

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño y prototipado de un banco de pruebas para simulación de fallas por arco eléctrico

Trabajo de graduación presentado por Herbert Estuardo de la Cruz Chacón para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala,
2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño y prototipado de un banco de pruebas para simulación de fallas por arco eléctrico

Trabajo de graduación presentado por Herbert Estuardo de la Cruz Chacón para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala,
2025

Asesor



Ing. Héctor Francisco Gómez Hernández

Vo.Bo. Director



Ing. Gustavo Barrera
Ingeniería Mecánica Industrial

Fecha de presentación: Guatemala, 18 de noviembre de 2025

Prefacio

Este trabajo representa el cierre de una etapa que marcó profundamente mi vida. No solo simboliza el esfuerzo académico de varios años, sino también el crecimiento personal que viene con cada reto superado, cada error convertido en aprendizaje y cada logro alcanzado con dedicación.

Durante este proceso, descubrí que la ingeniería no se limita a fórmulas ni a planos, sino que también es una forma de entender el mundo y buscar soluciones reales a los problemas que enfrentamos. Este proyecto fue más que un ejercicio técnico: fue una oportunidad para poner en práctica lo aprendido, para imaginar, construir y comprobar que las ideas pueden transformarse en algo tangible cuando se trabaja con pasión y perseverancia.

Agradezco a Zona Solar por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto en sus instalaciones y por la confianza depositada en mi trabajo. Su apoyo fue fundamental para llevar esta idea a la realidad. De igual forma, expreso mi reconocimiento a mi asesor, cuya orientación y criterio académico fueron esenciales para mantener el rumbo y la calidad del proyecto. Este logro no habría sido posible sin las personas que siempre creyeron en mí.

Dedico este trabajo a mis padres, hermanos y a mi novia, por su apoyo incondicional, su confianza y por acompañarme con amor y paciencia a lo largo de estos años de estudio. Cada palabra de ánimo, cada gesto de comprensión y cada muestra de cariño fueron el impulso que me permitió llegar hasta aquí.

Con gratitud, concluyo esta etapa sabiendo que el camino del aprendizaje nunca termina, y que cada meta alcanzada es solo el inicio de nuevos desafíos por enfrentar.

Lista de figuras.....	i
Lista de cuadros.....	ii
Resumen.....	iii
1. Introducción.....	1
2. Justificación.....	2
3. Objetivos	3
3.1. Objetivo general.....	3
3.2. Objetivos específicos	3
4. Identificación de requisitos.....	4
4.1. Entrevistas.....	4
4.2. Visita de campo.....	4
4.3. Revisión normativa y documentación técnica.....	5
4.4. Identificación de requisitos	5
5. Revisión del estado del arte	7
5.1. Regulaciones y desafíos de los fallos por arco eléctrico.....	7
5.2. Revisión de bancos de pruebas didácticos y su aplicación educativa	7
5.2.1. Banco de pruebas para sistemas solares fotovoltaicos	7
5.2.2. Banco de pruebas para motores de combustión interna	8
5.3. Innovaciones en bancos de pruebas y plataformas de prototipado	8
5.3.1. Banco de pruebas digital para aeronaves Beechcraft King	8
5.3.2. Plataforma de prototipado rápido para sistemas fotovoltaicos.....	8
5.4. Detección de fallos por arco en sistemas de corriente continua.....	9
5.4.1. Análisis de fallos por arco en paralelo con IA	9
5.4.2. Detección de fallos por arco en serie con análisis espectral	9
5.4.3. Evaluación de dispositivos de detección de fallos por arco	9
6. Metodología	10
6.1. Descripción de metodología.....	10
6.2. Diseños preliminares.....	11
6.2.1. Selección de materiales	12
6.2.2. Diseño modular	13
6.2.3. Estrategias de manufactura	14
6.3. Cálculos y diseño	15
6.3.1. Cálculos eléctricos	15
6.3.2. Tolerancias de impresión	16
6.3.3. Módulo de transmisión de potencia	18
6.3.4. Módulo electrónico	22

6.3.5. Módulo de cubierta	29
6.3.6. Módulo estructural	30
6.4. Evaluación y verificación.....	31
6.5. Fabricación.....	32
6.6. Pruebas	33
7. Resultados	34
7.1. Cumplimientos de requisitos.....	34
7.2. Pruebas electrónicas.....	36
7.3. Prototipo final	36
7.4. Visualización de arco eléctrico	38
7.5. Retroalimentación Zona Solar.....	39
7.6 Matriz de riesgos.....	39
8. Análisis de resultados.....	41
8.1. Cumplimiento normativo	41
8.2. Desempeño del sistema electrónico	41
8.3. Resistencia estructural y modularidad	41
8.4. Seguridad y riesgos operativos.....	42
8.5. Aplicación comercial y educativa	42
9. Conclusiones	44
10. Recomendaciones	45
11. Bibliografía	46
12. Anexos	48

Lista de figuras

Figura 1: Banco de pruebas para sistemas solares fotovoltaicos.....	7
Figura 2: Banco de pruebas para motores de combustión interna.....	8
Figura 3: Diagrama de flujo metodología	11
Figura 4: Diseños preliminares	12
Figura 5: Explosión banco de pruebas Zona Solar.....	13
Figura 6: Especificación de tolerancias en Autodesk Inventor®	17
Figura 7: Diseño final piñón	20
Figura 8: Diseño final cremallera.....	20
Figura 9: Base sistema de transmisión piñón-cremallera.....	21
Figura 10: Módulo de transmisión de potencia.....	22
Figura 11: Placa Arduino UNO R3	23
Figura 12: Motor de pasos NEMA 17 de 40 mm.....	23
Figura 13: <i>Driver</i> A4988.....	25
Figura 14: Módulo de extensión para controlador A4988	26
Figura 15: Protoboard 400 puntos.....	26
Figura 16: Sensor infrarrojo KY-022 y Control.....	27
Figura 17: Diagrama de control	27
Figura 18: Diagrama Esquemático de módulo electrónico	28
Figura 19: Módulo electrónico.....	28
Figura 20: Vista superior módulo cubierta.....	29
Figura 21: Módulo de cubierta.....	30
Figura 22: Módulo de cubierta.....	31
Figura 23: Banco de pruebas Zona Solar	36
Figura 24: Módulo electrónico.....	37
Figura 25: Módulo de transmisión de potencia.....	37
Figura 26: Simulación de arco eléctrico.....	38
Figura 27: Detección de corto circuito por inversor Huawei	38
Figura 28: Matriz de riesgos	40

Lista de cuadros

Cuadro 1: Identificación de códigos	5
Cuadro 2: Definición de requisitos	6
Cuadro 3: Valores iniciales para cálculos eléctricos	15
Cuadro 4: Ecuaciones para cálculos eléctricos	16
Cuadro 5: Grado de tolerancias internacionales según Norma ISO 286	17
Cuadro 6: Sistemas de dientes estándar y comúnmente usados para engranes rectos	18
Cuadro 7: Ecuaciones para parámetros de diseño de piñón	19
Cuadro 8: Parámetros de diseño de piñón	19
Cuadro 9: Lista de materiales para módulo electrónico	22
Cuadro 10: Ecuaciones para cálculo de velocidades de módulo de transmisión de potencia	24
Cuadro 11: Velocidades de módulo de transmisión de potencia	24
Cuadro 12: Ecuaciones para cálculo de velocidades de módulo de transmisión de potencia	25
Cuadro 13: Verificación de cumplimiento de requisitos	34
Cuadro 14: Resultados de módulo electrónico	36
Cuadro 15: Retroalimentación Zona Solar	39
Cuadro 16: Identificación de riesgos	39
Cuadro 17: Matriz de riesgos	42

Resumen

El crecimiento acelerado de la energía solar fotovoltaica ha incrementado la necesidad de fortalecer la seguridad en las instalaciones, especialmente en la prevención de fallas por arco eléctrico, una de las principales causas de ignición en los sistemas solares. En Guatemala, la empresa Zona Solar enfrenta la limitación de no contar con un dispositivo que permita simular de manera controlada y segura este tipo de fallas, lo que dificulta demostrar a clientes y técnicos la capacidad de los inversores Huawei para detectar y desconectar módulos defectuosos.

El objetivo de este trabajo fue diseñar, prototipar y validar un banco de pruebas capaz de reproducir arcos eléctricos en condiciones representativas y seguras, con fines demostrativos, educativos y de investigación. Para ello, se aplicó el proceso de diseño de ingeniería, el cual incluyó la identificación de necesidades mediante entrevistas y visitas de campo, la definición de requisitos basados en normativas internacionales, el diseño asistido por computadora, la selección de materiales aislantes y resistentes, y la fabricación mediante técnicas combinadas de impresión 3D, maquinado CNC y corte láser.

Los resultados evidenciaron que el prototipo cumplió con los requisitos establecidos por la norma UL1699B, permitiendo generar arcos eléctricos con una separación de 0.8 mm y una duración máxima de 0.5 segundos en un entorno seguro y portátil de 13.8 kg. Las pruebas electrónicas confirmaron la precisión del sistema de control mediante Arduino UNO y motor NEMA 17, mientras que la retroalimentación del equipo técnico de Zona Solar validó su utilidad comercial, educativa y de capacitación técnica.

Se concluye que el banco de pruebas representa una herramienta innovadora para el sector fotovoltaico nacional, al ofrecer un dispositivo seguro, replicable y de bajo costo, que contribuye al fortalecimiento de la seguridad eléctrica, la formación técnica y la confianza en la energía solar.

En cuanto a futuras iteraciones, se recomienda incorporar sensores de corriente, tensión y temperatura que permitan registrar datos en tiempo real durante la simulación, así como desarrollar una interfaz gráfica para el control y monitoreo remoto del sistema. También se sugiere ampliar el rango de condiciones de prueba con el fin de reproducir distintos escenarios de falla, y elaborar manuales de capacitación y guías técnicas que faciliten su implementación en entornos formativos y demostrativos, garantizando la continuidad y mejora del proyecto.

Introducción

El crecimiento acelerado de la energía solar fotovoltaica en los últimos años ha consolidado a esta tecnología como la principal fuente renovable de generación a nivel mundial. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2023), la capacidad instalada de energía solar representó el 22% del total de generación renovable en 2023, y se proyecta que para 2028 supere a la energía eólica como la fuente renovable de mayor aporte eléctrico (IEA, 2024). Sin embargo, la masificación de esta tecnología trae consigo nuevos retos en materia de seguridad, siendo las fallas por arco eléctrico uno de los principales riesgos operativos, ya que constituyen una causa frecuente de ignición en sistemas fotovoltaicos (Ong et al., 2021).

En Guatemala, Zona Solar, distribuidora autorizada de inversores Huawei, es una empresa especializada en soluciones de energía renovable que integra productos y tecnología de clase mundial. Su propósito es contribuir a la transformación hacia un futuro sostenible mediante el desarrollo de proyectos que promueven el uso eficiente y seguro de la energía solar. La compañía se ha consolidado como un referente en el sector fotovoltaico de Guatemala y El Salvador, ofreciendo soluciones innovadoras orientadas a la excelencia, la sostenibilidad y la capacitación técnica de sus clientes (Zona Solar, 2025).

En el marco de esta labor, la empresa identificó la necesidad de contar con una herramienta que permita simular fallas por arco eléctrico en condiciones controladas, con el propósito de demostrar la capacidad de sus equipos de detección y desconexión ante este tipo de incidentes. La ausencia de dicho recurso limita tanto los procesos de capacitación técnica como la confianza de los clientes en las soluciones tecnológicas ofrecidas. En este contexto, el presente trabajo de graduación se delimita al diseño, prototipado y validación de un banco de pruebas para la simulación de fallas por arco eléctrico, concebido como un dispositivo portátil, seguro y replicable, que pueda emplearse en entornos educativos, comerciales y de investigación aplicada.

El estado del arte evidencia que los bancos de pruebas se han utilizado en diferentes áreas de la ingeniería como plataformas experimentales y didácticas, desde motores de combustión interna hasta sistemas fotovoltaicos (Romero-Piedrahita, 2020; Rúa-Ramírez, 2021). Asimismo, investigaciones recientes han mostrado que la integración de tecnologías como Arduino, impresión 3D y sistemas de control digital han permitido reducir costos de prototipado y mejorar la replicabilidad de los dispositivos (Daza, 2021). No obstante, no se encontraron antecedentes de bancos de pruebas específicamente orientados a la demostración comercial y académica de fallas por arco eléctrico en sistemas solares, lo cual refuerza la relevancia de este proyecto como un aporte novedoso al sector fotovoltaico nacional.

Justificación

Según el informe *Estadísticas de capacidad renovable del año 2023* presentado por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), la energía solar lideró el crecimiento de capacidad de generación con un 22 % de participación, siendo la energía solar fotovoltaica la principal responsable de este incremento (Sayed et al., 2023). Este avance ha traído consigo nuevos retos vinculados con la seguridad de los sistemas, particularmente en la prevención de fallas por arco eléctrico. Estos arcos constituyen uno de los peligros más críticos en los sistemas fotovoltaicos, ya que pueden generar temperaturas superiores a los 3,000 °C, acompañadas de radiación ultravioleta intensa, ondas de presión, ruido y gases ionizados, capaces de provocar incendios, dañar equipos o causar lesiones graves al personal técnico. Un estudio realizado en la Universidad de Edimburgo confirmó que los arcos eléctricos son la principal causa de ignición en paneles solares fotovoltaicos (Ong et al., 2021), lo que evidencia que se trata de un problema global cuya atención resulta prioritaria. En Guatemala, este riesgo adquiere relevancia ante el crecimiento sostenido del sector fotovoltaico impulsado por empresas como Zona Solar, distribuidora autorizada de inversores Huawei, que enfrenta la limitación de no contar con una herramienta que permita demostrar de forma segura la capacidad de sus equipos para detectar y desconectar módulos con fallas por arco eléctrico, afectando tanto la capacitación técnica como la confianza de clientes e instituciones.

La importancia de este trabajo se relaciona directamente con el crecimiento proyectado de las energías renovables a nivel mundial. Según el informe *Electricity Mid-Year Update 2025* de la *International Energy Agency* (IEA), la generación eléctrica proveniente de fuentes renovables —especialmente solar y eólica— superará a la producción basada en carbón en 2025, y se prevé que cubrirá más del 90 % del incremento en la demanda eléctrica global durante este año (International Energy Agency, 2025). Este contexto subraya la urgencia de garantizar que las instalaciones solares se desarrollen con altos estándares de confiabilidad y seguridad. En este sentido, la relevancia del proyecto radica en que el banco de pruebas propuesto permitirá mitigar riesgos eléctricos asociados al fenómeno del arco eléctrico, al proporcionar un entorno controlado para la simulación de fallas y validación de los mecanismos de protección de los inversores, contribuyendo a la mejora de las prácticas de seguridad en el sector.

El propósito de este trabajo es diseñar y fabricar un banco de pruebas funcional, seguro y replicable que permita reproducir, bajo condiciones controladas, el fenómeno del arco eléctrico y la respuesta de los equipos de protección. La viabilidad del proyecto se evidencia en su potencial de impacto más allá del ámbito empresarial, ya que su utilidad se extiende a toda la cadena de valor de la energía solar en Guatemala: distribuidores que buscan fortalecer su competitividad, instituciones académicas que requieren recursos didácticos innovadores y comunidades que se beneficiarán indirectamente de instalaciones más seguras. Al reducir los costos de experimentación y facilitar la investigación aplicada en detección de fallas, este banco de pruebas sienta las bases para futuros desarrollos que incrementen la confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos. En síntesis, este trabajo aporta una solución práctica a una necesidad urgente, fortaleciendo la seguridad eléctrica, la formación técnica y la confianza en la energía solar fotovoltaica como motor de la transición energética nacional.

Objetivos

3.1. Objetivo general

Diseñar y prototipar un banco de pruebas que simule fallas por arco eléctrico en sistemas de energía solar fotovoltaica, garantizando la seguridad y efectividad para su uso en instalaciones de demostración.

3.2. Objetivos específicos

1. Especificar los requisitos técnicos y de diseño del banco de pruebas, tomando en cuenta las normas de seguridad y los estándares internacionales que sean aplicables.
2. Seleccionar los componentes necesarios para el diseño del banco de pruebas, asegurando que cumplan con los requisitos especificados.
3. Diseñar el banco de pruebas utilizando herramientas de diseño asistido por computadora, asegurando que el diseño cumpla con los requisitos y las normas de seguridad.
4. Construir y ensamblar el prototipo del banco de pruebas, siguiendo el diseño propuesto y utilizando los componentes seleccionados.
5. Realizar pruebas en el banco de pruebas para validar su funcionalidad y efectividad en la simulación de fallas por arco eléctrico, realizando ajustes según los resultados obtenidos.
6. Elaborar manuales de operación y mantenimiento para el banco de pruebas, asegurando que sean claros y detallados para facilitar su uso seguro y eficiente.

Identificación de requisitos

Con el fin de obtener requisitos válidos para el diseño y prototipado del banco de pruebas de fallas por arco eléctrico, se llevaron a cabo diferentes actividades de recolección de información en campo. Estas incluyeron entrevistas con personal técnico, visitas a instalaciones de demostración de la empresa Zona Solar, revisión de normativas internacionales y observación directa de necesidades operativas.

4.1. Entrevistas

El 23 de agosto de 2024 se realizó una entrevista con el ingeniero Andrés Cruz, encargado del proyecto en Zona Solar, distribuidora autorizada de inversores Huawei. Andrés manifestó que la mayor limitación actual es la imposibilidad de simular fallas de arco eléctrico en condiciones controladas, lo que dificulta demostrar a los clientes la capacidad de los inversores de detectar y desconectar módulos defectuosos.

Asimismo, destacó que el banco de pruebas no solo tendría un propósito demostrativo, sino también educativo, ya que podría utilizarse para capacitar a técnicos e instaladores en la identificación de fallas y en la correcta configuración de los inversores con protección por arco eléctrico. De esta manera, el dispositivo contribuiría a fortalecer las competencias técnicas del personal que realiza instalaciones fotovoltaicas, garantizando una ejecución más segura y eficiente.

Adicionalmente, indicó que el banco podría emplearse como una herramienta de diagnóstico preventivo, útil para verificar el funcionamiento de los sistemas antes de su puesta en marcha o durante el mantenimiento periódico. También señaló la necesidad de que el banco fuese seguro, portátil y de fácil instalación, considerando que las demostraciones y capacitaciones suelen realizarse en distintas locaciones (Cruz, 2024).

4.2. Visita de campo

El 28 de octubre de 2024 se realizó una visita técnica a la planta de demostración de Zona Solar, ubicada en Ciudad de Guatemala. Durante esta se tomaron medidas del espacio disponible (aprox. 1.2 m²), se observó la infraestructura fotovoltaica existente y se registró la restricción de que el banco de pruebas debía tener un peso máximo de 10 kg para facilitar el transporte por una sola persona. Asimismo, se evidenció la necesidad de incluir una cubierta transparente de seguridad que permita la observación del arco eléctrico sin exponer al operador a riesgos.

4.3. Revisión normativa y documentación técnica

Se consultó la norma UL 1699B: *Standard for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection* (Underwriters Laboratories, 2018), la cual establece parámetros críticos de prueba como la distancia entre electrodos de 0.8 mm y la duración máxima del arco eléctrico de 0.5 segundos. Se revisaron manuales de inversores Huawei que recomiendan validar estos fenómenos bajo condiciones de prueba controladas, es decir, en entornos aislados, con equipos de protección adecuados y sin la presencia de personas no autorizadas o con dispositivos médicos sensibles (por ejemplo, marcapasos o implantes electrónicos).

4.4. Identificación de requisitos

Con base en la información obtenida, se definieron los requisitos iniciales del banco de pruebas, organizados en cuatro módulos: general (GEN), electrónicos (ELE), seguridad (SEG) y estructurales (STR). El Cuadro 2 presenta la lista completa de códigos y descripciones, los cuales fueron utilizados como base para el diseño posterior.

Cuadro 1: Identificación de códigos

ID	Módulo
GEN	General
ELE	Electrónicos
SEG	Seguridad
STR	Estructurales

ID	Tipo
CMP	Cumplimiento
MEC	Mecánico
OPR	Operacional
EST	Estético
COM	Componentes
TRN	Transporte

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 2: Definición de requisitos

Código	Descripción
GEN-CMP-001	El banco de pruebas debe proporcionar un entorno seguro para verificar el cumplimiento del inversor con la normativa UL1699B.
GEN-MEC-001	El banco de pruebas debe estar diseñado con componentes mecánicos disponibles en el mercado guatemalteco.
GEN-OPR-001	El banco de pruebas debe permitir la ejecución de simulaciones en intervalos de 10 minutos.
GEN-OPR-002	El banco de pruebas debe permitir simulaciones en un lapso de 1 hora sin interrupciones por sobrecalentamiento.
GEN-OPR-003	El banco de pruebas debe poder ser operado a distancia mediante una interfaz remota, con un alcance mínimo de 3 metros.
GEN-OPR-004	La prueba no debe exceder los 10 segundos de duración.
ELE-COM-001	El banco de pruebas debe incorporar componentes electrónicos compatibles con el lenguaje de programación Arduino, asegurando una integración funcional y eficiente.
ELE-COM-002	Se deberá proporcionar a Zona Solar un diagrama electrónico detallado que permita la réplica del proyecto, especificando claramente todas las conexiones y los componentes necesarios.
ELE-COM-003	El motor seleccionado para la movilidad del banco de pruebas debe ser capaz de superar la resistencia generada por el arco eléctrico durante las pruebas, garantizando su correcto funcionamiento bajo dichas condiciones.
ELE-COM-004	Los componentes electrónicos utilizados deben operar de manera eficiente sin requerir el uso de baterías, utilizando únicamente una fuente de alimentación conectada a la red eléctrica, compartida o compatible con el sistema Arduino.
SEG-COM-001	El banco de pruebas debe incluir una cubierta transparente de seguridad que permita la observación del arco eléctrico sin riesgo para el operador.
SEG-COM-002	El banco de pruebas debe estar fabricado de materiales que eviten el contacto accidental con partes en tensión durante la simulación del arco eléctrico.
STR-MEC-001	La distancia mínima entre los componentes eléctricos y la carcasa protectora debe ser de 80 mm para garantizar un aislamiento adecuado.
STR-TRN-001	El banco de pruebas deberá tener una masa total máxima de 15 kg, asegurando que pueda ser transportado fácilmente por una persona.
STR-TRN-002	El banco de pruebas debe ser transportable, con un volumen máximo de $0.02 m^3$, cuyas dimensiones no excedan los 30 cm de largo, 30 cm de ancho y 20 cm de alto.

Fuente: Elaboración propia

5.1. Regulaciones y desafíos de los fallos por arco eléctrico

Los fallos por arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos son un riesgo creciente que requiere medidas estrictas de seguridad. Desde 2011, el Código Nacional Eléctrico exige el uso de interruptores de fallo en módulos que excedan los 80V. Por su parte, la norma UL 1599b establece que los arcos deben detectarse en menos de 2 segundos, reduciendo así la probabilidad de incendios y daños. Estas disposiciones buscan garantizar la seguridad en instalaciones solares mientras se enfrentan los retos de la expansión fotovoltaica (Sánchez, 2024).

5.2. Revisión de bancos de pruebas didácticos y su aplicación educativa

5.2.1. Banco de pruebas para sistemas solares fotovoltaicos

La elaboración de bancos didácticos permite a los estudiantes conectar la teoría y con la práctica, el diseño de este banco para sistemas fotovoltaicos permite interactuar con curvas I-V en condiciones variables de radiación y temperatura. Además, los manuales prácticos ayudan a realizar experimentos seguros y estructurados, conectando teoría y práctica. Así, los estudiantes entienden las diferencias entre el rendimiento teórico y real de los paneles solares, fortaleciendo sus habilidades analíticas (Rúa-Ramírez, 2021).

Figura 1: Banco de pruebas para sistemas solares fotovoltaicos



Fuente: (Rúa-Ramírez, 2021)

5.2.2. Banco de pruebas para motores de combustión interna

La implementación de softwares y sensores permite observar y entender de manera detallada la prueba que se quiere ejecutar, para este diseño el banco mide parámetros clave como velocidad, corriente y voltaje en el arranque de motores, usando sensores inductivos y volantes de inercia. Los datos obtenidos se procesan con Matlab®, generando análisis detallados que optimizan el diagnóstico de motores. Esta herramienta fomenta la formación práctica en ingeniería automotriz, vinculando conceptos teóricos con aplicaciones reales. Su diseño contribuye a mejorar la eficiencia en el mantenimiento y análisis de motores (Romero-Piedrahita, 2020)

Figura 2: Banco de pruebas para motores de combustión interna



Fuente: (Romero-Piedrahita, 2020)

5.3. Innovaciones en bancos de pruebas y plataformas de prototipado

5.3.1. Banco de pruebas digital para aeronaves Beechcraft King

La utilización de bancos de pruebas para la optimización y evaluación de área de mejora es una herramienta que permite la innovación constante, ejemplo de esto es el desarrollo de un banco de pruebas digital la empresa Beechcraft King ya que representa una mejora significativa en los procesos de mantenimiento. Este diseño ha reducido el tiempo de pruebas de 120 a 25 minutos, optimizando además el consumo de combustible en un 85.55%. Entre las ventajas de este banco destacan su capacidad para realizar mediciones precisas de voltaje e impedancia, la generación de informes técnicos automatizados y la posibilidad de ser operado por una sola persona, mejorando la eficiencia y seguridad de los procedimientos (Arias, 2020).

5.3.2. Plataforma de prototipado rápido para sistemas fotovoltaicos

En el diseño y validación de estrategias de control, la plataforma basada en Arduino y Simulink ofrece una solución económica y práctica. Permite probar controladores de voltaje y algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia sin necesidad de construir un banco de pruebas para cada aplicación. La plataforma también mide variables críticas en tiempo real, realizando simulaciones y entregando resultados en tiempo real. Gracias a su accesibilidad y bajo coste, se ha convertido en una herramienta ideal para investigadores y estudiantes interesados en el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas (Daza, 2021).

5.4. Detección de fallos por arco en sistemas de corriente continua

5.4.1. Análisis de fallos por arco en paralelo con IA

La detección de fallos por arco en paralelo en sistemas de corriente continua ha mejorado gracias a algoritmos avanzados de inteligencia artificial como SVM, redes neuronales profundas y *random forest*. SVM clasifica patrones complejos mediante hiperplanos que separan las características clave de las señales. Las redes neuronales procesan grandes volúmenes de datos, detectando patrones no lineales, mientras que *random forest* utiliza árboles de decisión para lograr clasificaciones precisas al promediar sus resultados. Estos métodos alcanzan tasas de detección superiores al 95 %, fortaleciendo la seguridad y el mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos (Dang, 2022).

5.4.2. Detección de fallos por arco en serie con análisis espectral

La detección de fallos por arco en serie en sistemas fotovoltaicos DC se investiga utilizando análisis espectral de baja frecuencia de la corriente, demostrando eficacia incluso con equipos de medición comunes. Pruebas en laboratorio y campo validaron este método bajo condiciones de ruido e interferencia típicas de sistemas reales. La normativa UL 1599B, base para las pruebas, exige que los dispositivos detecten y desconecten arcos peligrosos en menos de 2 segundos, diferenciando entre arcos benignos y peligrosos para evitar falsas alarmas. Este enfoque mejora la seguridad en sistemas fotovoltaicos (Artale, 2021).

5.4.3. Evaluación de dispositivos de detección de fallos por arco

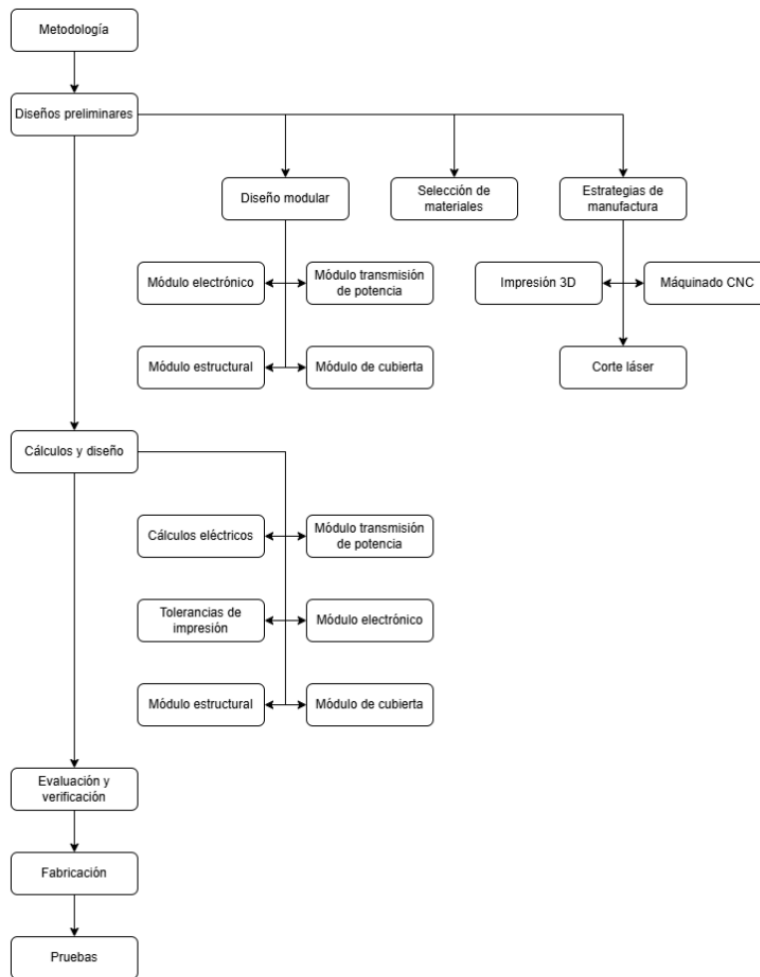
Se investiga la capacidad de los dispositivos de detección de fallos por arco para detectar y mitigar fallos por arco en sistemas de baja tensión, específicamente fallos por arco en serie. Las pruebas en diferentes marcas de los dispositivos de detección de fallos por arco revelaron variaciones en su rendimiento, destacando que algunos dispositivos no lograron prevenir incendios antes de desconectar el circuito. Se utilizaron cargas resistivas y capacitivas en paralelo, así como conexiones defectuosas, para simular fallos de arco. El estudio también resalta la importancia de la normativa IEC 52505, que regula los tiempos máximos de respuesta y los requisitos de los AFDD para garantizar la seguridad eléctrica en instalaciones residenciales (Al Qabbani, 2021).

6.1. Descripción de metodología

Este trabajo de graduación se desarrollará siguiendo el proceso de diseño de ingeniería, debido a que este permite abordar problemas técnicos de forma estructurada y progresiva. Esto facilita la obtención de un producto funcional, seguro y viable en cada etapa. Esta metodología abarca desde la identificación de necesidades hasta la evaluación del prototipo final utilizando herramientas de análisis y diseño.

Se ejecutará siguiendo las siguientes fases: identificación de la necesidad, definición de requisitos, elaboración de diseño preliminar, realización de cálculos de diseño, diseño final y prototipado, evaluación, verificación, fabricación y finalmente la validación del banco de pruebas por medio de pruebas.

Figura 3: Diagrama de flujo metodología



Fuente: Elaboración propia.

6.2. Diseños preliminares

En esta sección se describen las decisiones de diseño inicial que guiaron el desarrollo del banco de pruebas, considerando tanto los requisitos funcionales como las condiciones de manufactura y seguridad. Se detallan los materiales seleccionados por sus propiedades técnicas, la organización modular del sistema, y las técnicas de fabricación definidas para cada componente. Estas decisiones proponen las bases para la validación del prototipo, facilitando su construcción, mantenimiento y posible réplica en entornos similares. A continuación, se presentan los criterios que respaldan dichas elecciones.

Figura 4: Diseños preliminares



Fuente: Elaboración propia.

6.2.1. Selección de materiales

Después de analizar los requisitos eléctricos y de seguridad se decidió utilizar plástico de ingeniería y filamento de ácido poliláctico (PLA) como los materiales principales. Se optó por estos materiales debido a varias razones. La primera es que no tienen propiedades que favorezcan la conducción eléctrica, lo cual permite reducir el riesgo de cortocircuitos o descargas durante la simulación, además de eliminar la necesidad de recubrimientos adicionales.

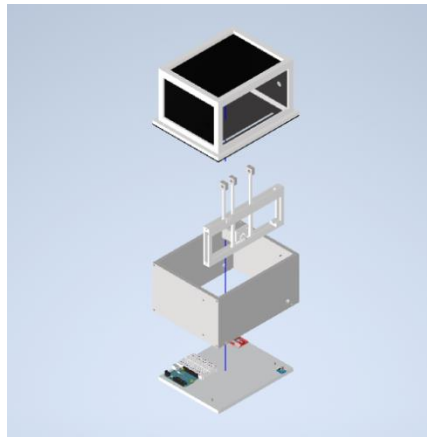
En segundo lugar, ambos materiales son livianos, lo cual facilita el transporte del banco de pruebas y contribuye a cumplir con el requisito STR-TRN-001, de mantener un peso total menor a 15 kilogramos. Además, se destaca la resistencia estructural del Nylon 6PA Natural, cuyas propiedades mecánicas están documentadas en su ficha técnica (ver Anexo E). Este material posee una resistencia a la tensión de 69–93 MPa, resistencia a la compresión de 93–110 MPa, y resistencia a la flexión de 106–120 MPa, lo cual garantiza su capacidad para soportar las cargas previstas en el banco de pruebas. Estas características lo convierten en un material confiable para la fabricación de estructuras que deben mantener su forma y rigidez ante esfuerzos mecánicos.

Por último, tanto el PLA como los plásticos de ingeniería cuentan con facilidad de maquinado y manufactura. El PLA, al ser un material termoplástico ampliamente utilizado en impresión 3D, permite la creación de piezas con geometrías complejas y personalizadas a bajo costo. Por su parte, el Nylon 6PA es compatible con técnicas como el maquinado CNC, lo cual asegura acabados precisos y repetibles, fundamentales para el correcto ensamblaje del banco de pruebas.

6.2.2. Diseño modular

Este banco de pruebas se planea fabricar bajo un diseño modular, lo que facilita el ensamblaje, reparación y futura modificación del sistema. Este diseño permite que cada módulo cumpla con funciones específicas y su ensamblaje, mantenimiento o remplazo se pueda realizar de manera independiente.

Figura 5: Explosión banco de pruebas Zona Solar



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2.1. Módulo electrónico

Este módulo cuenta con el sistema de control que se basa en programación del controlador *Arduino UNO REV3*, el cual junto con un *protoboard* permiten la interconexión de los diferentes componentes.

Entre los componentes se encuentran: el motor de pasos NEMA 17 de 40mm, el cual genera la transmisión de potencia necesaria para el movimiento del mecanismo, el controlador del motor de pasos, el cual facilita la conexión y programación del motor y, por último, el sensor infrarrojo que permite la activación del mecanismo de forma remota y segura por medio de un control remoto.

6.2.2.2. Módulo de transmisión de potencia

Este módulo cuenta con el sistema mecánico compuesto por el piñón y la cremallera, los cuales son impulsados por el motor de pasos. Su función es controlar la separación de los electrodos, de forma que sea posible variar las condiciones de generación del arco eléctrico de forma segura y controlada.

6.2.2.3. Módulo estructural

Conformado por las paredes externas del banco de pruebas, fabricadas con plástico de ingeniería, proporciona el soporte y la rigidez necesaria para el banco. Su diseño cuenta con agujeros roscados que permitirán su ensamblaje de manera sencilla por medio de tornillos.

6.2.2.4. Módulo de cubierta

Compuesto por un marco fabricado con impresión 3D y placas de acrílico, el cual permitirá la visualización directa del arco eléctrico de forma segura. Incluirá agujeros que permitan el ingreso de los electrodos y que además funcionarán de ventilación pasiva para disipar el calor y el humo que la simulación pueda ocasionar.

6.2.3. Estrategias de manufactura

La fabricación del banco de pruebas se llevó a cabo mediante técnicas de manufactura seleccionadas en función del material, precisión requerida y disponibilidad en la universidad. Estas técnicas permitieron asegurar la funcionalidad, repetibilidad y calidad del prototipo.

6.2.3.1. Impresión 3D

Se utilizó para la fabricación de las piezas del módulo de transmisión de potencia y cubierta. Se eligió esta técnica de manufactura por su versatilidad, ya que permite fabricar piezas complejas sin requerir herramientas especializadas ni moldes, lo que la hace ideal para el prototipado rápido y las iteraciones del diseño. La impresión 3D también permitió el reemplazo de piezas incurriendo en bajo costo y personalización de geometría en caso de futuras iteraciones.

6.2.3.2. Maquinado CNC

Para las piezas estructurales que requieren alta precisión, como las paredes de plástico de ingeniería que conforman el módulo estructural, se empleó maquinado CNC (Control Numérico por Computadora) utilizando una fresadora *Router CNC*. Esta técnica fue seleccionada sobre el fresado convencional por diversas razones: el CNC permite automatizar el proceso con gran exactitud dimensional, reducir el margen de error humano, estandarizar múltiples piezas y facilitar la replicabilidad del diseño para futuras fabricaciones en otras sedes o versiones del banco de pruebas. Además, el control digital permite programar operaciones complejas de perforación y corte con rapidez, lo cual resulta fundamental para lograr una alineación perfecta en los agujeros de montaje y pasos de cables.

6.2.3.3. Corte Láser

El corte láser será utilizado para la fabricación de las placas de acrílico negro y transparente ubicadas en las paredes del módulo de cubierta. Esta técnica es ideal para materiales termoplásticos debido a su alta precisión, rapidez y calidad de corte, permitiendo obtener bordes limpios y sin rebaba, evitando microfisuras que podrían presentarse con métodos tradicionales. Además, es una técnica altamente replicable y eficiente para lotes pequeños.

6.3. Cálculos y diseño

6.3.1. Cálculos eléctricos

Para el cálculo de los parámetros eléctricos esperados durante la simulación de un arco eléctrico en el banco de pruebas, se utilizaron los valores recomendados por la norma UL 1699B, emitida por *Underwriters Laboratories* (UL). Esta normativa establece criterios específicos para la evaluación de la seguridad en sistemas fotovoltaicos ante fallos por arco eléctrico en corriente continua. Los valores de tensión, corriente, separación entre electrodos y tiempo de arco especificados en dicha norma están basados en condiciones reales de operación de módulos solares típicos y permiten garantizar que los ensayos realizados sean representativos, seguros y replicables en contextos de prueba. En la siguiente tabla se resumen los valores iniciales adoptados para los cálculos eléctricos del presente proyecto:

Cuadro 3: Valores iniciales para cálculos eléctricos

Magnitud	Variable	Valor
Voltaje de pico máximo	V_{mmp} (V)	312
Corriente de pico máximo	I_{mmp} (A)	3
Corriente durante el arco	I_{min} (A)	2.5
Distancia entre electrodos	d (mm)	0.8
Duración de arco eléctrico	t (s)	0.5

Underwriters Laboratories (UL), 2018

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4: Ecuaciones para cálculos eléctricos

Condición eléctrica	Ecuación
Potencia del arco	$P = I_{min} * V_{mmp}$
Energía disipada	$E = P * t$

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la intensidad del arco eléctrico se calculó la potencia, ya que esta magnitud permitió estimar la cantidad de energía liberada en forma de calor durante la descarga. Conocer este valor fue fundamental para el diseño del sistema de pruebas, pues proporcionó una referencia sobre las condiciones energéticas que se debían esperar y controlar durante la simulación:

$$P = 780 W$$

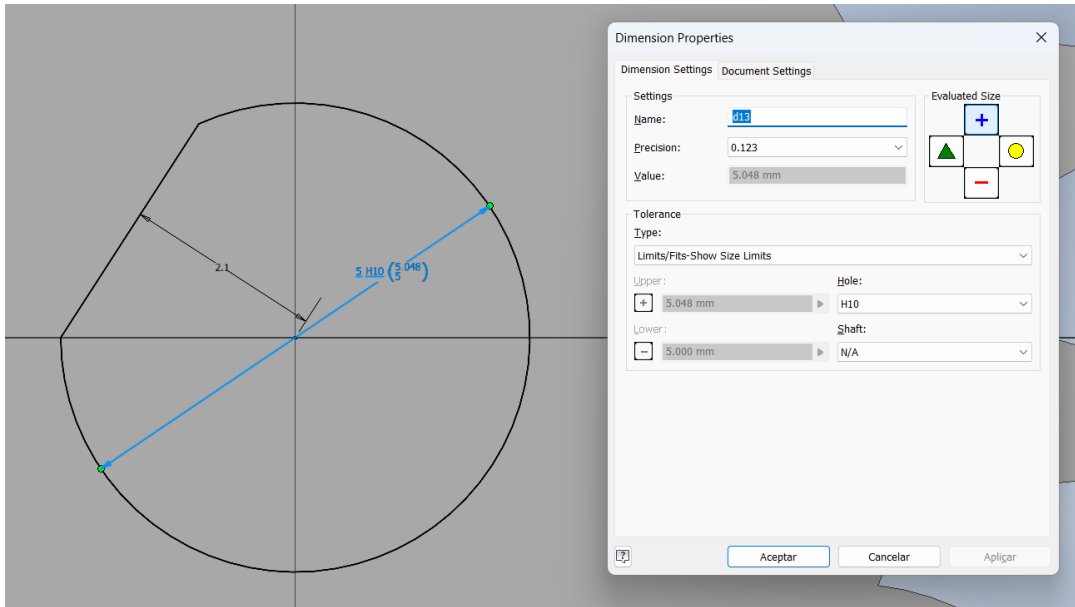
$$E = 390 J$$

6.3.2. Tolerancias de impresión

Se realizaron iteraciones de impresión con el fin de caracterizar la impresora 3D a utilizar, la cual fue un equipo Ultimaker 3. Se pudo observar que en las impresiones existía una ligera sobre materialización, es decir, se depositaba más material del esperado. Esto tiende a reducir el tamaño de los agujeros y aumentar el tamaño de los insertos respecto a sus dimensiones modeladas en Autodesk Inventor®. Por ello, para garantizar un ensamble preciso entre las piezas que debían acoplarse, se utilizó la norma ISO 286 para determinar las tolerancias necesarias.

Para la estrategia se utilizó una tolerancia de grado H10 para los agujeros mientras que para los insertos se utilizó una tolerancia de h7, esto con el fin de adaptarse a las condiciones reales del material PLA y la impresión 3D. Esta estrategia se aplicó a todas las uniones que requerían encaje en el banco de pruebas, este tipo de encaje permite que las piezas puedan ensamblarse y desensamblarse de forma manual con un poco de presión, lo que permite que se mantengan firmes durante la operación, además de un mantenimiento o sustitución de piezas sencillo.

Figura 6: Especificación de tolerancias en Autodesk Inventor®



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5: Grado de tolerancias internacionales según Norma ISO 286

Basic size mm	Standard tolerance grades																		
	IT1 ²⁾	IT2 ²⁾	IT3 ²⁾	IT4 ²⁾	IT5 ²⁾	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14 ³⁾	IT15 ³⁾	IT16 ³⁾	IT17 ³⁾	IT18 ³⁾	
Above	Tolerances																		
—	3 ³⁾	μm										mm							
—	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4	
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630 ²⁾	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800 ²⁾	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1000 ²⁾	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1000	1250 ²⁾	13	18	24	33	47	66	106	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1250	1600 ²⁾	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1600	2000 ²⁾	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2000	2500 ²⁾	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2500	3150 ²⁾	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

Fuente: International Standard Organization, 2010.

6.3.3. Módulo de transmisión de potencia

Para el módulo de transmisión de potencia del banco se seleccionó un mecanismo de piñón y cremallera, esto debido a su capacidad de convertir el movimiento rotacional del motor de pasos en un movimiento lineal preciso. Esta conversión resulta fundamental, ya que permite controlar la distancia entre los electrodos, lo cual posibilita la formación o interrupción del arco eléctrico.

El piñón estaba acoplado al eje del motor de pasos, el cual proporcionó una rotación de alta precisión angular, con una exactitud de $\pm 0.09^\circ$ por paso. Esta rotación se transmitió a la cremallera, que se encontraba montada de forma fija a lo largo de la trayectoria lineal deseada, generando así un desplazamiento lineal controlado. La elección de este sistema se justificó por su capacidad de ofrecer movimientos suaves, precisos y fácilmente controlables, características esenciales para ajustar con exactitud milimétrica la separación entre los componentes conductores.

Entre otras ventajas se encontraron la simplicidad mecánica y la robustez del sistema. Presentó un bajo juego mecánico, lo que resultó ideal para mantener una posición fija sin deslizamientos. Además, su reversibilidad de movimiento permitió ajustar con precisión las posiciones en ambas direcciones sin requerir mecanismos adicionales.

Para el diseño del piñón se utilizaron las siguientes tablas y ecuaciones:

Cuadro 6: Sistemas de dientes estándar y comúnmente usados para engranes rectos

Sistema de dientes	Ángulo de presión ϕ , grados	Cabeza (addendum) a	Raíz (dedendum) b
Profundidad total	20	$1/P_d$ o bien $1m$	$1.25/P$ o bien $1.25m$
			$1.35/P$ o bien $1.35m$
	$22\frac{1}{2}$	$1/P_d$ o bien $1m$	$1.25/P$ o bien $1.25m$
			$1.35/P$ o bien $1.35m$
Dientes recortados	20	$0.8/P_d$ o bien $0.8m$	$1/P$ o bien $1m$

Fuente: Budynas, 2018.

Cuadro 7: Ecuaciones para parámetros de diseño de piñón

Especificaciones de piñón	Ecuación	Variables
Paso circular	$p = \pi * m$	$m = \text{módulo}$
Espesor del diente	$t = \frac{p}{2}$	$p = \text{paso circular}$
Número de dientes	$N = \frac{d_p}{m}$	$m = \text{módulo}$ $d_p = \text{diámetro primitivo}$
Ángulo de espesor	$\theta_t = \frac{360 * t}{2\pi(\frac{d}{2})}$	$t = \text{espesor del diente}$ $d = \text{diámetro primitivo}$

(Cardona, 2011)

Fuente: Elaboración propia

Utilizando las ecuaciones anteriores se establecieron los siguientes parámetros de diseño para el piñón:

Cuadro 8: Parámetros de diseño de piñón

Magnitud	Variable	Valor
Diámetro primitivo	d_p (mm)	16
Módulo	m (mm)	1
Cabeza de diente	a (mm)	1
Raíz de diente	b (mm)	1.25
Ángulo de presión	\emptyset (°)	20
Paso circular	p (mm)	3.14
Espesor del diente	t (s)	1.57
Número de dientes	N	16
Ángulo de espesor	θ_t (°)	11.25
Ancho de cara	A (mm)	4

Fuente: Elaboración propia

Una vez se obtuvieron los valores de los parámetros necesarios fue posible realizar el diseño del piñón utilizando Autodesk Inventor®:

Figura 7: Diseño final piñón



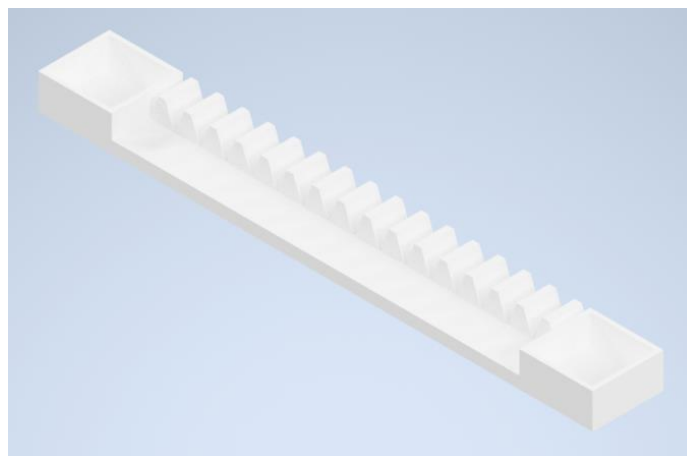
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Fuente: Elaboración propia.

Finalizado el diseño del piñón, se procedió con el diseño de la cremallera, sabiendo que teóricamente “se puede considerar a una *cremallera* como un engrane recto con un diámetro de paso infinitamente grande” (Budynas, 2018) y utilizando los parámetros del piñón se utilizó nuevamente Autodesk Inventor® para su creación.

Una vez se obtuvo el diseño de la cremallera fue necesario agregar dos soportes en los laterales de la cremallera, esto para que fuera posible anclar los pilares que trasladarán el movimiento hacia la parte superior del banco.

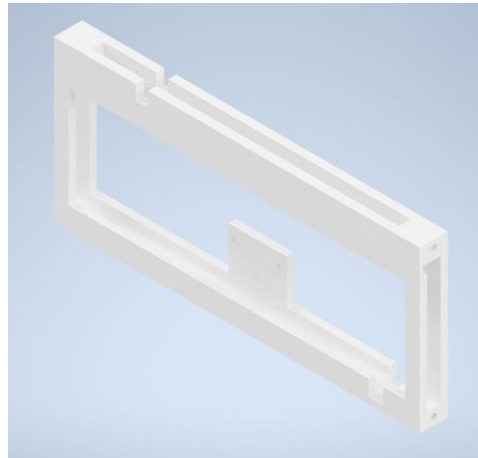
Figura 8: Diseño final cremallera



*Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez seleccionado y realizado el sistema de transmisión de potencia se diseñó una base estructural que permitiera el desplazamiento fluido y sin juego de la cremallera, la cual debía de tener contacto constante con el piñón impulsado por el motor. En esta base se integró un soporte que permitió alojar de forma sencilla el motor, lo que permitió su correcto posicionamiento y alineación con el sistema de transmisión de potencia. Esto que garantiza una transmisión de movimiento eficiente.

Figura 9: Base sistema de transmisión piñón-cremallera

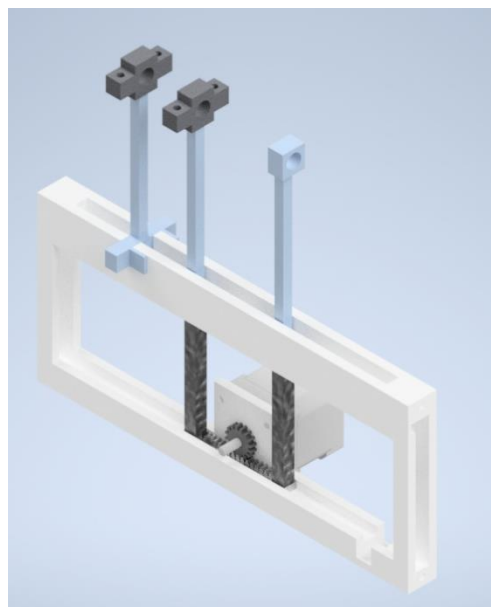


*Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.*

Con el objetivo de trasladar el movimiento lineal desde el plano inferior hasta el plano superior, que es donde estarán ubicados los electrodos encargados de generar el arco eléctrico, se diseñaron tres pilares verticales. Dos de los pilares se encuentran anclados directamente a los extremos de la cremallera, mientras que el tercer pilar se encuentra fijado a la estructura base, cumpliendo con la función de punto de apoyo estático, este sistema permite la unión y separación de los electrodos en función de la posición de los pilares móviles.

Por último, para este módulo fue necesario diseñar una pieza que fuera capaz de sujetar los electrodos, para ello se tomó la decisión de fabricar porta cables que sujetaran los electrodos con presión aplicada por tornillos plásticos. Con todos los componentes mencionados anteriormente fue posible construir el ensamblaje del módulo de transmisión de potencia.

Figura 10: Módulo de transmisión de potencia



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.

6.3.4. Módulo electrónico

Cuadro 9: Lista de materiales para módulo electrónico

Item	Componente	Descripción	Cantidad
1	Placa Arduino UNO R3	Microcontrolador ATmega328P, compatible con lenguaje C/C++, alimentación 5V, 14 pines digitales, 6 entradas analógicas.	1
2	Motor paso a paso NEMA 17 (40 mm)	Motor bipolar 1.8°/paso, 200 pasos/rev, torque nominal 45 N·cm, corriente nominal 1.7 A.	1
3	Controlador de motor A4988	Driver para motor paso a paso bipolar, tensión de alimentación 8–35 V, corriente de salida 2 A por bobina, <i>microstepping</i> 1/16.	1
4	Módulo de extensión para A4988	Adaptador para conexión entre el Arduino, el driver A4988 y el motor paso a paso.	1
5	Protoboard de 400 puntos	Base de pruebas sin soldadura, 400 contactos, compatible con cables tipo jumper.	1
6	Sensor infrarrojo KY-022 con control remoto	Receptor de señal IR de 38 kHz con control remoto programable. Alimentación 3.3–5 V.	1
7	Cables jumper Macho-Macho / Macho-Hembra	Cables flexibles de 20 cm, tipo Dupont, calibre 22 AWG.	1 Set (20 unidades)
8	Fuente de alimentación DC 12V / 2A	Adaptador de corriente con conector tipo jack, entrada 120V AC, salida 12V DC.	1

Fuente: Elaboración propia.

Este módulo fue diseñado para controlar el movimiento del sistema de transmisión de potencia mediante una señal emitida por un control y recibida por un sensor infrarrojo. Esto permite al usuario interactuar con el banco de pruebas de forma segura y remota. El sistema se basa en una placa Arduino UNO R3, la cual fue seleccionada debido a su compatibilidad con componentes, facilidad de programación, disponibilidad de bibliotecas y amplia documentación, todo lo mencionado anteriormente la convierte en una opción confiable para sistemas de control simples y de rápida construcción.

Figura 11: Placa Arduino UNO R3



Nota. Recuperado de Placa Arduino UNO REV3 [Fotografía], por Arduino, 2025, Arduino Store (<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>)

Para generar el movimiento lineal del banco se utilizó un motor paso a paso NEMA 17 de 40 mm, controlado por un controlador A4988, el cual permite un control preciso del posicionamiento y velocidad del motor. Para facilitar la conexión entre el Arduino, el controlador y el motor se agregó un módulo de extensión para el controlador A4988.

Figura 12: Motor de pasos NEMA 17 de 40 mm



Nota. Recuperado de Motor de pasos NEMA 17 de 40 mm [Fotografía], por La Electrónica, 2025, La Electrónica (<https://laelectronica.com.gt/motor-de-pasos-nema-17-de-500-rpm?search=motor%20nema%2017&description=true>)

Como se mencionó anteriormente se deben cumplir ciertos requisitos para poder generar el arco eléctrico, se requiere una distancia entre electrodos de 0.8 milímetros y para cumplir las especificaciones de seguridad este no puede durar más de 0.5 segundos. Por lo que se utilizaron estos valores para calcular la velocidad de avance de la cremallera y la velocidad angular a la que debe girar el motor de pasos NEMA 17.

Cuadro 10: Ecuaciones para cálculo de velocidades de módulo de transmisión de potencia

Magnitud	Ecuación	Variables	Descripción
Avance de piñón	$A = \pi * d_p$	$d_p = \text{diámetro primitivo}$	Distancia que avanza la cremallera por vuelta completa de piñón.
Velocidad de avance	$V_a = \frac{d}{t}$	$d = \text{distancia entre electrodos}$ $t = \text{duración de arco eléctrico}$	Velocidad lineal con la que se desplaza la cremallera.
Velocidad angular	$n = \frac{60 * V_a}{p * N}$	$p = \text{paso circular}$ $V_a = \text{velocidad de avance}$ $N = \text{número de dientes}$	Velocidad angular con la que debe girar el piñón.
Desplazamiento angular	$s = \frac{1 \text{ rev} * d}{A}$	$d = \text{distancia entre electrodos}$ $A = \text{avance de piñón}$	Distancia angular necesaria para generación de arco.

Fuente: Elaboración propia

Utilizando estas ecuaciones se calcularon los siguientes valores:

Cuadro 11: Velocidades de módulo de transmisión de potencia

Magnitud	Variable	Valor
Avance de piñón	$A \text{ (mm)}$	50.26
Velocidad de avance	$V_a \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right)$	1.6
Velocidad angular	$n \text{ (rpm)}$	1.91
Desplazamiento angular	$s \text{ (rev)}$	0.016

Fuente: Elaboración propia

Conociendo la velocidad angular necesaria del piñón fue posible calcular la cantidad de pasos que el motor de paso Nema 17 debía de realizar para poder lograr el desplazamiento lineal antes mencionado.

Cuadro 12: Ecuaciones para cálculo de velocidades de módulo de transmisión de potencia

Magnitud	Ecuación	Variables	Descripción
Pasos de motor	$p_m = \frac{200}{rev} * s$	$s = desplazamiento\ angular$	Cantidad de pasos necesarios para lograr el desplazamiento de la cremallera.
Tiempo total de operación	$t_o = n * s$	$s = desplazamiento\ angular$ $n = velocidad\ angular$	Tiempo total que debe operar el motor
Tiempo por paso	$t_p = \frac{t_{Ep}}{p_m}$	$p_m = paso\ de\ motor$ $t_o = tiempo\ entre\ pasos$	Tiempo que tarda el motor en realizar un paso.

Fuente: Elaboración propia

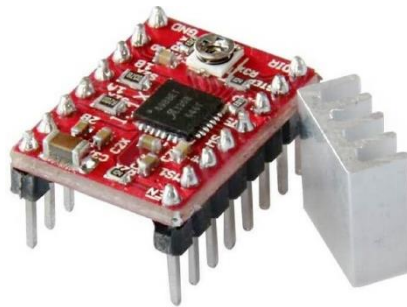
Cuadro 12: Velocidades de módulo de transmisión de potencia

Magnitud	Variable	Valor
Pasos de motor	p_m	3.2
Tiempo total de operación	$t_o (ms)$	471
Tiempo por paso	$t_p (ms)$	157

Fuente: Elaboración propia

Con estos valores fue posible realizar la programación necesaria para obtener la velocidad y el desplazamiento lineal necesario en la cremallera, el código se incluye en el anexo A.

Figura 13: Driver A4988



Nota. Recuperado de Driver A4988 para motor de pasos [Fotografía], por La Electrónica, 2025, La Electrónica (<https://laelectronica.com.gt/driver-a4988-para-motor-stepper?search=a4988&description=true>)

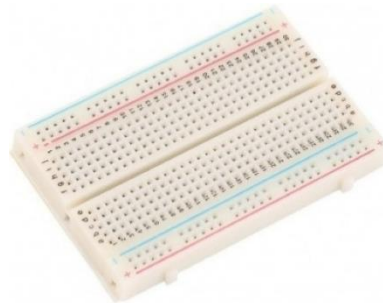
Figura 14: Módulo de extensión para controlador A4988



Nota. Recuperado de Módulo de extensión para controlador A4988 [Fotografía], por La Electrónica, 2025, La Electrónica (<https://laelectronica.com.gt/modulo-de-extension-para-driver-a4988-o-drv8825>)

Para una conexión ordenada y simple se utilizó una protoboard de 400 puntos, esto permite facilidad en futuras modificaciones o pruebas sin la necesidad de utilizar soldaduras.

Figura 15: Protoboard 400 puntos



Nota. Recuperado de Protoboard media galleta [Fotografía], por La Electrónica, 2025, La Electrónica (<https://laelectronica.com.gt/protoboard-de-0.5-galleta?search=PROTOBOARD&description=true>)

Para la interacción del usuario con el banco de pruebas se utilizó un sensor infrarrojo KY-022, el cual recibe señales desde un control remoto. Se programaron dos funciones principales: al presionar el botón “A” del control remoto, el motor realiza un giro en sentido horario (movimiento hacia la derecha desde la vista frontal del sistema), mientras que al presionar el botón “B”, el motor gira en sentido antihorario (movimiento hacia la izquierda). Para evitar errores de funcionamiento o el forzamiento del motor, se incorporó una condición de seguridad que impide ejecutar dos veces seguidas un desplazamiento en la misma dirección, evitando así ciclos repetitivos no deseados.

Figura 16: Sensor infrarrojo KY-022 y Control



Nota. Recuperado de Módulo de control IR HX1838 con receptor [Fotografía], por La Electrónica, 2025, La Electrónica (<https://laelectronica.com.gt/modulo-de-control-ir-hx1838-con-receptor>)

Figura 17: Diagrama de control



Fuente: Elaboración propia

6.3.5. Módulo de cubierta

Este módulo fue diseñado con el objetivo de permitir la visualización del arco eléctrico de forma segura, tanto para el operador como para el equipo, sin comprometer la calidad de la observación durante la demostración.

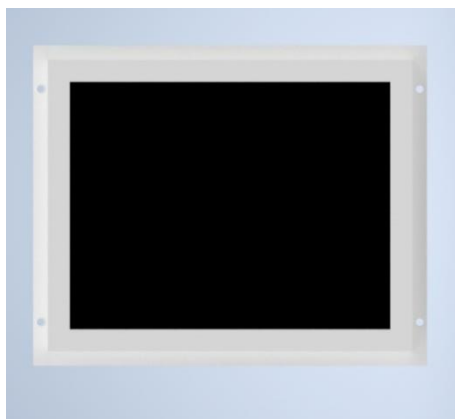
El marco se fabricó con material PLA mediante impresión 3D, como se mencionó anteriormente este material cuenta con baja conductividad eléctrica, facilidad de fabricación, bajo peso y una resistencia estructural adecuada. Además, este material permite una correcta integración con el resto de los componentes del banco de pruebas debido a que muchas de las demás piezas también fueron diseñadas para ser fabricadas en PLA. Esto garantiza compatibilidad dimensional, facilidad de ensamblaje y uniformidad en los parámetros de impresión, lo cual reduce la necesidad de ajustes o recalibraciones entre módulos. Asimismo, trabajar con un único material para múltiples elementos facilita la reposición de piezas y mejora la coherencia mecánica y térmica del sistema durante su operación.

Se seleccionó acrílico negro para las paredes laterales, superior e inferior de la cubierta con el fin de mejorar el contraste visual durante la generación del arco eléctrico, permitiendo así una observación más clara del fenómeno. Este color reduce la entrada de luz externa y hace más visible el arco generado, lo cual es especialmente importante para fines demostrativos. Además, el acrílico actúa como una barrera física y dieléctrica, protegiendo al operador de posibles chispas, calor o emisiones de radiación durante la simulación del fallo. Para la placa frontal, se utilizó acrílico transparente, lo que permite al usuario o espectador visualizar directamente el proceso desde un punto seguro, sin comprometer la integridad del sistema ni la del observador.

En conjunto, la cubierta ofrece una solución integral que combina protección, funcionalidad y presentación visual. Esto es particularmente relevante en el contexto de Zona Solar, donde el banco será utilizado como herramienta de demostración frente a clientes e instituciones. Una presentación clara, segura y profesional del funcionamiento del sistema refuerza la confianza en la tecnología, facilita la comprensión del mecanismo de detección de fallos y apoya las estrategias comerciales de la empresa.

La cubierta es removible y cuenta con orificios que permite la fijación a las paredes del módulo estructural, esto permite un fácil mantenimiento y acceso a los componentes internos cuando sea necesario.

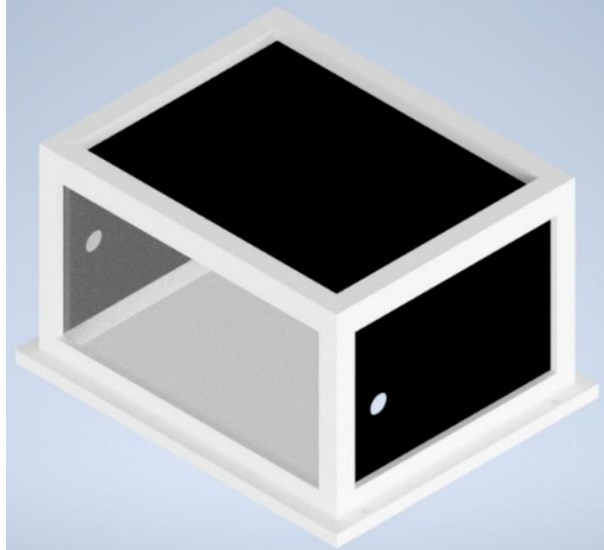
Figura 20: Vista superior módulo cubierta



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21: Módulo de cubierta



*Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.
Fuente: Elaboración propia.*

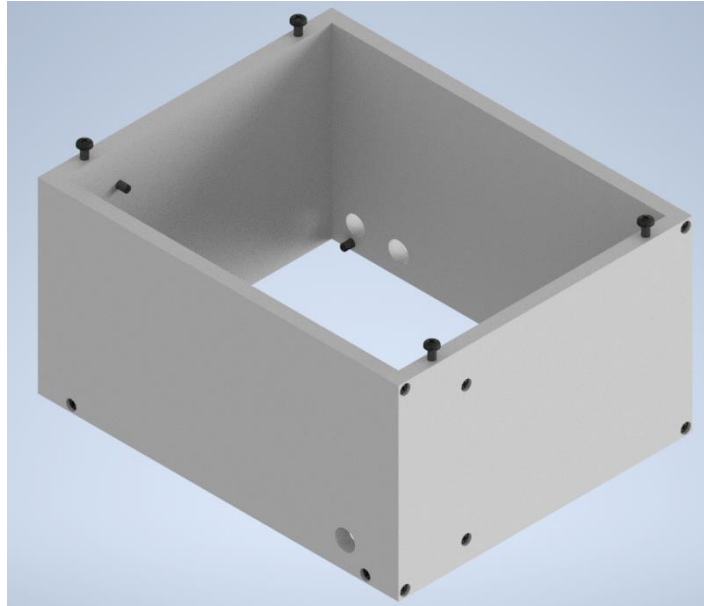
6.3.6. Módulo estructural

Este módulo es el responsable de brindar el soporte principal al banco de pruebas, proporcionando rigidez y estabilidad al resto de conjunto que conforman el sistema. Está compuesto por cuatro paredes fabricadas en plástico de ingeniería.

Las paredes cuentan con perforaciones distribuidas de forma estratégica para permitir la fijación de los módulos del banco. Servirán de puntos de montaje para tornillo de sujeción, lo que permite un ensamblaje y desensamblaje sencillo en caso de mantenimiento, modificación o transporte. Además, posee orificios que permiten el ingreso de los cables de alimentación y las señales hacia los sensores instalados en el banco.

Para garantizar una alta precisión en la alineación de estos agujeros este módulo se fabricará mediante procesos de maquinado CNC, esto permite que se reduzca el riesgo de desalineaciones de las paredes.

Figura 22: Módulo de cubierta



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Evaluación y verificación

Para la evaluación y verificación del banco de pruebas se fabricará un prototipo, esto permitirá analizar de forma práctica el comportamiento del sistema a lo largo de su desarrollo. Cada módulo del banco será fabricado, ensamblado y puesto a prueba para identificar interferencia o limitaciones que no fueron contempladas en el modelo digital.

Para el módulo electrónico se validará que el motor NEMA 17, controlado mediante el sistema Arduino, ejecute los desplazamientos angulares programados con precisión. La verificación se centrará en que, al accionar un botón del control infrarrojo, el motor genere un movimiento angular específico que se traduzca en un avance lineal controlado de la cremallera. Para evaluar la precisión del desplazamiento, se utilizará una regla milimétrica fijada a la base como escala de referencia, y se colocarán marcas visuales sobre los pilares móviles para permitir una comparación directa entre el desplazamiento esperado y el real. Esta prueba permitirá comprobar tanto la fidelidad del sistema de control como la respuesta mecánica del conjunto.

Adicionalmente, se comprobará que el sensor infrarrojo KY-022 detecte correctamente las señales del control remoto. Para ello se ejecutarán pruebas funcionales donde se envíen comandos específicos al Arduino, y se observará si la señal es reconocida (mediante impresión por monitor serial) y si el sistema ejecuta la acción correspondiente.

También se verificará el correcto funcionamiento de la lógica de seguridad, la cual impide movimientos consecutivos en la misma dirección sin una orden inversa previa. Esta función será evaluada al intentar enviar dos veces el mismo comando, esperando que en la segunda ocasión el sistema no responda, tal como fue programado.

En el ámbito mecánico se comprobará que las uniones entre los módulos impresos en PLA sean firmes y estables, de manera que puedan montarse y desmontarse manualmente sin herramientas, pero que al mismo tiempo no se desprendan con facilidad durante el uso normal del banco de pruebas. Se realizarán pruebas de ensamblaje repetidas para verificar que las piezas mantengan su forma y funcionalidad después de varios ciclos. También se validará que el banco permita la instalación correcta de los tornillos de fijación en su estructura, asegurando una sujeción adecuada y alineación entre componentes. Este enfoque permite realizar ajustes individuales para cada módulo, lo que asegura que no existan problemas al integrarlo en su conjunto final.

6.5. Fabricación

La fabricación se realizará utilizando los recursos de manufactura de la Universidad del Valle de Guatemala, ya que estos permiten llevar a cabo procesos de alta precisión y un prototipado eficiente. Como se ha mencionado anteriormente se utilizará una combinación de técnicas de impresión 3D, maquinado CNC y corte láser.

Las piezas del banco de pruebas que se fabricaron por impresión 3D fueron modeladas en el software Autodesk Inventor, desde donde se exportaron en formato STL. Posteriormente, se utilizó el programa Ultimaker Cura para definir los parámetros de impresión y generar el código G compatible con la impresora Ultimaker S3 ubicada en la UVG.

Para todas las impresiones se utilizó una velocidad de 100 mm/s y una densidad de relleno del 15%, buscando un equilibrio entre tiempo de fabricación, resistencia estructural y economía de material. Sin embargo, se emplearon distintos perfiles de impresión según la complejidad geométrica y los requerimientos de calidad superficial de cada pieza.

En los componentes que requerían alta precisión y buen acabado superficial, como los porta cables, pilares, cremallera y piñón, se utilizó una configuración de calidad extrafina, con un espesor de capa de 0.06 mm y soportes tipo árbol, adecuados para garantizar un correcto encaje entre piezas. Esta impresión tuvo una duración de 9 horas con 12 minutos y consumió 4.85 metros de filamento PLA.

Para piezas donde la precisión era menos crítica, pero se necesitaba mayor robustez, como la base de la cremallera, se utilizó el perfil predeterminado "*Fast*", con un espesor de capa de 0.2 mm, lo que permitió reducir el tiempo de fabricación. Esta pieza tomó 3 horas con 51 minutos y utilizó 14.16 metros de filamento.

Finalmente, para una de las piezas más complejas del proyecto, la cubierta, que presentaba voladizos considerables y requería un alto volumen de soportes, se utilizó la configuración "*Sprint*", con un espesor de capa de 0.4 mm. Debido a la geometría y la necesidad de estructuras de soporte extensas, esta impresión fue la más exigente en recursos, requiriendo 16 horas y 73 metros de filamento PLA.

Para la fabricación de las paredes del módulo estructural se utilizará la fresadora HAAS VF-1, aplicando un proceso de maquinado CNC debido a la necesidad de alta precisión en los agujeros de montaje y anclaje, así como en el dimensionamiento exacto de las piezas. Los agujeros pasantes de Ø5.3 mm, Ø8 mm, Ø14 mm y Ø15 mm se realizarán utilizando una combinación de dos brocas helicoidales: una de Ø5.5 mm, que permitirá una tolerancia adecuada para tornillos estándar y el preavellanado, y otra de Ø15 mm, que se empleará tanto para los agujeros mayores como para el ajuste del orificio de Ø14 mm mediante desbaste adicional.

Adicionalmente, para garantizar que las piezas alcancen las dimensiones especificadas, especialmente en cuanto al ancho y altura final de las paredes, se efectuará un desbaste de las orillas utilizando una fresa de corte lateral de Ø8 mm. Esta herramienta se seleccionará por su capacidad para evacuar viruta eficientemente al trabajar con plástico de ingeniería. Se trabajará con una profundidad de corte axial de 10 mm (igual al espesor del material), realizando el acabado en una sola pasada. Esta estrategia de maquinado permitirá obtener bordes uniformes, precisos y libres de rebabas, cumpliendo con los requerimientos dimensionales necesarios para el ensamblaje de los módulos.

Por último, para los paneles de acrílico se utilizará corte láser, se eligió esta técnica por su velocidad de producción y capacidad de replicabilidad. Este proceso no solo permite cortes limpios, sino que también evita microfracturas las cuales son comunes al momento de utilizar el taladrado convencional, lo cual es especialmente importante en los paneles de visualización del arco eléctrico.

Esta combinación de técnicas permite una fabricación eficiente, estética y de alta precisión, características fundamentales para la fabricación de un dispositivo de demostración comercial.

6.6. Pruebas

Una vez finalizada la fabricación y el ensamblaje del banco de pruebas, se llevará a cabo el proceso de validación experimental. Para ello, se establecerá un protocolo de pruebas que permitirá evaluar el rendimiento del sistema en su totalidad, verificando la integración y el funcionamiento conjunto de todos los módulos.

Este protocolo incluirá pruebas específicas para verificar el cumplimiento de los requisitos electrónicos, estructurales y de seguridad que se plantearon al inicio del proyecto, su finalidad principal es determinar la capacidad del banco para generar y mantener un arco eléctrico de forma segura y visible.

Las pruebas se realizarán en las instalaciones de Zona Solar, aprovechando que poseen el entorno técnico y los dispositivos que permiten realizar las demostraciones de la funcionalidad de sus inversores Huawei. Durante las pruebas se evaluarán aspectos como la estabilidad del sistema, comportamiento térmico de los componentes, calidad visual del arco y la seguridad del sistema.

Los resultados serán documentados mediante fotografías, registros técnicos y observaciones estructuradas, con el fin de realizar una evaluación detallada del comportamiento del banco de pruebas durante su funcionamiento. En caso de identificarse desviaciones respecto a los parámetros esperados, se procederá con los ajustes necesarios para asegurar el cumplimiento de los requisitos funcionales.

Además, el prototipo será presentado al equipo técnico de Zona Solar, quienes realizarán una evaluación práctica en sus instalaciones. Esta retroalimentación será clave para validar el dispositivo desde una perspectiva aplicada y comercial, asegurando que el banco de pruebas no solo cumpla con los objetivos técnicos, sino también con las necesidades reales del entorno donde se planea implementar.

7.1. Cumplimientos de requisitos

Cuadro 13: Verificación de cumplimiento de requisitos

Código	Criterio	Cumple
GEN-CMP-001	El banco de pruebas debe proporcionar un entorno seguro para verificar el cumplimiento del inversor con la normativa UL1699B.	Sí
GEN-MEC-001	El banco de pruebas debe estar diseñado con componentes mecánicos disponibles en el mercado guatemalteco.	Sí
GEN-OPR-001	El banco de pruebas debe permitir la ejecución de simulaciones en intervalos de 10 minutos.	Sí
GEN-OPR-002	El banco de pruebas debe permitir simulaciones en un lapso de 1 hora sin interrupciones por sobrecalentamiento.	Sí
GEN-OPR-003	El banco de pruebas debe poder ser operado a distancia mediante una interfaz remota, con un alcance mínimo de 3 metros .	No
GEN-OPR-004	La prueba no debe exceder los 10 segundos de duración.	Sí
ELE-COM-001	El banco de pruebas debe incorporar componentes electrónicos compatibles con el lenguaje de programación Arduino , asegurando una integración funcional y eficiente.	Sí
ELE-COM-002	Se deberá proporcionar a Zona Solar un diagrama electrónico detallado que permita la réplica del proyecto, especificando claramente todas las conexiones y los componentes necesarios.	Sí
ELE-COM-003	El motor seleccionado para la movilidad del banco de pruebas debe ser capaz de superar la resistencia generada por el arco eléctrico durante las pruebas, garantizando su correcto	Sí

ELE-COM-004	funcionamiento bajo dichas condiciones. Los componentes electrónicos utilizados deben operar de manera eficiente sin requerir el uso de baterías, utilizando únicamente una fuente de alimentación conectada a la red eléctrica, compartida o compatible con el sistema Arduino.	Sí
SEG-COM-001	El banco de pruebas debe incluir una cubierta transparente de seguridad que permita la observación del arco eléctrico sin riesgo para el operador.	Sí
SEG-COM-002	El banco de pruebas debe estar fabricado de materiales que eviten el contacto accidental con partes en tensión durante la simulación del arco eléctrico.	Sí
STR-MEC-001	La distancia mínima entre los componentes eléctricos y la carcasa protectora debe ser de 80 mm para garantizar un aislamiento adecuado.	Sí
STR-TRN-001	El banco de pruebas deberá tener una masa total máxima de 15 kg, asegurando que pueda ser transportado fácilmente por una persona.	Sí
STR-TRN-002	El banco de pruebas debe ser transportable, con un volumen máximo de $0.02 m^3$, cuyas dimensiones no excedan los 30 cm de largo, 30 cm de ancho y 20 cm de alto.	Sí

Fuente: Elaboración propia

7.2. Pruebas electrónicas

Cuadro 14: Resultados de módulo electrónico

Prueba	Condición	Observación	Resultado
Movimiento piñón-cremallera	Separación lenta y controlada	Sistema realizó desplazamiento de forma correcta	Cumplido
Control remoto	Botón A = avance Botón B = retroceso	Sistema respondió adecuadamente	Cumplido
Lógica de seguridad	Dos comandos consecutivos iguales	Sistema bloqueó la acción	Cumplido

Fuente: Elaboración propia

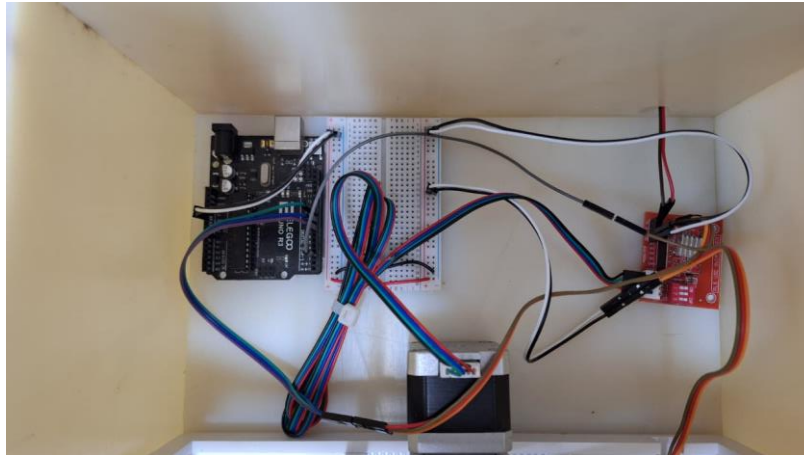
7.3. Prototipo final

Figura 23: Banco de pruebas Zona Solar



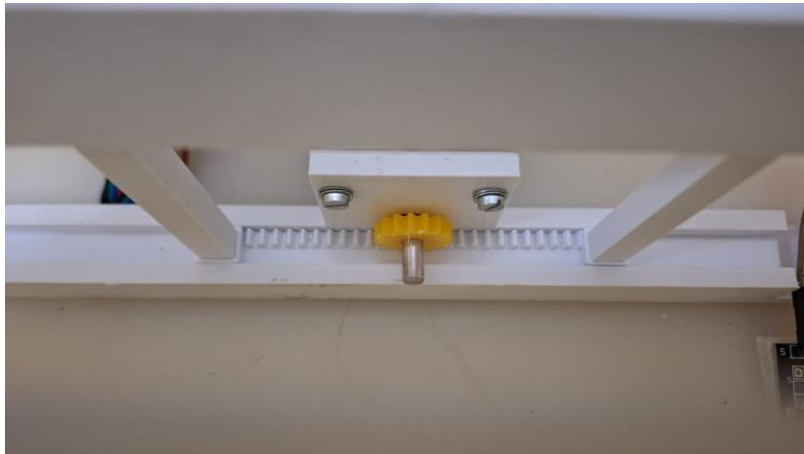
Fuente: Elaboración propia

Figura 24: Módulo electrónico



Fuente: Elaboración propia

Figura 25: Módulo de transmisión de potencia



Fuente: Elaboración propia

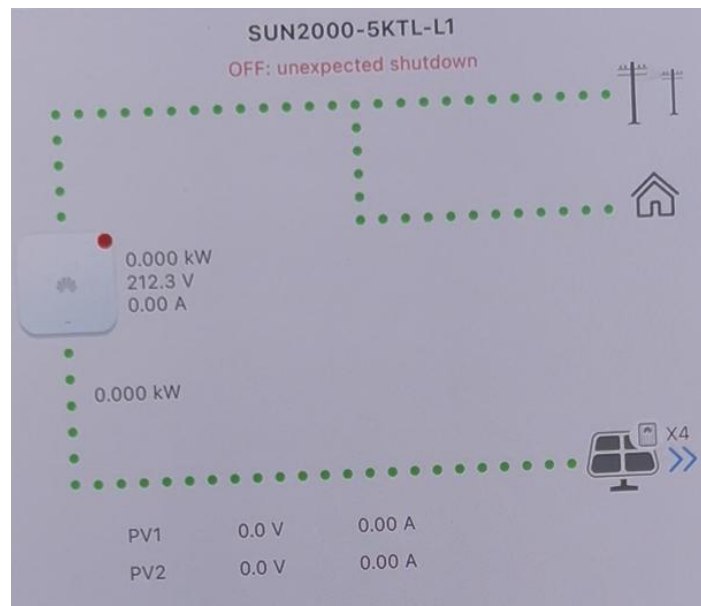
7.4. Visualización de arco eléctrico

Figura 26: Simulación de arco eléctrico



Fuente: Elaboración propia

Figura 27: Detección de corto circuito por inversor Huawei



Fuente: Elaboración propia

7.5. Retroalimentación Zona Solar

Cuadro 15: Retroalimentación Zona Solar

Aspecto evaluado	Observación
Utilidad comercial	Permite demostrar la detección de fallas en inversores Huawei.
Seguridad	Cumple con condiciones adecuadas para su uso en demostraciones.
Replicabilidad	Puede reproducirse en otras sedes con los planos y diagramas entregados.

Fuente: Elaboración propia

7.6 Matriz de riesgos

Cuadro 16: Identificación de riesgos

Número de identificación	Riesgo identificado
1	Exposición al arco eléctrico
2	Exposición a personas con marcapasos
3	Arco mantenido por tiempo prolongado
4	Contacto accidental con componentes energizados
5	Falta de apagado rápido
6	Falla de cubierta acrílica

Fuente: Elaboración propia

Figura 28: Matriz de riesgos

SEVERIDAD	CONSECUENCIAS				PROBABILIDAD ASCENDENTE				
	Personas	Activos	Ambiente	Reputación	A	B	C	D	E
					Incidente nunca escuchado en la industria	Escuchado en la industria	El incidente ha ocurrido en nuestra compañía	Ocurre varias veces al año en nuestra compañía	Ocurre varias veces al año en el sitio
0	Sin efecto en la salud/lesión	Sin daño	Sin efecto	Sin impacto	Mejoramiento continuo				
1	Efecto en la salud/lesión leve	Daño leve	Efecto leve	Impacto leve					
2	Efecto en la salud/lesión menor	Daño menor	Efecto menor	Impacto limitado	4, 5				
3	Efecto en la salud/lesión mayor	Daño localizado	Efecto localizado	Impacto considerable					
4	PTD o 1-3 fatalidades	Daño mayor	Efecto mayor	Impacto nacional	2, 3				
5	Múltiples fatalidades	Daño extenso	Efecto masivo	Impacto internacional					

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos permiten concluir que el banco de pruebas cumple con los requisitos técnicos planteados, demostrando ser un dispositivo seguro, funcional y replicable. La validación experimental bajo parámetros de la norma UL1699B garantiza que la simulación representa condiciones reales de falla en sistemas fotovoltaicos.

8.1. Cumplimiento normativo

El prototipo permitió generar un arco eléctrico con una separación de 0.8 mm y una duración máxima de 0.5 segundos, en concordancia con lo establecido en la norma UL1699B. Esto valida el diseño y demuestra la funcionalidad del banco como herramienta de prueba y demostración. La generación del arco eléctrico y su comportamiento durante la prueba pueden observarse en la *Figura 26*.

8.2. Desempeño del sistema electrónico

El sistema Arduino UNO, junto con el motor NEMA 17 y el mecanismo piñón-cremallera, logró un control preciso del movimiento lineal. La lógica de seguridad implementada evitó ciclos repetitivos y mejoró la confiabilidad del sistema, lo cual constituye un aporte fundamental a la seguridad operativa. Los resultados obtenidos durante las pruebas funcionales del módulo electrónico se resumen en el *Cuadro 14*, donde se evidencia el cumplimiento de todas las condiciones evaluadas por Zona Solar (*Anexo I*). La disposición del sistema y la interconexión de sus componentes pueden observarse en la *Figura 24*. El único objetivo que no se cumplió fue el GEN-OPR-003, debido a que el sensor KY-022 únicamente cuenta con un alcance de 2 metros.

8.3. Resistencia estructural y modularidad

El diseño modular permitió ensamblar y desensamblar los diferentes módulos de forma sencilla, lo que facilita el mantenimiento y posibles futuras mejoras. Sin embargo, se detectó un desgaste en las piezas fabricadas en PLA, lo cual sugiere que el material puede no ser óptimo para usos prolongados. La disposición final del banco de pruebas y la integración de sus módulos se muestran en la *Figura 23*.

8.4. Seguridad y riesgos operativos

A pesar de que el banco cumplió con las medidas básicas de seguridad, se identificaron riesgos potenciales que se resumen en la Matriz de Riesgos (*Cuadro 17*), donde también se presentan las medidas de mitigación correspondientes. La evaluación gráfica de la severidad y probabilidad de dichos riesgos puede observarse en la *Figura 28*, la cual permite visualizar su clasificación dentro de los niveles de tolerancia establecidos.

Cuadro 17: Matriz de riesgos

Riesgo identificado	Posible consecuencia	Medida de mitigación
Exposición al arco eléctrico (operador sin protección)	Quemaduras, daño ocular, descargas eléctricas	Uso obligatorio de cubierta acrílica
Exposición a personas con marcapasos	Interferencia peligrosa	Restricción de uso a personas con dispositivos médicos implantados
Arco mantenido por tiempo prolongado	Sobrecalentamiento, fusión de electrodos	Programación de tiempo máximo de 0.5 s
Contacto accidental con componentes energizados	Descarga eléctrica	Uso de materiales aislantes y operación remota
Falta de apagado rápido	Accidente en caso de falla	Botón de emergencia o flipón externo de corte de energía (brindado por Zona Solar)
Falla de la cubierta acrílica	Proyección de chispas	Jaula de Faraday o malla aterrizada como refuerzo

Fuente: Elaboración propia

8.5. Aplicación comercial y educativa

La retroalimentación proporcionada por Zona Solar destacó que el prototipo fortalece la propuesta de valor de la empresa al permitir demostraciones prácticas y seguras de la tecnología de detección de fallas por arco eléctrico integrada en los inversores Huawei. Esto representa una ventaja competitiva, ya que facilita la presentación técnica a clientes, distribuidores e inversionistas, reforzando la confianza en la eficacia de los sistemas de protección. Además, el banco puede utilizarse en ferias tecnológicas y procesos de capacitación comercial, posicionando a la empresa como un referente en innovación y seguridad fotovoltaica.

Los aspectos evaluados durante las pruebas, relacionados con la utilidad comercial, la seguridad y la replicabilidad del sistema, se resumen en el Cuadro 14, donde se evidencia la satisfacción de la empresa con el desempeño del prototipo. Desde el ámbito educativo, el dispositivo se consolida como una herramienta didáctica para la formación de técnicos e ingenieros en detección de fallas y seguridad eléctrica. Su diseño modular y control remoto permiten recrear de forma segura las condiciones reales de un arco eléctrico, promoviendo el aprendizaje práctico y la investigación aplicada en instituciones académicas y centros de capacitación técnica.

Finalmente, la validación del funcionamiento y aceptación del prototipo por parte de Zona Solar se formalizó mediante la Carta de aceptación del prototipo presentada en el Anexo G, en la cual se confirma que las pruebas realizadas fueron satisfactorias y que el dispositivo cumple con los criterios establecidos para su implementación en demostraciones técnicas.

Conclusiones

1. Se logró diseñar y fabricar un banco de pruebas para la simulación de fallas por arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos, cumpliendo los parámetros definidos por la norma UL1699B y los objetivos planteados en el proyecto.
2. El prototipo demostró ser funcional, seguro y replicable, permitiendo la generación controlada del arco eléctrico en un entorno protegido y cumpliendo con las condiciones de portabilidad y modularidad establecidas.
3. El sistema de control electrónico, compuesto por Arduino UNO y motor NEMA 17, funcionó correctamente, garantizando precisión en el movimiento de los electrodos y confiabilidad en la operación remota.
4. La retroalimentación de Zona Solar validó la utilidad del banco como herramienta comercial y educativa, aportando valor en la demostración de tecnologías de detección de fallas y en capacitaciones técnicas.
5. Las prácticas de manufactura implementadas —impresión 3D, corte láser y maquinado CNC— resultaron efectivas para la construcción del prototipo, permitiendo alcanzar precisión, estandarización y bajo costo en la fabricación.
6. Se identificaron limitaciones relacionadas con el desgaste de piezas fabricadas en PLA y el incremento térmico en los electrodos, lo que abre la oportunidad de optimizar materiales, incorporar ventilación forzada y añadir instrumentación para monitoreo de variables eléctricas.
7. En conjunto, el banco de pruebas constituye un aporte innovador al sector fotovoltaico en Guatemala, al proporcionar una herramienta de bajo costo, portátil y segura, que combina aplicaciones técnicas, comerciales y académicas en un solo dispositivo.

Recomendaciones

1. Mejorar la seguridad operativa, explorando la implementación de una jaula de Faraday o un recubrimiento metálico conductor en la cubierta acrílica, con el fin de reducir la radiación electromagnética y las posibles interferencias generadas durante la simulación del arco eléctrico.
2. Optimizar los materiales estructurales, sustituyendo las piezas críticas actualmente fabricadas en PLA por plásticos de mayor resistencia térmica y mecánica, como ABS o Nylon 6PA, que soporten mejor las temperaturas y esfuerzos generados durante el funcionamiento continuo del banco de pruebas.
3. Ampliar la instrumentación de medición, incorporando sensores de corriente, voltaje y temperatura conectados a un sistema de adquisición de datos. Esto permitirá obtener registros cuantitativos en tiempo real, mejorar el análisis del fenómeno de arco eléctrico y validar experimentalmente los modelos teóricos utilizados.
4. Establecer protocolos formales de seguridad, que incluyan restricciones de uso para personas portadoras de marcapasos o dispositivos médicos sensibles, delimitación de áreas seguras, procedimientos de encendido y apagado, así como lineamientos de mantenimiento preventivo para asegurar la integridad de los operadores y equipos.
5. Potenciar la aplicación comercial y educativa del banco de pruebas, replicando el prototipo en otras sedes de Zona Solar y utilizándolo en ferias tecnológicas, programas de capacitación para técnicos e ingenieros, y procesos demostrativos de venta. Además, se sugiere desarrollar una versión portátil y modular que facilite su transporte y montaje en entornos académicos y de exhibición.

Bibliografía

- Al Qabbani, G. (2021). *Tests of Series Arcing and Arc Fault Detection Devices in Low Voltage Systems* (Dissertation).
<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-301621>
- Abubakar, A., Almeida, C. F. M., & Gemignani, M. (2021). Review of Artificial Intelligence-Based Failure Detection and Diagnosis Methods for Solar Photovoltaic Systems. *Machines*, 9(12), 328.
<https://doi.org/10.3390/machines9120328>
- Arias, C. A. C., Rairan, F. S. G., Calderón, I. A., & Vargas, Ó. E. G. (2020). Design of a Troubleshooting Digital Test Bench for the Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 and 350 Aircraft GCU. *Ingeniería*, 25(3), 393–409.
<https://doi.org/10.14483/23448393.16903>
- Arduino. (2025). *Placa Arduino UNO R3* [Fotografía]. Arduino.
<https://laelectronica.com.gt/arduino-uno-rev3?srsId=AfmBOop3L5SQMRfUkdN-HzoZ7IzOgZdtQJYQ0VGjrwYyW8quFWYcYsZJ>
- Artale, G., Caravello, G., Cataliotti, A., Cosentino, V., Di Cara, D., Guaiana, S., Panzavecchia, N., & Tinè, G. (2021). Characterization of DC series arc faults in PV systems based on current low frequency spectral analysis. *Measurement*, 182, 109770.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109770>
- Budynas, R. G. (2018). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A.
- Cardona, L. (octubre de 2011). *Modelado y control de posición de una unidad de CD para aplicaciones en microscopía óptica*. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/225077669_Modelado_y_control_de_posicion_de_una_unidad_de_CD_para_aplicaciones_en_microscopia_optica
- Dang, H., Kwak, S., & Choi, S. (2022). Parallel DC Arc Failure Detecting Methods Based on Artificial Intelligent Techniques. *IEEE Access*, 10, 26058–26067.
<https://doi.org/10.1109/access.2022.3157298>
- Daza, J. E. Z., González-Montoya, D., Bravo, E. E. H., Ramos-Paja, C. A., & Aponte-Roa, D. A. (2021). Plataforma de prototipos de control rápido para sistemas fotovoltaicos basados en Arduino y Simulink. *Revista EIA*, 18(36).
<https://doi.org/10.24050/reia.v18i36.1470>
- Domínguez, H. (2021). *Diseño y fabricación de la estructura de un banco de pruebas para motores de combustión interna* (MCI).
<https://hdl.handle.net/10901/19115>
- Dzhavatov, D., Uryupin, A., Kiselev, S., & Beloglazov, A. (2022). Analysis of the Influence of Arc Volt-Ampere Characteristics on Various Loads and Methods for Detecting Series Arc Faults. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 15(4), 166–172.
<https://doi.org/10.25103/jestr.154.23>

- Eduardo, Q. C., De València Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática - Departament D'Enginyeria de Sistemes I Automàtica, U. P., & De València Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño - Escola Tècnica Superior D'Enginyeria del Disseny, U. P. (2023, 26 septiembre). *Diseño de un método usando técnicas de inteligencia artificial y machine learning con Matlab para el mantenimiento y diagnóstico de fallos en paneles solares*. <http://hdl.handle.net/10251/197009>
- International Energy Agency. (2025). *Electricity Mid-Year Update 2025*. International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cc64f0aa-30e4-4497-9cca-1ffae2c55fe5/ElectricityMid-YearUpdate2025.pdf>
- International Standard Organization. (abril de 2010). *ISO 286 - Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes*.
- Inversiones R.M. S.A. (2025). *Cotización de plásticos de ingeniería*. Documento no publicado.
- Inversiones R.M. S.A. (2025). *Ficha técnica de Nylon 6PA Natural (Ertalon)*.
- Li, X., Pan, C., Luo, D., & Sun, Y. (2020). Series DC Arc Simulation of Photovoltaic System Based on Habedank Model. *Energies*, 13(6), 1416. <https://doi.org/10.3390/en13061416>
- Maggiore, P. (2021). *Development of an experimental test bench for the validation of prognostic algorithms for electromechanical actuators*. Webthesis. <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/20007>
- Nosotros | Zona Solar S.A. (s. f.). *Zona Solar S.A.* <https://www.zona-solar.com/nosotros>
- Romero-Piedrahita, C., Rodríguez-Valencia, A., & Monroy-Jaramillo, M. (2020). Ensamble e instrumentación de un banco didáctico para pruebas de arranque en motores de combustión interna. *Revista UIS Ingenierías*, 19(3), 37–48. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n3-2020004>
- Rúa-Ramírez, E., Mendoza-Jiménez, I., Torres-Suarez, E., Flórez-Serrano, E., & Serrano-Rico, J. (2021). Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2). <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021001>
- Sanchez, L. M., Jiménez, D. S., Valenzuela, M. R. C., & Jalil, J. M. N. (2024). Safety in Photovoltaic Systems Applied to Electric Arc. *DYNA*, 99(4), 343. <https://doi.org/10.52152/11204>
- Thermal Imaging and AI in Solar Panel Defect Identification. (2024). *International Journal of Advanced Engineering Technologies and Innovations*, 1(3), 73–95. <https://ijaeti.com/index.php/Journal/article/view/230>
- Underwriters Laboratories (UL). (2018). *UL 1699B, Standard for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection*. Underwriters Laboratories (UL).

Anexo A: Carta de aceptación de prototipo

Fuente: (Ajin, 2025)

Anexo B: Carta de aceptación pruebas finales



Guatemala, 23 de octubre del 2025

A quien corresponda:

Por este medio hacemos constar que **Herbert de la Cruz**, quien actualmente desarrolla su proyecto de graduación en colaboración con nuestra empresa, se presentó en nuestras instalaciones el martes 19 de agosto para realizar las pruebas finales del prototipo de estructura para arcos eléctricos.

Estas pruebas se llevaron a cabo con el objetivo de verificar el funcionamiento del prototipo, y los resultados obtenidos fueron **satisfactorios**, cumpliendo con los criterios establecidos para esta etapa.

Agradecemos su aporte al desarrollo del proyecto.

Atentamente,



Roberto Carlos Ajin
Pre&post-sales coordinator
Zona Solar

 zona-solar.com

 info@zona-solar.com

 @zona-solar

(Ajín, 2025)

Anexo C: Código programación Arduino

```
#include <IRremote.h>
#define STEP_PIN 9 // Pin del Arduino conectado a STEP en el shield
#define DIR_PIN 8 // Pin del Arduino conectado a DIR en el shield
#define ENABLE_PIN 7 // Pin que activa o desactiva el driver
#define Boton_1 0xF807FF00 // Código infrarrojo del botón 1
#define Boton_2 0xF609FF00 // Código infrarrojo del botón 2
int bloqueo = 0; // Variable que impide ejecutar el mismo movimiento dos veces seguidas
int SENSOR = 2; // Pin del sensor infrarrojo

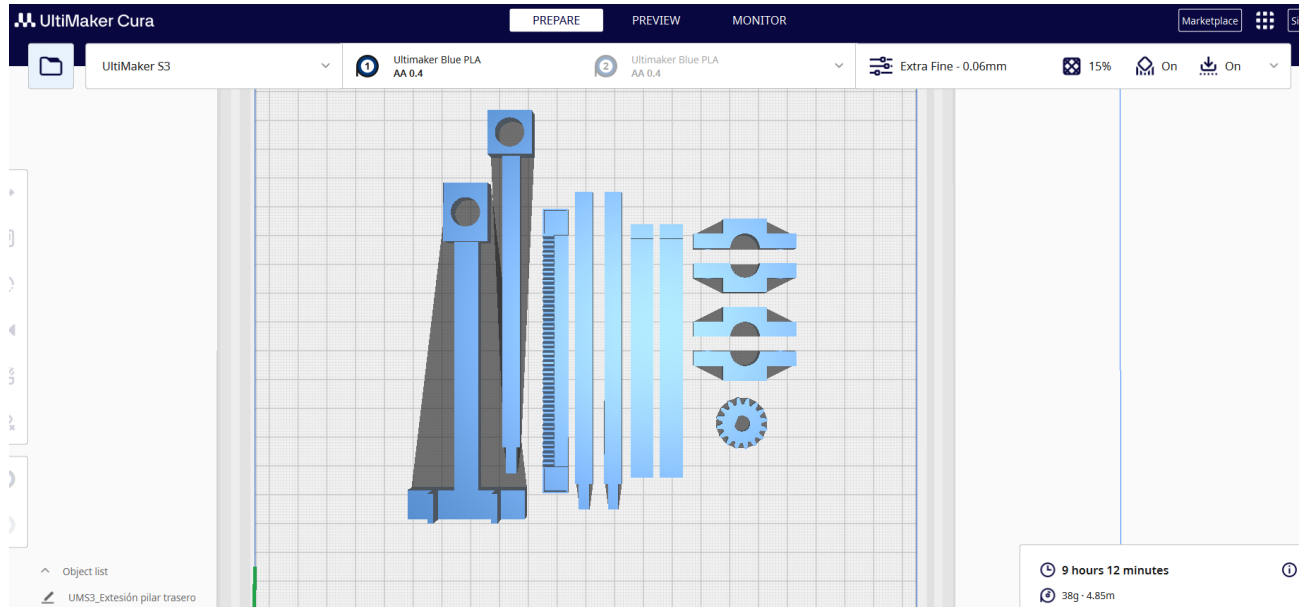
void setup() {
  Serial.begin(9600); // Inicia la comunicación serie para depuración
  IrReceiver.begin(SENSOR, DISABLE_LED_FEEDBACK); // Inicializa el receptor IR sin LED indicador
  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW); // Activa el driver (si está conectado)
}

void loop() {
  if (IrReceiver.decode()) {
    if (IrReceiver.decodedIRData.decodedRawData == Boton_1 && bloqueo == 0){ // si codigo recibido es igual a Boton_1
      Serial.println("Izquierda");
      digitalWrite(DIR_PIN, HIGH); // Define el sentido de rotación (HIGH = izquierda)
      for (int i = 0; i < 800; i++) {
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH); // Activa un paso
        delayMicroseconds(1000); // Espera 1 ms
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW); // Termina el paso
        delayMicroseconds(1000); // Espera otro ms
      }
      bloqueo = 1; // Cambia el estado de bloqueo
      Serial.println(bloqueo);
    }

    if (IrReceiver.decodedIRData.decodedRawData == Boton_2 && bloqueo == 1){ // si codigo recibido es igual a Boton_2
      Serial.println("Derecha"); // Cambia la dirección de rotación
      digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
      for (int i = 0; i < 800; i++) {
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
        delayMicroseconds(1000);
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
        delayMicroseconds(1000);
      }
      bloqueo = 0;
      Serial.println(bloqueo);
    }
    IrReceiver.resume(); // Reactiva el receptor IR para recibir nuevas señales
  }
  delay (1000); // Espera 1 segundo antes de la siguiente lectura (protección o estabilidad)
}
```

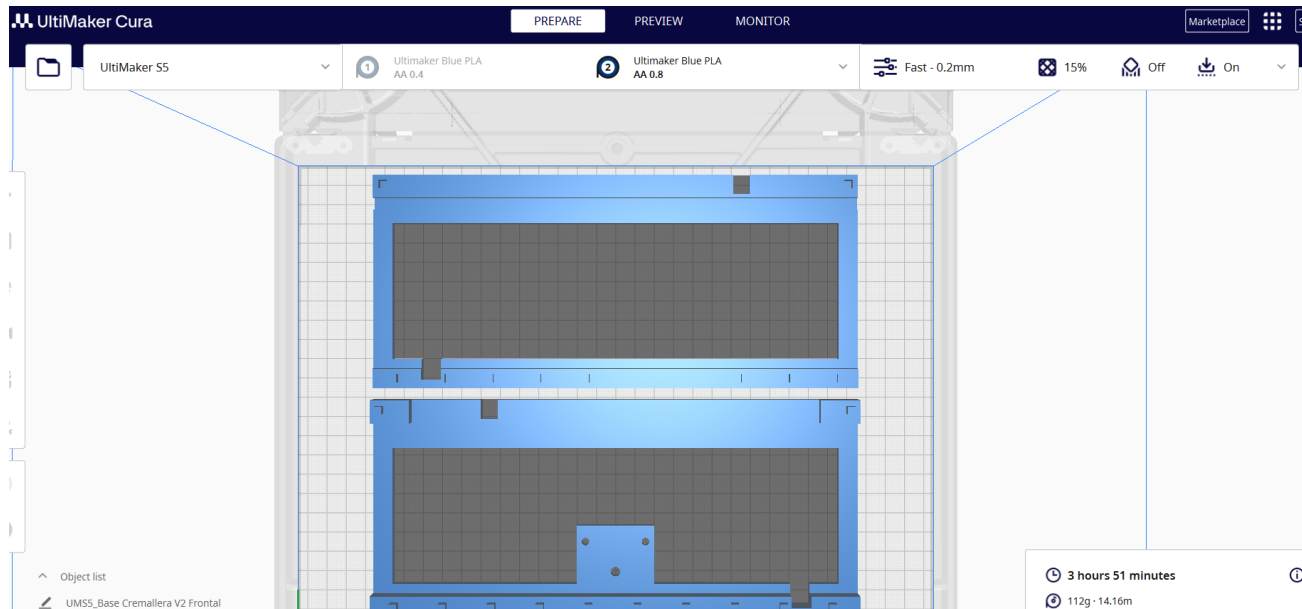
Fuente: Elaboración propia.

Anexo D: Parámetros impresión ultrafina



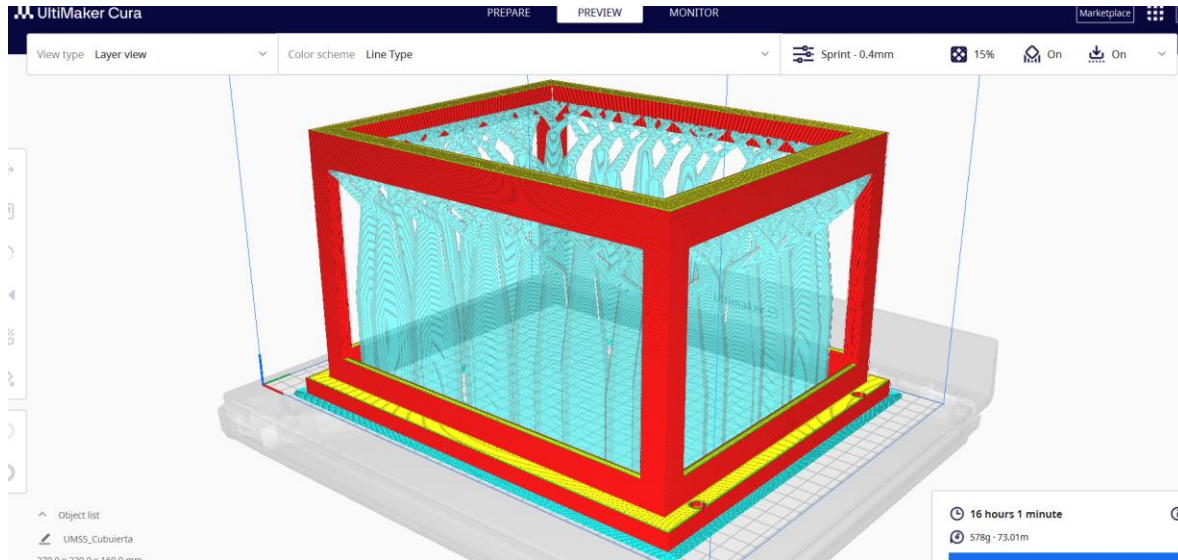
Captura de pantalla reimpresas por cortesía de *Ultimaker Cura, Inc.*
Fuente: *Elaboración propia.*

Anexo E: Parámetros impresión base cremallera



Captura de pantalla reimpresas por cortesía de *Ultimaker Cura, Inc.*
Fuente: *Elaboración propia.*

Anexo F: Parámetros impresión cubierta



Captura de pantalla reimprimas por cortesía de *Ultimaker Cura, Inc.*
Fuente: Elaboración propia.

NYLON 6PA NATURAL

Poliamida 6/6

También conocido como: Ertalon®

Por su combinación de propiedades mecánicas se utiliza ampliamente en la industria. El Nylon 6 posee alta resistencia a la compresión y resistencia al impacto, y es un excelente material para piezas que necesiten resistencia a la corrosión. Es un material liviano y está aprobado para trabajar con contacto con alimentos por FDA.

Aplicaciones:

- Siendo un material es muy versátil se puede utilizar para las siguientes aplicaciones: cojinetes, bujes, engranajes, poleas, placas de desgaste, sellos, sprockets, y componentes en la industria alimenticia.

Propiedades:

PROPIEDAD	MÉTRICO	INGLÉS
Densidad	1.17 g/cm ³	73 lb/ft ³
Resistencia a la tensión	69 - 93 MPa	10 - 13.50 ksi
Elongación	20 - 55%	20 - 55%
Resistencia a la compresión	93 - 110 MPa	13.5 - 16 ksi
Resistencia a la flexión	106 - 120 MPa	15.5 - 17.5 ksi
Resistencia al corte	69 76 MPa	10 - 11 ksi
Dureza (Shore D)	78 - 83	78 - 83
Temperatura de fusión	232±10 °C	450±10 °F
Temperatura de deflexión (264 psi)	93 - 204 °C	200 - 400 °F
Temperatura de deflexión (66 psi)	204 - 221 °C	400 - 430 °F
Temperatura de servicio (Continuo)	110 °C	230 °F
Temperatura de servicio (Intermitente)	165 °C	330 °F
Coefficiente de fricción Dinámica	0.22	0.22
Absorción de agua (24 hrs)	0.5 - 0.6 %	0.5 - 0.6 %
Absorción de agua (Saturación)	4.0 - 6.0 %	4.0 - 6.0 %
Resistencia Dieléctrica	500 - 600 v/mil.	500 - 600 v/mil.

Disponibilidad:

- Barra redonda
- Placa

*Otras presentaciones disponibles en importación express.

** La información aquí presentada se basa en las normas internacionales que rigen estas aleaciones. Estos datos se entregan únicamente como referencia por lo que su correcta interpretación y utilización es responsabilidad del lector.

(502) 2329.8900 | ventas@tecniaceros.com 23 ave. 31-53 zona 12 Colonia Santa Elisa,
www.tecniaceros.com Guatemala

Fuente: (Inversiones R.M. S.A., 2025)

Anexo H: Cotización plásticos de ingeniería

TECNIACEROS®

ABRATEC

HARDOX®
WEARPARTS

INVERSIONES R. M., S. A.

NIT: 784958-3

**Sujeto a pagos trimestrales ISR*

**Agente de Retención del IVA*

Horario de atención:

Lunes a viernes de 07:00 a 16:30
(sin cerrar al medio día)

Cliente: Universidad del Valle de Guatemala

Teléfono: 23688309

Contacto: Edgar René Castillo

Email: ercastillo@uvg.edu.gt

Condición de pago: Crédito 30 Días

NIT: 1751758-3

Fecha: 24/4/2025

Válido hasta: 27/4/2025

Tipo de Cambio: Q1.00

Moneda: QTZ

Tiempo de Entrega:

Inmediato (*excepto anotación específica*)

Cotización 20234633

#	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UM	PRECIO UM	CANTIDAD U	TOTAL
1	SPL01090004	PLANCHA ERTALON 10 mm X 300mm X 1000mm 1 PLANCHA // ENTREGA INMEDIATA	PULGADA2	Q1.60000	484.64	Q775.42
2	SPL07090001	PLANCHA (CN) PLASTICO DE INGENIERIA UHMW-PE (BLACK) 12 mm X 1250 mm 1 PLANCHA // ENTREGA INMEDIATA	PULGADA2	Q2.20000	605.95	Q1,333.09
3	SPL05090004	PLANCHA (CN) PLASTICO DE INGENIERIA TEFLON 1/2 " X 1000 mm 1 PLANCHA // ENTREGA INMEDIATA	PULGADA2	Q5.10000	484.64	Q2,471.66
					Total	Q 4,580.17

- Tolerancias dimensionales según norma.
- Tolerancia de corte: (-0/+20) mm según diámetro o espesor.
- Mayor información contactar a su asesor.

COMENTARIOS:

ASESOR: En Activación

Cheques a: **INVERSIONES R.M., S.A.**
Cotización sujeta a cambios y existencias.
Precios válidos por la cantidad cotizada.
Todos los precios incluyen IVA.

Compra desde donde estés con



NO SE ACEPTAN DEVOLUCIONES

Página 1 de 1

PARA SU COMODIDAD, AHORA ACEPTAMOS TARJETAS DE CRÉDITO Y DÉBITO

(Aplica recargo del 4% con tarjeta de crédito y 5% en CompraClick)



Fuente: (Inversiones R.M. S.A., 2025)

Anexo I: Encuesta de cumplimiento de requisitos

Guatemala, 23 de octubre de 2025

Encuesta de cumplimiento de requisitos

Prueba	Condición	Observación	Resultado
Movimiento piñón- cremallera	Separación lenta y controlada	Sistema realizó desplazamiento de forma correcta	Cumplido
Control remoto	Botón A = avance Botón B = retroceso	Sistema respondió adecuadamente	Cumplido
Lógica de seguridad	Dos comandos consecutivos iguales	Sistema bloqueó la acción	Cumplido



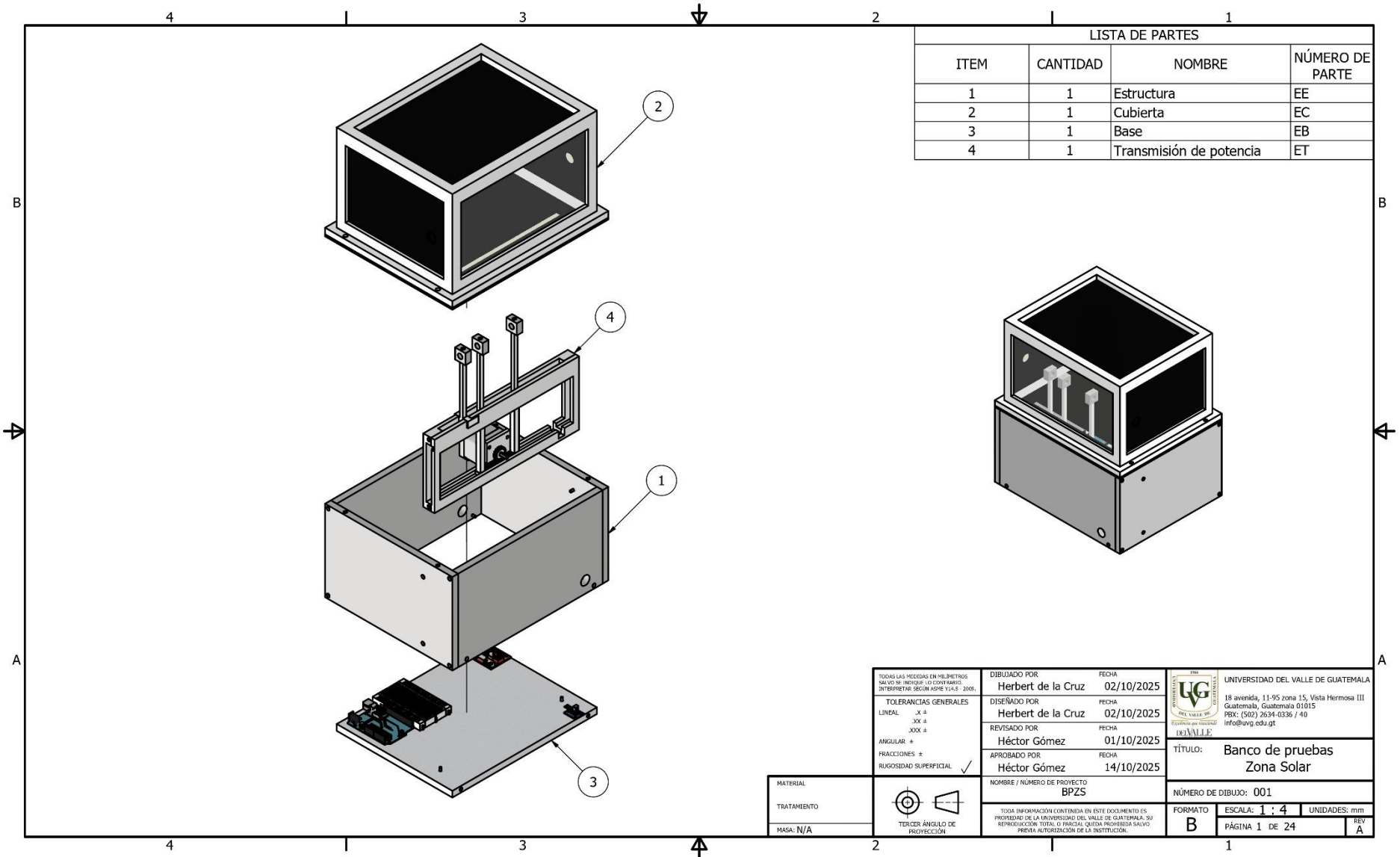
Roberto Carlos Ajin

Coordinador de pre&post-venta



Zona Solar

Fuente: Elaboración propia.

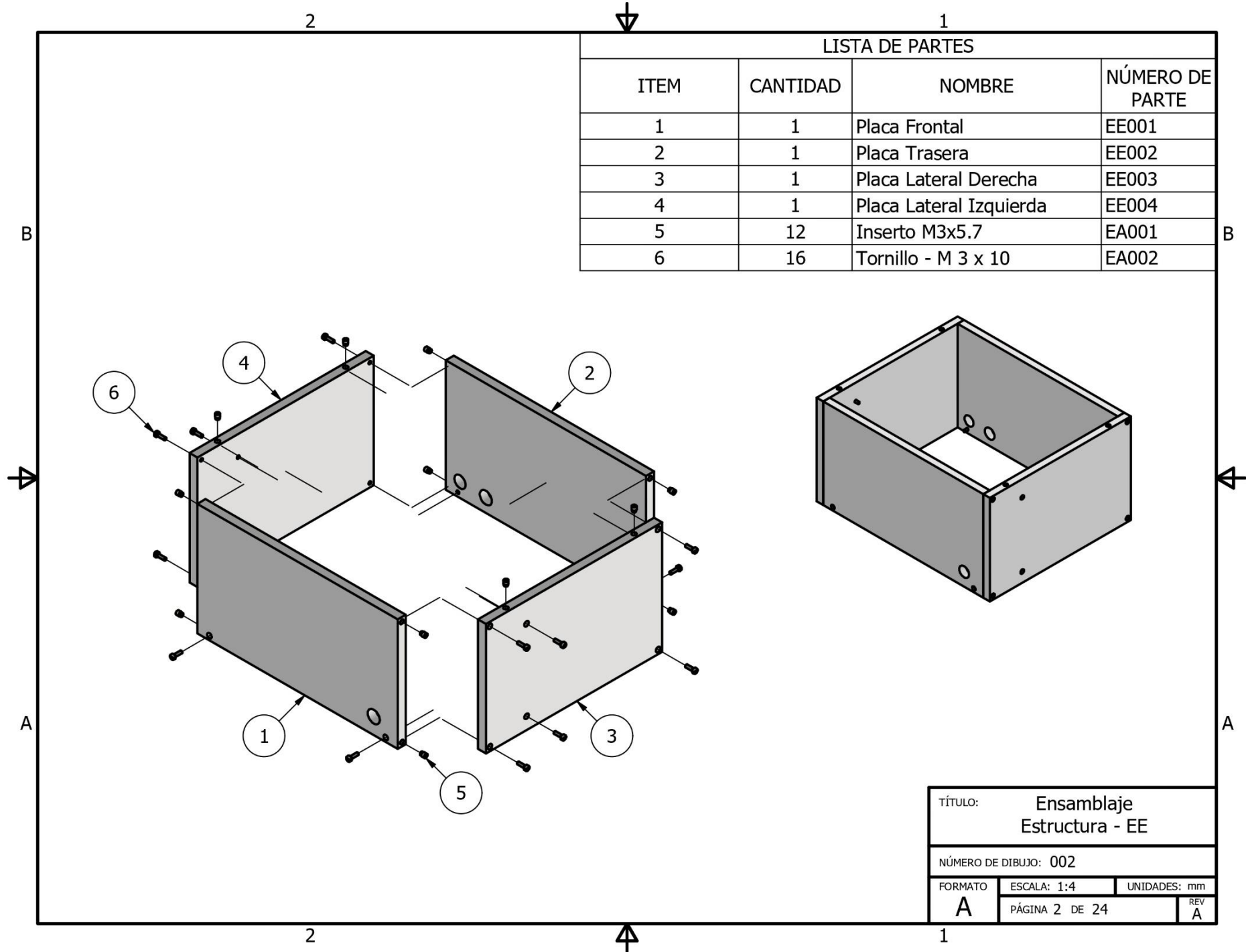
Anexo J: Planos mecánicos banco de pruebas Zona Solar



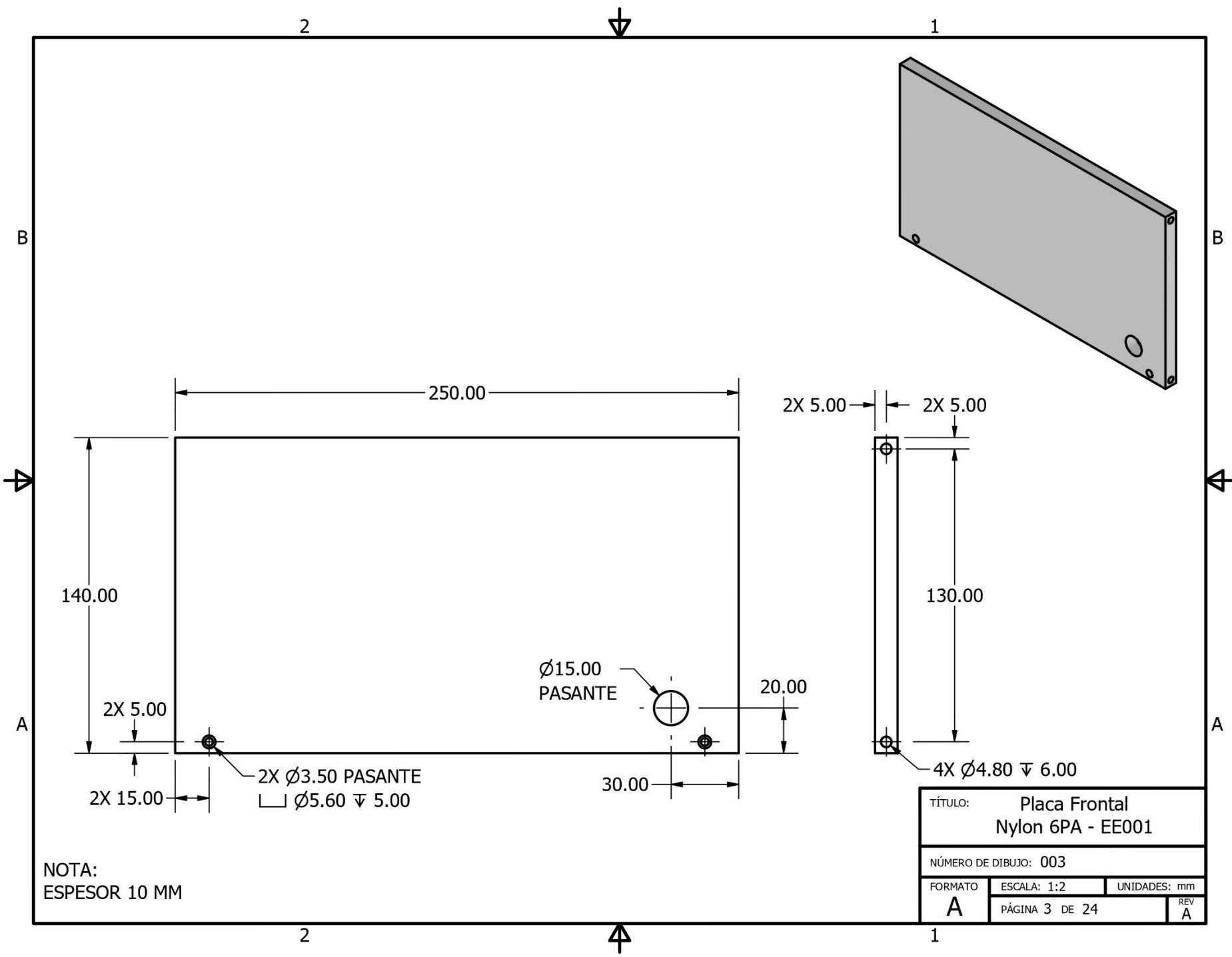
LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	NÚMERO DE PARTE
1	1	Estructura	EE
2	1	Cubierta	EC
3	1	Base	EB
4	1	Transmisión de potencia	ET

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SINO SE INDICARE LO CONTRARIO INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5-2009.	DIBUJADO POR Herbert de la Cruz	FECHA 02/10/2025	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt
	TOLERANCIAS GENERALES LINEAL .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR ± FRACCIONES ± RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓	DISEÑADO POR Herbert de la Cruz	
	REVISADO POR Héctor Gómez	FECHA 01/10/2025	TÍTULO: Banco de pruebas Zona Solar
	APROBADO POR Héctor Gómez	FECHA 14/10/2025	
MATERIAL TRATAMIENTO MASA: N/A	 TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO BPZS	NÚMERO DE DIBUJO: 001
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SIN SU PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.			FORMATO: B ESCALA: 1 : 4 UNIDADES: mm PÁGINA 1 DE 24 REV A

LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	NÚMERO DE PARTE
1	1	Placa Frontal	EE001
2	1	Placa Trasera	EE002
3	1	Placa Lateral Derecha	EE003
4	1	Placa Lateral Izquierda	EE004
5	12	Inserto M3x5.7	EA001
6	16	Tornillo - M 3 x 10	EA002

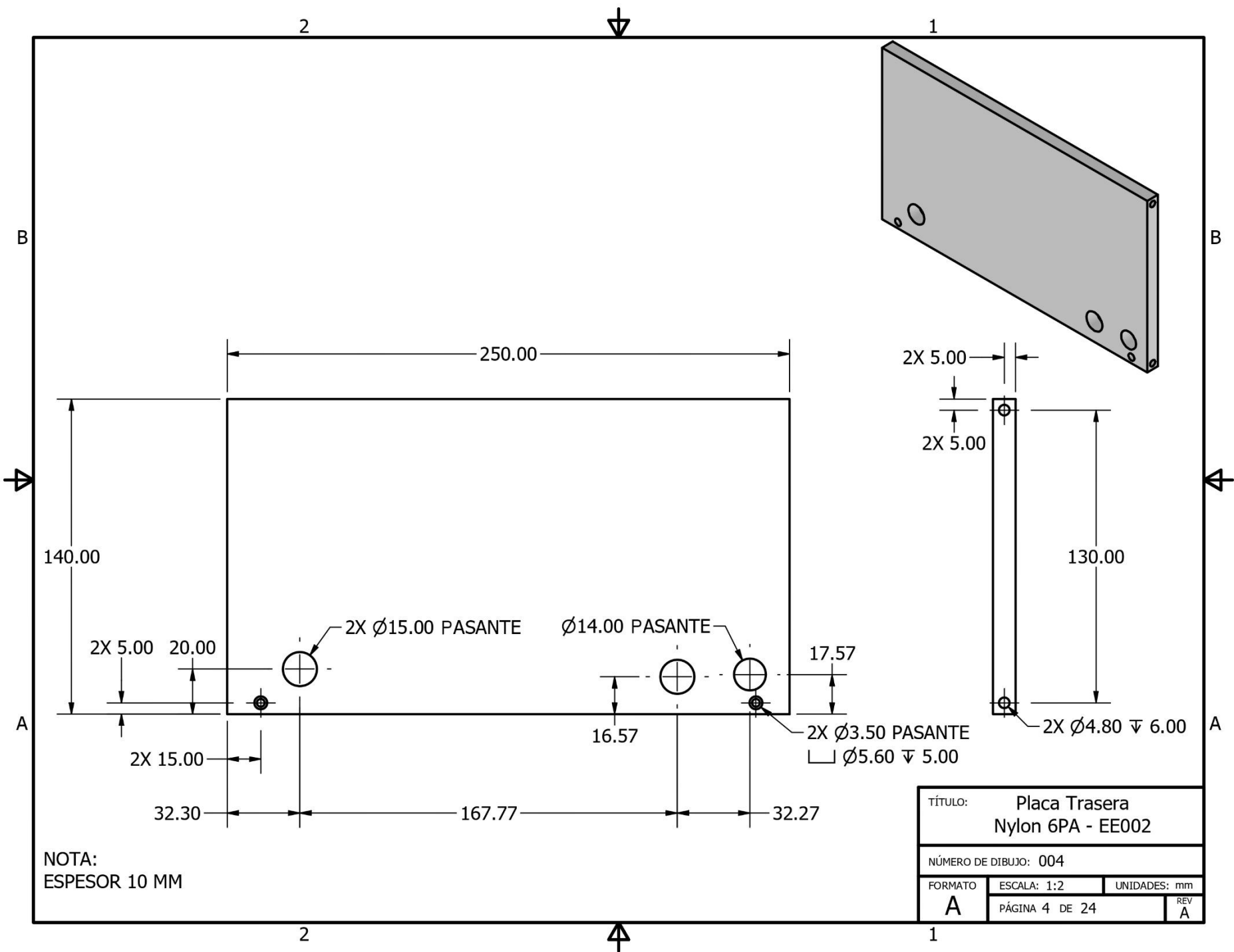


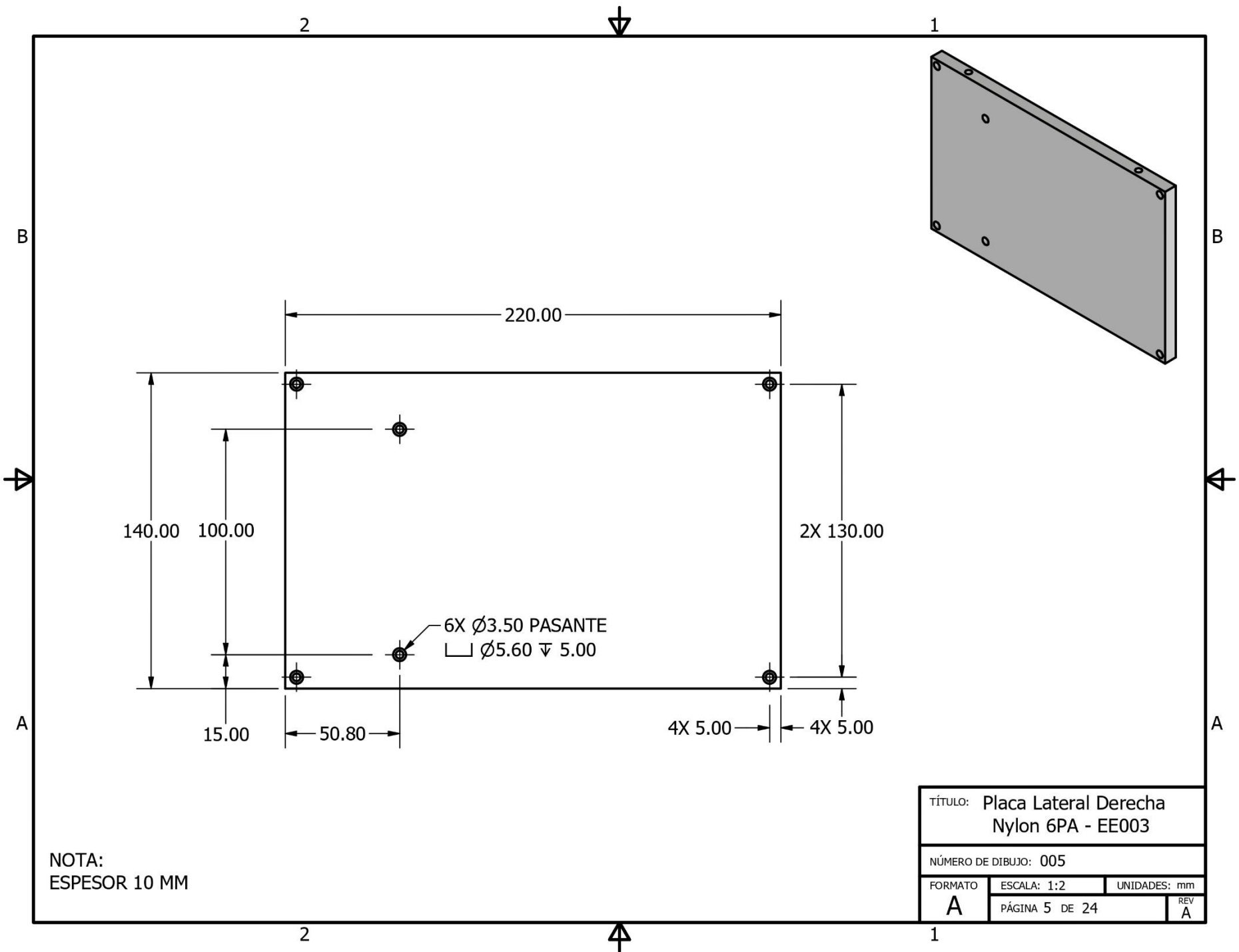
TÍTULO: Ensamblaje Estructura - EE		
NÚMERO DE DIBUJO: 002		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 2 DE 24	REV A



NOTA:
 ESPESOR 10 MM

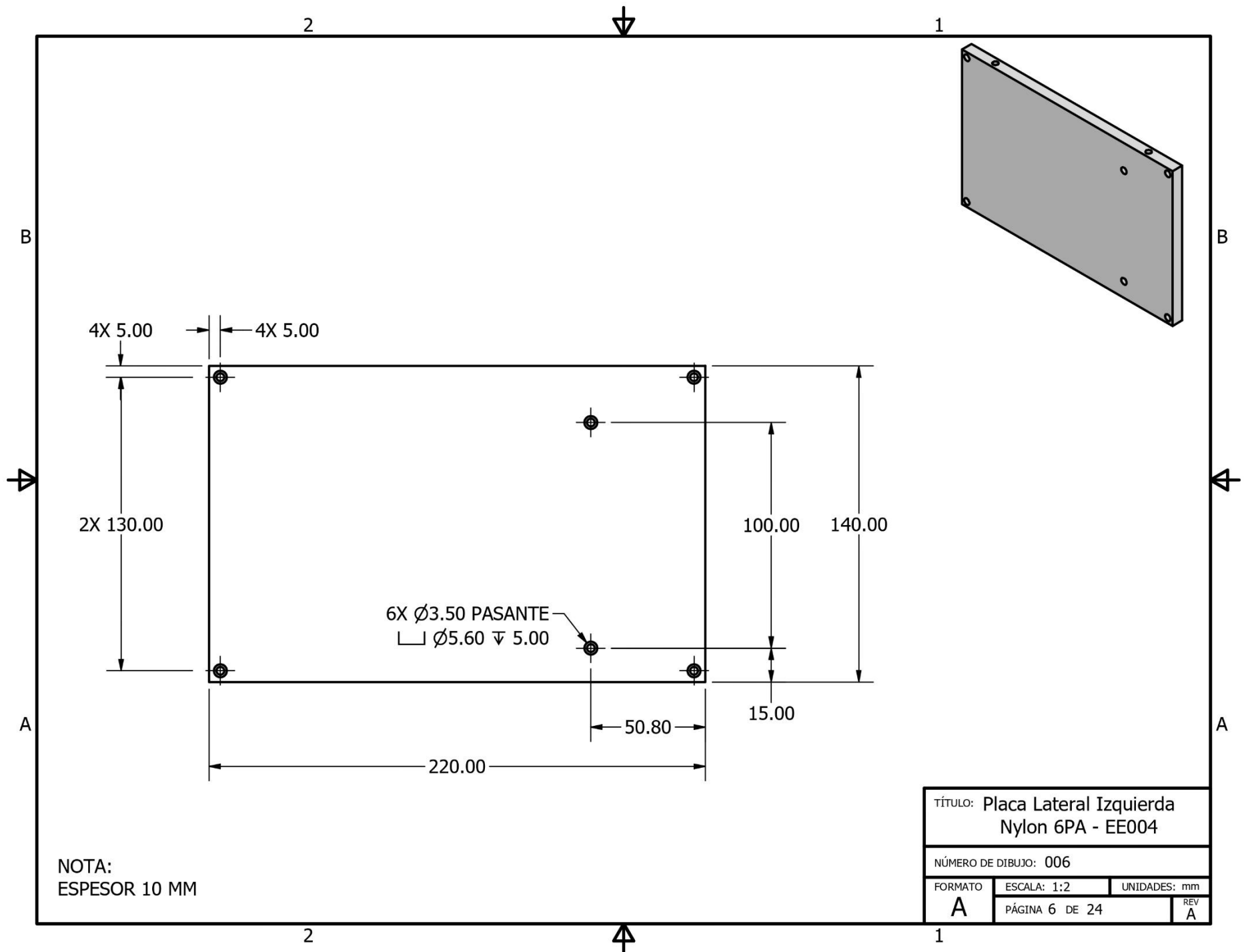
TÍTULO: Placa Frontal Nylon 6PA - EE001		
NÚMERO DE DIBUJO: 003		
FORMATO A	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
	PÁGINA 3 DE 24	REV A





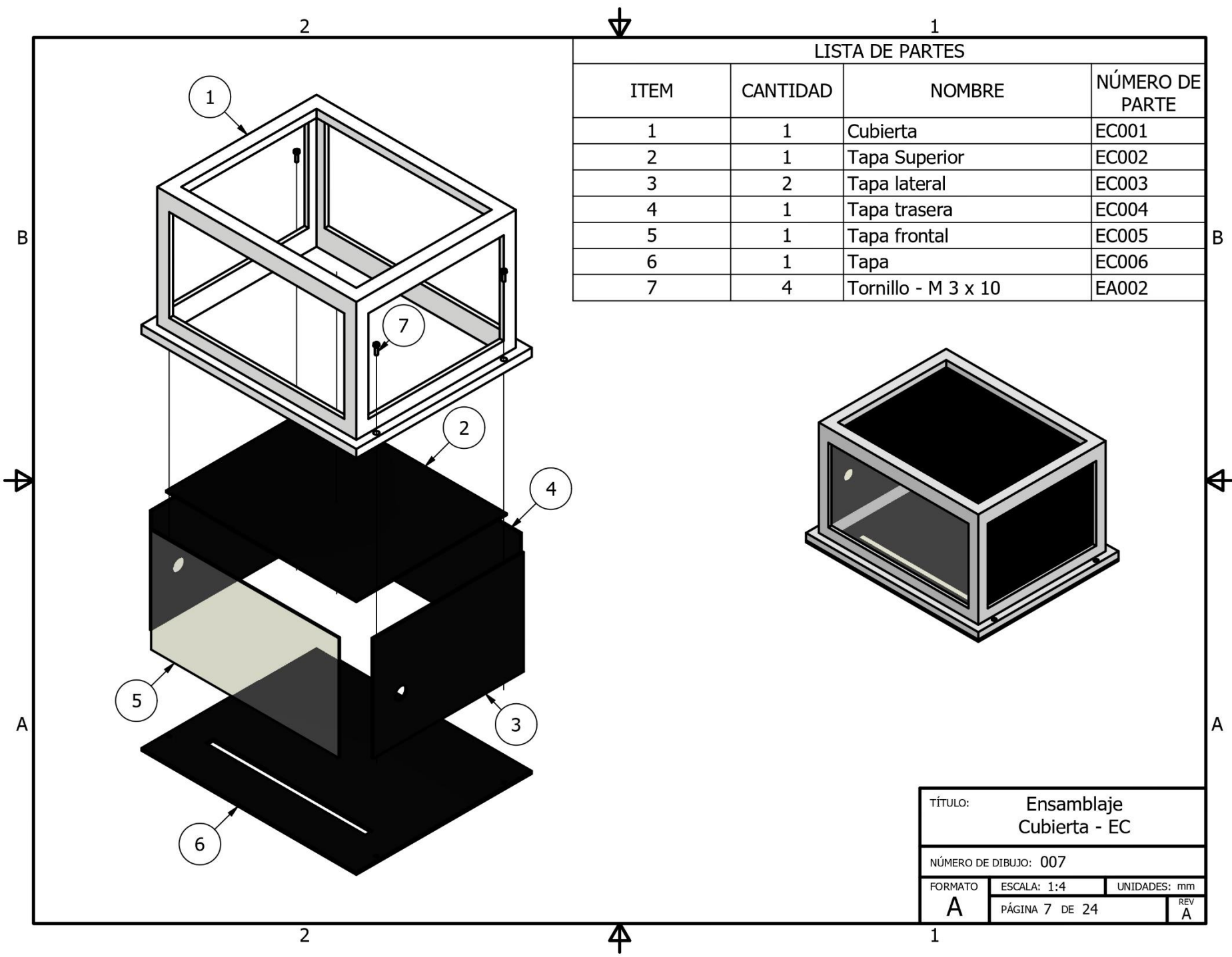
NOTA:
 ESPESOR 10 MM

TÍTULO: Placa Lateral Derecha Nylon 6PA - EE003		
NÚMERO DE DIBUJO: 005		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 5 DE 24	REV A

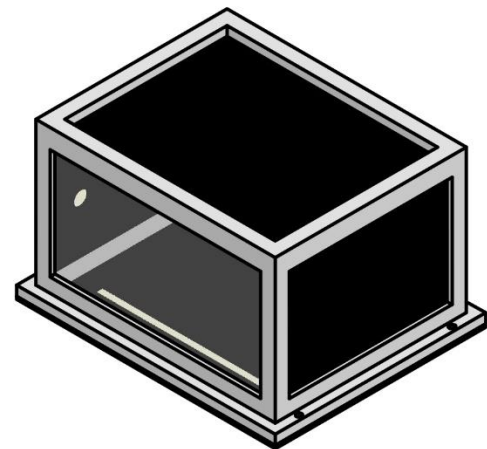


NOTA:
 ESPESOR 10 MM

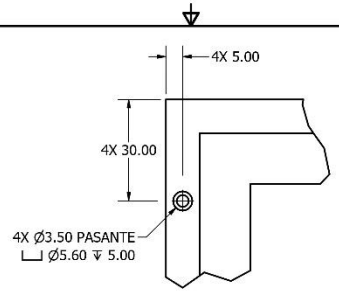
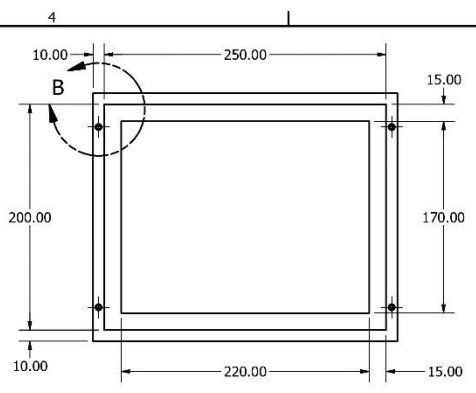
TÍTULO: Placa Lateral Izquierda Nylon 6PA - EE004		
NÚMERO DE DIBUJO: 006		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 6 DE 24	REV A



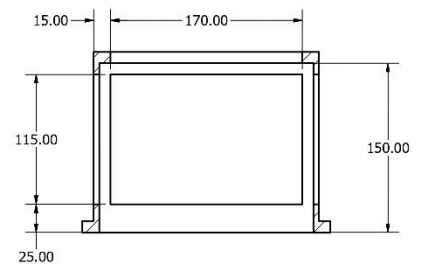
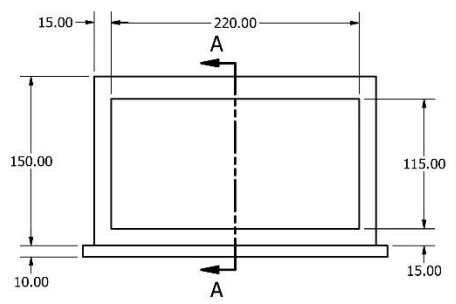
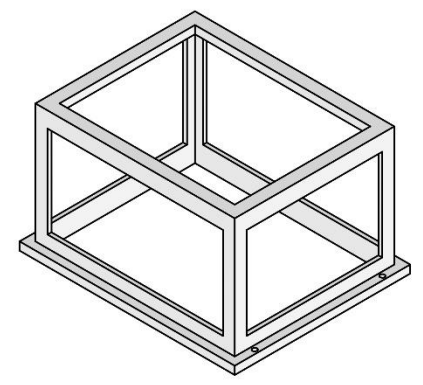
LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	NÚMERO DE PARTE
1	1	Cubierta	EC001
2	1	Tapa Superior	EC002
3	2	Tapa lateral	EC003
4	1	Tapa trasera	EC004
5	1	Tapa frontal	EC005
6	1	Tapa	EC006
7	4	Tornillo - M 3 x 10	EA002



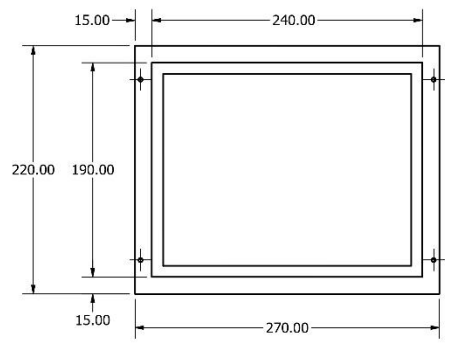
TÍTULO: Ensamblaje Cubierta - EC		
NÚMERO DE DIBUJO: 007		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 7 DE 24	REV A



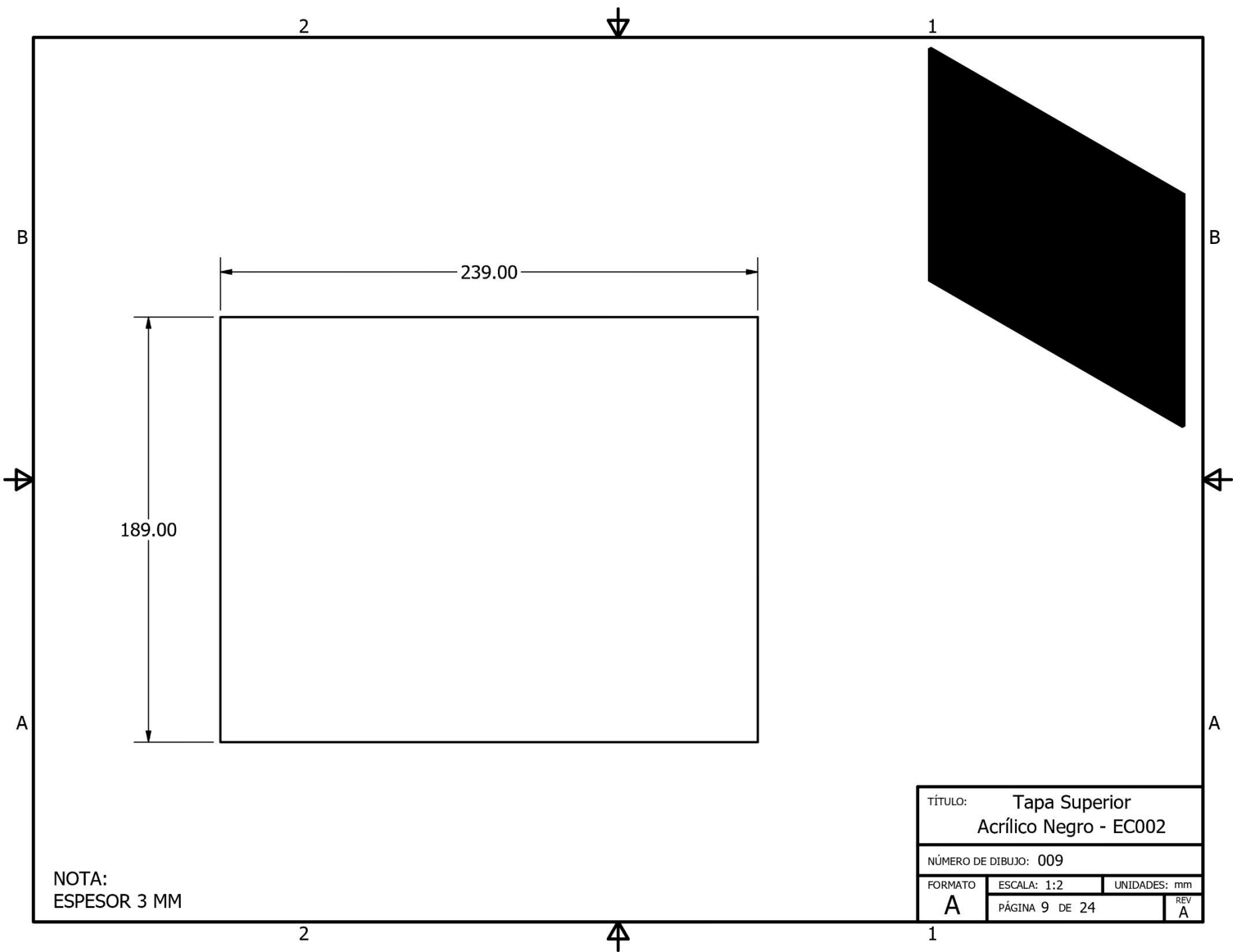
DETALLE B
ESCALA 1 / 1

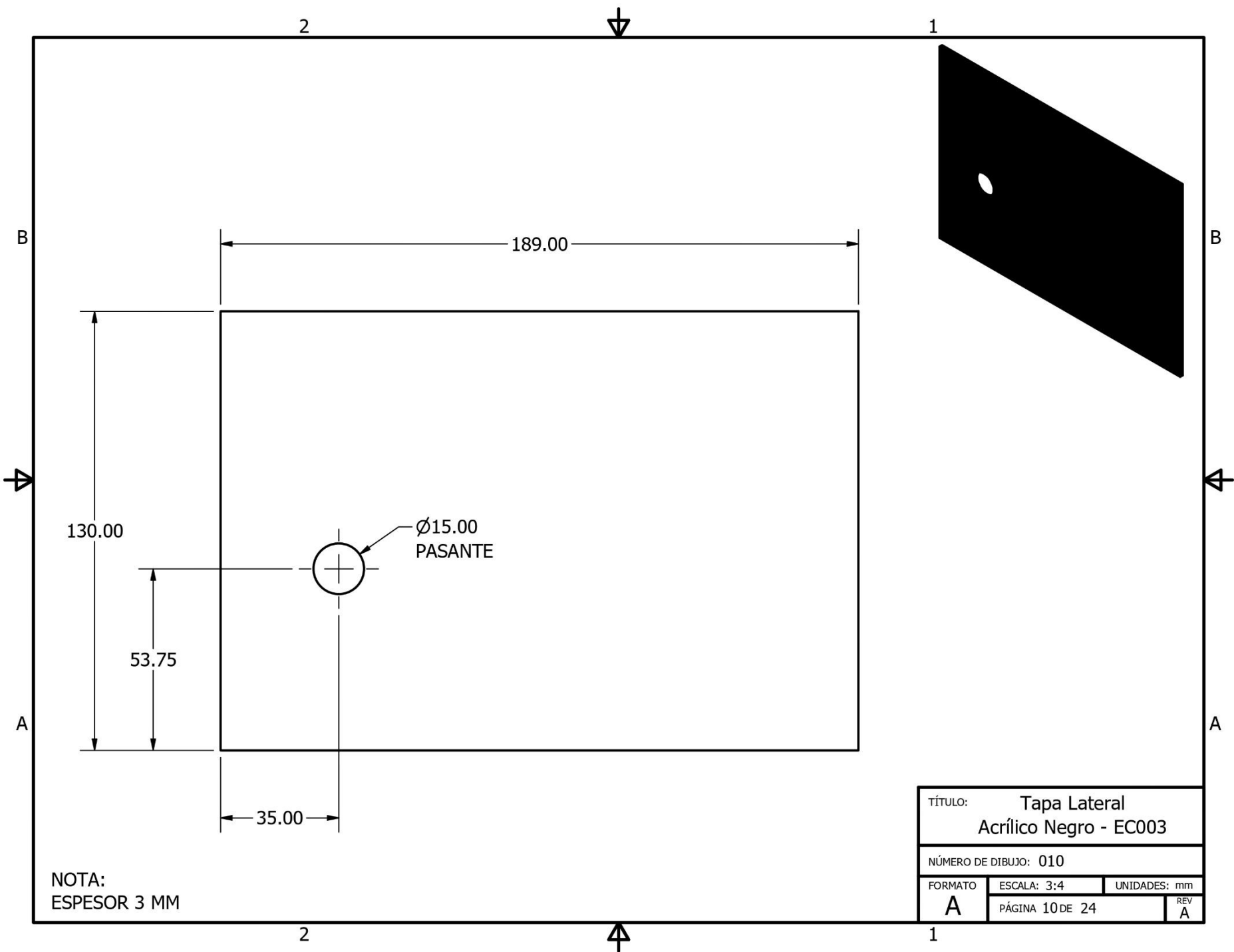


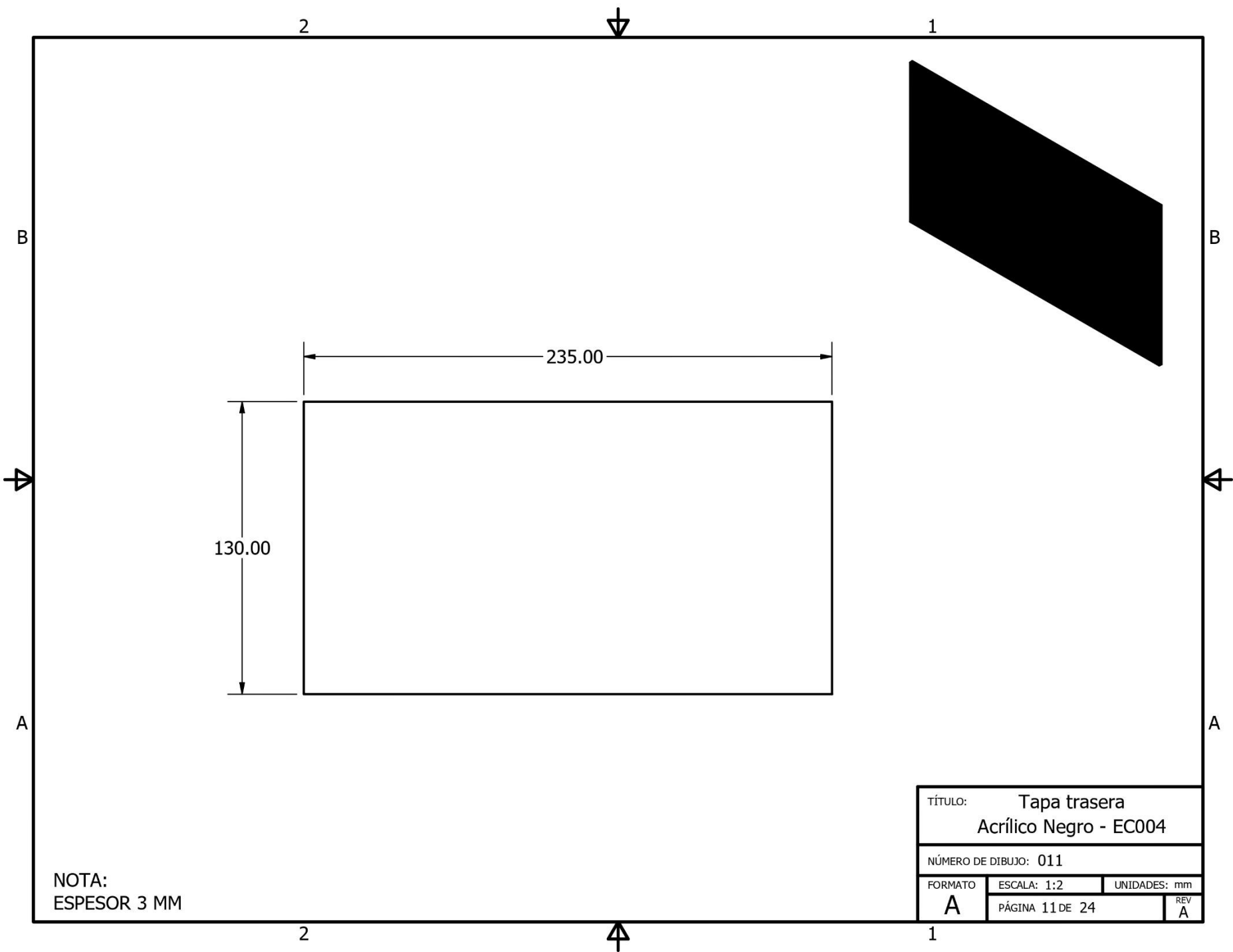
SECCIÓN A-A

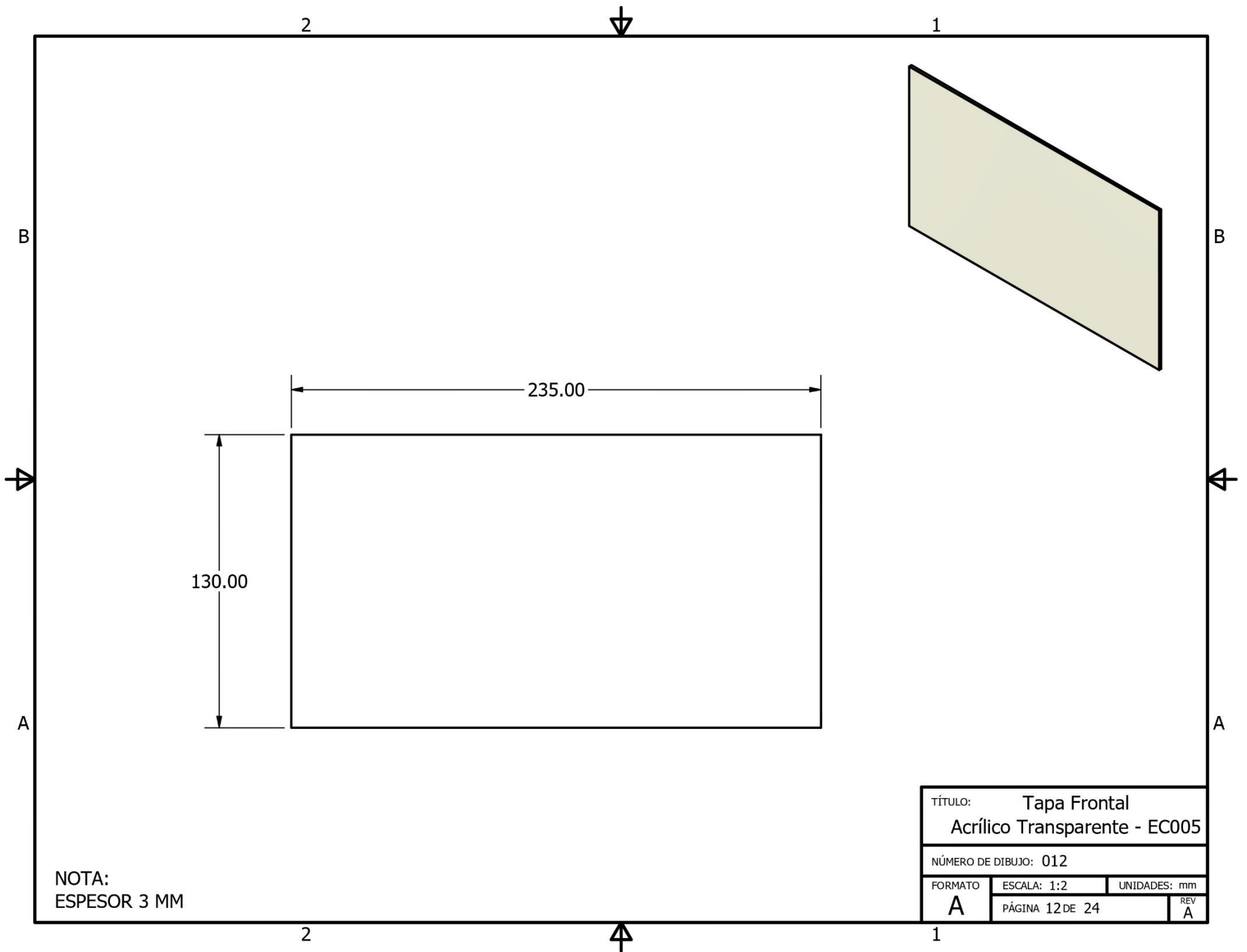


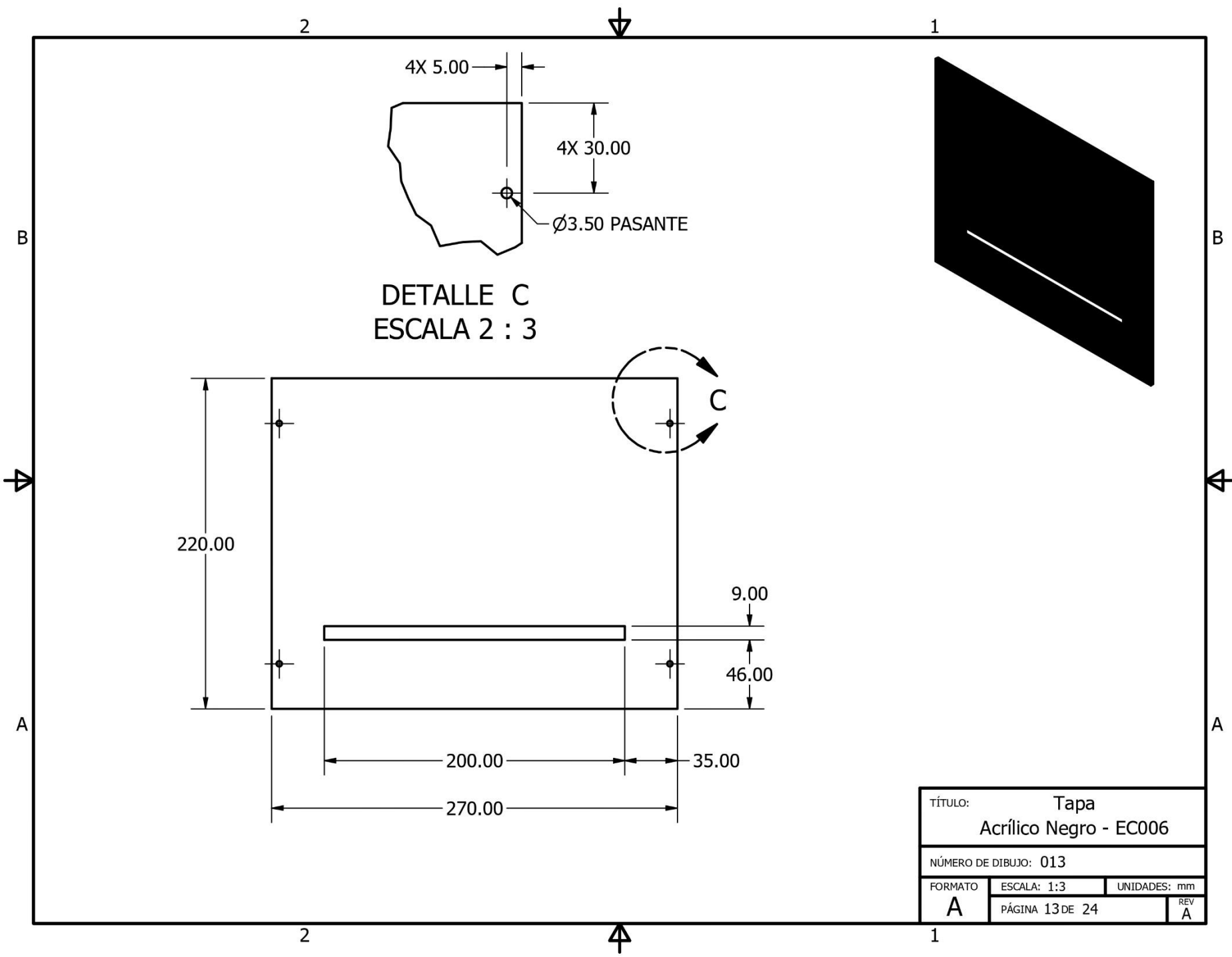
TÍTULO:		Cubierta PLA - EC001	
NÚMERO DE DIBUJO: 008			
FORMATO:	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	
C	PAGINA 8 DE 24		REV A







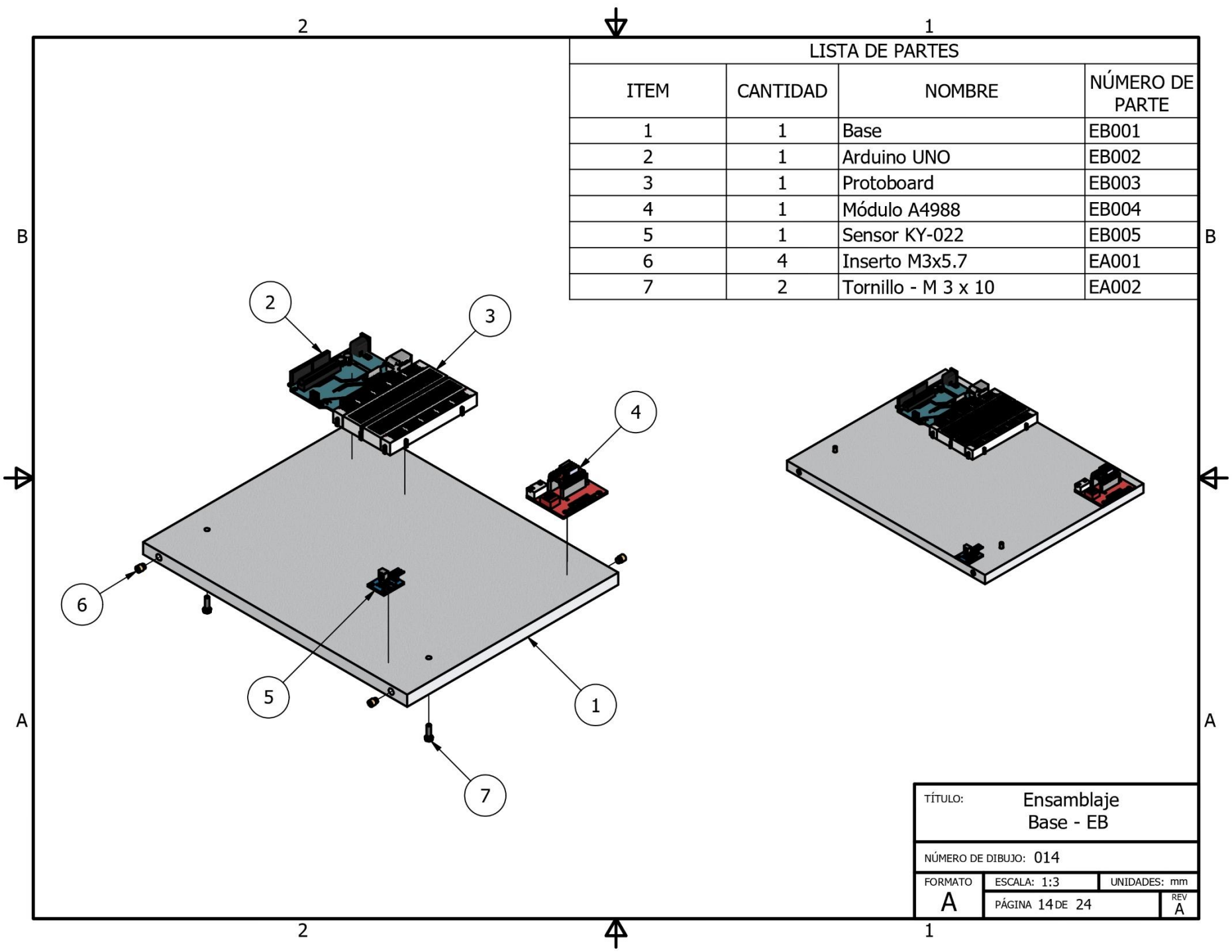




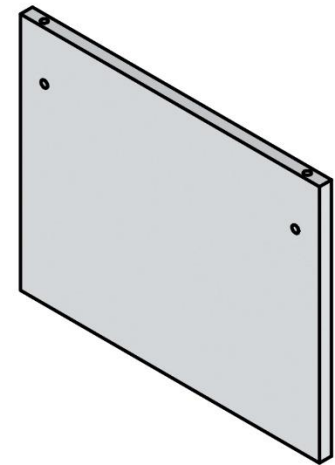
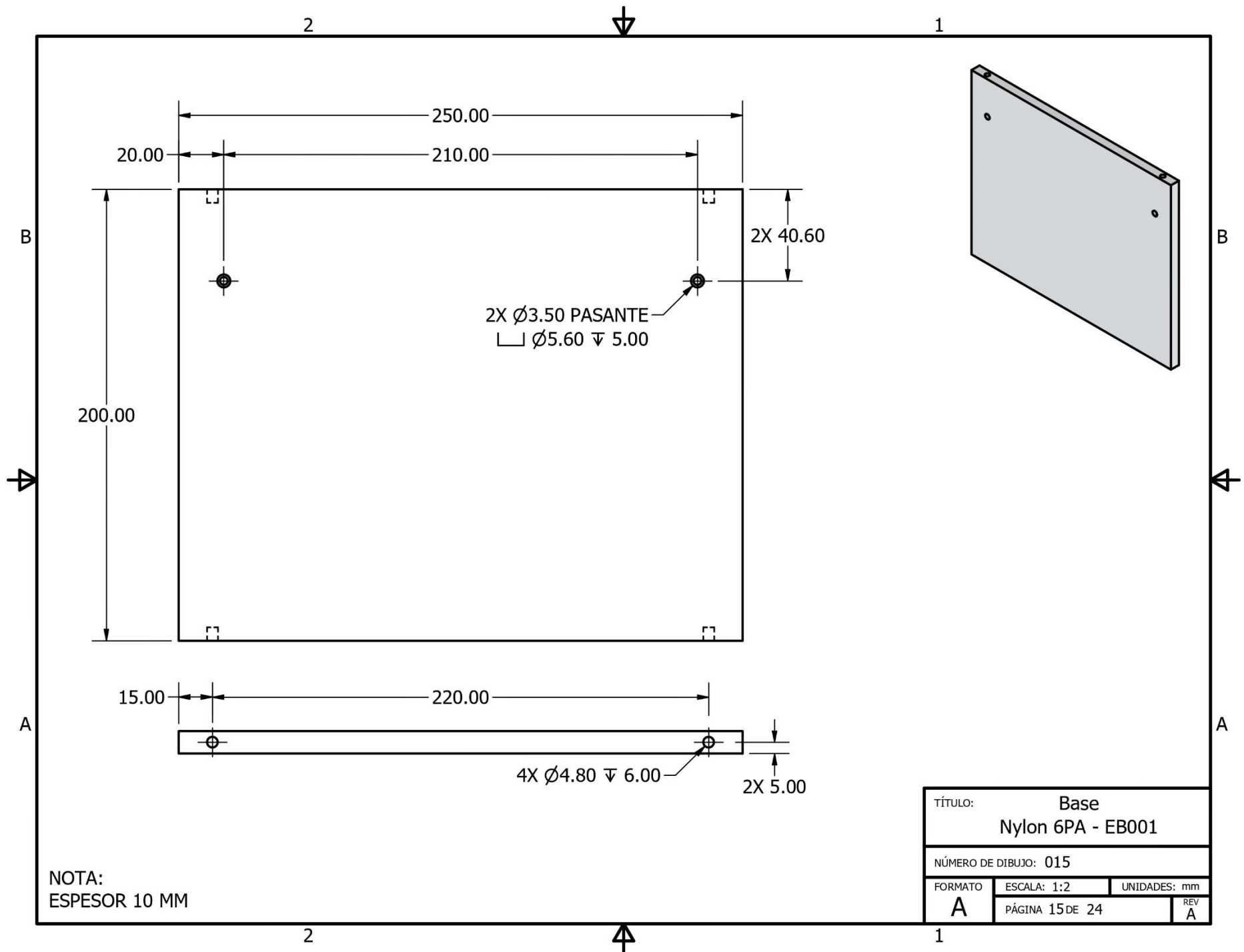
DETALLE C
ESCALA 2 : 3

TÍTULO:			Tapa
			Acrílico Negro - EC006
NÚMERO DE DIBUJO: 013			
FORMATO	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 13 DE 24	REV A	

LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	NÚMERO DE PARTE
1	1	Base	EB001
2	1	Arduino UNO	EB002
3	1	Protoboard	EB003
4	1	Módulo A4988	EB004
5	1	Sensor KY-022	EB005
6	4	Inserto M3x5.7	EA001
7	2	Tornillo - M 3 x 10	EA002

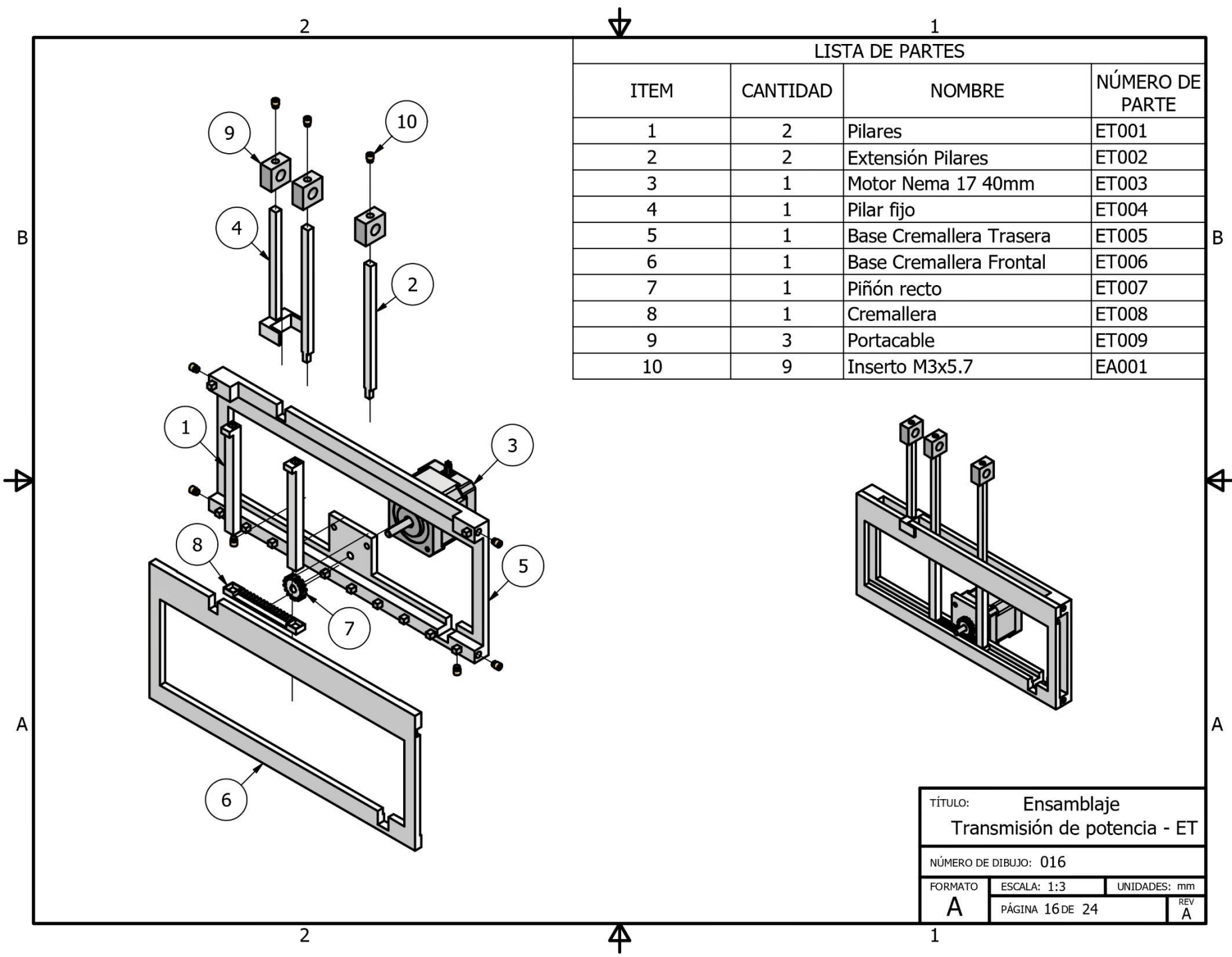


TÍTULO: Ensamblaje Base - EB		
NÚMERO DE DIBUJO: 014		
FORMATO	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 14 DE 24	REV A



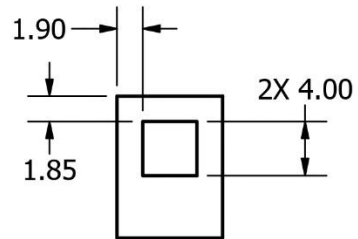
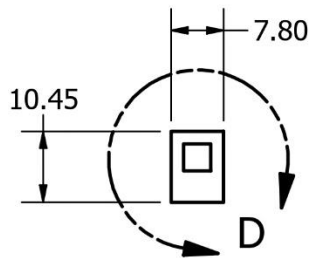
NOTA:
ESPESOR 10 MM

TÍTULO:		
Base Nylon 6PA - EB001		
NÚMERO DE DIBUJO: 015		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 15 DE 24	REV A

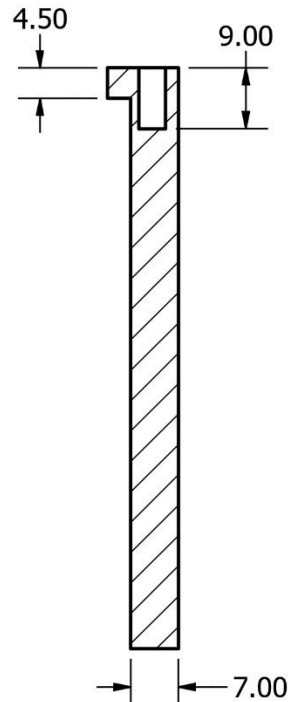
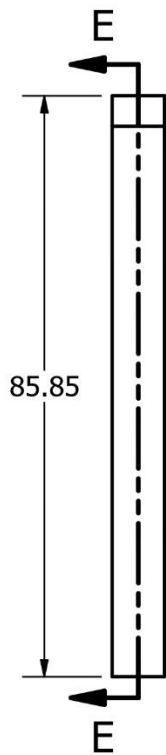
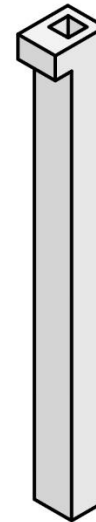


LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	NOMBRE	NÚMERO DE PARTE
1	2	Pilares	ET001
2	2	Extensión Pilares	ET002
3	1	Motor Nema 17 40mm	ET003
4	1	Pilar fijo	ET004
5	1	Base Cremallera Trasera	ET005
6	1	Base Cremallera Frontal	ET006
7	1	Piñón recto	ET007
8	1	Cremallera	ET008
9	3	Portacable	ET009
10	9	Inserto M3x5.7	EA001

TÍTULO: Ensamblaje		
Transmisión de potencia - ET		
NÚMERO DE DIBUJO: 016		
FORMATO	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 16 DE 24	REV A

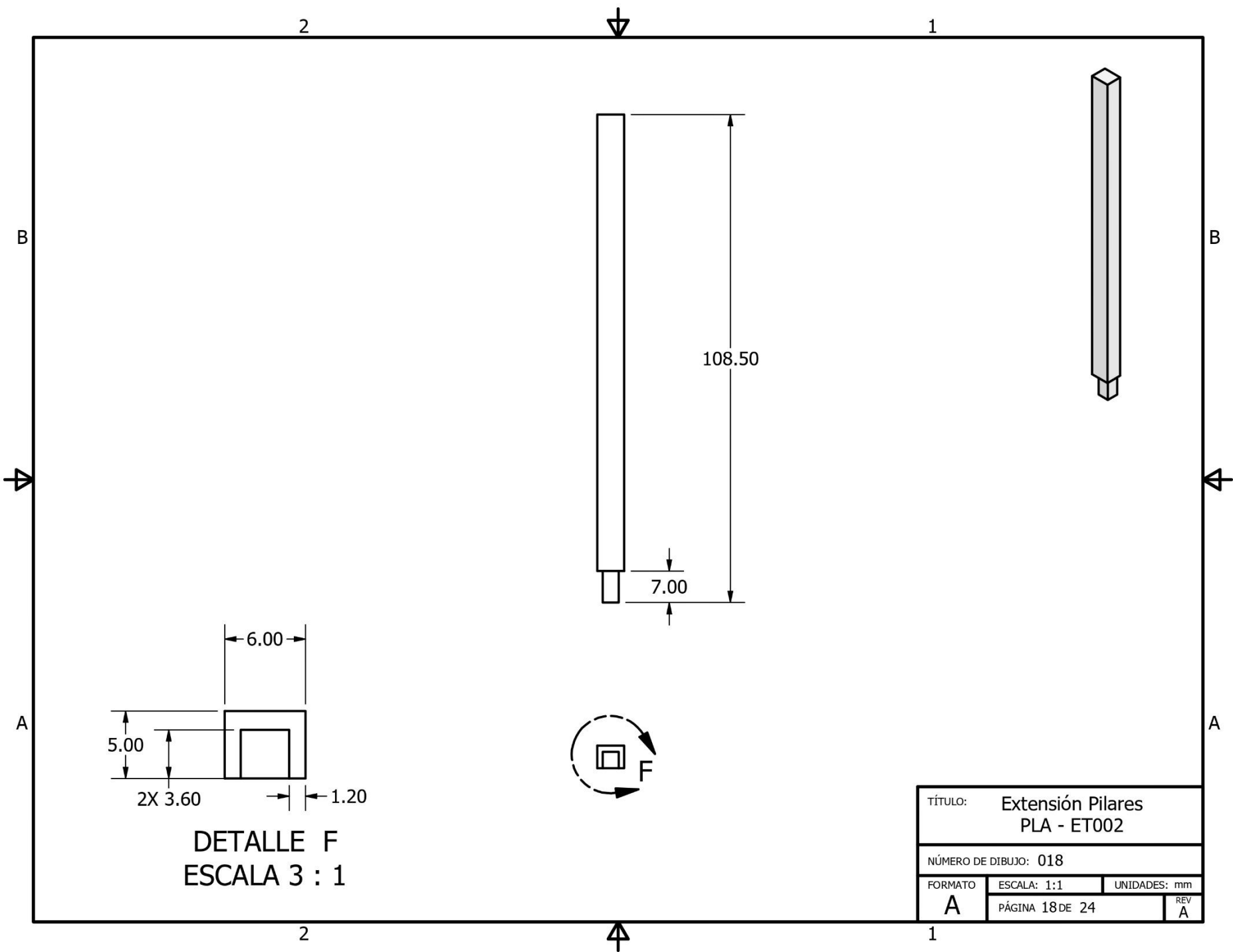


DETALLE D
ESCALA 2 : 1

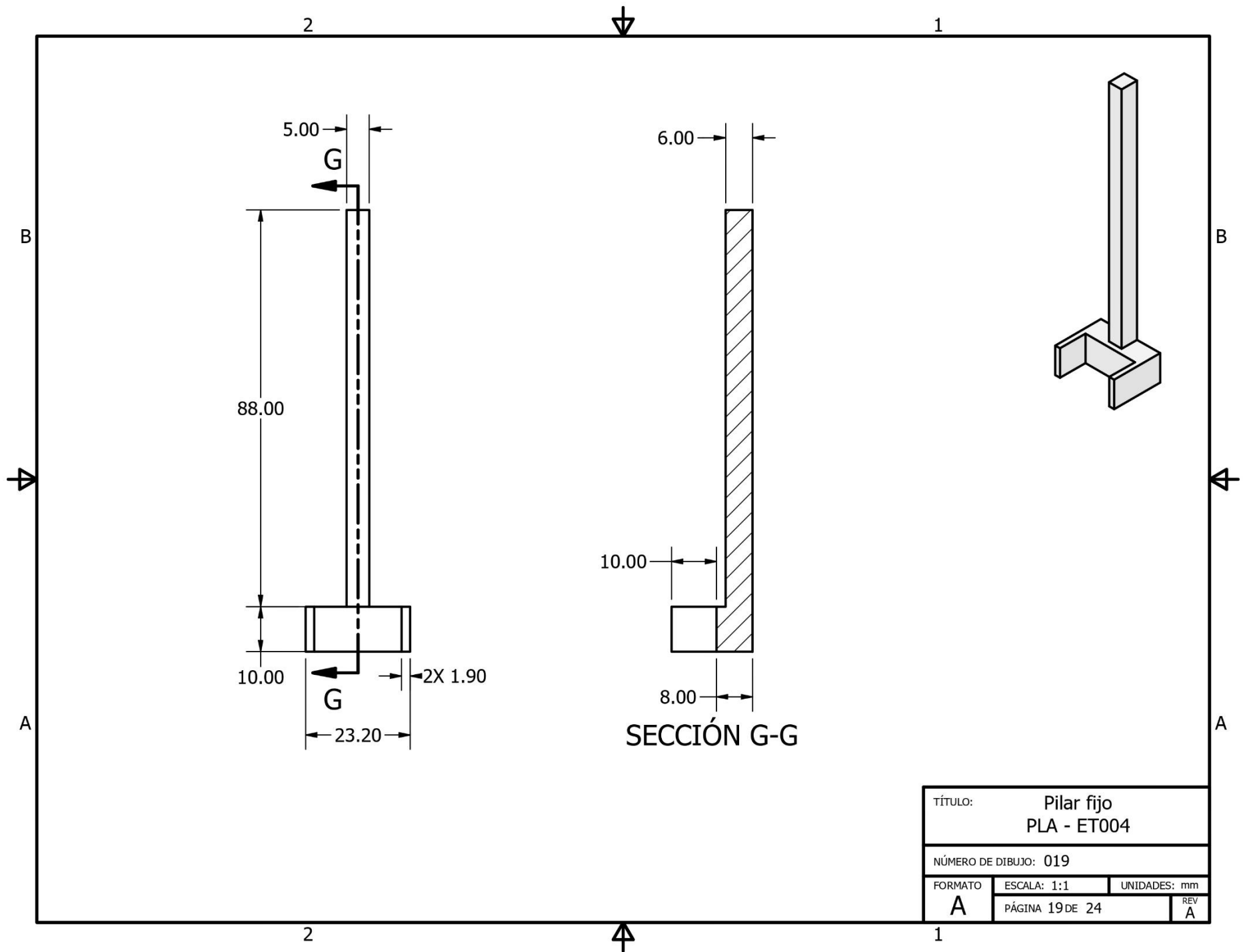


SECCIÓN E-E

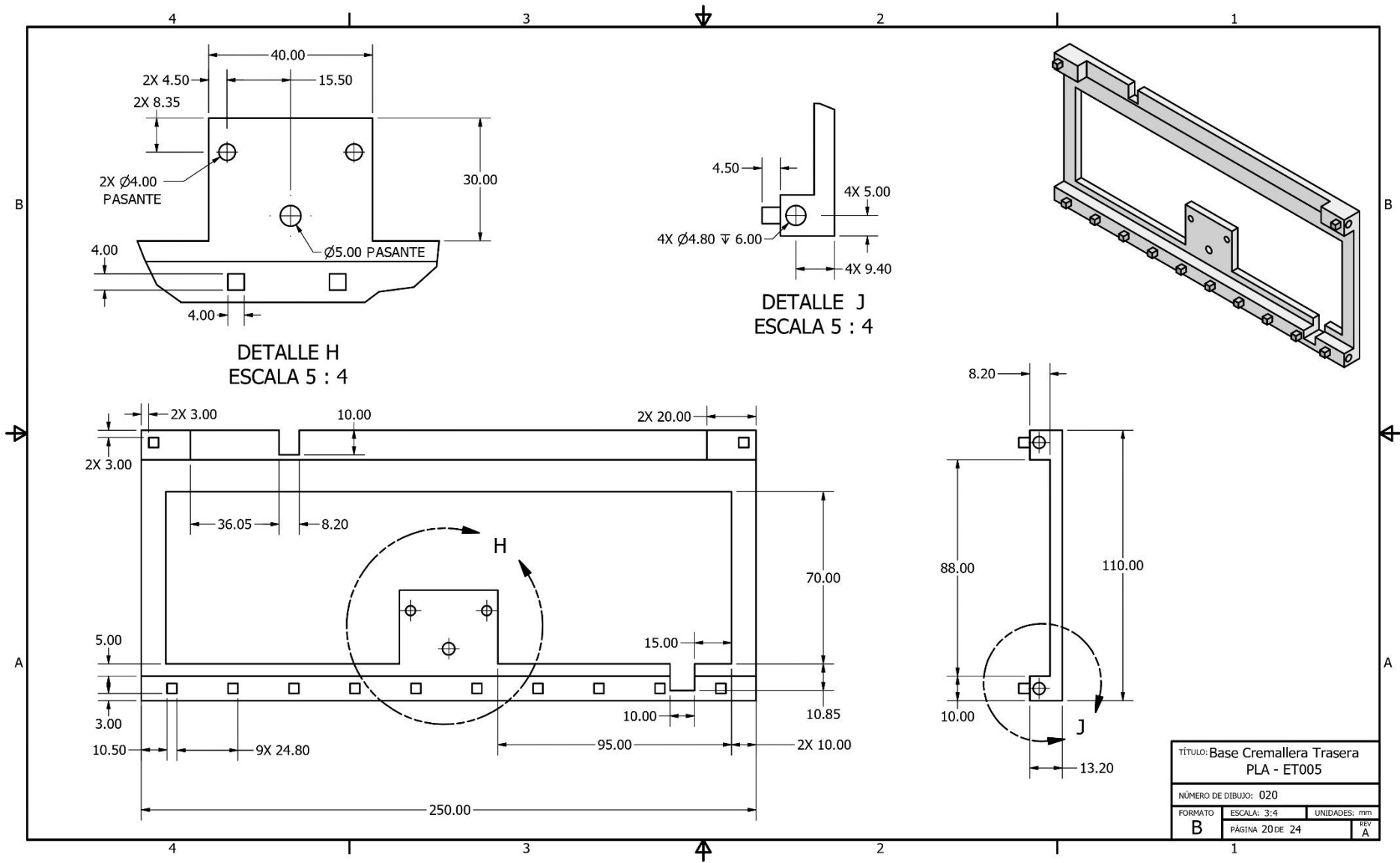
TÍTULO: Pilares PLA - ET001		
NÚMERO DE DIBUJO: 017		
FORMATO A	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
	PÁGINA 17 DE 24	REV A

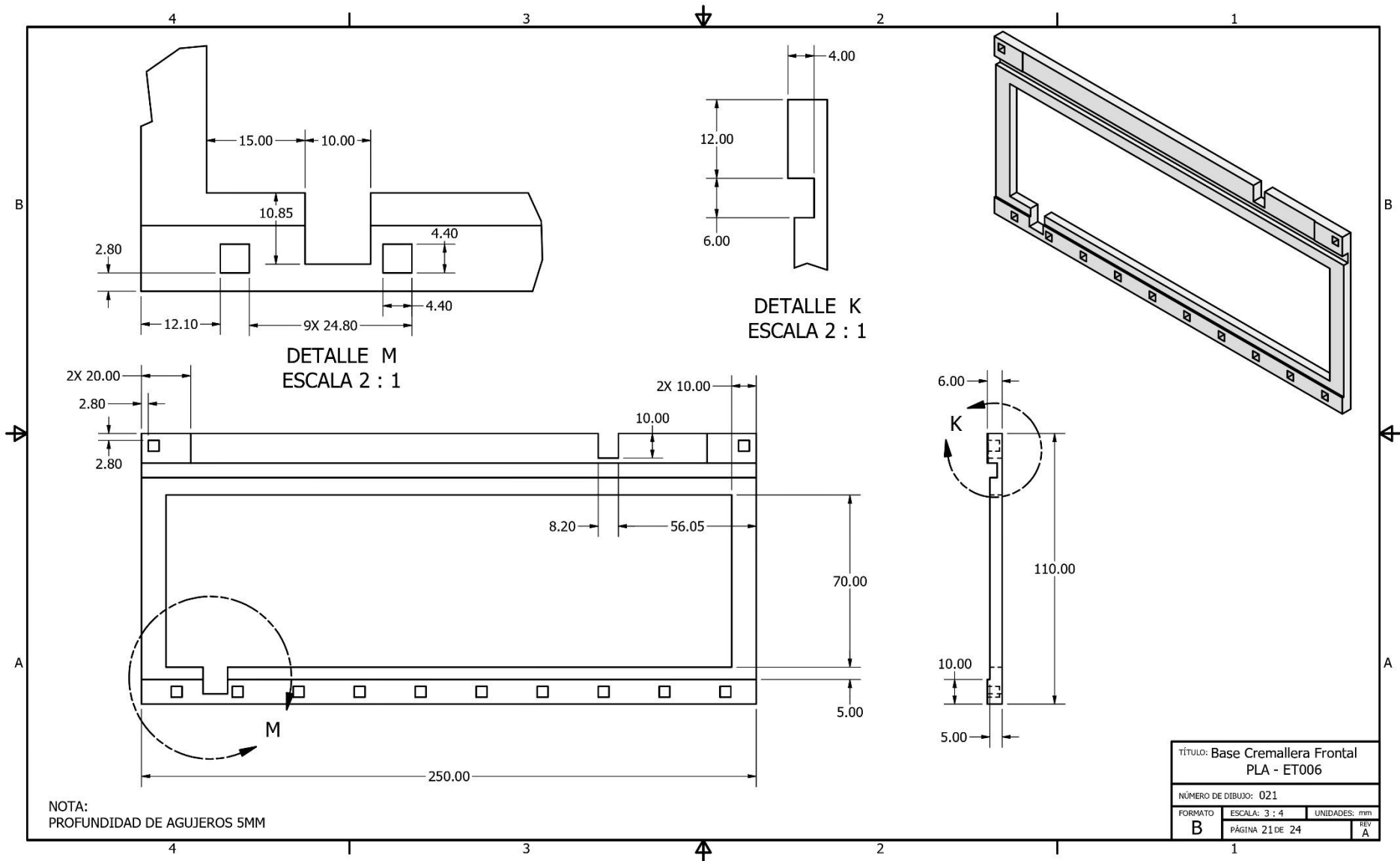


TÍTULO: Extensión Pilares PLA - ET002		
NÚMERO DE DIBUJO: 018		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 18 DE 24	REV A



TÍTULO: Pilar fijo PLA - ET004		
NÚMERO DE DIBUJO: 019		
FORMATO A	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
	PÁGINA 19 DE 24	REV A



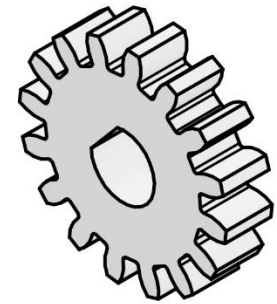


2

1

PARÁMETROS DE DISEÑO PIÑÓN

DESCRIPCIÓN	VALOR
DIÁMETRO PRIMITIVO	16 MM
MÓDULO	1 MM
CABEZA DE DIENTE	1 MM
RAÍZ DE DIENTE	1.25 MM
ÁNGULO DE PRESIÓN	20°
PASO CIRCULAR	3.14 MM
ESPELOR DEL DIENTE	1.57
NÚMERO DE DIENTES	16
ÁNGULO DE ESPESOR	11.25°
ANCHO DE CARA	4 MM

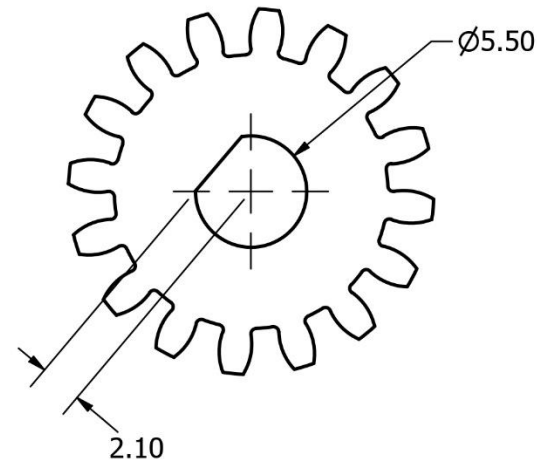


B

B

A

A



A

TÍTULO: Piñón Recto
PLA - ET007

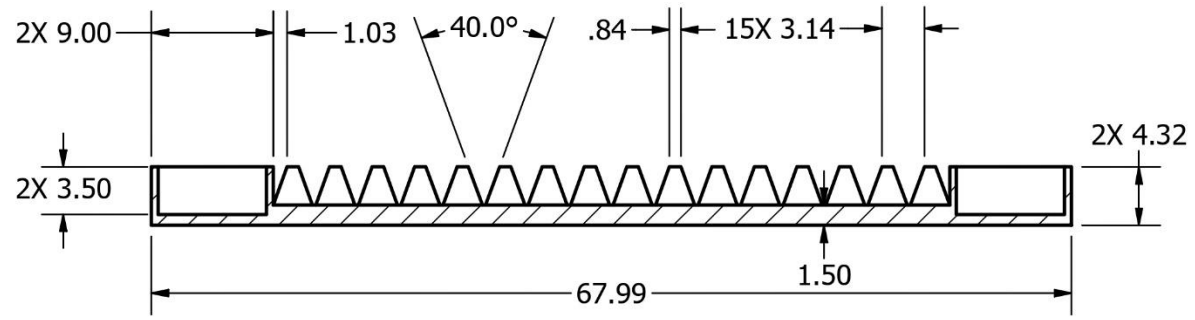
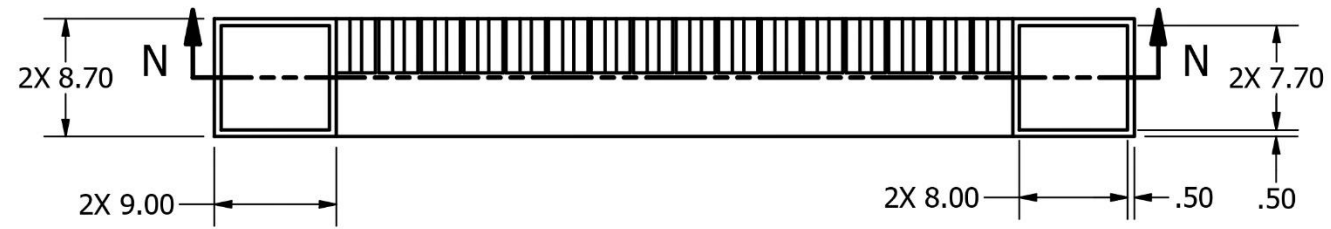
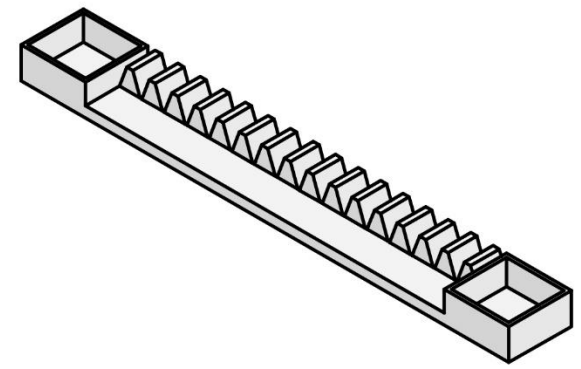
NÚMERO DE DIBUJO: 022

FORMATO	ESCALA: 3 : 1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 22 DE 24	REV A

2

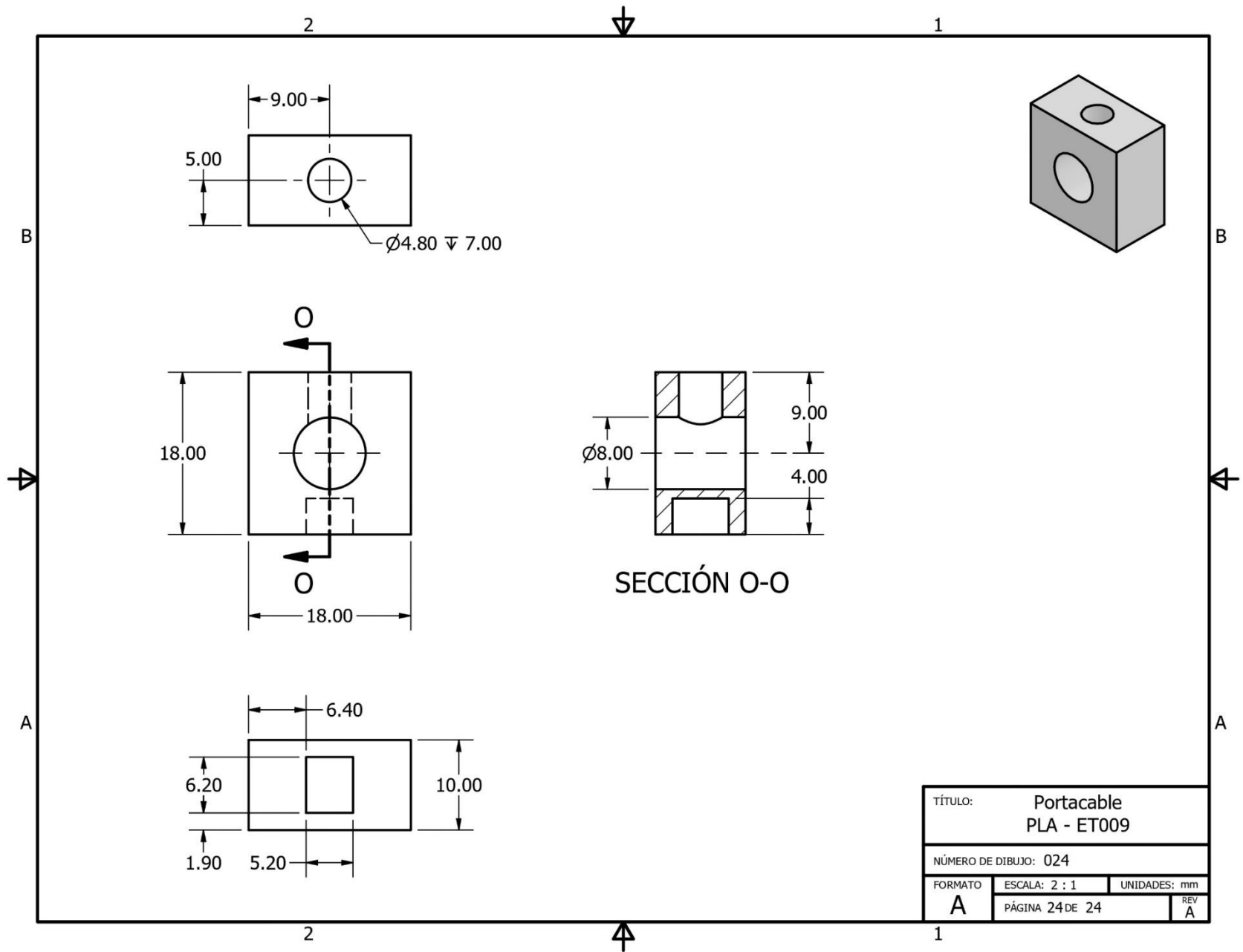
1

A



SECCIÓN N-N

TÍTULO: Cremallera PLA - ET008		
NÚMERO DE DIBUJO: 023		
FORMATO A	ESCALA: 3:1	UNIDADES: mm
	PÁGINA 23 DE 24	REV A



TÍTULO: Portacable PLA - ET009		
NÚMERO DE DIBUJO: 024		
FORMATO	ESCALA: 2 : 1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 24 DE 24	REV A

Planos mecánicos de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.