerta();
    gestionarBotones();
    gestionarSolenoid();

    if (millis() - tiempoUltimoReporte >= INTERVALO_REPORTESERIAL) {
        tiempoUltimoReporte = millis();
        Serial.print("T: "); Serial.print(temperatura);
        Serial.print(" | Estado: "); Serial.println(estadoActual);
    }

    switch (estadoActual) {
        case STANDBY: gestionarEstadoStandby(); break;
        case FASE_INICIAL: gestionarFaseInicial(); break;
        case FASE_TERMOFILA: gestionarFaseTermofila(); break;
        case FASE_ENFRIAMIENTO: gestionarFaseEnfriamiento(); break;
        case CICLO_FINALIZADO: gestionarCicloFinalizado(); break;
        case DETENIDO_POR_USUARIO: gestionarEstadoDetenido(); break;
        case ALARMA: gestionarAlarma(); break;
    }

    gestionarLuces();
}

```

Anexo H: Resultados de laboratorio del compost obtenido Reporte No. 897



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
LABORATORIO DE QUÍMICA AGRÍCOLA Y SUELOS



REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS

Remitente: **Sr. Jhony Pujota**
Procedencia: **Pichincha – Pedro Moncayo – Tabacundo**
Número de Laboratorio: **897 (Muestra agricultor No. 01 “COMPOST”)**
Fecha del Informe: **19 septiembre 2025**

RESULTADO E INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS EFECTUADO

PARÁMETROS ANALIZADOS:

No. muestra	pH	C.E.	Carbono Orgánico del Suelo	Materia Orgánica del Suelo	N	P	K
		dS/m	%	%	%	ppm	cmol/kg
897 (Muestra 01 “COMPOST”)	7.17	18.94	13.29	25.14	1.26	24.4	13.62
Interpretación	Ligeramente alcalino	Muy salino	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

Métodos empleados para las determinaciones:

- ☞ pH: Con potenciómetro, en solución acuosa relación 1:2.5
- ☞ C.E.: Utilizando conductímetro con extracto de pasta saturada
- ☞ Nitrógeno total: Mediante cálculo a partir del porcentaje de materia orgánica
- ☞ P: Colorimétricamente, con fotolorímetro. Método Olsen modificado
- ☞ K: Espectrofotometría de absorción atómica. Extracto Olsen modificado.
- ☞ Materia orgánica: Por combustión húmeda. Método Walkley-Black

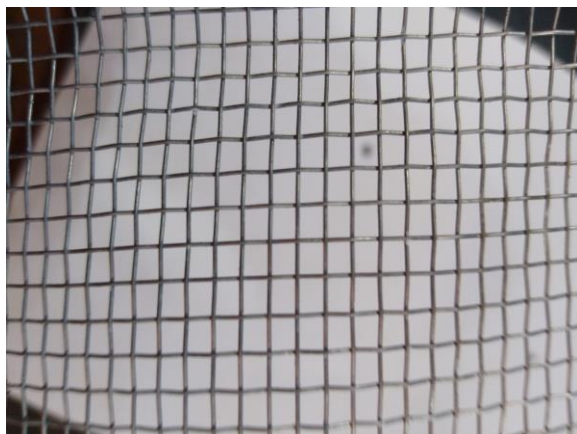


Dr. Marco Rivera M.
LABORATORIO DE QUÍMICA
AGRÍCOLA Y SUELOS

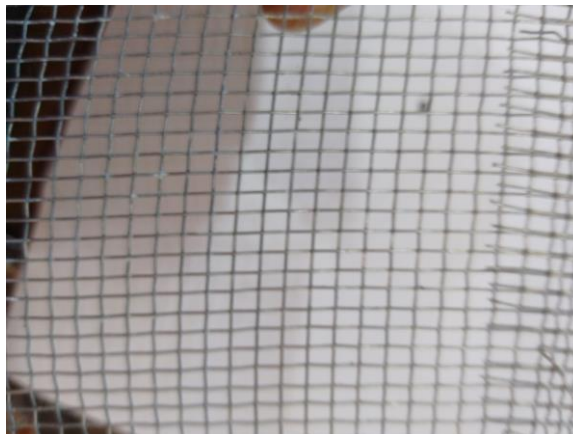


Empresa de Tecnología Agrícola
Eloy Alfaro N74, Carcelén Industrial. Quito, D.M. – Ecuador.Tel.: 0987148798
www.agrotec.ec

Anexo I: Juego de tamices de malla 10 mm, 4 mm, 2 mm y 0.08 mm.



Anexo I.1: Tamiz de 10 mm



Anexo I.2: Tamiz de 8 m



Anexo I.3: Tamiz de 10 mm



Anexo I.4: Tamiz de 8 mm

Anexo J: Clasificación granulométrica del sustrato final.



Anexo J.1 Granulometría >10 mm



Anexo J.1 Granulometría >10 mm



Anexo J.1 Granulometría >10 mm



Anexo J.1 Granulometría >10 mm



Anexo J.1 Granulometría >10 mm

Anexo K: Detalle de costos

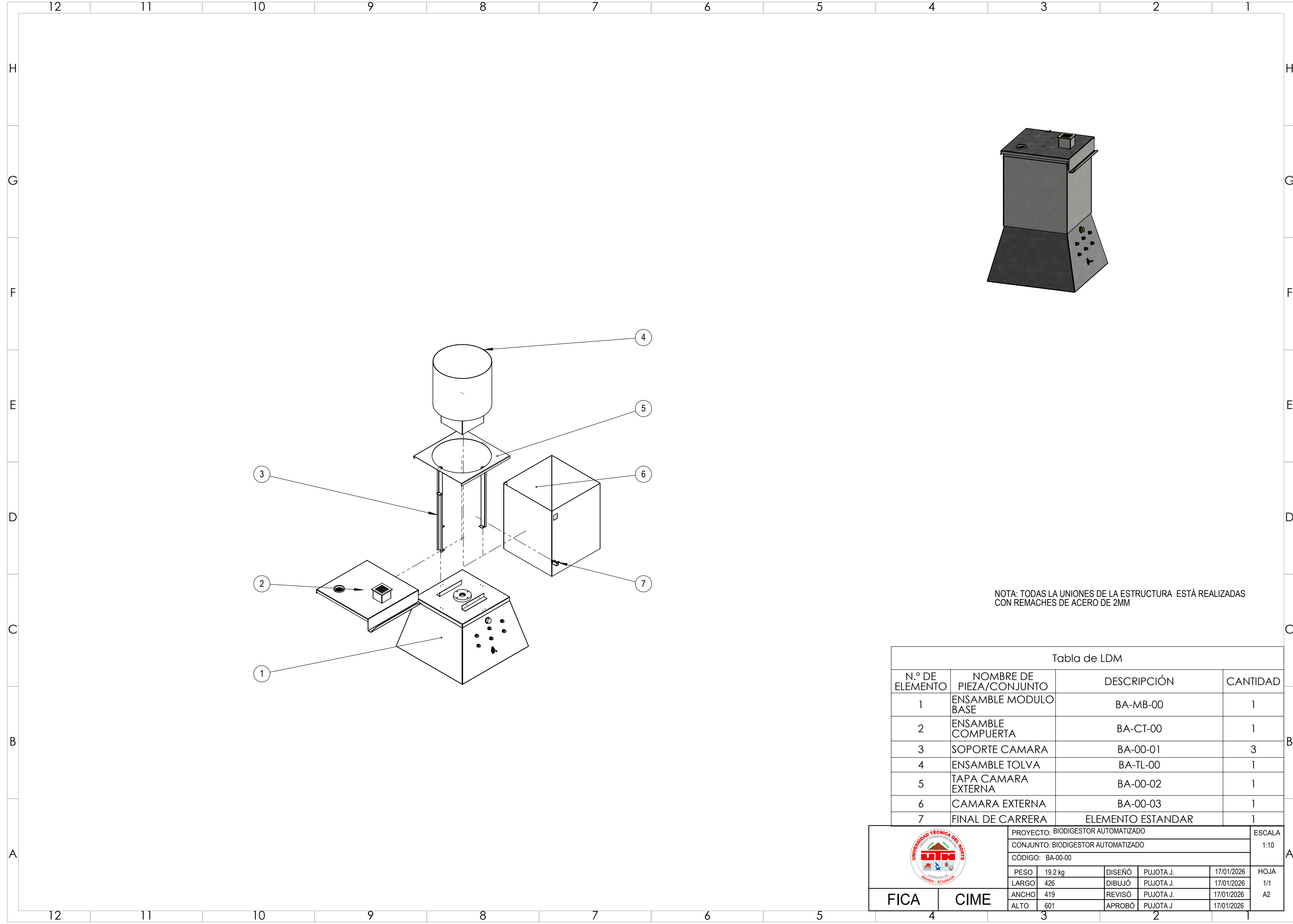
Componente	Cantidad	Costo Unitario	Total
Arduino Mega 2560 (Genérico)	1	\$ 22.00	\$ 22.00
Sensor Temperatura/Humedad DHT22	1	\$ 7.00	\$ 7.00
luces LED(verde, azul, amarillo)	3	\$ 0.20	\$ 0.60
Soporte LED de 5 mm - Metal	3	\$ 0.20	\$ 0.60
Pulsadores	3	\$ 0.30	\$ 0.90
Final de carrera 16A 250V Switch Con Palanca	1	\$ 0.40	\$ 0.40
SUBTOTAL CONTROL			\$ 31.50

Componente	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Motor DC 24V Brushless (Serie JK42BL)	1	\$ 65.00	\$ 65.00
Resistencia PTC REA016 (50W)	2	\$ 7.00	\$ 14.00
Cerradura Solenoide 12V	1	\$ 4.00	\$ 4.00
Ventilador Axial DC	1	\$ 5.00	\$ 5.00
Fuente Modular 24V (100W)	1	\$ 15.00	\$ 15.00
Fuente 12V a 1A	1	\$ 3.00	\$ 3.00
Módulo de relé de 4 canales 5V relés 250V 10A para Arduino	1	\$ 7.00	\$ 7.00
Porta fusible americano de cartucho	2	\$ 0.50	\$ 1.00
Cableado de potencia 18 AWG	1	\$ 3.00	\$ 3.00
cableado siliconado 20 AWG	1	\$ 10.00	\$ 10.00
PRENSAESTOPA DE NYLON GRIS	1	\$ 2.50	\$ 2.50
CONECTORES tipo espada TERMINALES CALIBRE 18	8	\$ 0.06	\$ 0.48
SUBTOTAL POTENCIA			129.98

Categoría	Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Acero Galvanizado	Lámina e=1.6mm y e=6mm (fracción)	1	\$ 45.00	\$ 45.00
Acero Inoxidable	Eje y pletinas para paletas (AISI 304)	1	\$ 20.00	\$ 20.00
Transmisión	Poleas, banda y rodamientos	1	\$ 25.00	\$ 25.00
Manufactura Aditiva	Carcasas filtro	1	\$ 3.00	\$ 3.00
Acabados	Pintura, anticorrosiva y remaches	1	\$ 20.00	\$ 20.00
Gabinete de alojamiento	Gabinete industrial estanco de la línea JSL Serie 200.	1	\$ 6.00	\$ 6.00
Aislamiento termico	AISLAMIENTO TÉRMICO REFLECTIVO	1	\$ 12.00	\$ 12.00
SUBTOTAL MECÁNICA				\$ 131.00

Servicio	Descripción	Costo
Mecanizado	Torneado de eje y bujes	\$ 30.00
Soldadura	Servicio TIG/Arco	\$ 25.00
Corte y Doble	Servicio de plegado de láminas	\$ 20.00
Varios	Transporte e insumos menores	\$ 15.00
SUBTOTAL MANUFACTURA		\$ 90.00

Anexo L: Planos del proyecto Biodigestor Automatizado



NOTA: TODAS LA UNIONES DE LA ESTRUCTURA ESTÁ REALIZADAS CON REMACHES DE ACERO DE 2MM

Tabla de LDM						
N.º DE ELEMENTO		NOMBRE DE PIEZA/CONJUNTO		DESCRIPCIÓN		CANTIDAD
1		ENSAMBLE MODULO BASE		BA-MB-00		1
2		ENSAMBLE COMPUERTA		BA-CT-00		1
3		SOPORTE CAMARA		BA-00-01		3
4		ENSAMBLE TOLVA		BA-TL-00		1
5		TAPA CAMARA EXTERNA		BA-00-02		1
6		CAMARA EXTERNA		BA-00-03		1
7		FINAL DE CARRERA		ELEMENTO ESTANDAR		1

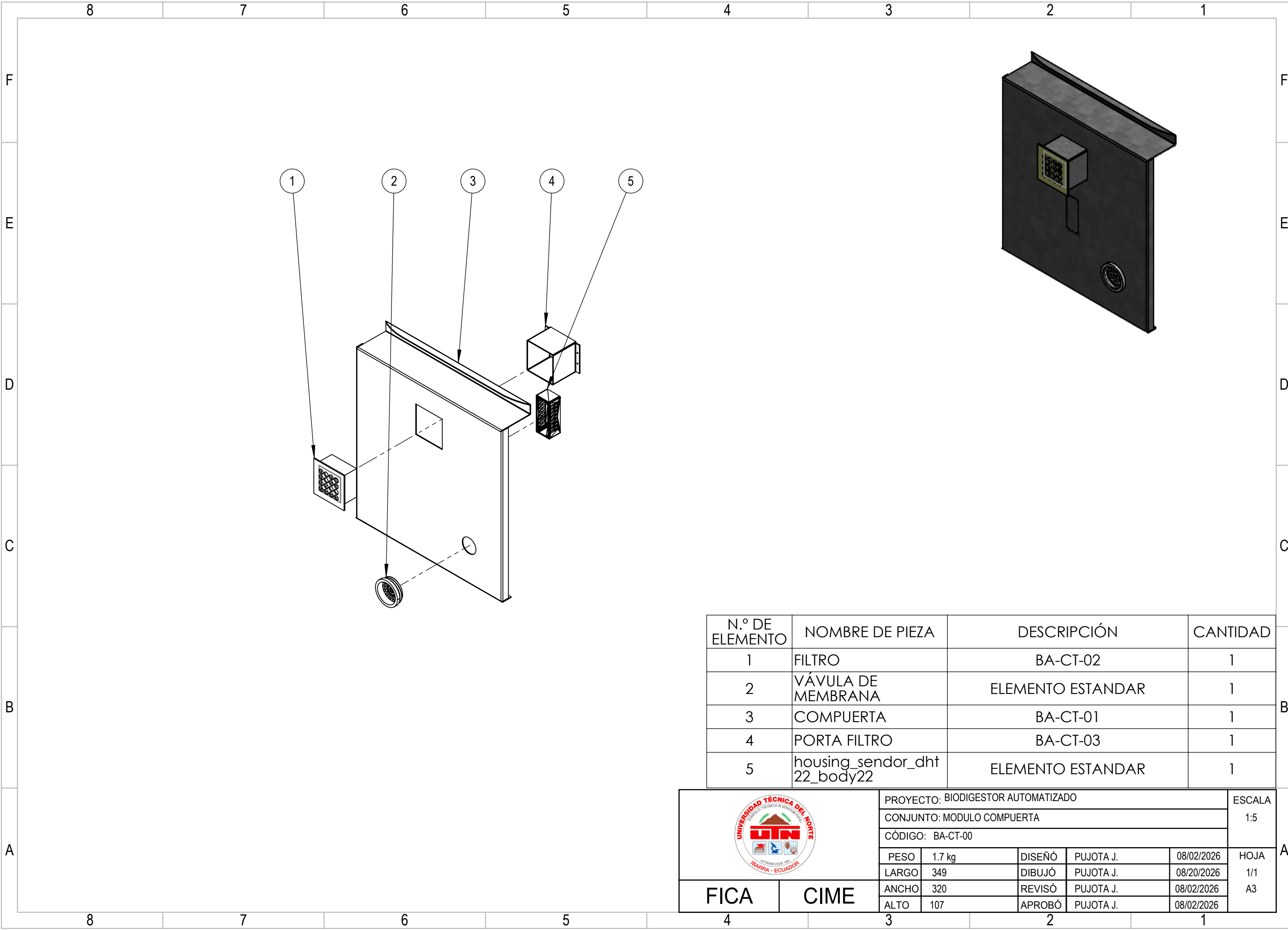
	PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO					ESCALA 1:10
	CONJUNTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO					
	CÓDIGO: BA-00-00					
	PESO	19.2 kg	DISEÑO	PUJOTA J.	17/01/2026	HOJA 1/1 A2
	LARGO	426	DIBUJÓ	PUJOTA J.	17/01/2026	
ANCHO	419	REVISÓ	PUJOTA J.	17/01/2026		
ALTO	601	APROBÓ	PUJOTA J.	17/01/2026		
FICA	CIME					

4

3

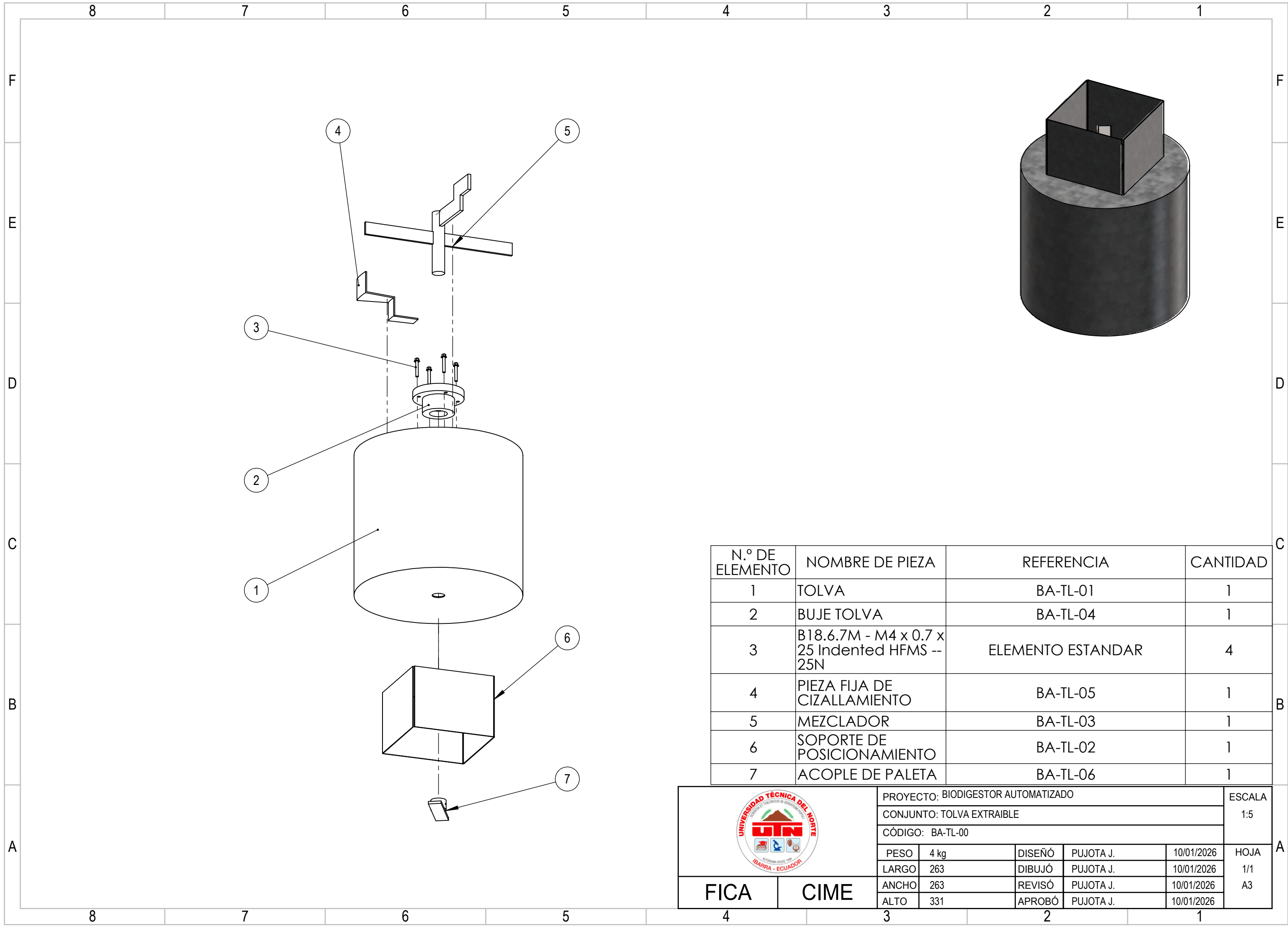
2

1



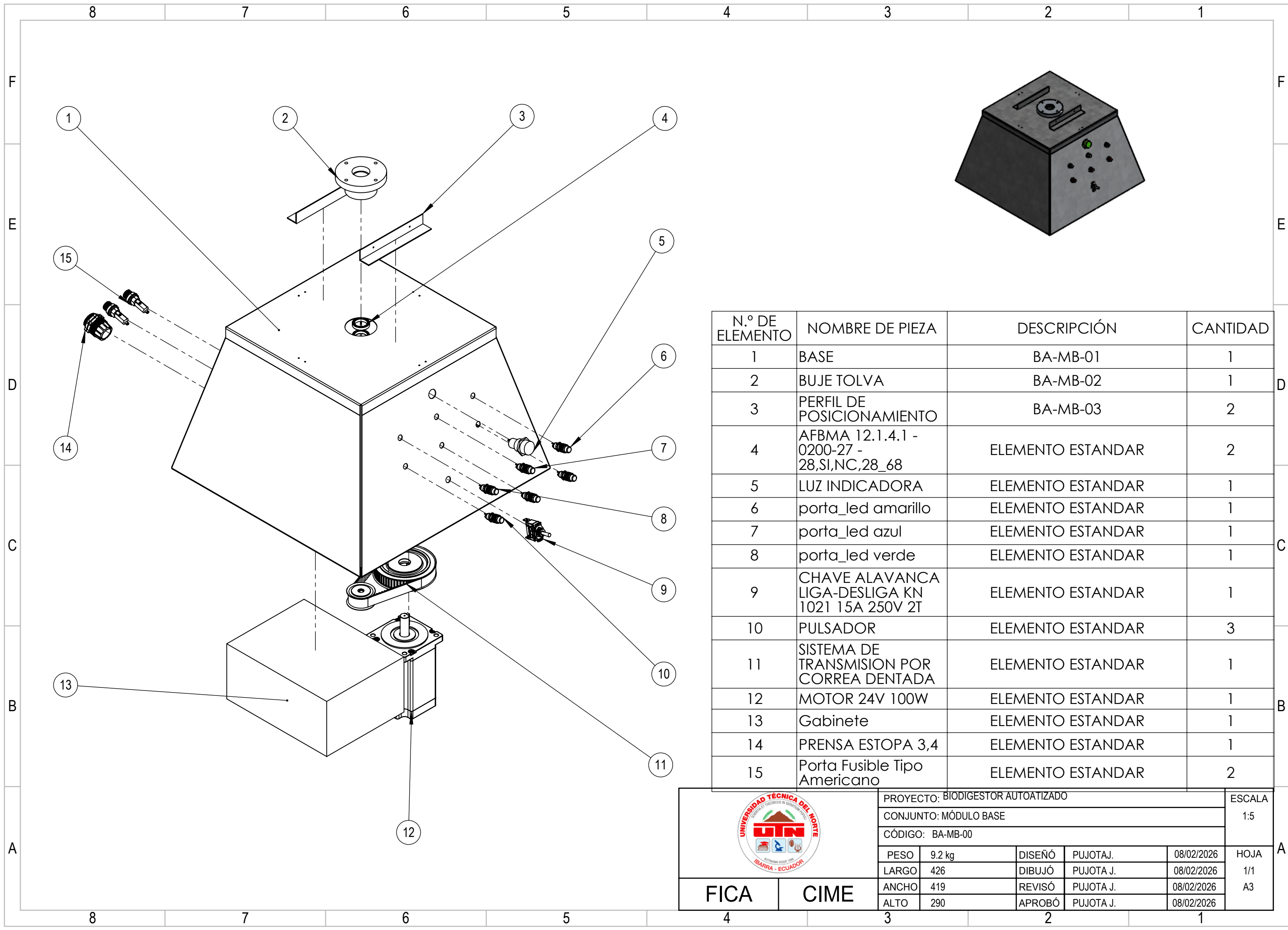
N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	FILTRO	BA-CT-02	1
2	VÁVULA DE MEMBRANA	ELEMENTO ESTANDAR	1
3	COMPUERTA	BA-CT-01	1
4	PORTA FILTRO	BA-CT-03	1
5	housing_sendor_dht 22_body22	ELEMENTO ESTANDAR	1

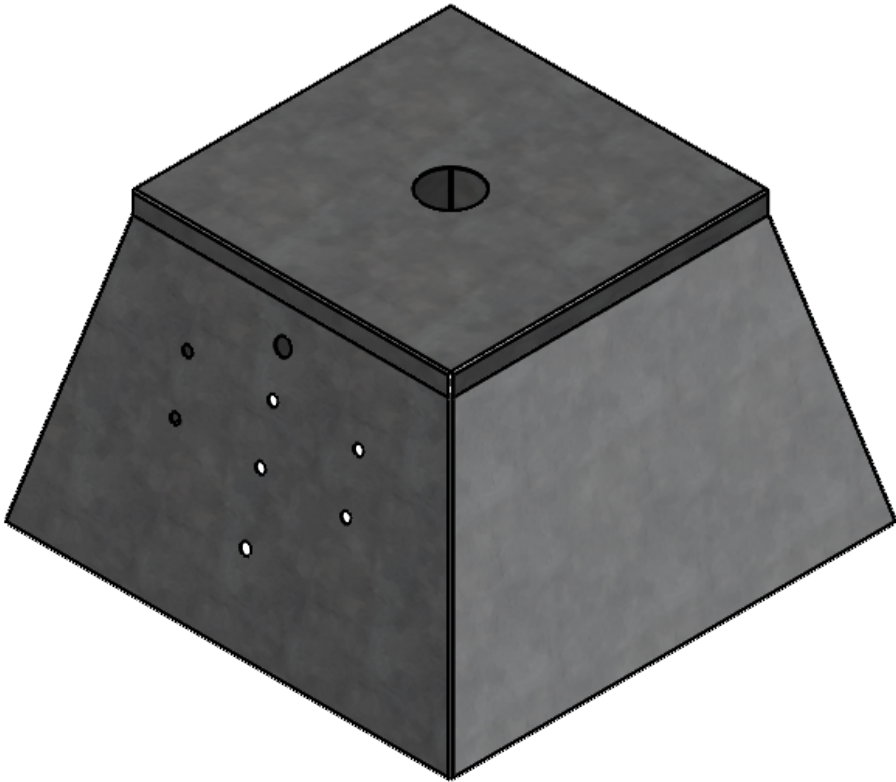
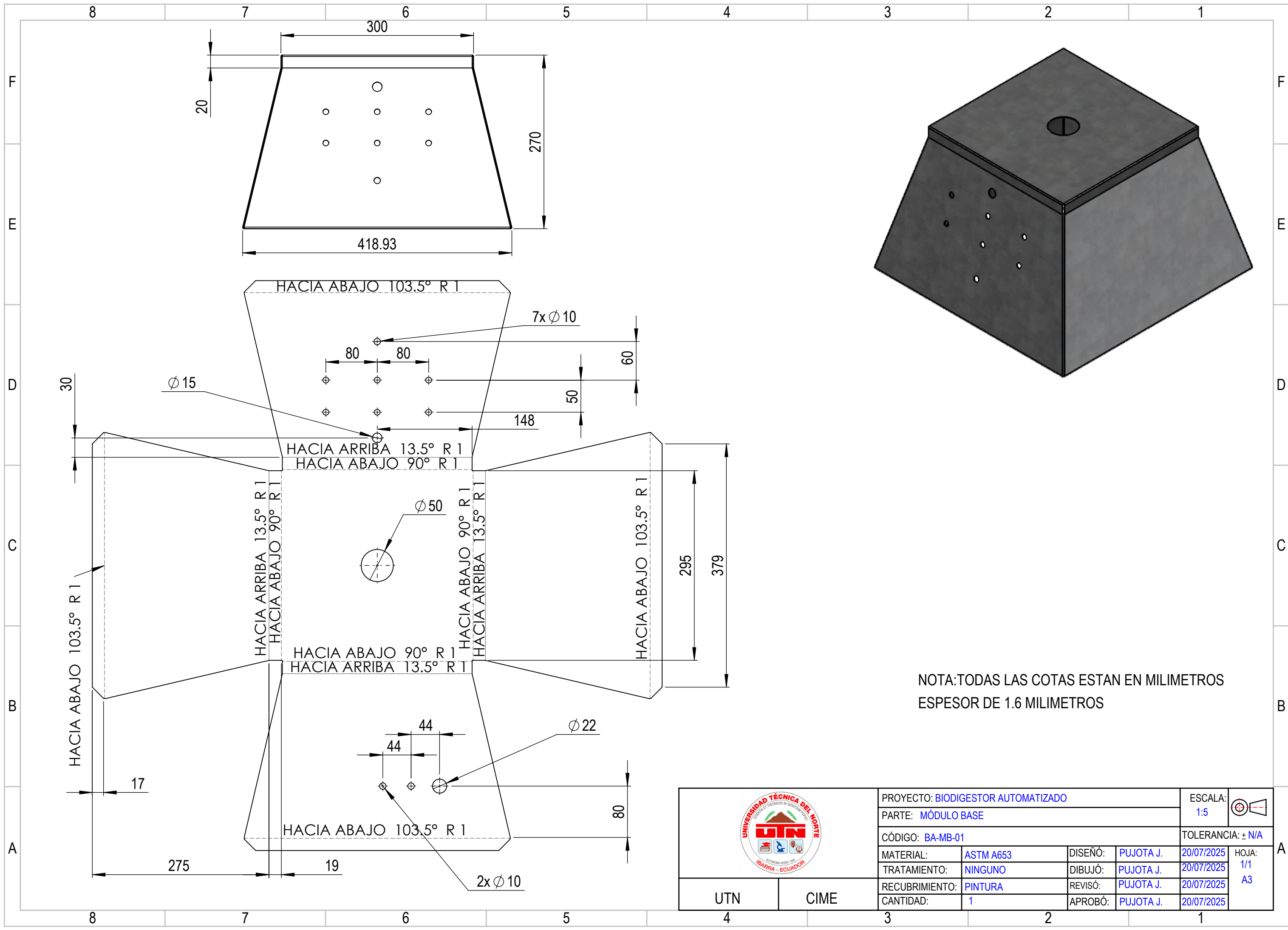
	PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO					ESCALA 1:5
	CONJUNTO: MODULO COMPUERTA					
	CÓDIGO: BA-CT-00					
	PESO	1.7 kg	DISEÑO	PUJOTA J.	08/02/2026	HOJA 1/1 A3
	LARGO	349	DIBUJÓ	PUJOTA J.	08/20/2026	
FICA	CIME	ANCHO	320	REVISÓ	PUJOTA J.	08/02/2026
		ALTO	107	APROBÓ	PUJOTA J.	08/02/2026



N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	REFERENCIA	CANTIDAD
1	TOLVA	BA-TL-01	1
2	BUJE TOLVA	BA-TL-04	1
3	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 25 Indented HFMS -- 25N	ELEMENTO ESTANDAR	4
4	PIEZA FIJA DE CIZALLAMIENTO	BA-TL-05	1
5	MEZCLADOR	BA-TL-03	1
6	SOPORTE DE POSICIONAMIENTO	BA-TL-02	1
7	ACOPLE DE PALETA	BA-TL-06	1

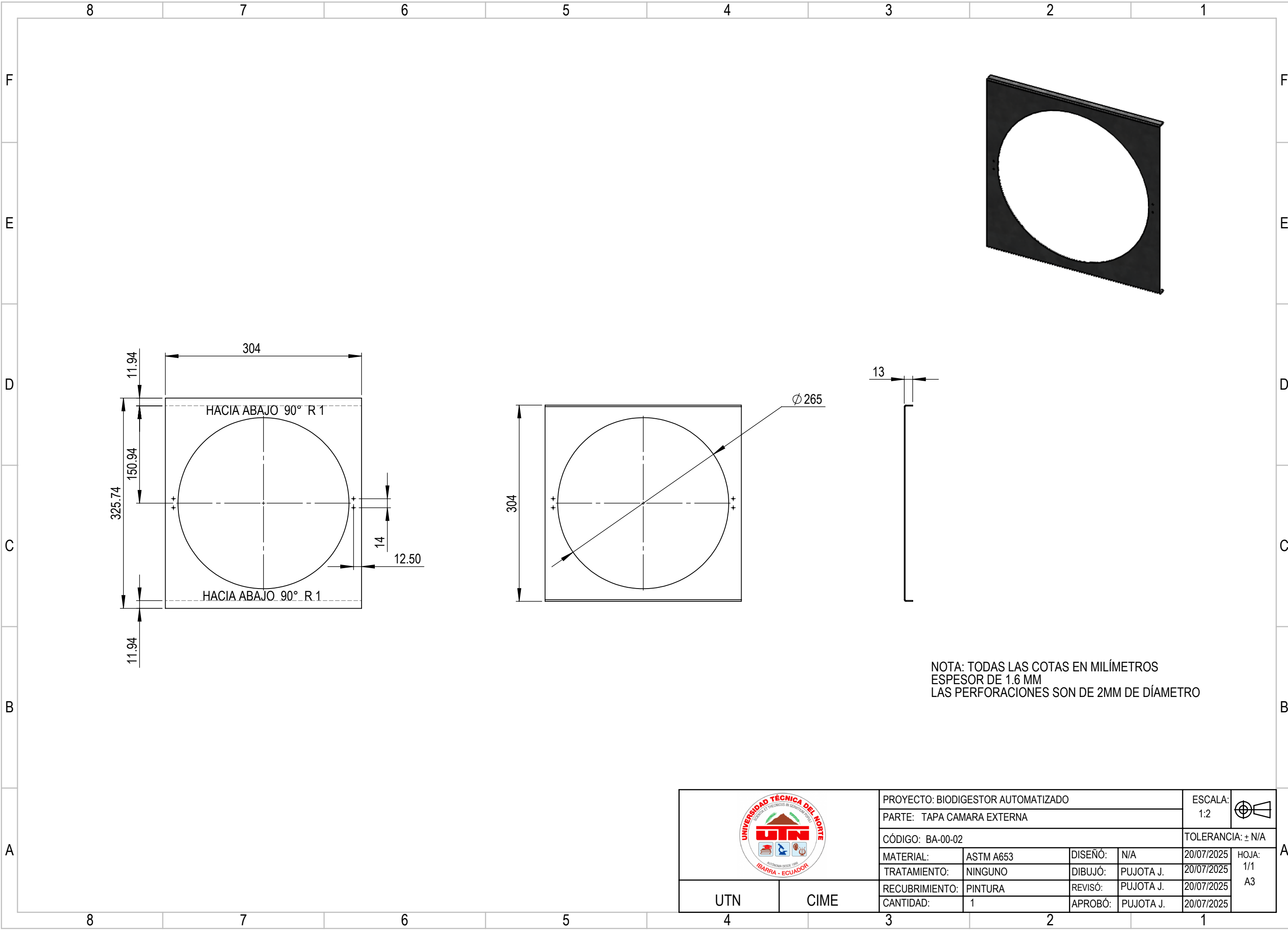
	PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO					ESCALA 1:5
	CONJUNTO: TOLVA EXTRAIBLE					
	CÓDIGO: BA-TL-00					
	PESO	4 kg	DISEÑO	PUJOTA J.	10/01/2026	HOJA 1/1 A3
	LARGO	263	DIBUJÓ	PUJOTA J.	10/01/2026	
FICA		ANCHO	263	REVISÓ	PUJOTA J.	
CIME		ALTO	331	APROBÓ	PUJOTA J.	10/01/2026





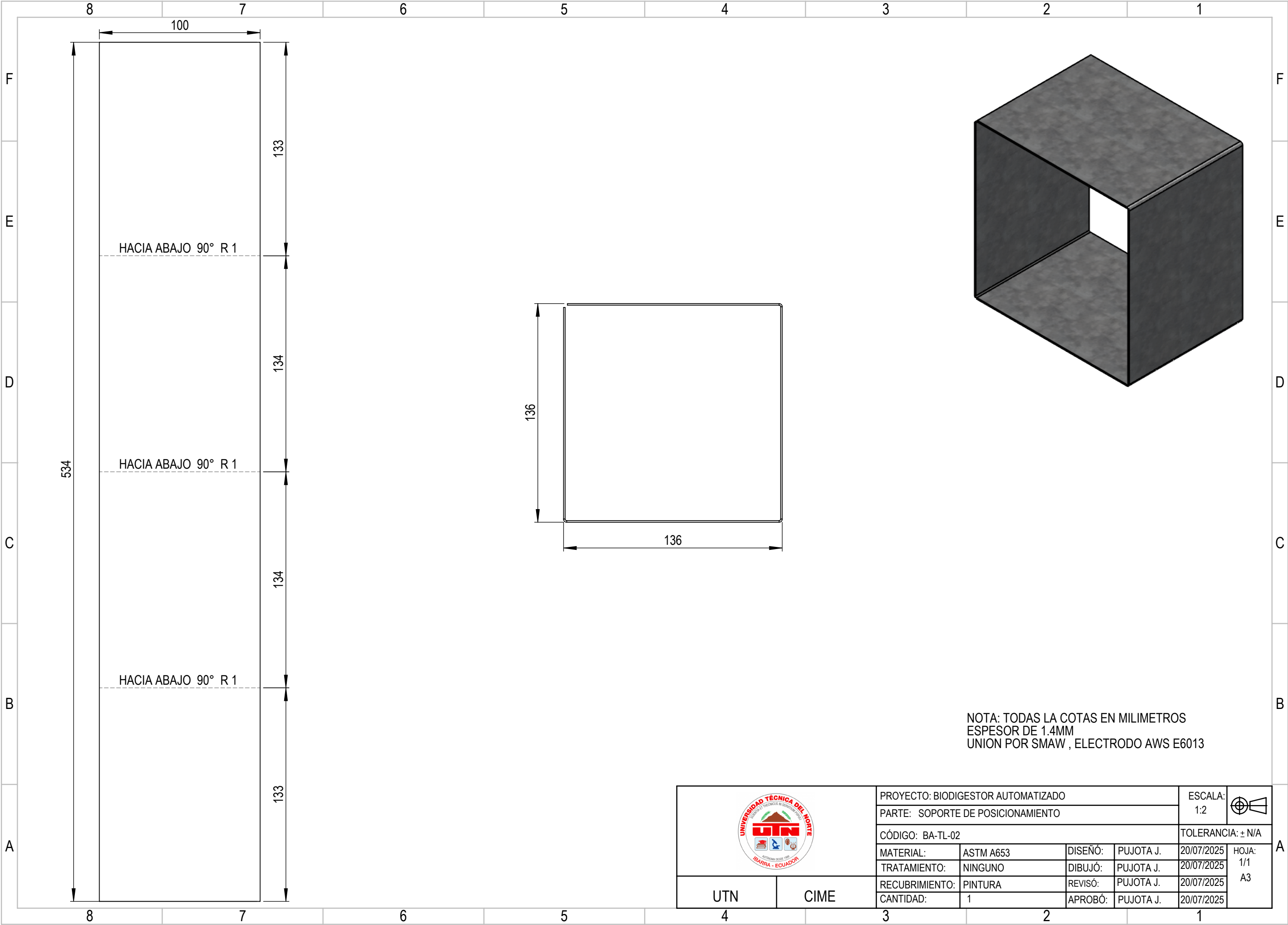
NOTA: TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILIMETROS
ESPESOR DE 1.6 MILIMETROS

		PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:5			
		PARTE: MÓDULO BASE							
		CÓDIGO: BA-MB-01						TOLERANCIA: ± N/A	
		MATERIAL:		ASTM A653	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A3	
		TRATAMIENTO:		NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
RECUBRIMIENTO:		PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025				
CANTIDAD:		1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025				
UTN		CIME							



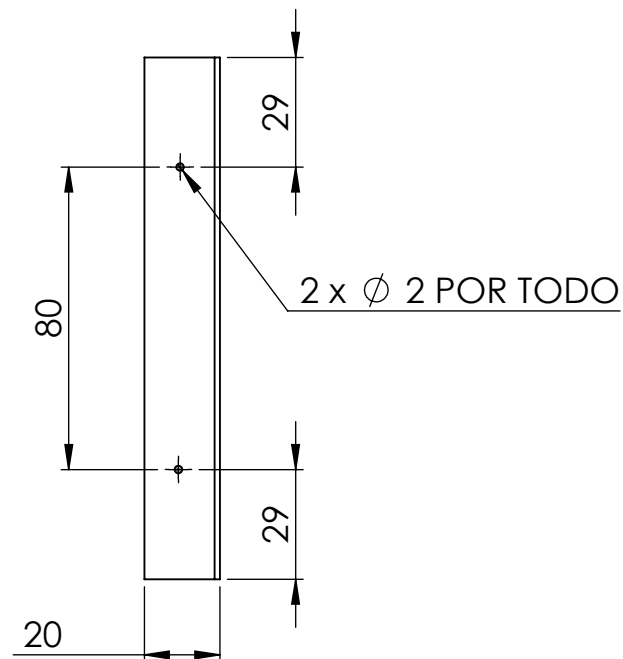
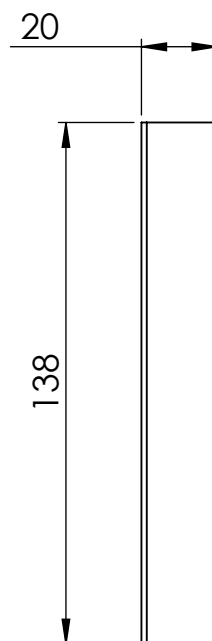
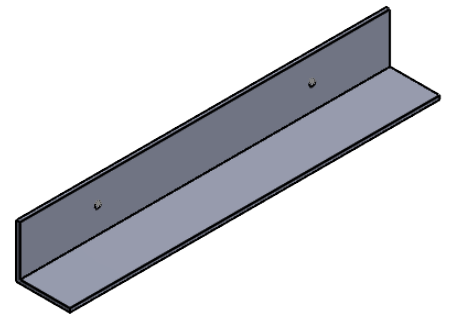
NOTA: TODAS LAS COTAS EN MILÍMETROS
ESPESOR DE 1.6 MM
LAS PERFORACIONES SON DE 2MM DE DIÁMETRO

	PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:2	
	PARTE: TAPA CAMARA EXTERNA					
	CÓDIGO: BA-00-02				TOLERANCIA: ± N/A	
	MATERIAL:	ASTM A653	DISEÑO:	N/A	20/07/2025	HOJA: 1/1 A3
	TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	
RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
UTN	CIME					



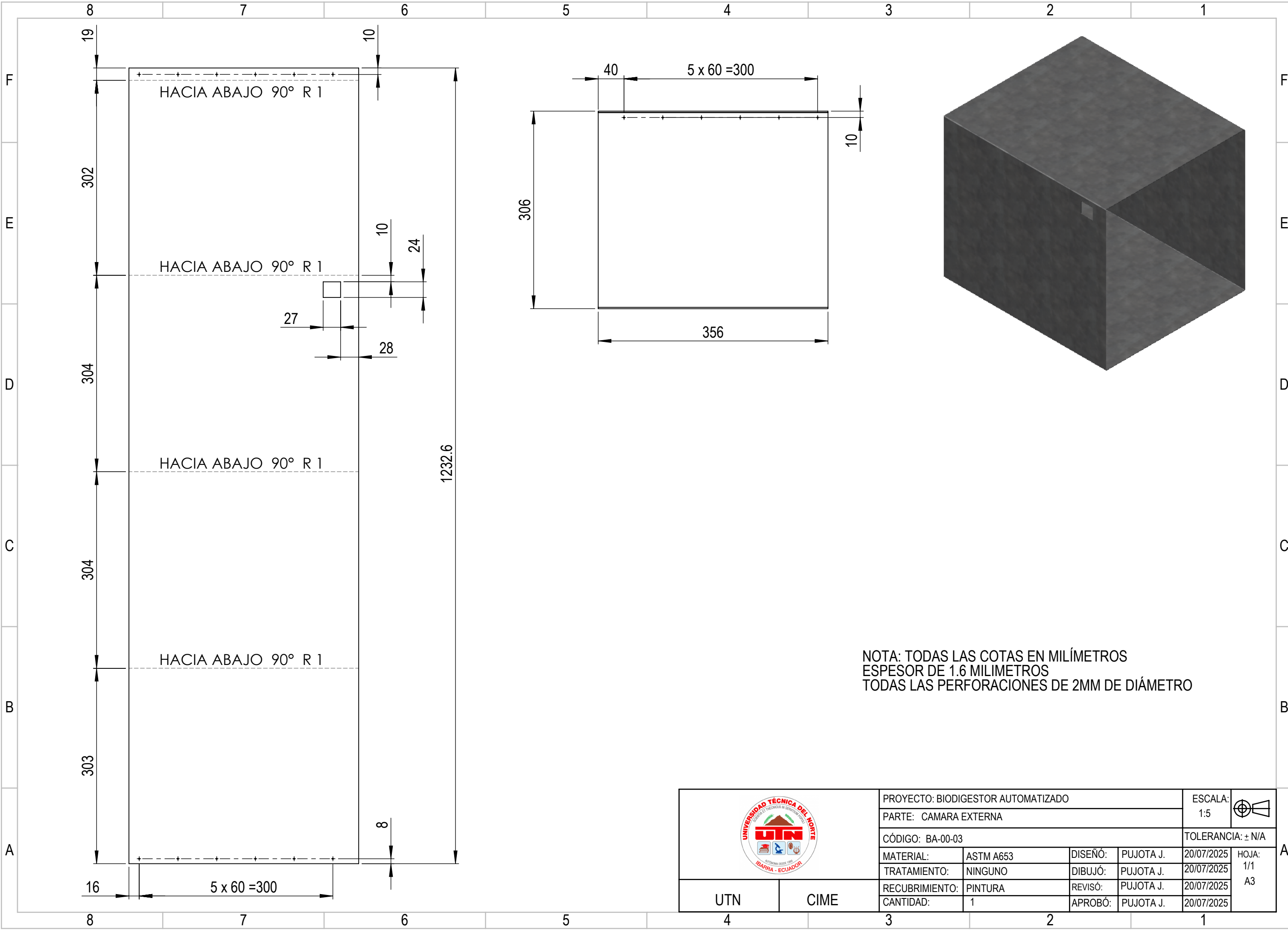
NOTA: TODAS LA COTAS EN MILIMETROS
ESPESOR DE 1.4MM
UNION POR SMAW , ELECTRODO AWS E6013

	PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:2	
	PARTE: SOPORTE DE POSICIONAMIENTO					
	CÓDIGO: BA-TL-02				TOLERANCIA: ± N/A	
	MATERIAL:	ASTM A653	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A3
	TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	
RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
UTN	CIME					



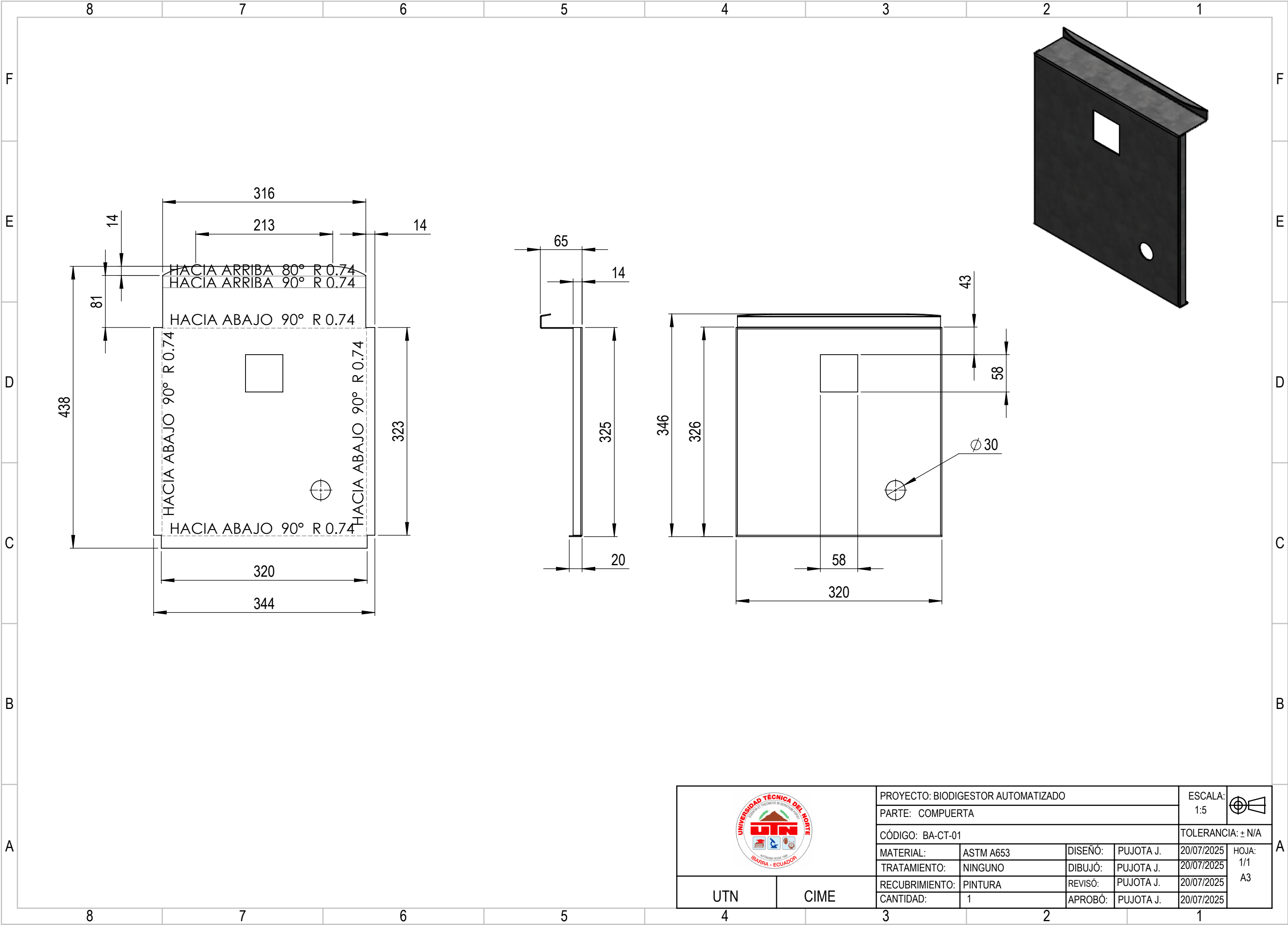
NOTA: TODAS LAS COTAS EN MILÍMETROS
ESPEJOR DE 1.6MM

		PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:2		
		PARTE: PERFIL POSICIONAMIENTO						
		CÓDIGO: BA-MB-03				TOLERANCIA: ± N/A		
		MATERIAL:	ASTM A653	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A4	
		TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025				
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025				
UTN	CIME							

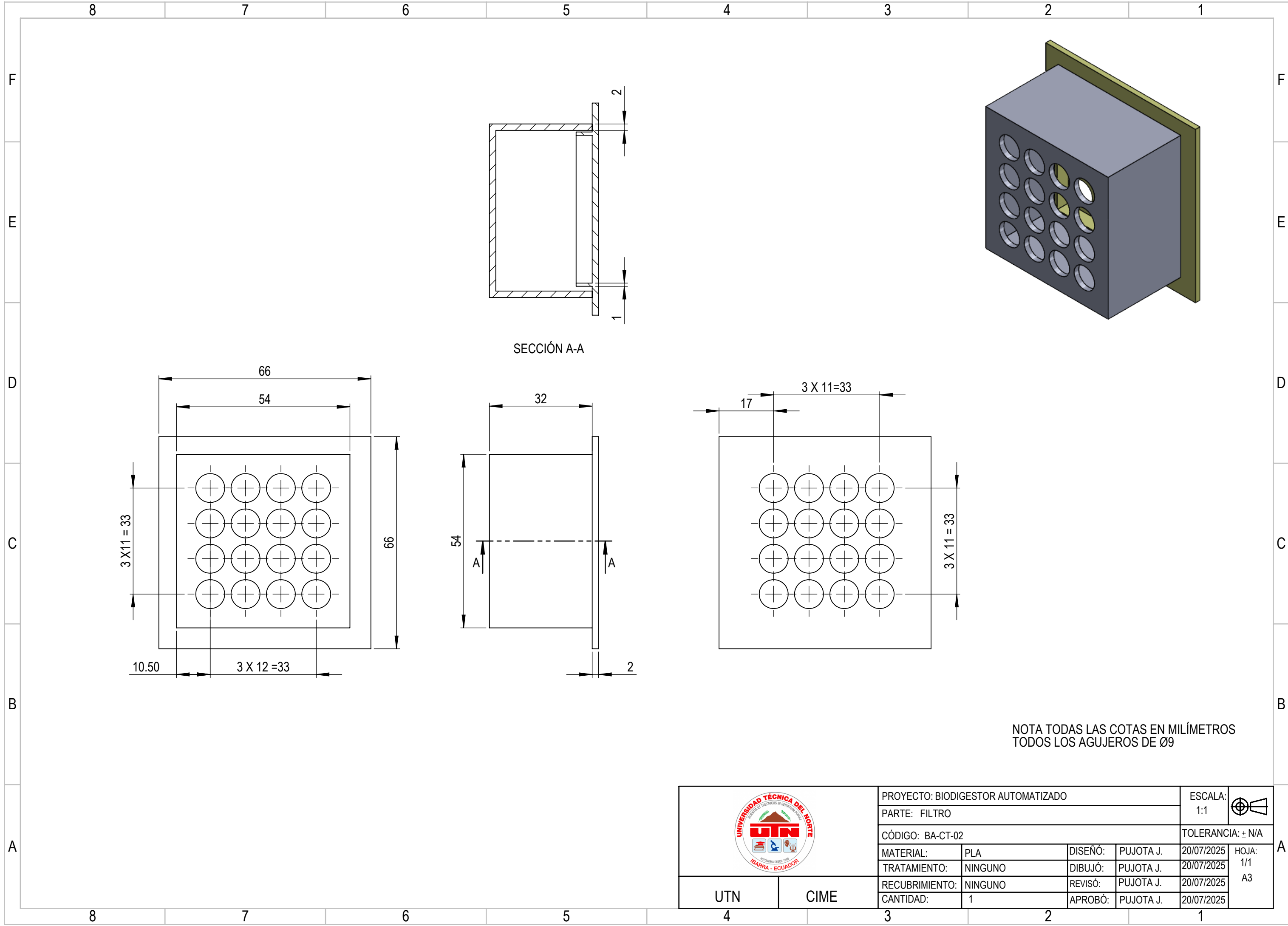


NOTA: TODAS LAS COTAS EN MILÍMETROS
ESPESOR DE 1.6 MILÍMETROS
TODAS LAS PERFORACIONES DE 2MM DE DIÁMETRO

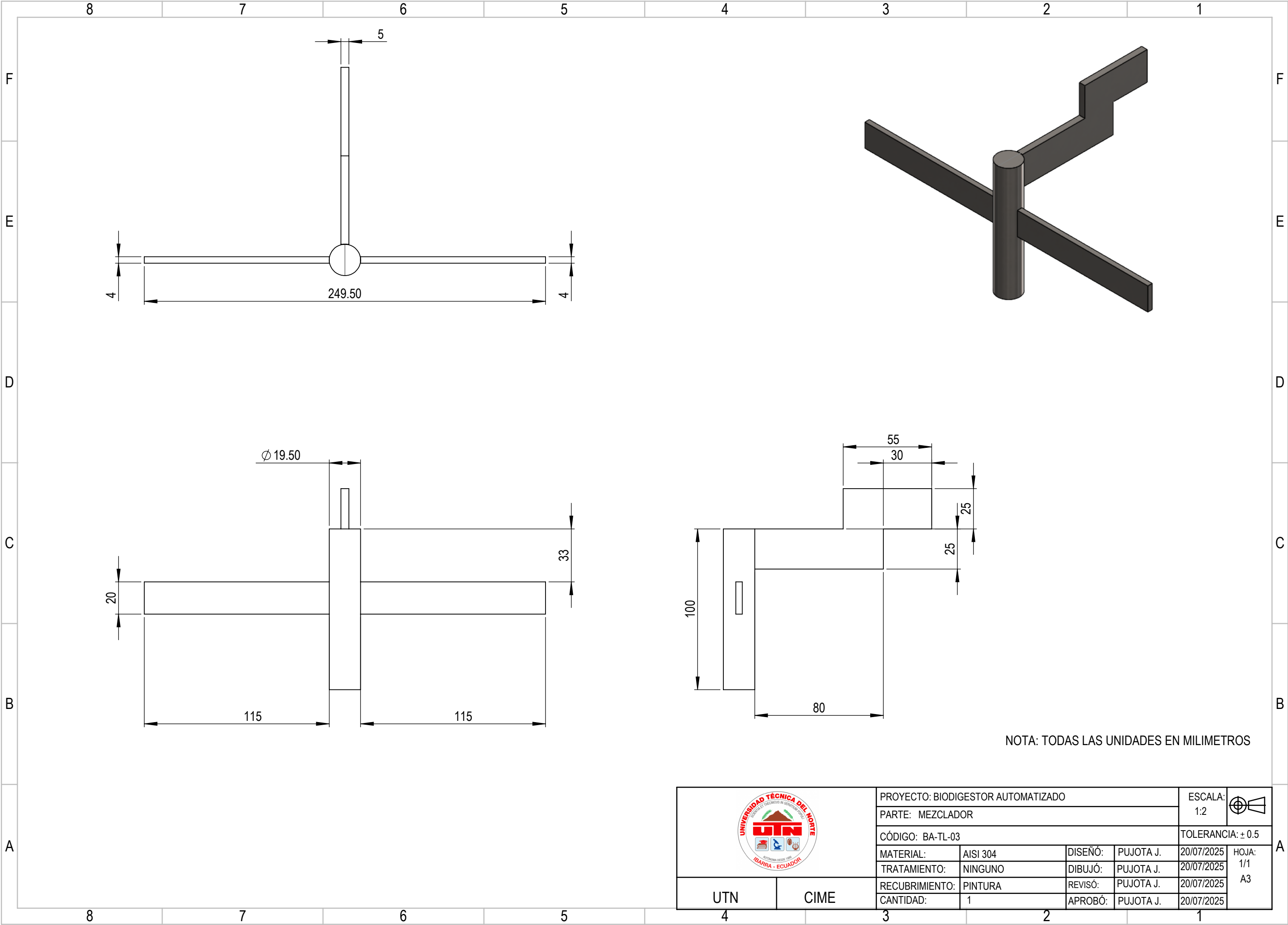
		PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:5	
		PARTE: CAMARA EXTERNA					
		CÓDIGO: BA-00-03				TOLERANCIA: ± N/A	
		MATERIAL:	ASTM A653	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A3
		TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	
RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025			
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025			
UTN	CIME						

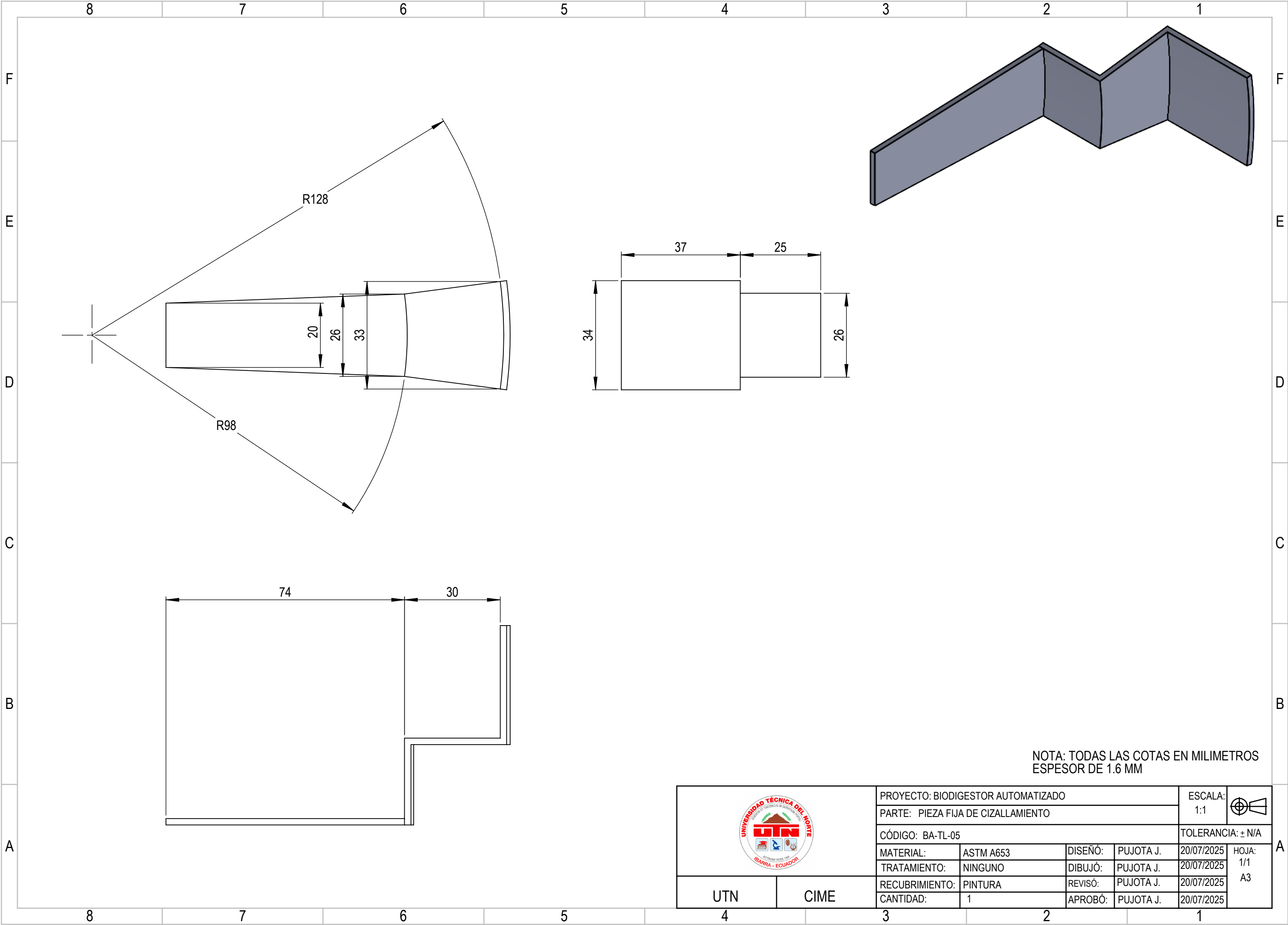


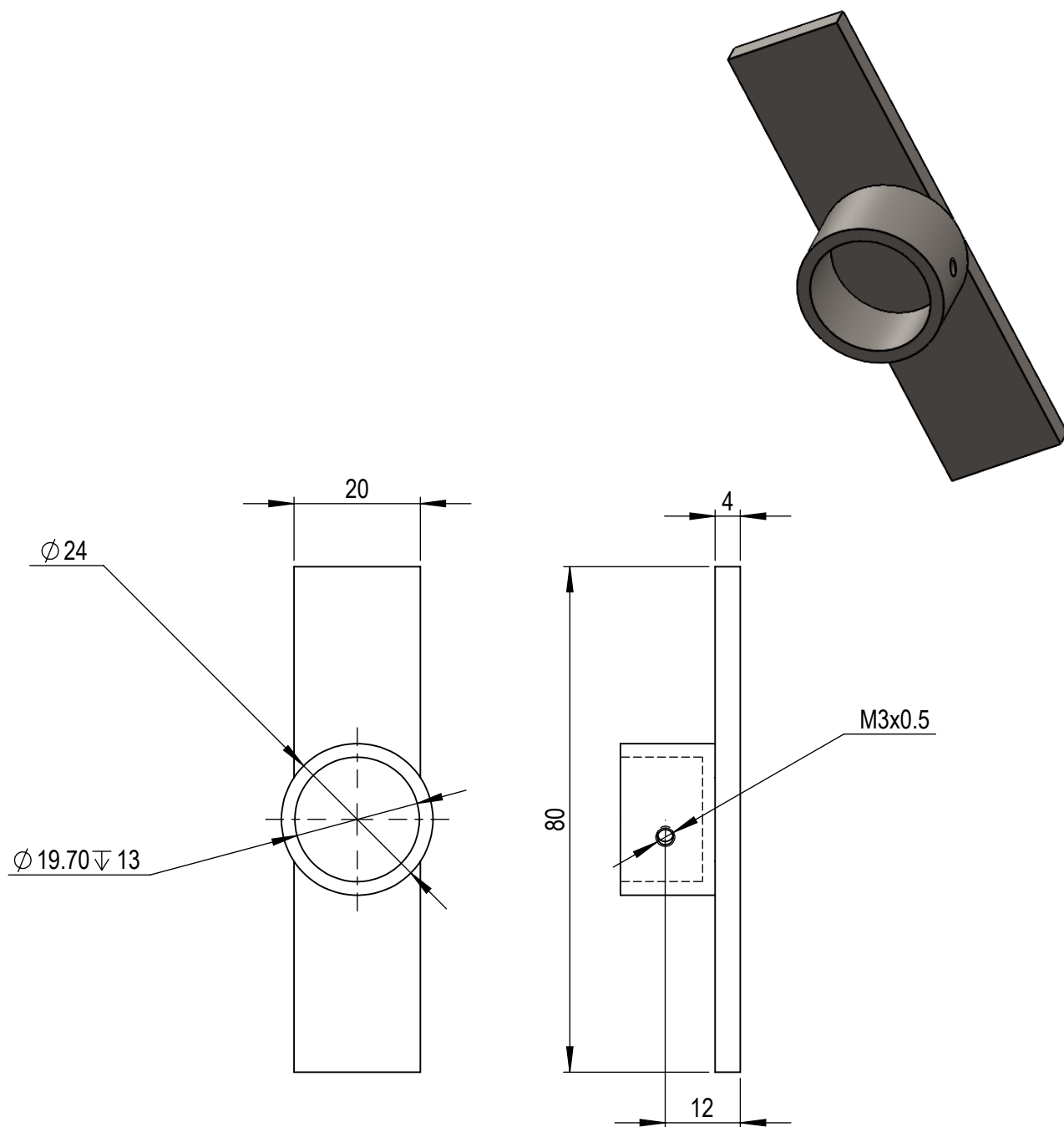
	PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA:	
	PARTE: COMPUERTA				1:5	
	CÓDIGO: BA-CT-01				TOLERANCIA: ± N/A	
	MATERIAL:	ASTM A653	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A3
	TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	
RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
UTN	CIME					



	PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:1	
	PARTE: FILTRO					
	CÓDIGO: BA-CT-02				TOLERANCIA: ± N/A	
	MATERIAL:	PLA	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A3
	TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	
RECUBRIMIENTO:	NINGUNO	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
UTN	CIME					

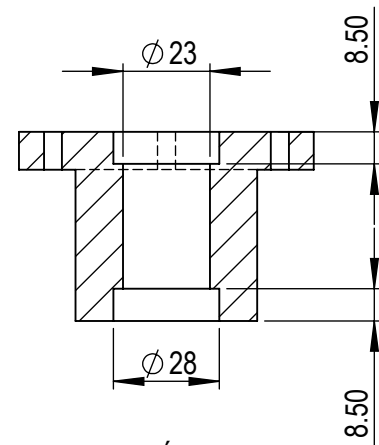
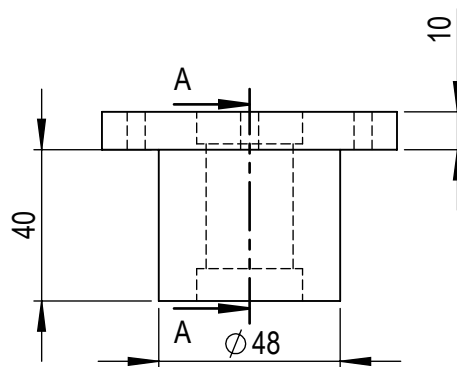
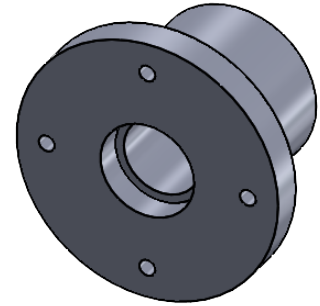
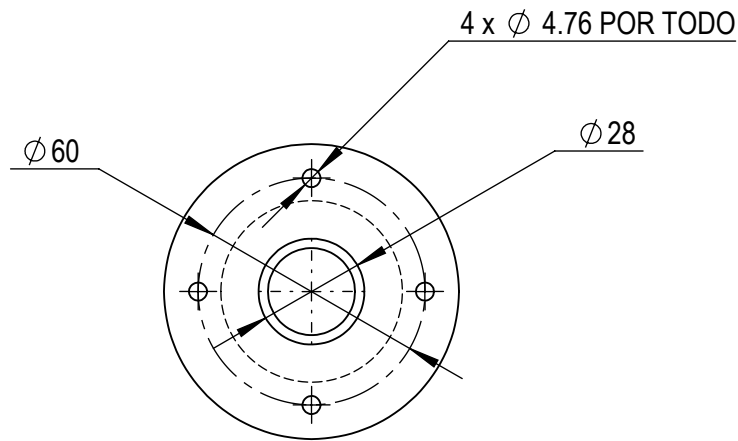






NOTA: TODAS LAS UNIDADES EN MILIMETROS

		PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA:		
		PARTE: ACOPLE DE PALETA				1:1		
		CÓDIGO: BA-TL-06				TOLERANCIA: ± N/A		
		MATERIAL:	AISI 1018	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A4	
		TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
UTN	CIME	RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
		CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		



SECCIÓN A-A



PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO

PARTE: BUJE BASE

CÓDIGO: BA-MB-02

MATERIAL: ASTM A653

TRATAMIENTO: NINGUNO

RECUBRIMIENTO: PINTURA

CANTIDAD: 1

DISEÑO: PUJOTA J

DIBUJÓ: PUJOTA J.

REVISÓ: PUJOTA J.

APROBÓ: PUJOTA J.

ESCALA:

1:2



TOLERANCIA: $\pm$ N/A

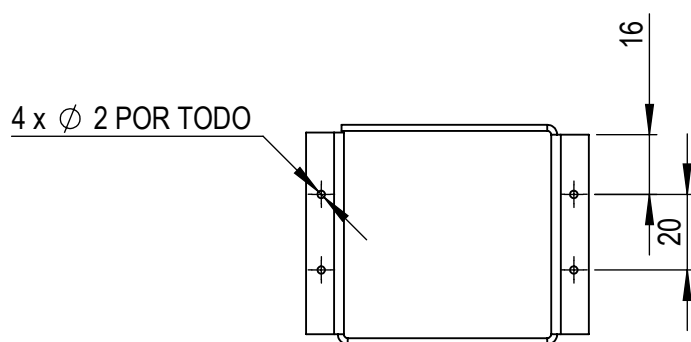
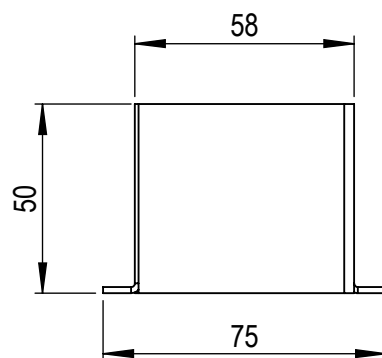
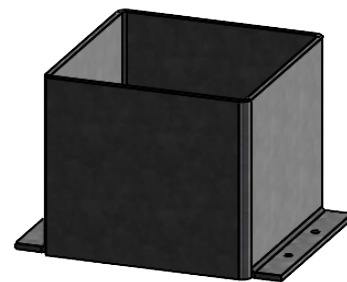
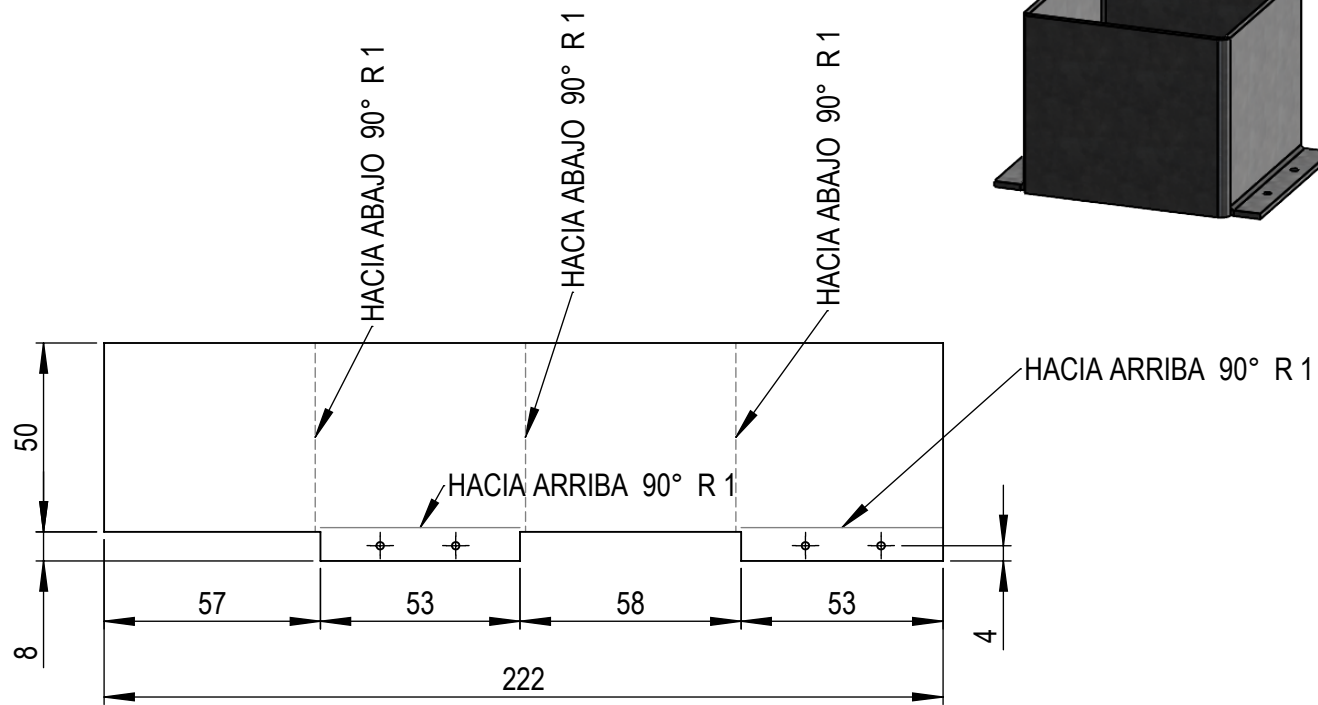
HOJA:

1/1

A4

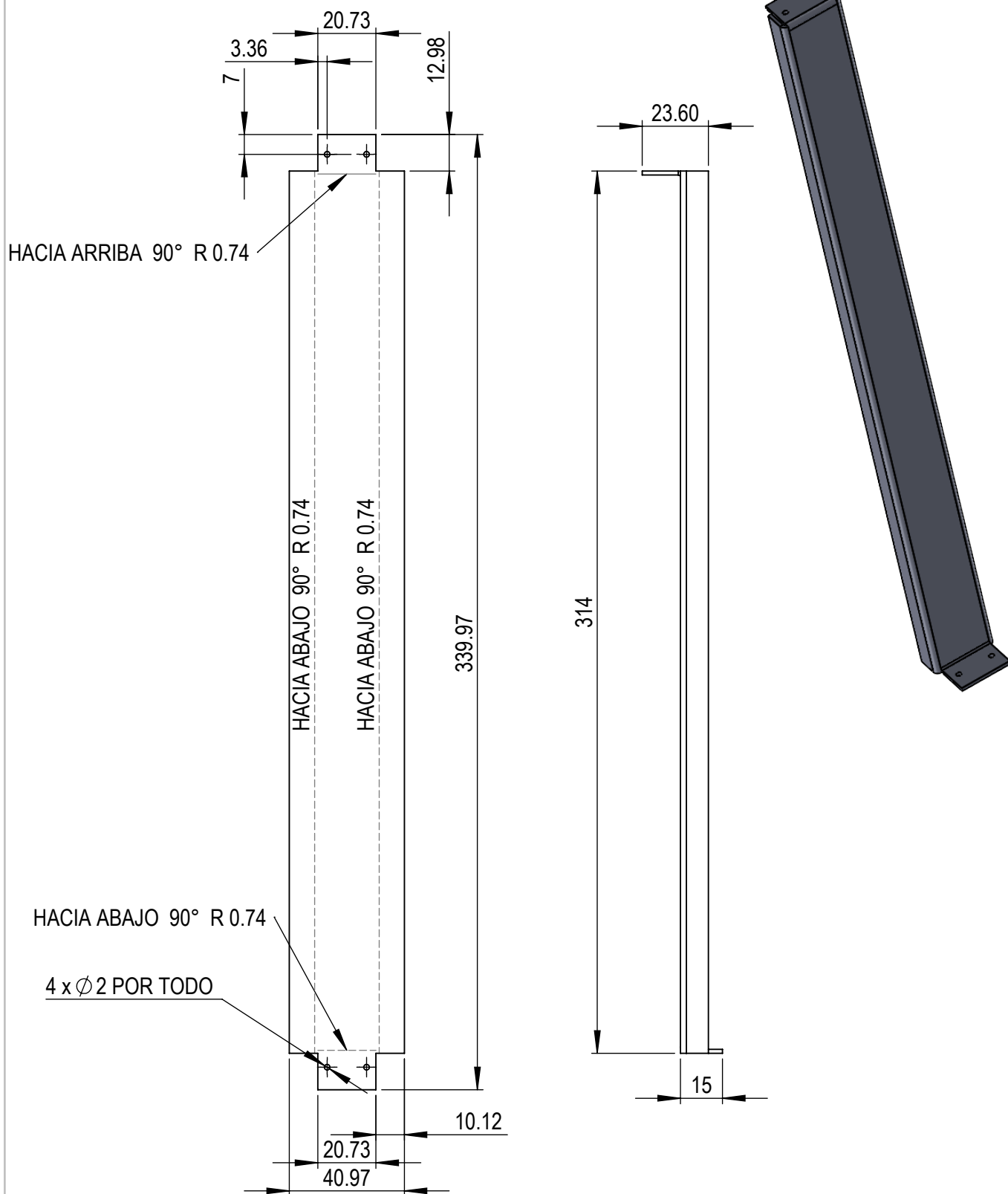
UTN

CIME

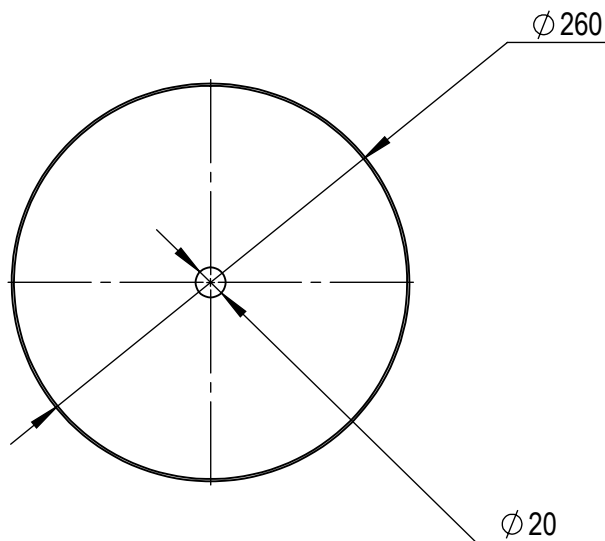
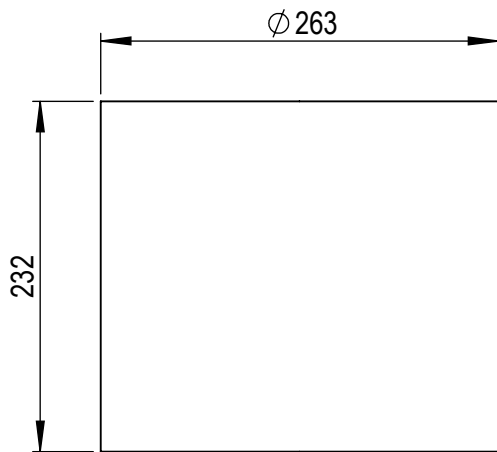


NOTA:TODAS LAS COTAS EN MILIMETROS

		PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:2	
		PARTE: PORTA FILTRO					
		CÓDIGO: BA-CT-03				TOLERANCIA: ± N/A	
		MATERIAL:	ASTM A653	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A4
		TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	
UTN	CIME	RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	
		CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	

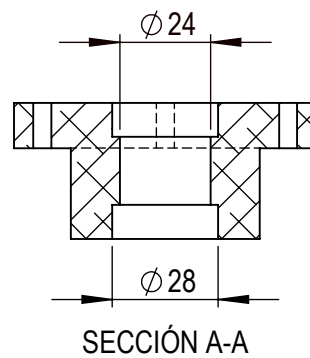
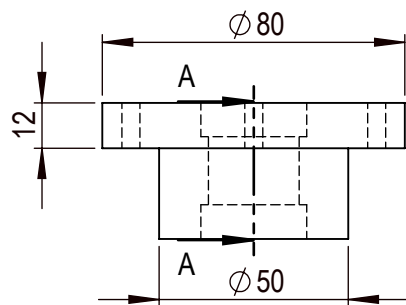
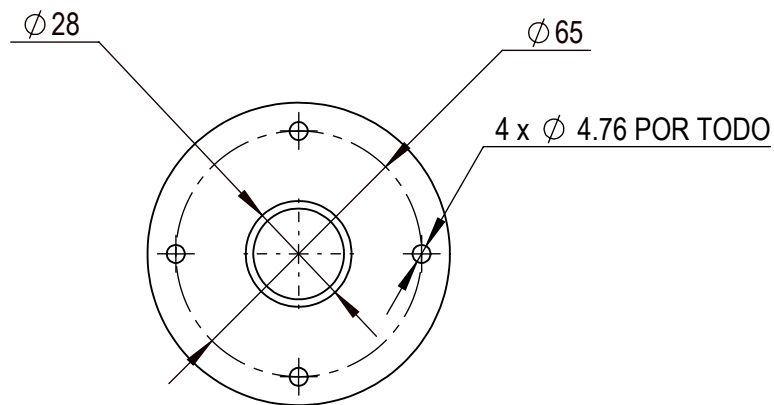
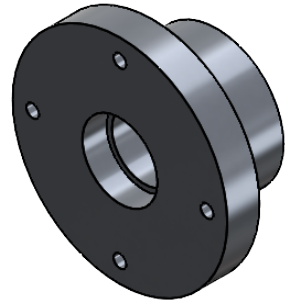


		PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:5	
		PARTE: SOPORTE					
		CÓDIGO: BA-00-01				TOLERANCIA: ± N/A	
		MATERIAL:	ASTM A653	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A4
		TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	
RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025			
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025			
UTN	CIME						



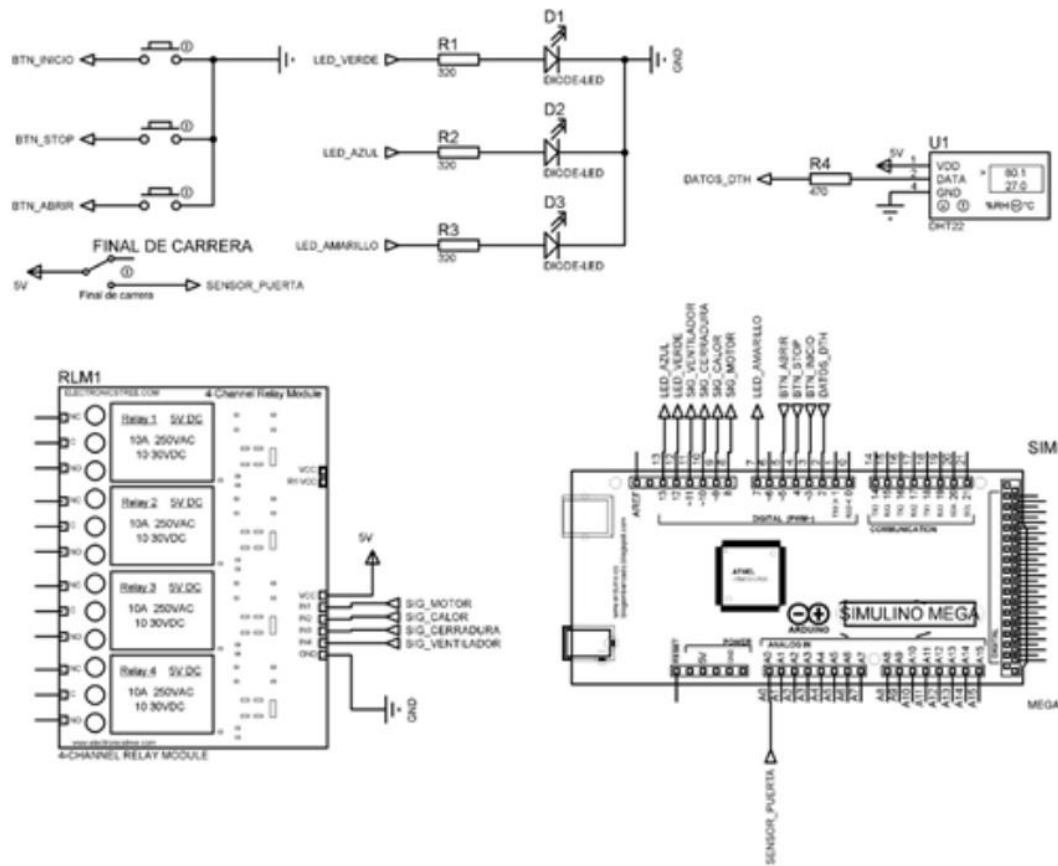
NOTA: TODAS LAS COTAS EN MILIMETROS
ESPESOR DE 1.6MM

		PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:5		
		PARTE: TOLVA						
		CÓDIGO: BA-TL-01				TOLERANCIA: ± N/A		
		MATERIAL:	ASTM A653	DISEÑO:	N/A	20/07/2025	HOJA: 1/1 A4	
		TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025		
RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025				
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025				
UTN	CIME							



NOTA: TODAS LAS COTAS EN MILIMETROS

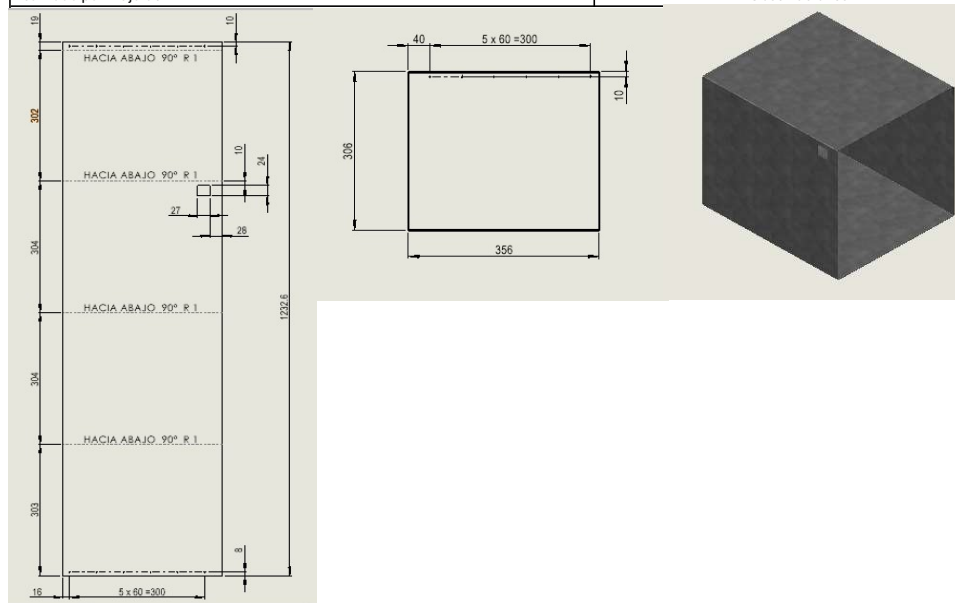
		PROYECTO: BIODIGESTOR AUTOMATIZADO				ESCALA: 1:2	
		PARTE: BUJE TOLVA					
		CÓDIGO: BA-TL-04				TOLERANCIA: ± 0.1	
		MATERIAL:	ASTM A653	DISEÑO:	PUJOTA J.	20/07/2025	HOJA: 1/1 A4
		TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025	
RECUBRIMIENTO:	PINTURA	REVISÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025			
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	PUJOTA J.	20/07/2025			
UTN	CIME						



	Fecha	Nombre Firmas	Entidad
Dibujado	20/09/2025	PUJOTA J.	UTN
Comprobado	21/09/2025	PUJOTA J.	
Fecha: 21/10/2025	Título CONECCIONES BIODIGESTOR AUTOMATIZADO		Núm: 1 de 1 Archivo: BIO_AUTO_002

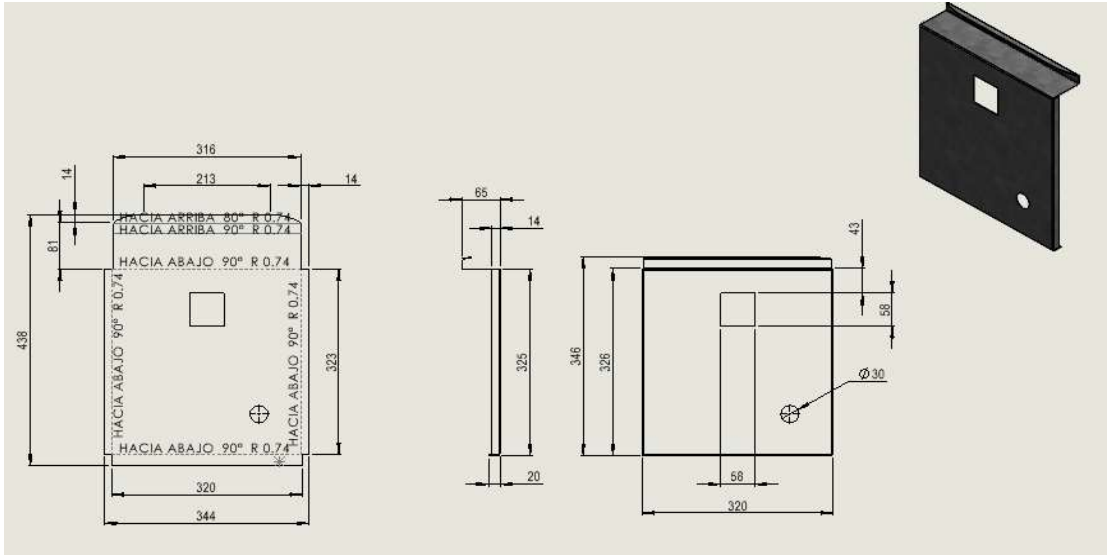
Anexo M: Hojas de Trabajo

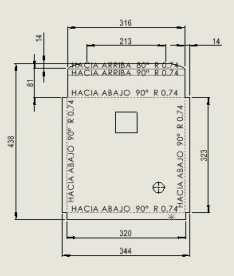
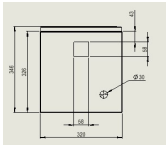
Proyecto	Biodigestor Automatizado	Plano Nro.	1	Tra. Nro	1	Fecha:
Pieza	Cámara Externa			Hoja	1	20/010/2025
Material	Lamina de acero galvanizado	Dimensiones desplegada	170mm x 30mm x 1.6mm			
Realizado por: Pujota J.		Observaciones:	Ninguna			

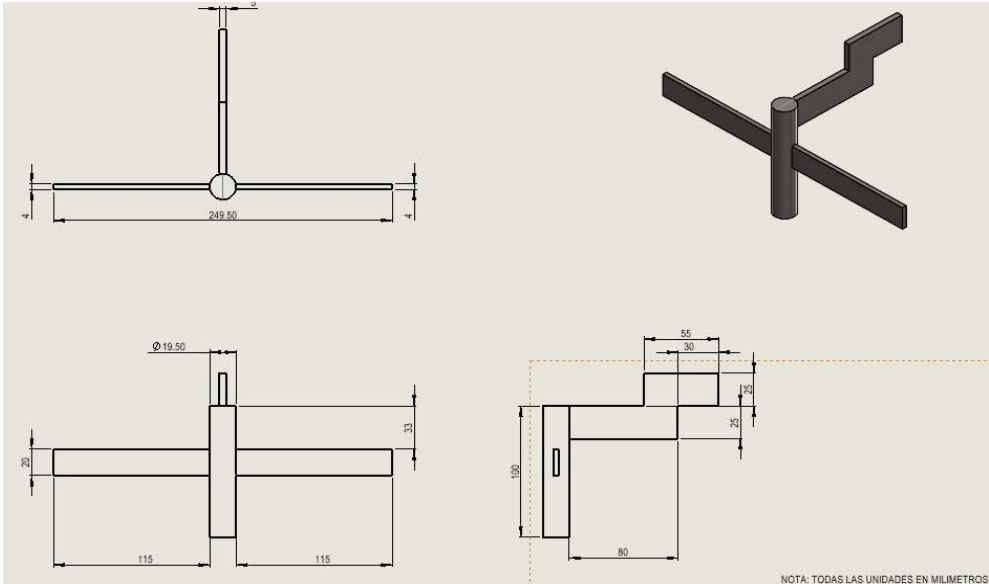
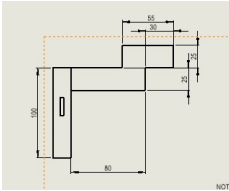
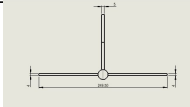


Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Trazado	1. Marcado	1	Trazar el contorno de 170x30 mm y líneas de doblez a 25 mm de los extremos.		Rayador, Regla, Escuadra	N/A	N/A	10
	2. Centros	1	Señalar centros de agujeros (distancia 120 mm) según cotas del plano.		Rayador, Compás de punta	N/A	N/A	10
2. Corte	1. Cizallado	1	Cortar la chapa siguiendo el trazado periférico.		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
	2. Graneteado	1	Marcar previamente los centros a taladrar con un granete para guiar la broca.		Granete, Martillo	N/A	N/A	10
3. Perforado	1. Guía	1	Centrar broca y taladrar con broca de centros. Sujetar firmemente para evitar deformación.		Taladro de pedestal, Broca de centros	N/A	N/A	10
	2. Taladrado	1	Perforar agujeros finales. Usar progresión de brocas si el diámetro supera los 10mm.		Taladro de pedestal, Broca 5/64	N/A	N/A	10
4. Conformado	1. Plegado	1	Doblar por las líneas trazadas a 90° para deacuerdo al plano para formar la cámara.		Dobladora manual	N/A	N/A	10

Proyecto	Biodigestor Automatizado	Plano Nro.	1	Tra. Nro	2	Fecha:
Pieza	Compuerta			Hoja	1	20/010/2025
Material	Lamina de acero galvanizado e=1.4	Dimensiones desplegada	170mm x 438mm x 344			
Realizado por:	Pujota J.	Observaciones:	Ninguna			

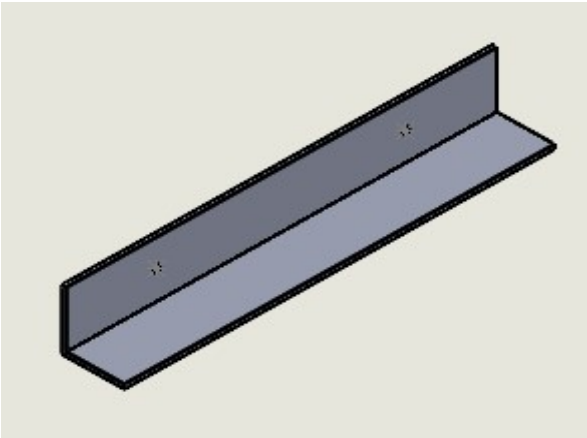


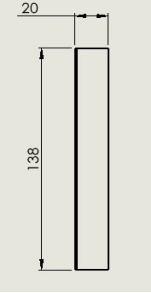
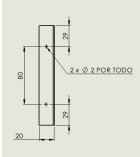
Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Trazado	1. Marcado	1	Trazar el contorno de 438mmx344 mm y líneas de doblez de los extremos conforme al lo indica el plano		Rayador, Regla, Escuadra	N/A	N/A	10
	2. Centros	1	Marcar centros para agujeros a 12.5 mm del borde superior y 25 mm del lateral.		Rayador, Compás de punta	N/A	N/A	10
2. Corte	1. Cizallado	1	Corte de platina exterior siguiendo el trazado de 170x30 mm. la chapa siguiendo el trazado periférico.		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
	2. Graneteado	1	Marcar previamente los centros a taladrar con un granete para guiar la broca.		Granete, Martillo	N/A	N/A	10
3. Perforado	1. Guía	1	Centrar broca de coronay taladrar con broca de centros. Sujetar firmemente para evitar deformación.		Taladro de pedestal, Broca de centros	N/A	N/A	10
	2. Taladrado	1	Taladro de pedestal, Sierra de Copa		Taladro de pedestal, Broca de corona	N/A	N/A	10
4. Conformado	1. Plegado	1	Doblar por las líneas trazadas a 90° según el diseño.		Dobladora manual	N/A	N/A	10

Proyecto	Biodigestor Automatizado		Plano Nro.	3	Tra. Nro	3	Fecha:	
Pieza	Mezclador				Hoja	1	20/010/2025	
Material	Acero inoxidable		Dimensiones	eje: 3/4" paletas: e=4mm				
Realizado por: Pujota J.			Observaciones:			Ninguna		
 NOTA: TODAS LAS UNIDADES EN MILIMETROS								
Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Torneado	1. Rerentado	1	Refrentado de caras del eje para longitud total según plano.		Torno Paralelo	500	5	10
	2. Verificación	1	En este caso no se cilindra, ya que se selecciono una medida de 2/4"		Calibrador Vernier	N/A	N/A	10
2. Trazado y Corte	1. Trazado	1	Trazado de las aspas según geometría escalonada (30mm de alto, 4mm de espesor).		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
	2. Corte	1	Corte de las 3 paletas del mezclador.		Granete, Martillo	N/A	N/A	10
3. Perforado	1. Agujero Eje	1	Perforación en el eje para pasador o acople superior (3mm de diametro).		Taladro de pedestal, Broca de 3mm	N/A	N/A	10
4. Soldadura	1.Posicionado		Presentación de aspas a 90 grados respecto al eje central.		Escuadra magnética	N/A	N/A	10
	1. Union	1	Soldadura de las aspas al eje central con soldadura por arco		Soldadora (TIG recomendado) electrodo E316L	N/A	N/A	10

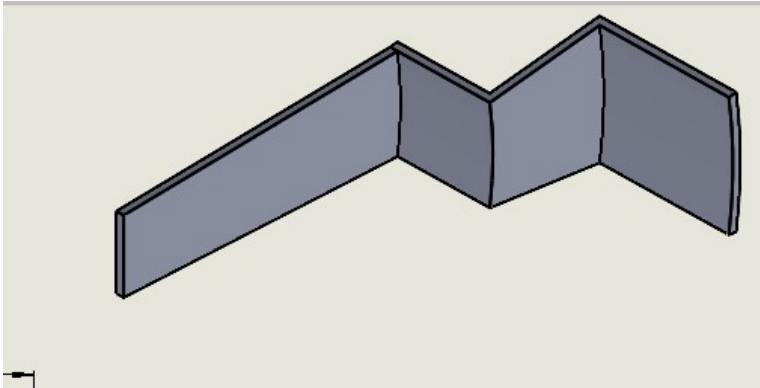
5. Acabado	1. Limado		Limado de cordones de soldadura y eliminación de proyecciones.		Lima para metal / Esmeril	N/A	N/A	10
	2. Acabado superficial	1	Limpieza de marcas de trazado y aplicación de pintura anticorrosiva.		Desengrasante, pintura anticorrosiva	N/A	N/A	10
6. Control	1. Final	2	Verificación dimensional de la pieza terminada		Calibrador Vernier/ Flexometro	N/A	N/A	10
							TOTAL:	100

Proyecto	Biodigestor Automatizado	Plano Nro.	4	Tra. Nro	4	Fecha:
Pieza	Perfil Posicionamiento			Hoja	1	
Material	Lamina de acero galvanizado e=1.4	Dimensiones desplegada	138mm x 40mm			
Realizado por: Pujota J.		Observaciones:		Ninguna		



Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Trazado	1. Marcado	1	Trazar el rectángulo base de 138x40 mm y las líneas de referencia.		Rayador, Regla, Escuadra	N/A	N/A	5
	2. Centros	1	Marcar los centros de los 4 barrenos respetando la distancia de 120 mm entre ejes.			N/A	N/A	5
2. Corte	1. Cizallado	1	Corte perimetral de la chapa y vaciado de las muescas de posicionamiento		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	5
	2. Graneteado	1	Marcar previamente los centros a taladrar con un granete para guiar la broca.		Granete, Martillo	N/A	N/A	5
3. Perforado	1. Guía	1	Marcar con granete los centros para asegurar la precisión del taladrado		Granete, Martillo	N/A	N/A	5
	2. Taladrado	1	Taladro de pedestal, broca		Taladro de pedestal, Broca 5/64	N/A	N/A	5
4. Conformado	1. Plegado	1	Doblar por las líneas trazadas a 90° según el diseño.		Dobladora manual	N/A	N/A	5

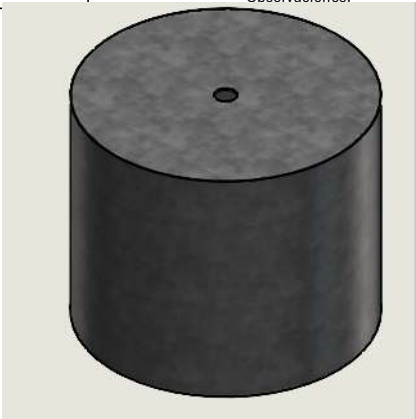
Proyecto	Biodigestor Automatizado	Plano Nro.	5	Tra. Nro	5	Fecha:
Pieza	Pieza fija de cizallamiento			Hoja	1	
Material	Lamina de acero galvanizado	Dimensiones	e = 1.4mm			
Realizado por: Pujota J.		Observaciones:		Ninguna		

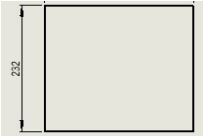
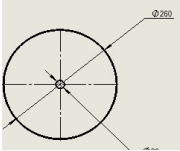


Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Trazado	1. Marcado	1	Trazar la platina base de soporte según la cota de 249.50 mm de longitud.		Rayador, Regla, Escuadra	N/A	N/A	10
	2. Centros	1	Marcar los segmentos de cizalla con longitudes de 29.30 mm y 50.50 mm con altura de 30 mm		Rayador, Compás de punta	N/A	N/A	10
2. Corte	1. Platinas	1	Corte de las piezas de acero inoxidable de espesor 4 mm siguiendo la geometría del plano.		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
	2. Muestras	1	Realizar los cortes internos para las muescas de ajuste de la pieza fija		Granete, Martillo	N/A	N/A	10
3. Perforado	1. Guía	1	Graneteado de centros para los puntos de anclaje fijos		Taladro de pedestal, Broca de centros	N/A	N/A	10
	2. Taladrado	1	Perforar agujeros finales.		Taladro de pedestal, Broca 5/64	N/A	N/A	10
4. Soldadura	1. Plegado	1	Unión de las platinas de cizallamiento a la base fija manteniendo la perpendicularidad		Soldadora TIG. electrodo E6013	N/A	N/A	10
5. Acabado	1. Limado		Limar todos los bordes exteriores y rebabas de los agujeros.		Lima plana y redonda	N/A	N/A	10

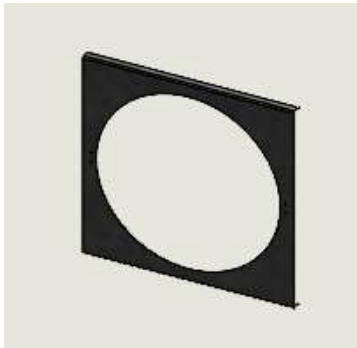
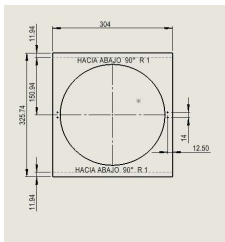
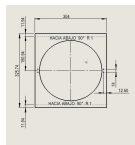
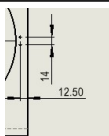
5. Acá	2. Acabado superficial	1	Limpieza de marcas de trazado y aplicación de pintura anticorrosiva.		Desengrasante, pintura anticorrosiva	N/A	N/A	10
6. Control	1. Final	2	Verificación dimensional de la pieza terminada		calibrador de vernier	N/A	N/A	10
							TOTAL:	100

Proyecto	Biodigestor Automatizado	Plano Nro.	6	Tra. Nro	6	Fecha:
Pieza	Tolva			Hoja	1	20/010/2025
Material	Lamina de acero galvanizado	Dimensiones	e = 1.4mm			
Realizado por:	Pujota J.	Observaciones:	Ninguna			

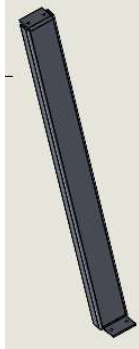
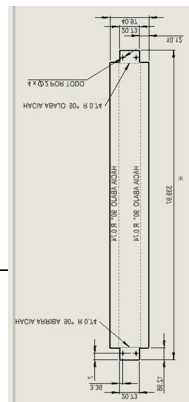
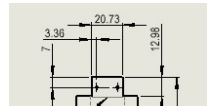


Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Trazado	1. Marcado	1	Trazar la forma rectangular para el cuerpo 754 x 230		Rayador, Regla, Escuadra	N/A	N/A	10
		2	Trazar la cara de la tolva		Rayador, Compás de punta	N/A	N/A	10
2. Corte	1. Platinas	1	Corte de la geometría desarrollada en el tol.		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
3. Perforado	1. Guía	1	Graneteado de centros del Agujero		Taladro de pedestal, Broca de centros	N/A	N/A	10
	2. Taladrado	1	Perforar agujeros finales.		Taladro de pedestal, Broca de corona	N/A	N/A	10
4. Doblado	1. Conformado		se genera la forma por rolado		Roladora de lamina	N/A	N/A	
4. Soldadura	1. soldadura	1	Unión por soldadura de arco		Soldadora TIG. electrodo E6013	N/A	N/A	10
5. Acabado	1. Limado		Limar todos los bordes exteriores y rebabas de los agujeros.		Lima plana y redonda	N/A	N/A	10
	2. Acabado superficial	1	Limpeza de marcas de trazado y aplicación de pintura anticorrosiva.		Desengrasante, pintura anticorrosiva	N/A	N/A	10

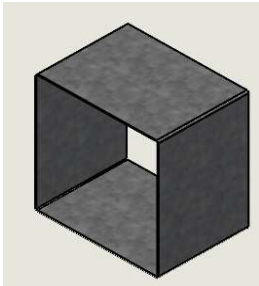
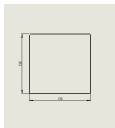
6. Control	1. Final	2	Verificación dimensional de la pieza terminada		calibrador de vernier	N/A	N/A	10
							TOTAL:	90

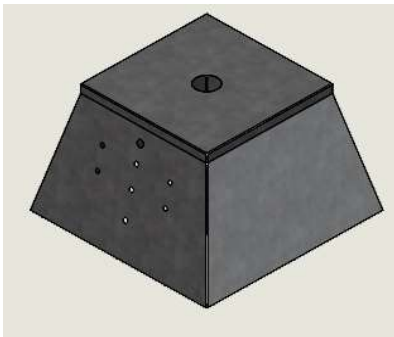
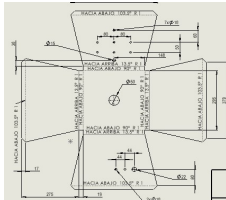
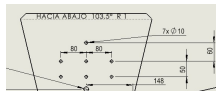
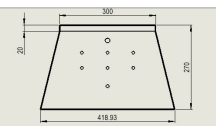
Proyecto	Biodigestor Automatizado		Plano Nro.	7	Tra. Nro	7	Fecha:	
Pieza	Tolva				Hoja	1	20/010/2025	
Material	Lamina de acero galvanizado			Dimensiones	e = 1.4mm			
Realizado por: Pujota J.				Observaciones:		Ninguna		
								
Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Trazado	1. Marcado	1	Trazar la forma rectangular para el cuerpo 7326 x 304		Rayador, Regla, Escuadra	N/A	N/A	10
		2	Trazar agujero y linea de doblez			N/A	N/A	10
2. Corte	1. Platinas	1	Corte de la geometría desarrollada en el tol.		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
3. Perforado	1. Guía	1	Graneteado de centros del Agujero		Taladro de pedestal, Broca de centros	N/A	N/A	10
	2. Taladrado	1	Perforar agujeros finales.		Taladro de pedestal, Broca de 5/64	N/A	N/A	10
4. Doblado	1.Conformado		Doblado de las caras según los ángulos de inclinación del diseño.		Roladora de lamina	N/A	N/A	10
5. Acabado	1. Limado		Limar todos los bordes exteriores y rebabas de los agujeros.		Lima plana y redonda	N/A	N/A	10
	2. Acabado superficial	1	Limpieza de marcas de trazado y aplicación de pintura anticorrosiva.		Desengrasante, pintura anticorrosiva	N/A	N/A	10

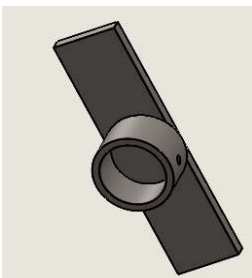
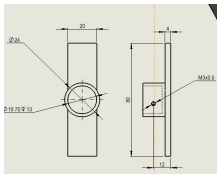
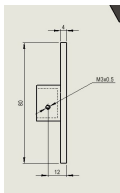
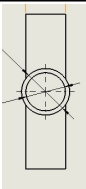
6. Control	1. Final	2	Verificación dimensional de la pieza terminada		calibrador de vernier	N/A	N/A	10
							TOTAL:	90

Proyecto	Biodigestor Automatizado		Plano Nro.	8	Tra. Nro	8	Fecha:	
Pieza	soporte				Hoja	1	20/010/2025	
Material	Lamina de acero galvanizado		Dimensiones		e = 1.4mm			
Realizado por: Pujota J.			Observaciones:			Ninguna		
								
Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Trazado	1. Marcado	1	Trazar la forma rectangular para el cuerpo 340 x 41		Rayador, Regla, Escuadra	N/A	N/A	10
		2	Trazar muescas y linea de doblez		Rayador, Compás de punta	N/A	N/A	10
2. Corte	1. Platinas	1	Corte de la geometría desarrollada en el tol.		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
3. Perforado	1. Guía	1	Graneteado de centros del Agujero		Taladro de pedestal, Broca de centros	N/A	N/A	10
	2. Taladrado	1	Perforar agujeros finales.		Taladro de pedestal, Broca de 5/64	N/A	N/A	10
4. Doblado	1.Conformado		Doblado de las caras según los ángulos de inclinación del diseño.		Roladora de lamina	N/A	N/A	10
5. Acabado	1. Limado		Limar todos los bordes exteriores y rebabas de los agujeros.		Lima plana y redonda	N/A	N/A	10
	2. Acabado superficial	1	Limpieza de marcas de trazado y aplicación de pintura anticorrosiva.		Desengrasante, pintura anticorrosiva	N/A	N/A	10

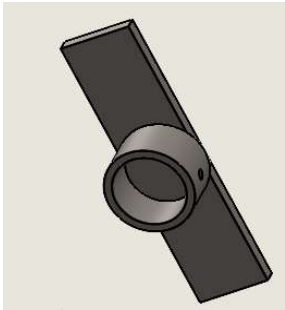
6. Control	1. Final	2	Verificación dimensional de la pieza terminada		calibrador de vernier	N/A	N/A	10
							TOTAL:	90

Proyecto	Biodigestor Automatizado		Plano Nro.	9	Tra. Nro	9	Fecha:	
Pieza	Soporte de posicionamiento				Hoja	1	20/010/2025	
Material	Lamina de acero galvanizado		Dimensiones		e ≈1.4			
Realizado por: Pujota J.			Observaciones:			Ninguna		
								
Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Trazado	1. Marcado	1	Trazar el contorno de 534x 100 mm y líneas de doblez según el plano		Rayador, Regla, Escuadra	N/A	N/A	10
2. Corte	1. Cizallado	1	Cortar la chapa siguiendo el trazado periférico.		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
3. Conformado	1. Plegado	1	Doblar por las líneas trazadas a 90° de acuerdo al plano		Dobladora manual	N/A	N/A	10
4. Soldadura	1. soldadura	1	Unión por soldadura de arco		Soldadora TIG. electrodo E6013	N/A	N/A	10
5. Acabado	1. Limado		Limar todos los bordes exteriores y rebabas de los agujeros.		Lima plana y redonda	N/A	N/A	10
	2. Acabado superficial	1	Limpieza de marcas de trazado y aplicación de pintura anticorrosiva.		Desengrasante, pintura anticorrosiva	N/A	N/A	10
6. Control	1. Final	2	Verificación dimensional de la pieza terminada		Calibrador de vernier	N/A	N/A	10
							TOTAL:	70

Proyecto	Biodigestor Automatizado		Plano Nro.	11	Tra. Nro	11	Fecha:	
Pieza	Módulo Base				Hoja	1	20/010/2025	
Material	Lamina de acero galvanizado		Dimensiones		e = 1.4mm			
Realizado por: Pujota J.			Observaciones:			Ninguna		
								
Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Trazado	1. Marcado 2. Centros	1	Trazar la forma para el cuerpo según el plano		Rayador, Regla, Escuadra	N/A	N/A	10
		2	Trazar muescas y centro de perforaciones			N/A	N/A	10
2. Corte	1. Platinas	1	Corte de la geometría desarrollada en el tol.		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
3. Perforado	1. Guía	1	Graneteado de centros del Agujero		Taladro de pedestal, Broca de centros	N/A	N/A	10
	2. Taladrado	1	Perforar agujeros finales.		Taladro de pedestal, Broca de 10 y de 22 mm	N/A	N/A	15
4. Doblado	1.Conformado		Doblado de las caras según los ángulos de inclinación del diseño.		doladora de lamina	N/A	N/A	10
5. Acabado	1. Limado		Limar todos los bordes exteriores y rebabas de los agujeros.		Lima plana y redonda	N/A	N/A	10
	2. Acabado superficial	1	Limpieza de marcas de trazado y aplicación de pintura anticorrosiva.		Desengrasante, pintura anticorrosiva	N/A	N/A	10
6. Control	1. Final	2	Verificación dimensional de la pieza terminada		calibrador de vernier	N/A	N/A	10
							TOTAL:	95

Proyecto	Biodigestor Automatizado			Plano Nro.	12	Tra. Nro	12	Fecha:	
Pieza	Mezclador					Hoja	1	20/010/2025	
Material	Acero inoxidable			Dimensiones	eje: 3/4" paletas: e=4mm				
Realizado por: Pujota J.				Observaciones:		Ninguna			
									
Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)	
1. Torneado	1. Rerentado	1	Refrentado de caras del eje para longitud total según plano.		Torno Paralelo	500	5	10	
	2. Verificación	1	En este caso no se cilindra, ya que se selecciono una medida de 24mm		Calibrador Vernier	N/A	N/A	10	
2. Trazado y Corte	1. Trazado	1	Trazado de la paleta según geometría		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10	
	2. Corte	1	Corte de la paleta		cizalla	N/A	N/A	10	
3. Perforado	1. Agujero Eje	1	Perforación en el eje para pasador o acople superior (3mm de diametro).			Taladro de pedestal, Broca de 3mm	N/A	N/A	10
4. Soldadura	1.Posicionado		Presentación de paleta centrada respecto al eje central.		Escuadra magnética	N/A	N/A	10	
	1. Union	1	Soldadura de las aspas al eje central con soldadura por arco		Soldadora (TIG recomendado) electrodo E316L	N/A	N/A	10	
abado	1. Limado		Limado de cordones de soldadura y eliminación de proyecciones.		Lima para metal / Esmeril	N/A	N/A	10	

Proyecto	Biodigestor Automatizado	Plano Nro.	13	Tra. Nro	13	Fecha:
Pieza	Acople de paleta			Hoja	1	20/010/2025
Material	Acero inoxidable	Dimensiones	eje: 3/4" paletas: e=4mm			
Realizado por: Pujota J.		Observaciones:		Ninguna		



Fase	Subfase	Operación	Denominación	Croquis	Herramientas/Control/ Indicaciones	N (rpm)	Va(mm/min)	t (min)
1. Tomeado	1. Rerentado	1	Refrentado de caras del eje para longitud total según plano.		Torno Paralelo	500	5	10
	2. Verificación	1	En este caso no se cilindra, ya que se selecciono una medida de 24mm		Calibrador Vernier	N/A	N/A	10
2. Trazado y Corte	1. Trazado	1	Trazado de la paleta según geometría		Tijera de tol / Cizalla industrial	N/A	N/A	10
	2. Corte	1	Corte de la paleta		cizalla	N/A	N/A	10
3. Perforado	1. Agujero Eje	1	Perforación en el eje para pasador o acople superior (3mm de diametro).		Taladro de pedestal, Broca de 3mm	N/A	N/A	10
4. Soldadura	1. Posicionado		Presentación de paleta centrada respecto al eje central.		Escuadra magnética	N/A	N/A	10

	1. Union	1	Soldadura de las aspas al eje central con soldadura por arco		Soldadora (TIG recomendado) electrodo E316L	N/A	N/A	10
5. Acabado	1. Limado		Limado de cordones de soldadura y eliminación de proyecciones.		Lima para metal / Esmeril	N/A	N/A	10
	2. Acabado superficial	1	Limpieza de marcas de trazado y aplicación de pintura anticorrosiva.		Desengrasante, pintura anticorrosiva	N/A	N/A	10
6. Control	1. Final	2	Verificación dimensional de la pieza terminada		Calibrador Vernier/ Flexometro	N/A	N/A	10
							TOTAL:	100