



Pontificia Universidad Católica de Chile
Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica
ICM2026-1

Entrega Final

Brochadora reciprocente – Grupo 1

Integrantes:

- Ignacio Ahumada
- Joaquín Coñomán
- Martín Salinas
- Mauricio Segura
- Felipe Valdés

Fecha: 11/07/2025

Introducción

Una brochadora es un tipo de máquina de mecanizado por arranque de viruta, en el cual se utiliza una herramienta llamada “brocha” para cortar y/o desgastar el material, generando así formas precisas, ya sea para ranuras, chavetas o estrías, interiores o exteriores. Existen 3 grandes tipos en los mercados actuales: horizontal, vertical y CNC.

En este informe se detalla el proceso de manufactura y creación de un modelo de brochadora horizontal, y contempla aspectos mecánicos y estructurales para evitar fallas y cumplir con las métricas que garantizan un correcto cumplimiento de la brochadora.

Contexto

En el contexto de este trabajo, se tiene como objetivo diseñar y desarrollar una brochadora reciprocase, que permita a estudiantes y profesores realizar mecanizados de precisión. Diseño el cual además debe cumplir con ciertos requerimientos, como: mecanizar chavetas con dimensiones mínimas de 12x12x100 mm, mecanizar piezas con diámetro máximo 180 mm, mecanizar elementos con una dureza mínima de 55 HRC y que sea de fácil utilización.

Prototipado

Se crea un prototipo para evaluar la factibilidad de algunos componentes del diseño, específicamente el sistema de transmisión de potencia y la estructura de la carcasa.

La dureza del corte disminuye. Ahora, en lugar de cortar acero se corta plástico. Esto es para simplificar el prototipo, ya que el modelo real está diseñado para ejecutar el corte con mayor fuerza y peso, algo imposible de imitar con la restricción de presupuesto.

Un alto porcentaje del prototipo es de madera. Esto es por la razón de que es más económico y manufacturable. Las partes de madera son el torpedo y los engranajes..

Modelamiento virtual

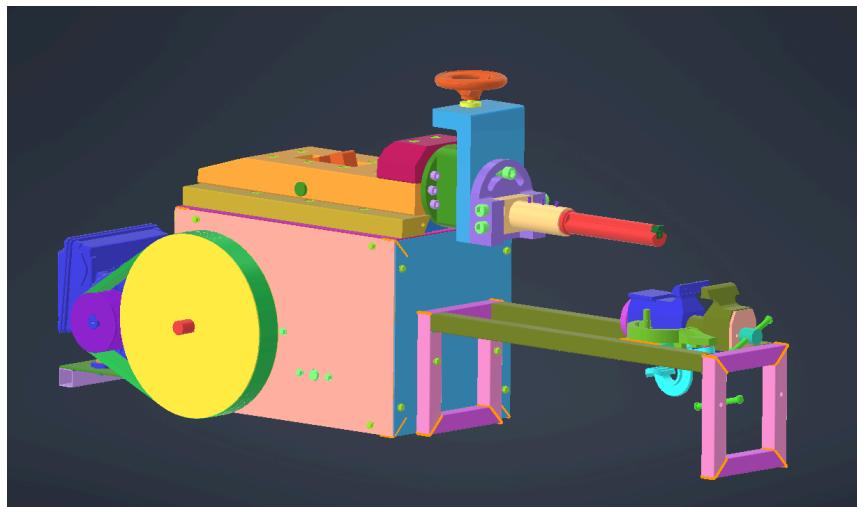


Figura 1. Ensamble completo.



Figura 2. Ensamble interior.

Se establece un diseño CAD en inventor para el diseño de la brochadora. Este diseño cuenta con 4 subsistemas que se observan a continuación:

- Torpedo y Porta herramienta (Ver Anexo 2.1 y 2.2)
- Armazón (Ver anexo 2.3)
- Sujeta pieza y mesa de trabajo (Ver anexos 2.4 y 2.5)
- Sistemas de reducción y eje (Ver anexos 2.6, 2.7 y 2.8)

BOM

El Bill of Materials del prototipo se realiza considerando las piezas rendidas por compra de material, y en algunas piezas la compra directa de la parte en el mercado. La tabla se presenta en el anexo 1.

Planos

El detalle de los planos de cada pieza manufacturada se encuentra en el anexo. En el caso de este informe se puede observar que se tienen los planos de los subconjuntos:

- Planos de los ejes (Anexo 3)
- Planos de los perfiles (Anexo 4)
- Planos de las planchas de la carcasa (Anexo 5)
- Planos del sistema biela (Anexo 6)
- Planos del torpedo (Anexo 7)
- Planos de los engranajes (Anexo 8)
- Planos de los ensambles de perfiles (Anexo 9)

En el caso de requerir más detalles, también se adjunta con la entrega una carpeta que contiene todos los planos con su respectiva información.

Costos solución a escala

En el caso del prototipo, se observa que los costos se van netamente en los materiales e insumos a utilizar, debido a que la mano de obra fue realizada por los integrantes del grupo.

Reporte de gastos: Anexo 10

En este caso, se observa que el principal porcentaje de los costos se va en el motor y en la plancha de acero. Se observa que estos costos se pueden mejorar, ya que la plancha fue comprada totalmente sobredimensionada, quedando mucho remanente. Si se hubiera hecho una compra de una plancha de dimensiones más pequeñas, se podrían haber rebajado algunos costos.

También se podrían haber rebajado los costos en algunos insumos, puesto que la inexperiencia de los operarios indujo a errores de cálculo y de métricas de algunos pernos, por lo cual en algunos casos se debió comprar dos veces. También se consumieron más insumos de herramientas (discos y brocas) de las que se consumiría normalmente, debido al factor de la inexperiencia.

Sin embargo, los costos también son bajos debido a que no existió mano de obra tercerizada en el prototipo, por lo cual el costo de la mano de obra fue 0.

En caso de escalar el prototipo, si se escalara el tamaño del prototipo, los costos subirán bastante, debido a que el motor, el cual es lo más caro de la máquina, sería más grande, y por ende, más caro. También hacer una máquina más grande implica tener que tercerizar algunos servicios, y por ende, aumentar el valor de costo de mano de obra. Los costos en los otros materiales también aumentan porcentualmente, pero variaciones muy pequeñas, y no muy importantes, debido a que la mayoría del costo de la máquina se la llevaría el motor y la mano de obra.

En el caso de escalar el volumen de construcción, los costos se verían reducidos, debido a que siempre construir a grandes volúmenes reduce los costos, sin embargo, en este caso se tendría que agregar también los costos de mano de obra, ya que construir a grandes cantidades también implica tercerizar la mano de obra, por lo cual es costo unitario por máquina quedaría similar al costo que se tiene actualmente.

Costos proyectados prototipo

En el archivo adjunto llamado “costo_fabricación_Final3” en el anexo 11 se visualiza el costo de cada componente de la solución. A modo de resumen, se calcula el costo de cada pieza ponderando el costo de material por un factor de 2 para incluir el costo de mano de obra y otros costos indirectos y se suman todos los que componen la solución.

El presupuesto total requerido para el prototipo es de \$2080148

Evaluación comercial de la solución

Para lanzar la solución al mercado, se utiliza el precio de \$3466913. Esto considera una utilidad del 40%. Los precios de otras brochadoras que realizan el mismo procedimiento con

diferente mecánica, ya que hay algunas verticales y otras con sistema hidráulico, oscilan entre los \$3000000 y los \$20000000, algunos incluso más. Revisar anexo 20 con la bibliografía.

El precio nos deja competir con el resto de productos del mercado. Para evaluar la compra, es necesario un análisis FODA (fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas), que se puede reducir en una tabla de pros y contras. Se tabula a continuación. Esta tabla entrega información de porqué es mejor comprar la solución que se expone en este informe por sobre los productos del mercado.

Pros	Contras
Está entre las opciones más económicas	Difícil de ensamblar
Despacho instantáneo	Otras soluciones tienen mayor recorrido de corte
Herramienta fácilmente intercambiable, permite ajustar tamaño de corte sin mayores complicaciones	El sistema no es digital
Herramienta económica (existen soluciones no reciprocanes donde la herramienta de corte es muy poco económica)	Sistema poco seguro
Es de las más portátiles del mercado	Presupuesto no incluye garantía

Ingeniería de detalle

Memoria de Cálculos del Modelo Teórico

En este apartado se presenta la memoria de cálculo correspondiente al diseño del sistema de transmisión mecánica de una máquina brochadora horizontal. El objetivo principal es validar que el sistema propuesto cumple con los requerimientos funcionales de corte, a través del dimensionamiento de sus componentes críticos, estimación de cargas, torques y potencias, y selección de elementos normalizados como rodamientos y motores. Los cálculos se desarrollaron mediante métodos clásicos de la mecánica, incluyendo análisis de equilibrio, esfuerzos combinados, transmisión de potencia, vibraciones, disipación térmica y resistencia de uniones.

Transmisión de Potencia y Fuerza de Corte: El estudio comienza con la estimación de la fuerza total ejercida sobre la herramienta de corte, determinada como 4241.2 N. Esta se calculó a partir de la presión específica de corte de 3500 N/mm² (correspondiente a un material con dureza < 55 HRC) y un área activa de corte de 1.2 mm². A esta fuerza se le sumó la fuerza de fricción generada por el deslizamiento del torpedo (\approx 41.2 N), alcanzando así la fuerza efectiva de empuje sobre la biela. A través del análisis del mecanismo biela-manivela, se determinó un torque de salida en el torpedo de 559.84 Nm. Utilizando una relación total de transmisión de 26.46, se obtuvo un torque de entrada requerido en el motor de 21.16 Nm.

Potencia y Selección del Motor: La potencia útil requerida fue estimada en 1.66 kW, y al considerar una eficiencia total del sistema de 81.2%, se calculó una potencia necesaria en el motor de 2.05 kW (\approx 2.74 hp). Se seleccionó un motor estándar de 3 hp (\approx 2.3 kW), con un torque útil disponible de 23.79 Nm, suficiente para satisfacer los requerimientos de operación.

Sistema de Transmisión: El tren de transmisión se diseñó para alcanzar la relación de reducción requerida de 26.46, distribuyéndose en una etapa por correa y dos etapas por engranajes, conectadas a través de cuatro ejes mecánicos. Este sistema permite aumentar el torque entregado por el motor hasta alcanzar los niveles necesarios para ejecutar el corte de forma efectiva.

Análisis de Ejes: Cada eje fue evaluado en términos de cargas transmitidas, reacciones en los apoyos, momentos combinados y selección de rodamientos:

- Eje 1: Transmite un torque de 71.36 Nm. Se calcularon reacciones de hasta 1550.7 N. Se utilizó un rodamiento rígido de bolas SKF 61804-2RS1.
- Eje 2: Transmite 199.80 Nm, soportando una reacción máxima de \approx 5913 N en el apoyo D. Rodamiento: SKF 61905-2RS1.
- Eje 3: Maneja el torque máximo del sistema, 629.38 Nm, con reacciones simétricas de aproximadamente 4627.7 N. Rodamiento: SKF 61906-2RS1.
- Eje 4 (Biel): Diseñado para transmitir una fuerza axial de 16386.78 N. Se seleccionó un diámetro de 16.68 mm, considerando factores de seguridad por corte y aplastamiento.

Velocidad de Corte: Se definió una carrera de 150 mm, con una frecuencia de 28.35 ciclos por minuto (CPM), lo que arroja una velocidad de corte de 4.25 m/min, valor que se encuentra dentro del rango recomendado para herramientas de HSS utilizadas sobre materiales de dureza media-alta (entre 3 y 7 m/min), y adecuada para el brochado de materiales de hasta 55 HRC (referencia se encuentra dentro de la memoria de cálculo).

Análisis de Vibraciones: El análisis dinámico identificó las principales fuentes de vibración en el sistema:

- Torpedo (biela-manivela): Produce una aceleración máxima de 0.389 m/s² y una fuerza de inercia de 16.44 N, resultando en una aceleración inducida en el bastidor de 0.4478 m/s².
- Engranaje 1 (GMF = 84.88 Hz): Genera una aceleración inducida de 0.256 m/s².
- Engranaje 2 (GMF = 30.7 Hz): Aceleración inducida de solo 0.035 m/s².

El valor total de aceleración RMS fue de 0.517 m/s², muy por debajo del umbral de percepción humana. Se concluye que las vibraciones generadas por el sistema no afectan el funcionamiento ni la integridad estructural. Los resultados detallados se presentan en el anexo 12, incluyendo tablas comparativas y diagramas de momentos flectores.

Análisis Térmico: El análisis termodinámico abordó las principales fuentes de generación y disipación de calor en el sistema:

- Motor trifásico con VFD: Las pérdidas térmicas alcanzan los 225 W, lo que eleva la temperatura de la carcasa del motor hasta aproximadamente 62.5 °C, valor muy por debajo del límite de aislación (Clase F: 105 °C).
- Engranajes en caja cerrada: Las pérdidas por fricción suman 197.3 W, de las cuales la mitad (\approx 98.65 W) son disipadas por la carcasa metálica. Se estimó un aumento de temperatura de 18.3 °C, alcanzando 43.3 °C. No se requiere ventilación forzada.
- Guías del torpedo: Se estimó una disipación de apenas 2.94 W debido al roce. En condiciones de lubricación adecuada, no representa una fuente térmica significativa.

Análisis de Uniones: Se realizó una evaluación de resistencia en uniones soldadas y apernadas bajo condiciones de carga estática, ignorando fatiga y efectos de temperatura:

- Uniones Soldadas (Cordones de Filete):
 - Cordón individual: resistencia LRFD de 15.1 kN.
 - Grupo de 8 cordones: capacidad total de 121 kN.
 - Cumple con factores de seguridad > 2.
- Uniones Apernadas (Pernos M6, clase 4.8):
 - Resistencia por perno: 3.62 kN (LRFD).
 - Grupo de 4 pernos: capacidad total de 14.5 kN.
 - Satisfactorio para cargas de hasta 100 kg (FS = 4.9)

Comparativa con el Prototipo – Validación Experimental

Para validar el diseño teórico y comprobar empíricamente el comportamiento del sistema de transmisión, se construyó un prototipo funcional a escala. Este mantiene la misma configuración geométrica, relación de transmisión y principio cinemático que el modelo original, pero utiliza materiales alternativos (como engranajes de terciado) y un motor de menor potencia.

Aspectos Relevantes del Prototipo:

- Relación de transmisión conservada: 26.46, idéntica al modelo original.
- Torque de entrada reducido: 1.52 Nm (proporcional al nuevo motor de 0.25 kW).
- Disminución proporcional de esfuerzos, manteniendo el comportamiento mecánico.
- Eficiencia total del sistema reducida a 47.8%, debido al uso de cadena y pérdidas mecánicas propias de un prototipo artesanal.

Análisis de la Fuerza de Corte a lo Largo del Ciclo: En los gráficos presentados en el anexo 13 se observa la evolución de la fuerza de corte en función del ángulo de rotación de la manivela para dos ciclos completos del mecanismo biela-manivela, tanto en el modelo teórico como en el prototipo, en donde se puede distinguir en azul el momento aproximado del mecanizado. En ambos casos, la curva presenta un comportamiento sinusoidal modulado por la variación del brazo de palanca efectivo, con máximos de fuerza ubicados aproximadamente a los 180° y 540°, correspondientes a los puntos de mayor aprovechamiento del torque transmitido. Aunque las magnitudes difieren considerablemente, alcanzando cerca de 6000 N en el modelo y alrededor de 380 N en el prototipo, se mantiene una coincidencia clara en la forma, periodicidad y distribución angular de los tramos de corte activos. Esto evidencia que el prototipo conserva la cinemática

funcional del sistema original, y valida su utilidad como herramienta de prueba para el estudio del comportamiento dinámico y la respuesta mecánica del sistema de transmisión.

Justificación Técnica: La implementación del prototipo permite testear experimentalmente los aspectos más críticos del sistema:

- Verificación del funcionamiento del tren de transmisión, incluyendo todas las etapas reductoras.
- Confirmación de la efectividad del mecanismo biela-manivela en generar movimiento alternativo útil para corte.
- Evaluación preliminar de vibraciones reales, que resultaron incluso menores ($RMS \approx 0.234 \text{ m/s}^2$) que las estimadas en el modelo.
- Validación de esfuerzos mediante comparación de diagramas flectores y de momento, los cuales muestran una coincidencia en forma y distribución, con diferencias esperables por escala.

En el anexo 14 se presenta una comparativa gráfica entre los diagramas de momento y fuerza cortante de ambos casos, mostrando que el comportamiento estructural es teóricamente el mismo, confirmando que el prototipo representa de forma válida el sistema real.

Simulación CAD

Dentro del análisis, se realizó una simulación CAD para conocer cómo se comporta cada pieza o ensamble bajo ciertos estados de tensiones a los que se enfrenta el prototipo durante el proceso de corte. Se realizaron en total 7 simulaciones, que fueron elegidas por las fuerzas a las que están sometidos.

Análisis del Bastidor (Anexos 13 y 14): En una primera instancia, se simuló el bastidor completo, incluyendo perfiles estructurales de acero A36 ($25 \times 25 \times 1.5 \text{ mm}$) y planchas de 1.5 mm de espesor. Se consideró una carga concentrada equivalente a la masa total del torpedo ($\approx 50 \text{ kg}$), obteniéndose una tensión máxima de Von Mises de 30.45 MPa, un desplazamiento máximo de 0.34 mm y un factor de seguridad (FS) de 6.8. Estos resultados indican un comportamiento estructural seguro, con niveles de deformación mínimos y márgenes aceptables frente al límite elástico del material.

Posteriormente, se aisló la estructura interna del bastidor (sin planchas laterales) para evaluar su resistencia estructural individual. En esta configuración, las tensiones aumentaron a 46.10 MPa y el FS disminuyó a 4.49, mientras que el desplazamiento se redujo significativamente a 0.031 mm. Este resultado evidencia la relevancia de las planchas en la distribución de carga, y demuestra que, aún en una configuración parcial, el bastidor conserva un buen margen de resistencia estructural.

Análisis de la Biela (Anexos 15 y 16): La biela fue identificada en estudios previos como uno de los componentes más exigidos del sistema. Para facilitar su manufactura, se simplificó su geometría y se sometió a condiciones de carga críticas mediante simulación. En una primera etapa, el análisis arrojó un factor de seguridad de 1.4, lo que, si bien indica que la pieza opera dentro de un rango funcional, la deja relativamente cerca de su límite de resistencia. Debido a que un FS de 1.4 se considera bajo para aplicaciones sujetas a carga cíclica o impactos, se procedió a una iteración del diseño, reforzando específicamente las

zonas con mayores concentraciones de tensión, identificadas como las más vulnerables. Como resultado, se obtuvo un nuevo FS de 1.9, mejorando significativamente la confiabilidad de la pieza sin comprometer su funcionalidad ni manufacturabilidad.

Análisis del Torpedo (Anexo 17): El torpedo, al ser una estructura sólida, no representa un riesgo estructural importante. Por ello, el análisis se enfocó en la herramienta de corte y su sistema de sujeción. En la simulación (modo ideal, corte perpendicular), se registró un desplazamiento de solo 0.027 mm y un FS de 4.58, lo que demuestra que el diseño cumple ampliamente con los requerimientos bajo condiciones estándar de operación.

Análisis del Porta Pieza (Anexos 18 y 19): Se evaluó la resistencia de la mesa porta pieza frente a la fuerza de corte, aplicándola de forma directa sin descomposición vectorial, simulando así el peor escenario posible. En la primera simulación presentada, se optó por eliminar el tornillo de banco del modelo con fines de simplificación, aplicando la carga directamente sobre la estructura de la mesa. Esta configuración arrojó tensiones máximas de 1399.46 MPa y desplazamientos totales superiores a 1 mm, con un desplazamiento en la dirección Z de 0.1 mm, revelando una alta concentración de esfuerzos en la zona de aplicación de la carga. Dado que el factor de seguridad (FS) obtenido fue de apenas 0.47, se propuso una modificación estructural. La nueva configuración permitió reducir significativamente las tensiones, con un desplazamiento total de 0.11 mm y un desplazamiento en Z de 0.04 mm. El FS se incrementó a 2.45, valor considerado plenamente aceptable para condiciones reales de corte, confirmando la efectividad del rediseño.

Manufactura

Siguiendo la planificación del proyecto, se inició un proceso de manufactura para el prototipo acorde al modelamiento virtual de este. Para la manufactura del prototipo se compraron los materiales del BOM.

Se inició cortando el perfil de acero A36 (BOM-3) con una tronzadora eléctrica. Se cortaron según las dimensiones estipuladas en los planos del anexo 4. Luego con una máquina de soldar MIG se soldaron los trozos de perfil para formar el armazón según las dimensiones del plano del anexo 9.1. Se eligió este proceso de manufactura dados los materiales disponibles en el taller. Para este proceso se necesitaron dos personas trabajando durante cinco horas de trabajo.

A partir de los perfiles de acero A36 ya tronzados también se realizaron soldaduras al arco para la mesa porta pieza según el plano del anexo 9.2. Se cambió el tipo de soldadura para trabajar en horarios no disponibles en el taller, y en estos solo se pudo trabajar con soldadura al arco.

Otro equipo de trabajo cortó las planchas de A36 1.5mm (BOM-1) cortando con un esmeril angular las planchas A, B, C y D según las dimensiones de los planos del anexo 5.

Un integrante del equipo trabajó en las piezas de madera (BOM-7) para formar las piezas del torpedo y biela para estas se trabajó con sierra circular, taladro de mesa y sierra caladora. Las dimensiones de cada pieza se encuentran registradas en los planos de los anexos 6 y 7.

Para los ejes se utilizó (BOM-2), esta fue torneada con procesos de refrentado y cilindrado. El resultado fueron barras acorde con las dimensiones de los planos del anexo 3.

Los engranajes se manufacturaron con una plancha de madera terciada (BOM-6), la geometría de los engranajes fue cortada mediante corte láser en 6 capas las cuales luego fueron pegadas utilizando cola fría para madera. Este trabajo fue tercerizado al maker-space de la biblioteca San Joaquín, esto fue con costo cero, a cambio de la ayuda que nos brindaron como grupo se donó la madera terciada que nos sobró.

Mediante pintura en spray negra se pintó con dos capas toda la estructura exterior del prototipo para asegurar un acabado prolíjo. Finalmente, con todas las partes manufacturadas o compradas se realiza el ensamblaje por completo del prototipo, figura 8.



Figura 3. Mesa porta pieza perfiles A36.



Figura 4. Torpedo de madera.



Figura 5. Engranajes mediante corte láser.



Figura 6. Pintura caraza.



Figura 7. Ensamble terminado.

Los aprendizajes obtenidos a partir de la manufactura del prototipo son; inicialmente notamos lo mucho más simple de manufacturar que es una estructura basada en perfiles en comparación con el diseño anterior donde la rigidez estructural provenía de las mismas planchas laterales, estas eran más gruesas obligando a métodos como corte con agua y complicando un ensamblaje con las tolerancias adecuadas debido a que el proceso de alinear los ejes y unir las planchas se debía hacer en conjunto.

Sumado a esto, se mejoró el diseño de la mesa del porta piezas, con un diseño también basado en perfiles, entregando mayor estabilidad además de la simplificación en su manufactura, donde ya no es necesario tercerizar procesos CNC para estas piezas abaratando en gran medida los costos.

Por otro lado, ya habiendo definido la estructura con perfiles el equipo docente nos hizo notar que sería aún más fácil el ensamblaje si las planchas no tuvieran ninguna relación con la estructura (no montar los rodamientos a estas) sino que solo actuarán como tapas para proteger el mecanismo interior.

Pruebas al prototipo

Las pruebas al prototipo se dividieron en dos, por un lado se probó de manera manual que el sistema de transmisión de potencia sea capaz de pasar el movimiento rotacional del piñón a una reciprocante en el torpedo y herramienta. Esta prueba fue exitosa momentáneamente ya que si bien funcionó, casi al terminar la primera iteración completa del ciclo el eje III se desalineó generando un tope en los engranajes lo cual detuvo el movimiento. Por otro lado, se probó por sí solo el funcionamiento del motor, lo cual funcionó sin problemas. Cuando se intentó juntar el funcionamiento del motor con el del sistema de transmisión de potencia resultó en un problema ya que la falta de tensión y alineación en la cadena.

De estas pruebas se aprendió que el uso de rodamientos autocentrantes generaba que el eje III al solo contar con un rodamiento empezaría a desalinearse lo cual hizo que los engranajes dejarán de calzar y se trabará el movimiento. Esto se solucionaría utilizando un rodamiento que no sea autocentrante para que mantenga la alineación del eje. También notamos lo difícil que es alinear y tensar perfectamente el sistema de piñones y cadena,

para solucionar esto se propone volver al diseño inicial de utilizar una correa y polea agregando un sistema tensor.

Cumplimiento de Requisitos y Funcionamiento del Dispositivo

El dispositivo desarrollado cumple satisfactoriamente con los requerimientos funcionales y técnicos planteados en la primera entrega, consolidándose como una solución viable, eficiente y adaptada al entorno del taller DIMM. Desde su diseño, se priorizó que las dimensiones físicas de la brochadora respetarán las restricciones de espacio, logrando una configuración final de 1168 mm de largo, 243 mm de ancho y 500 mm de alto, dimensiones que no solo se ajustan a los límites definidos por el cliente, sino que además facilitan su integración y operación en talleres de espacio limitado.

En términos de capacidad de mecanizado, la máquina permite realizar chavetas de hasta 12 mm de ancho y profundidad, con una carrera efectiva de 150 mm, superando con holgura los 100 mm mínimos requeridos. Esta capacidad se logra gracias a un sistema de avance reciprocente, generado mediante un mecanismo biela-manivela impulsado por un motor eléctrico trifásico con variador de frecuencia.

A nivel estructural, la brochadora fue diseñada y evaluada para soportar con seguridad los esfuerzos del proceso de mecanizado. Las simulaciones mecánicas sobre el bastidor y la mesa porta pieza arrojaron factores de seguridad superiores a 2.4 y hasta 6.8, confirmando que la estructura puede resistir sin deformaciones significativas la carga total generada por el proceso de corte. Asimismo, el análisis dinámico de vibraciones evidenció un comportamiento estable, con una aceleración RMS total de apenas 0.517 m/s², valor muy por debajo del umbral de percepción humana, lo que garantiza un funcionamiento fluido y sin interferencias para el operador.

En cuanto a su construcción, la máquina fue diseñada con un enfoque modular y manufacturada casi en su totalidad con materiales comerciales, como perfiles de acero A36, planchas de 1.5 mm y componentes normalizados como rodamientos y pernos. Esto no solo facilita su fabricación dentro del DIMM, sino que además permite simplificar tareas de mantenimiento o ajustes futuros, cumpliendo con los criterios de flexibilidad, accesibilidad y reparabilidad definidos por el cliente. La brochadora también presenta compatibilidad con herramientas estándar, permitiendo el uso de brochas de tipo chavetero comunes en el mercado, lo que elimina la necesidad de fabricar herramientas especiales o costosas. Para más detalles sobre los materiales ver el anexo 21.

Desde la perspectiva operativa, los ensayos y cálculos demostraron que el sistema es capaz de alcanzar una velocidad de corte de 4.25 m/min, cumpliendo así con las métricas de éxito definidas, como realizar una carrera completa en menos de 5 segundos o remover 1 mm de material en menos de 48 segundos. Esto, junto al adecuado dimensionamiento del motor y de la transmisión mecánica, asegura un rendimiento efectivo y consistente para tareas de mecanizado típicas del entorno educativo.

Finalmente, uno de los aspectos más destacables es su competitividad económica. Con un costo de producción estimado de \$2.080.148 y un precio de venta proyectado de \$3.466.913, la brochadora se posiciona como una alternativa económica frente a otras del mercado, cuyo rango de precios va desde los \$3.000.000 hasta más de \$20.000.000. Esto,

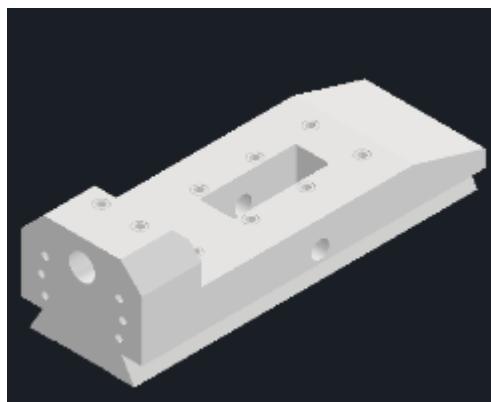
sumado a su portabilidad, facilidad de manufactura y adaptabilidad, refuerza su potencial como solución real para talleres de enseñanza técnica, pequeños emprendimientos o unidades de prototipado.

Anexos

Anexo 1: BOM

Número	Descripción	Cantidad	Material	Notas
1	Plancha de acero 1,5 mm	1	Acero A36	Se utilizó para la carcasa de la máquina. Se hicieron 4 cortes para la carcasa.
2	Barra de acero	1	Acero Sae 1020	Se corta en 3, se mecaniza y se utiliza para hacer los ejes del mecanismo de la máquina.
3	Perfil de acero	1	Acero A36	Se utiliza para realizar la estructura del armazón de la máquina y la mesa porta pieza.
4	Motor	1	-	Imatesa trifásico 0,25 kW.
5	Rodamientos	7	Metal	KFL 002
6	Plancha de madera	1	Madera	Se corta láser para realizar los engranajes del mecanismo de la máquina.
7	Perfil de madera		Madera	Se utiliza para realizar el sistema de torpedo de la máquina.
8	Herramienta de corte (brocha)	1	Acero HSS	Es la herramienta la cual realizará el mecanizado como tal.
9	Variador de frecuencia	1	-	Necesario para el funcionamiento del motor.
10	Cable de poder	1	-	Se utiliza para conectar el motor a la corriente.
11	Tornillo de banco	1	Acero	Se utiliza para fijar la pieza a mecanizar.

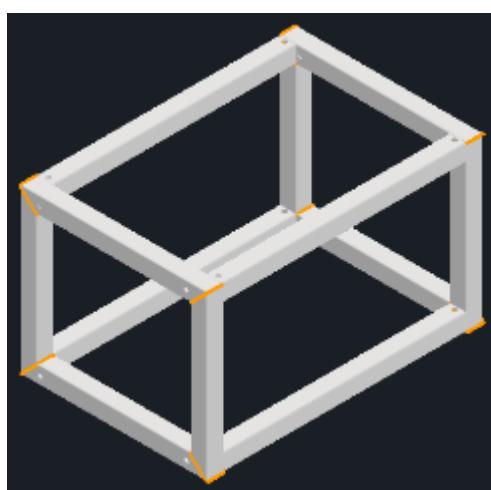
Anexo 2.1



Anexo 2.2



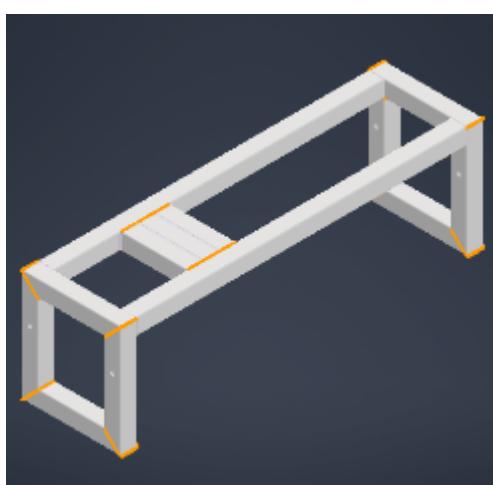
Anexo 2.3



Anexo 2.4



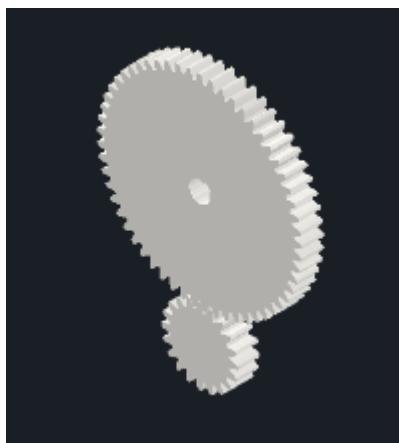
Anexo 2.5



Anexo 2.6



Anexo 2.7

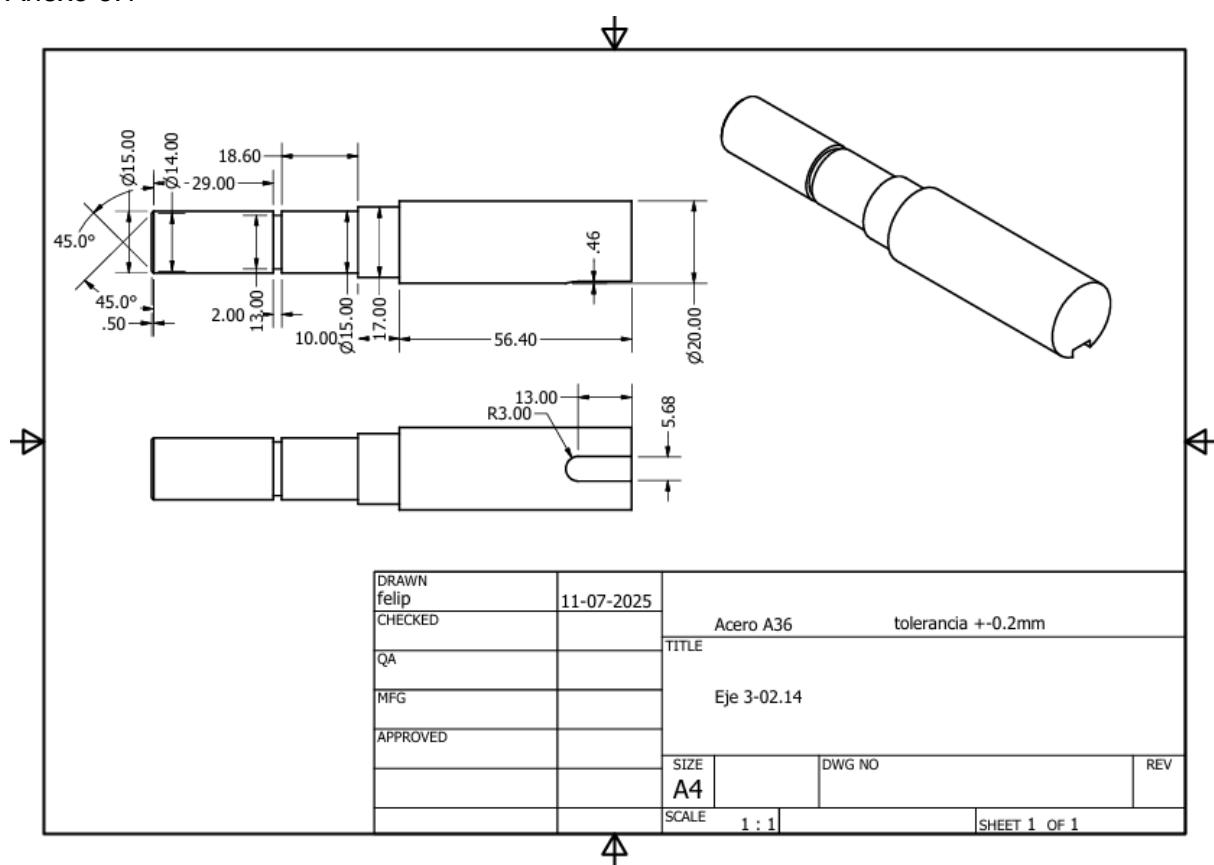


Anexo 2.8

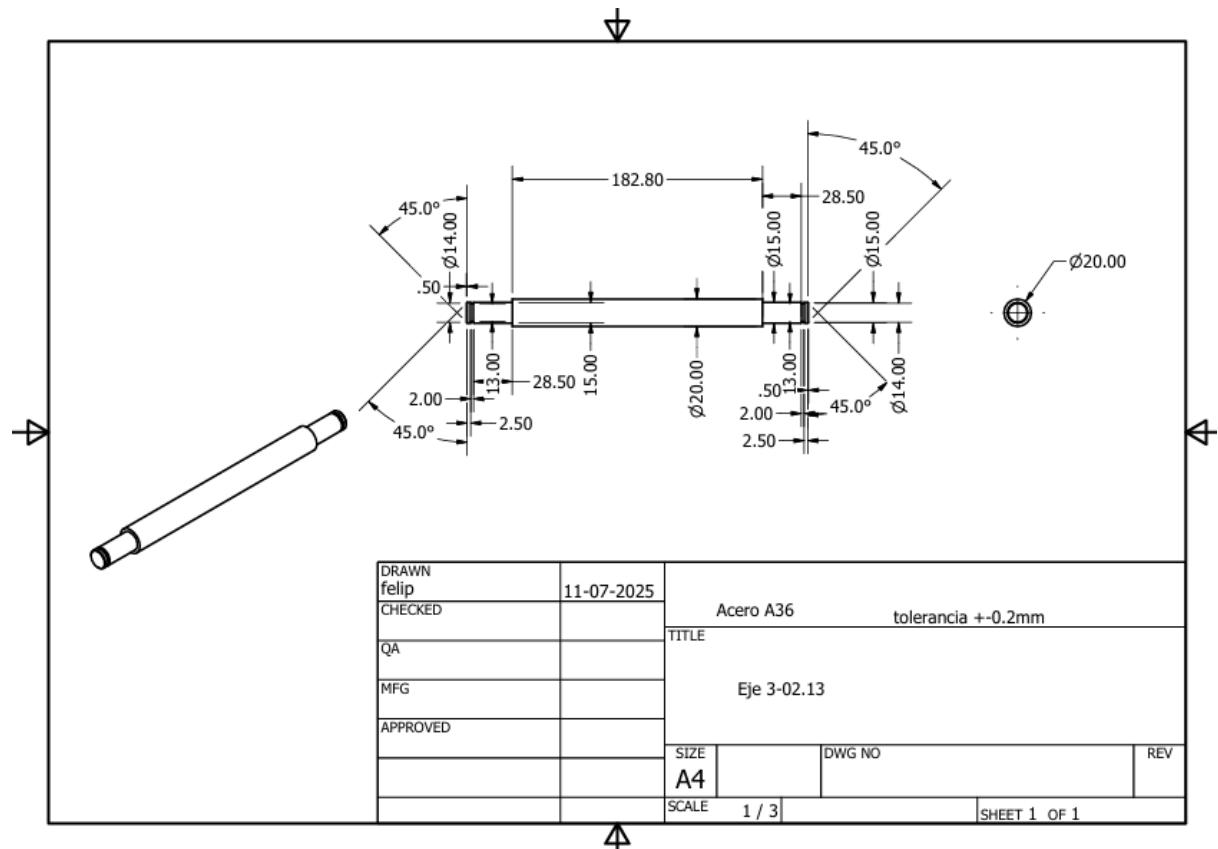


Anexo 3: Planos Ejes

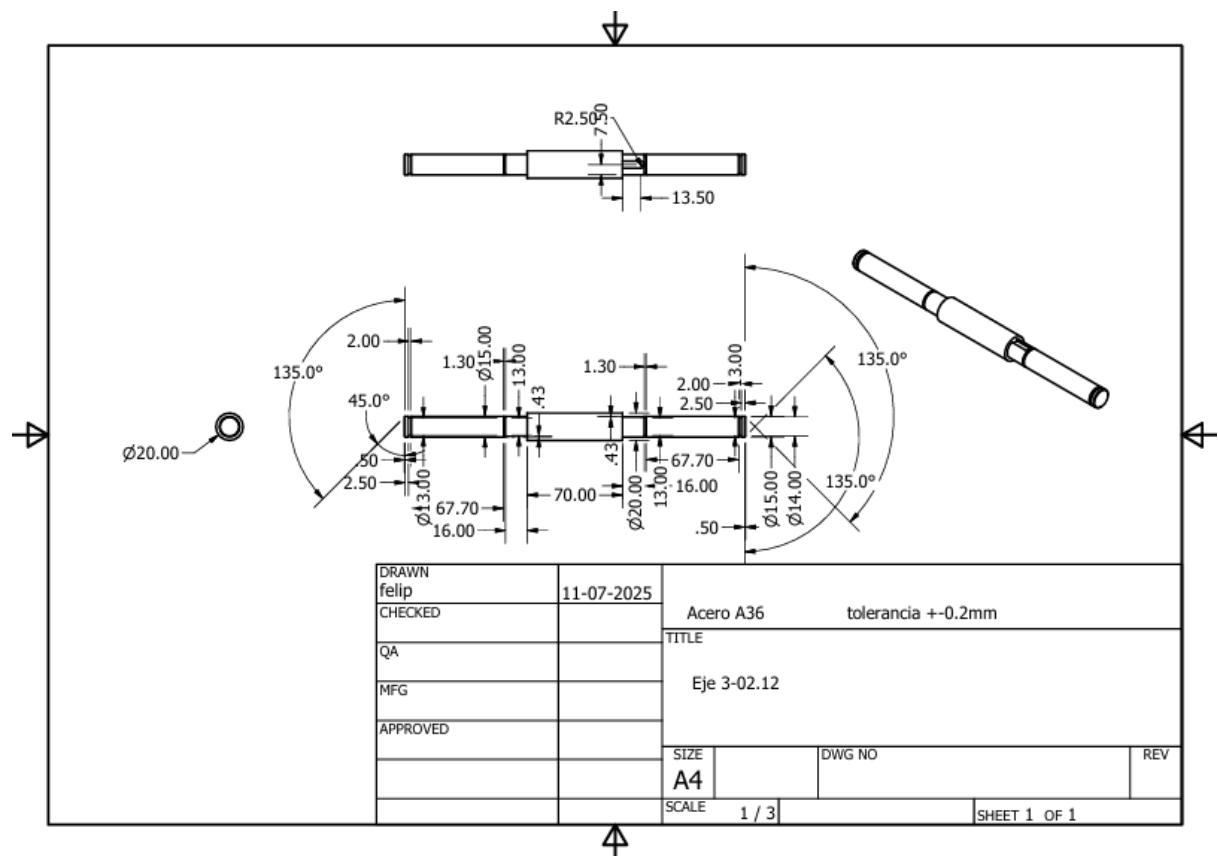
Anexo 3.1



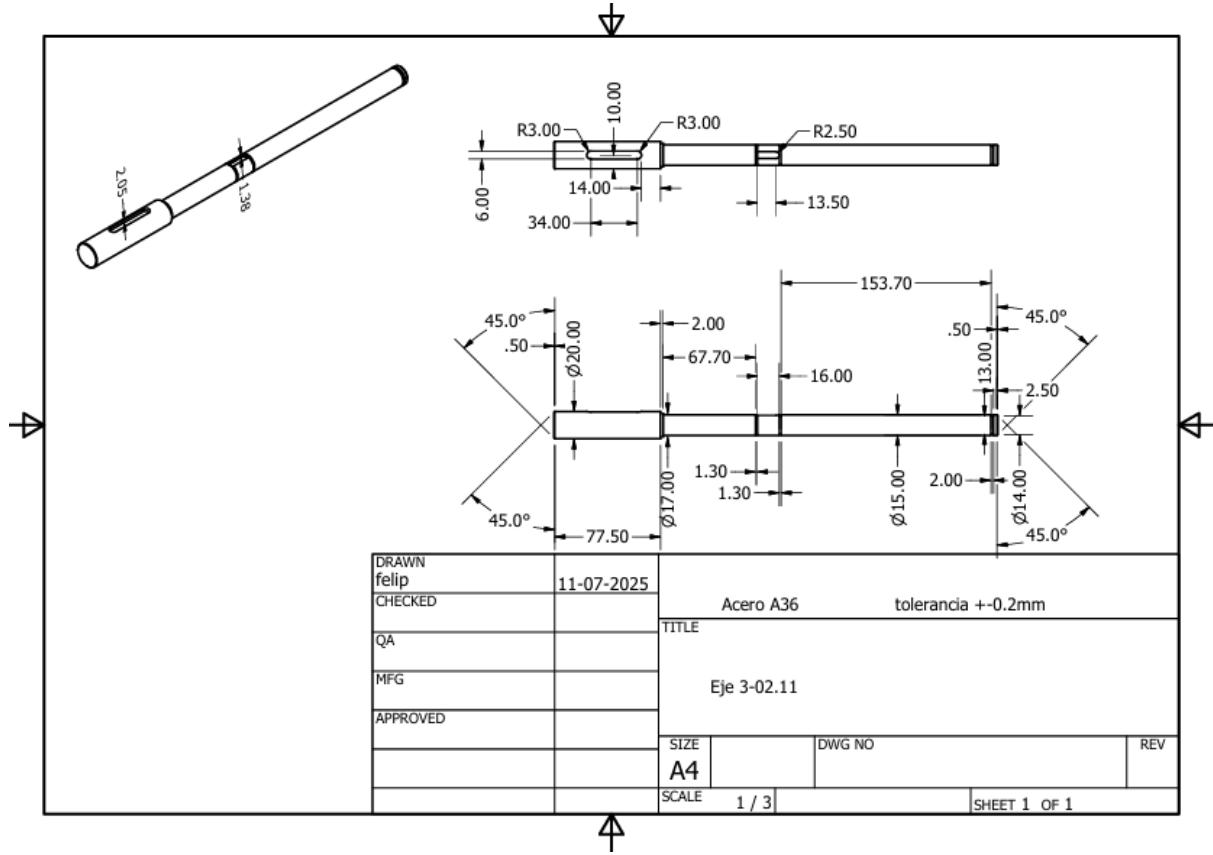
Anexo 3.2



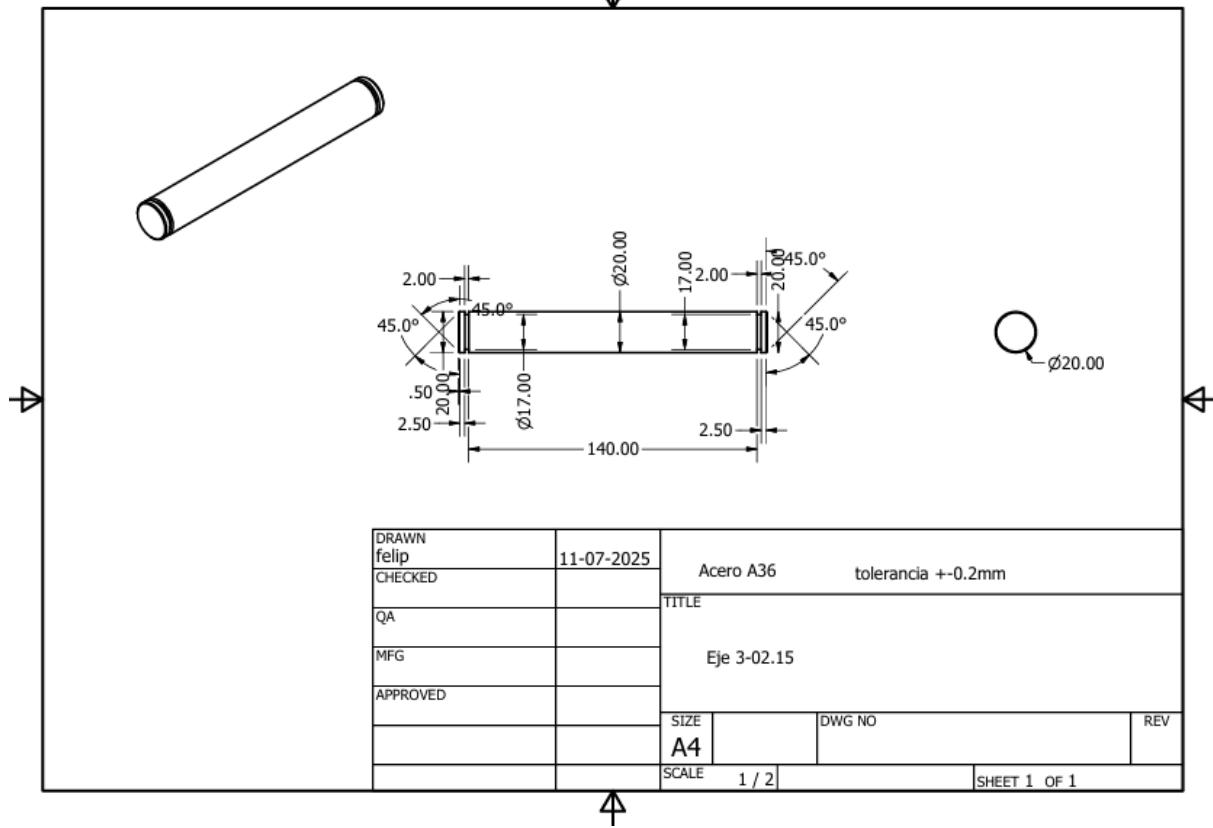
Anexo 3.3



Anexo 3.4

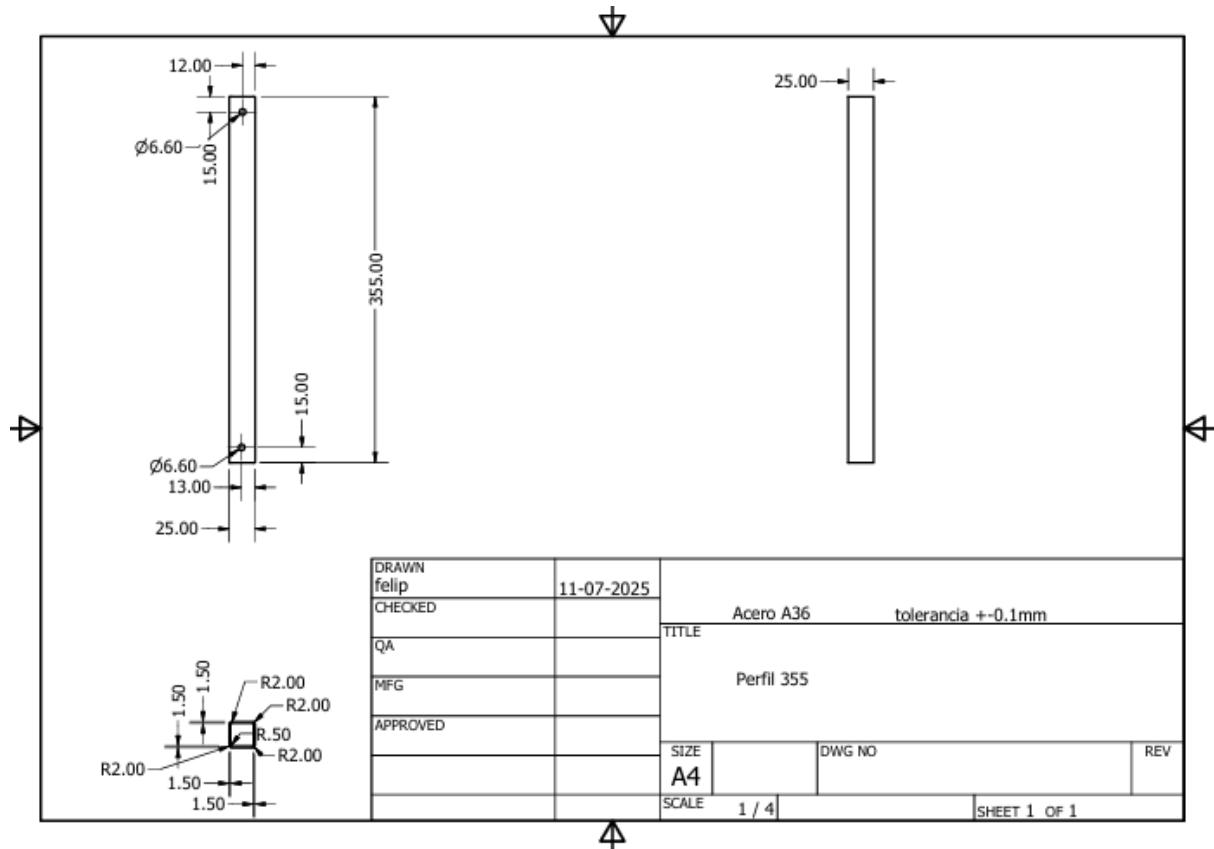


Anexo 3.5

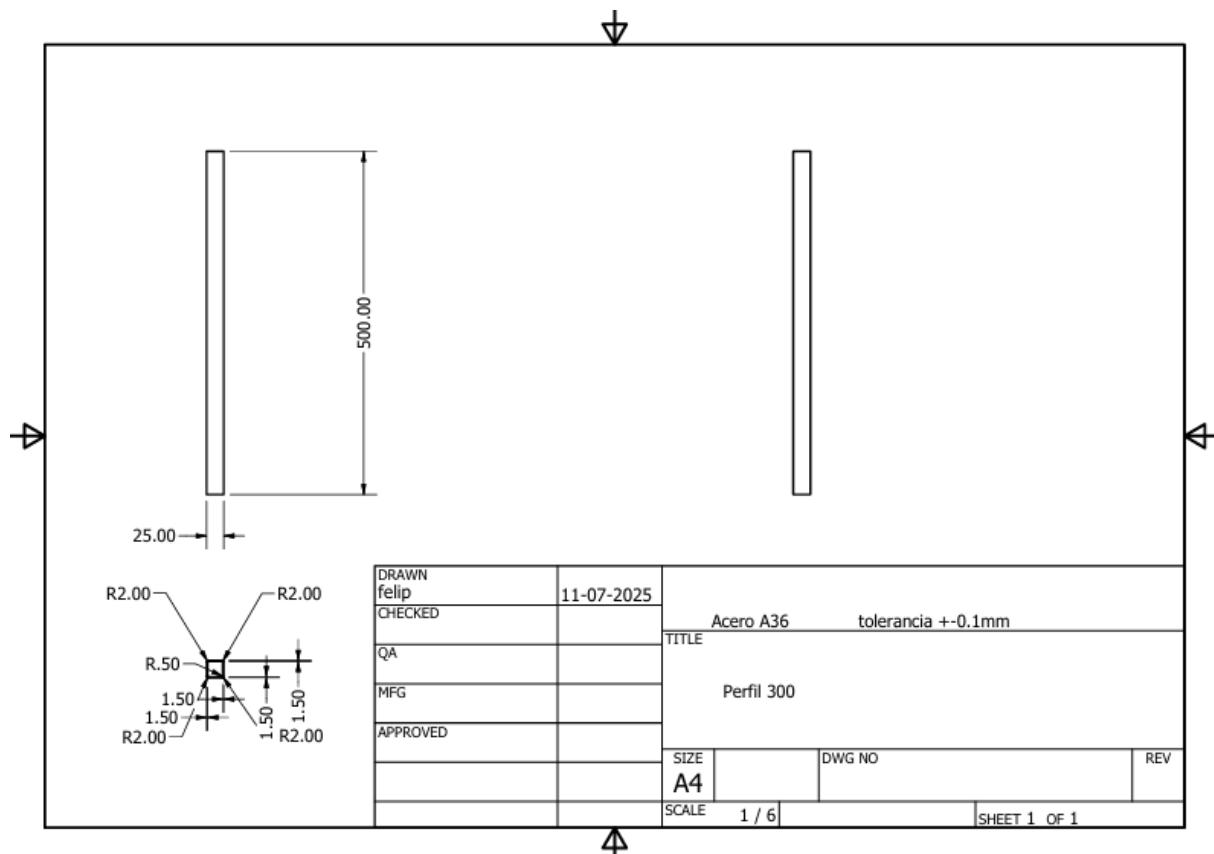


Anexo 4: Planos Perfiles

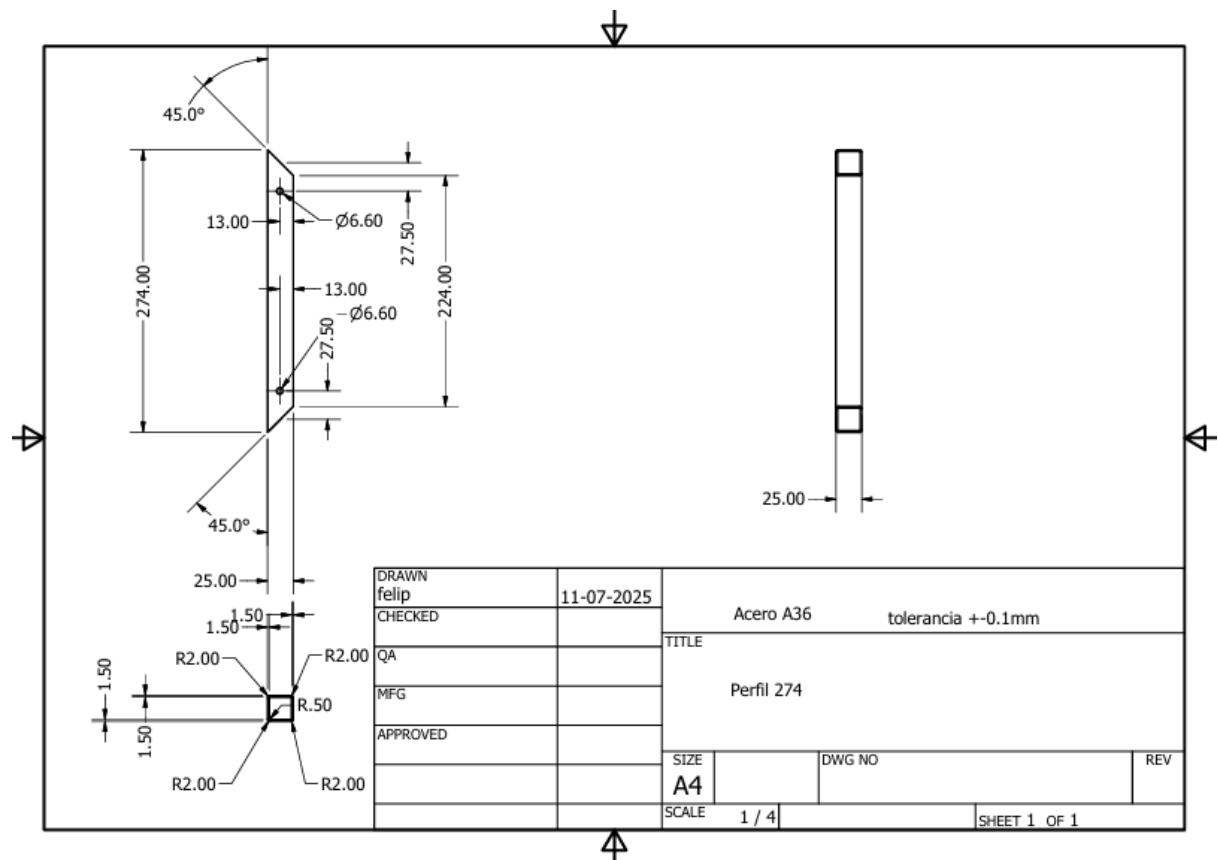
Anexo 4.1



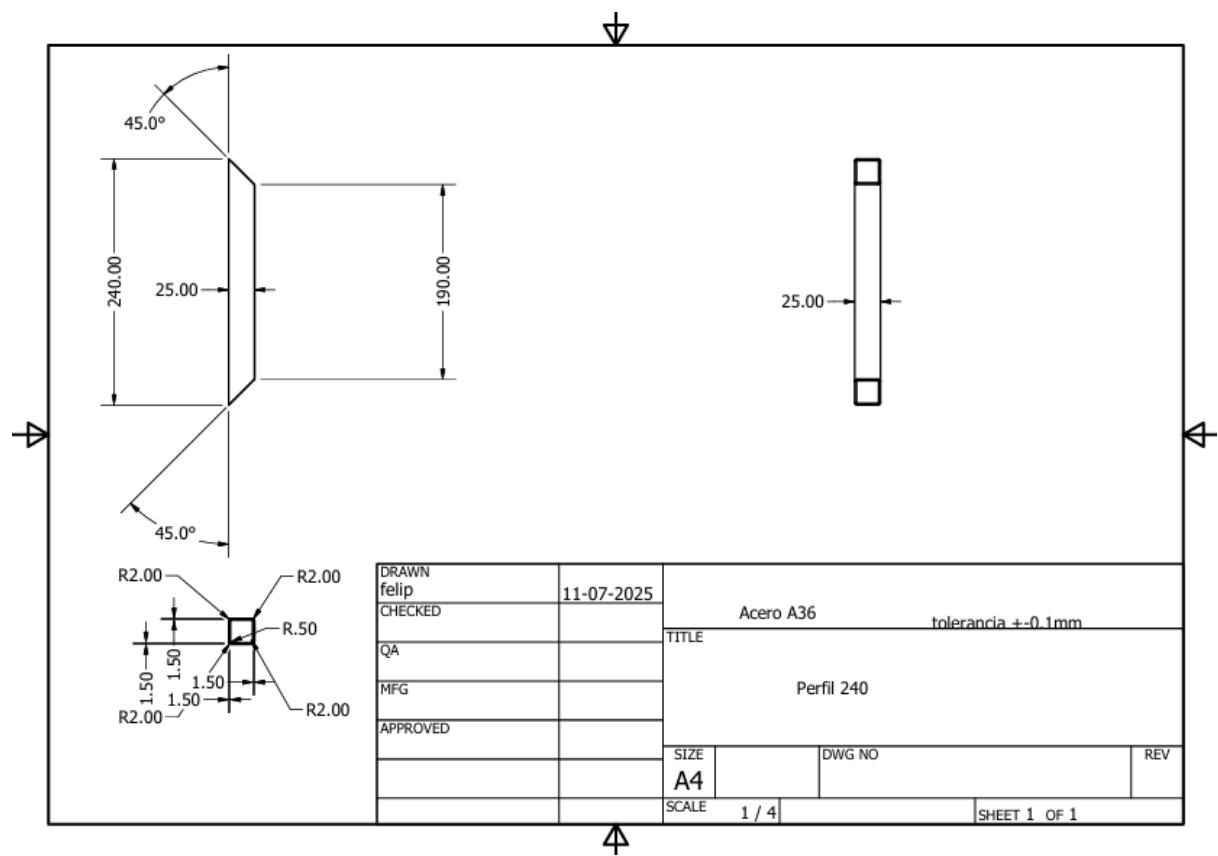
Anexo 4.2



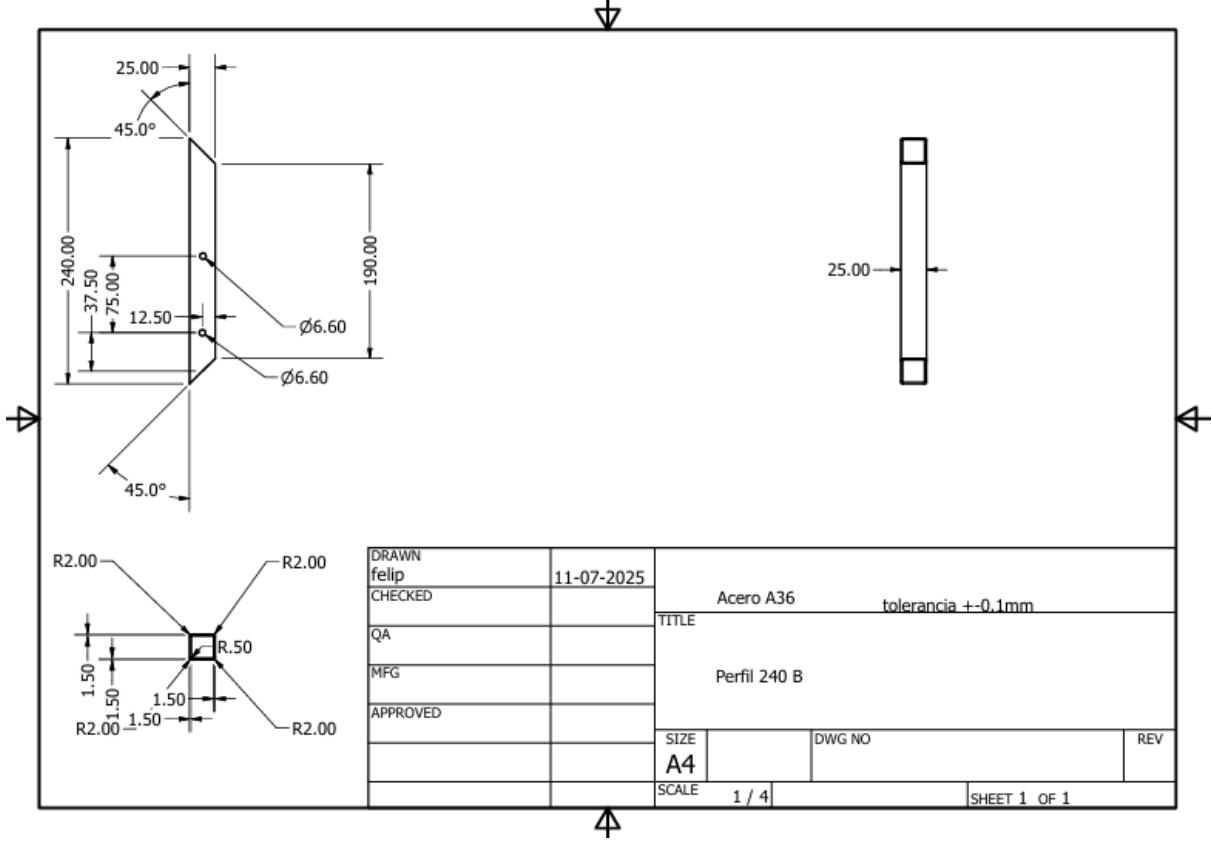
Anexo 4.3



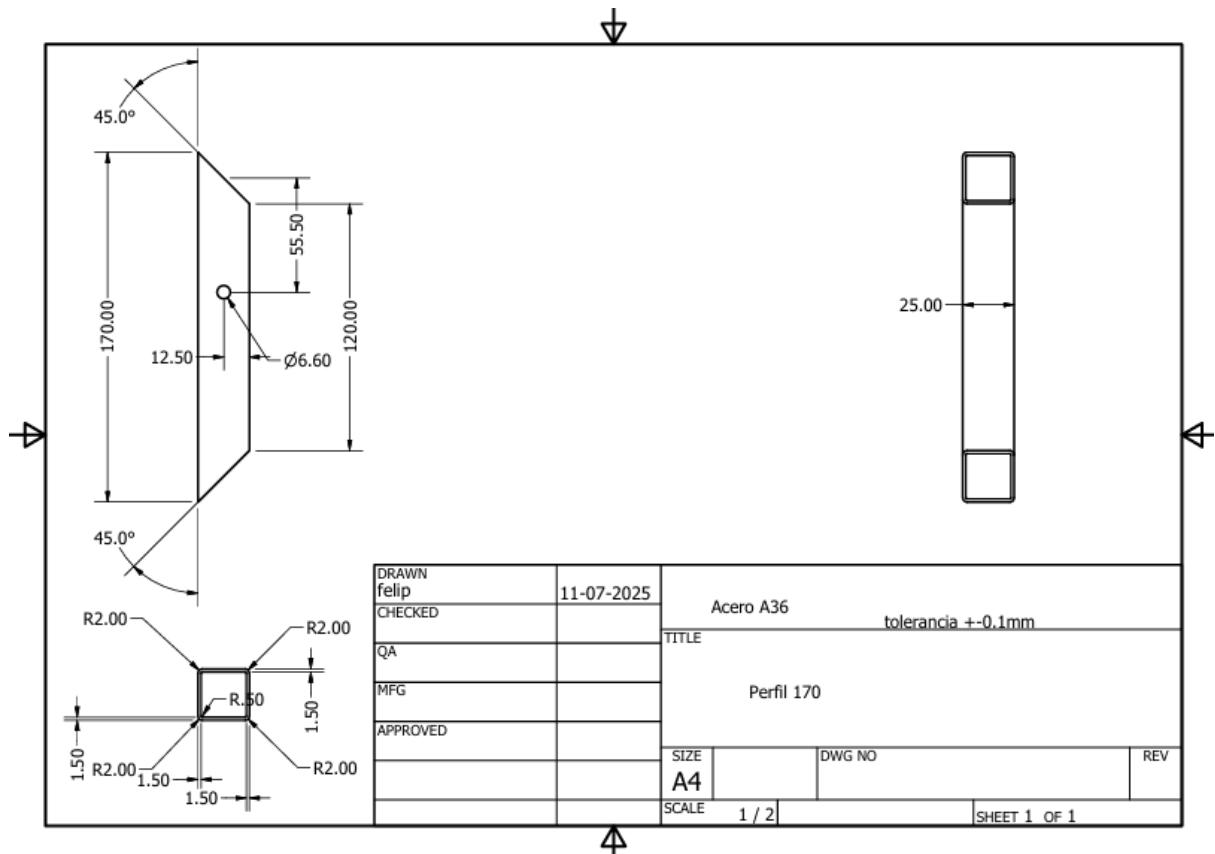
Anexo 4.4



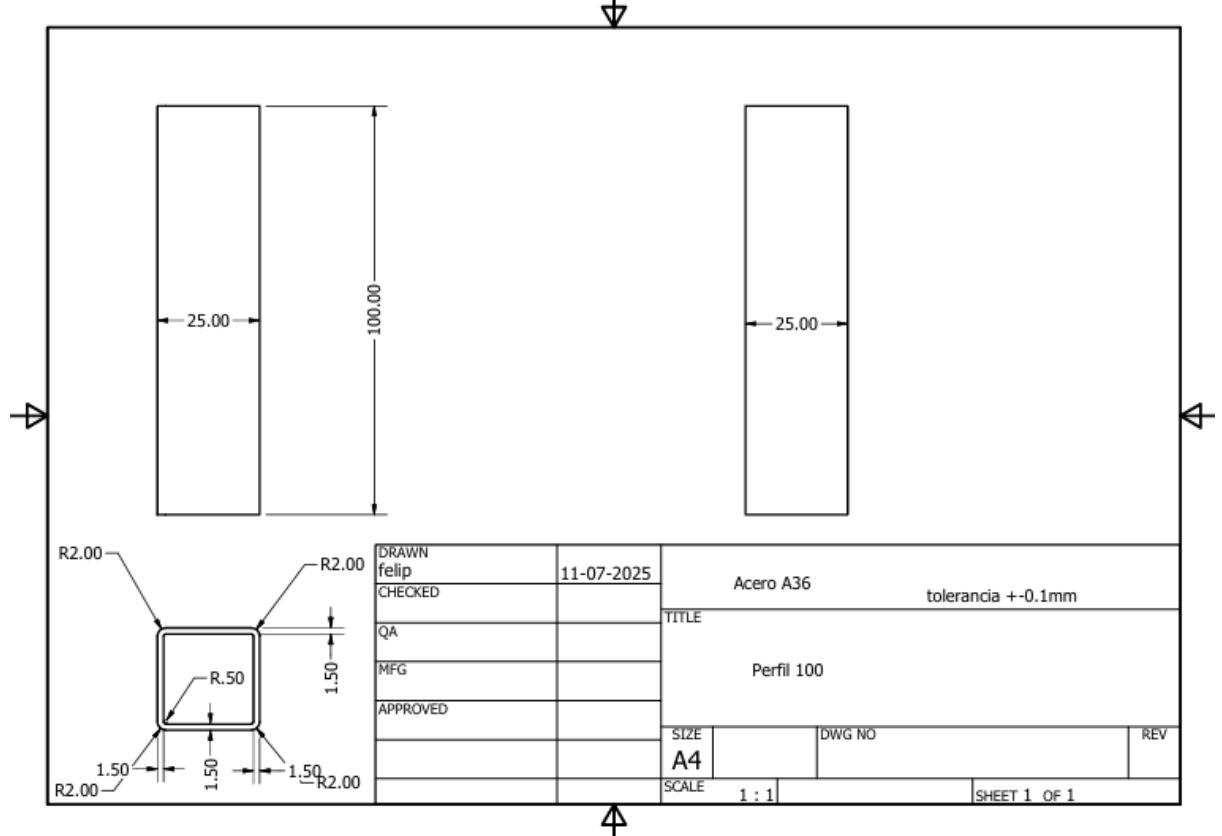
Anexo 4.5



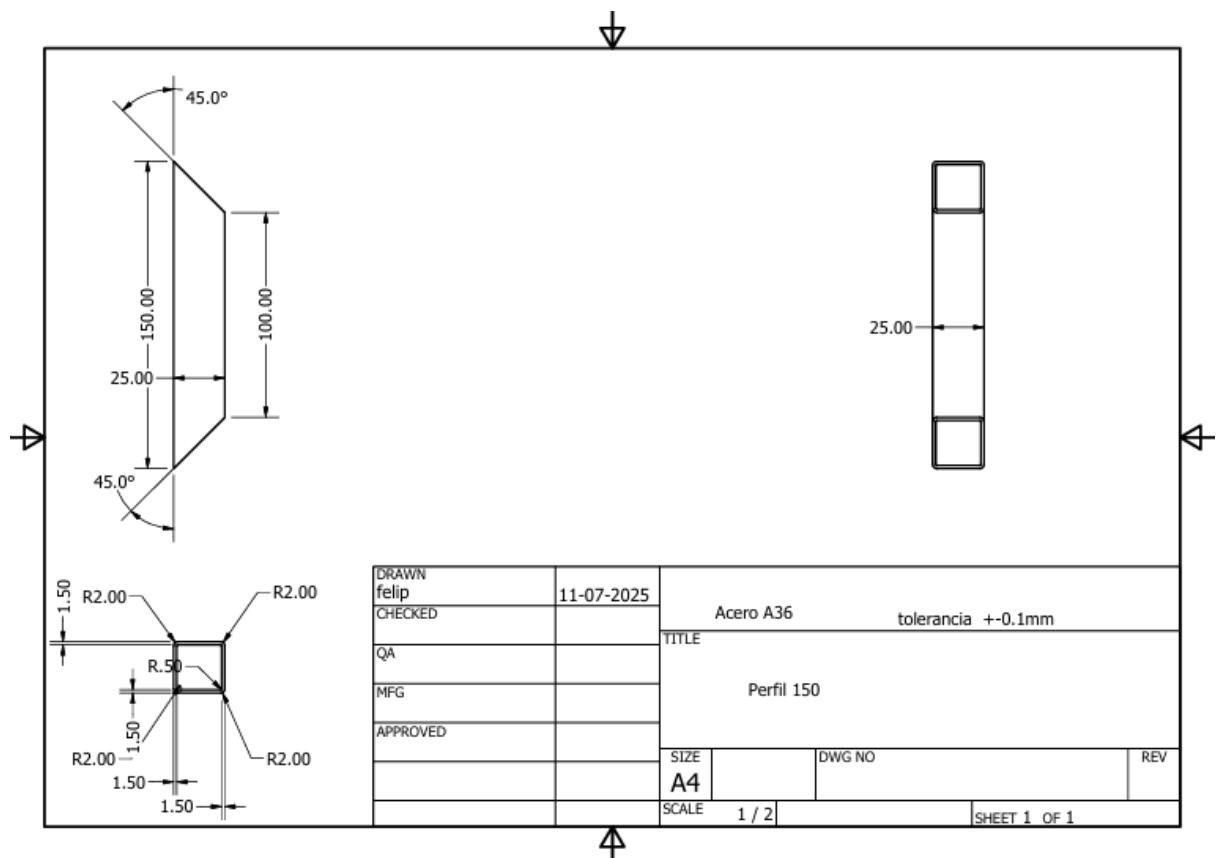
Anexo 4.6



Anexo 4.7

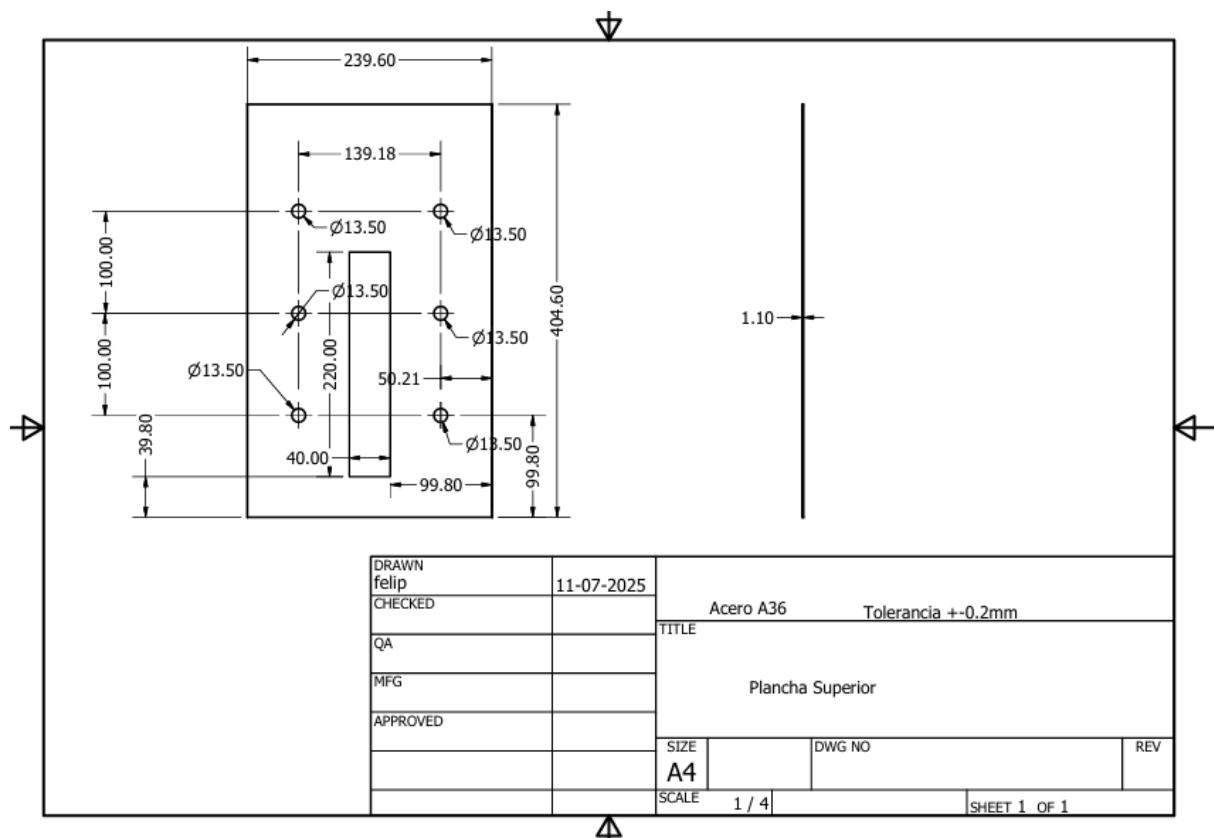


Anexo 4.8

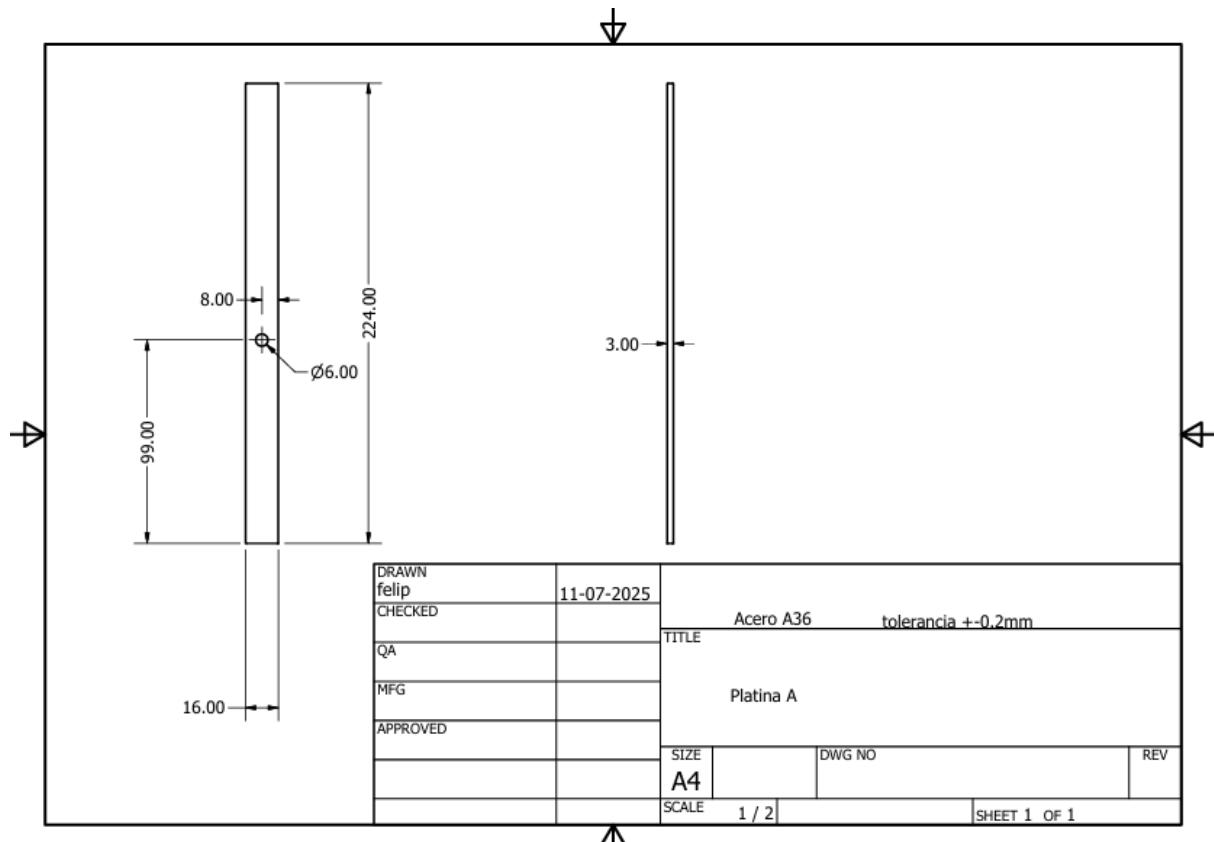


Anexo 5: Planos planchas carcasa

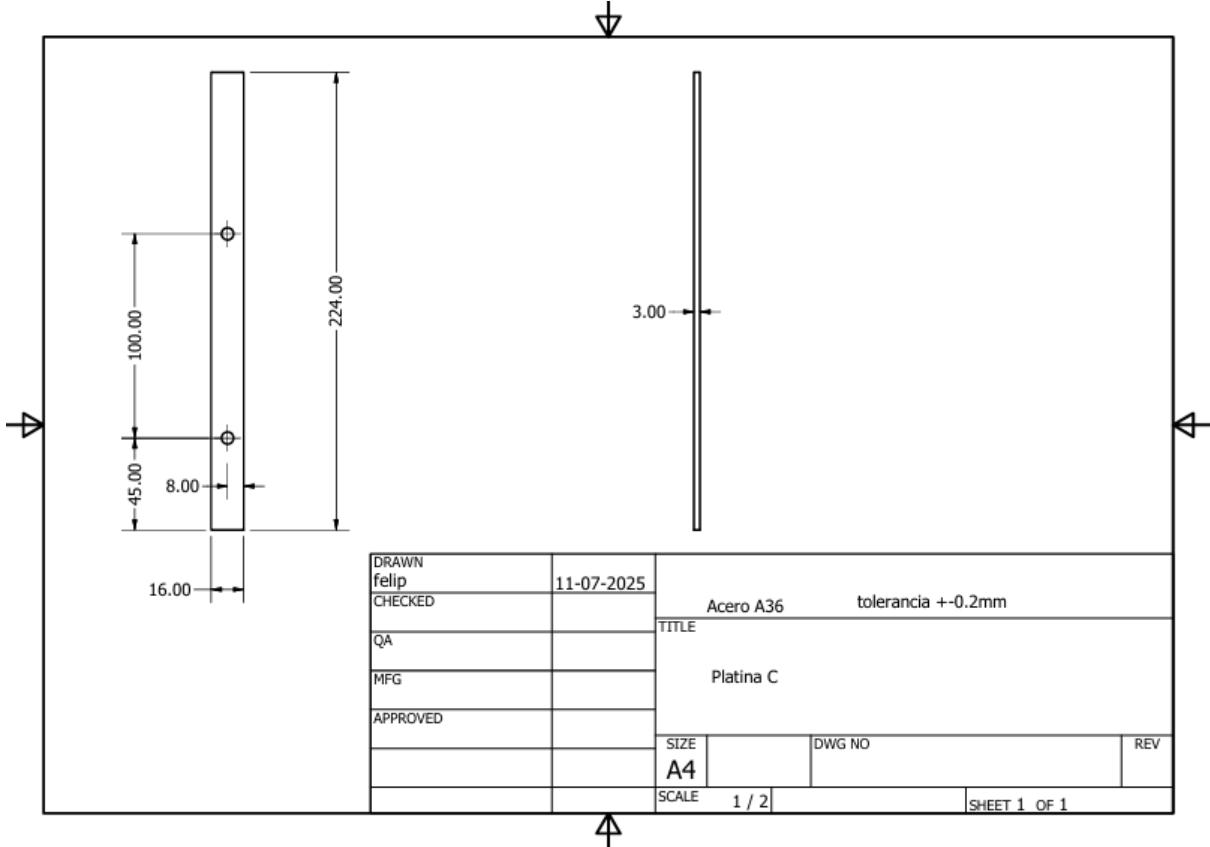
Anexo 5.1



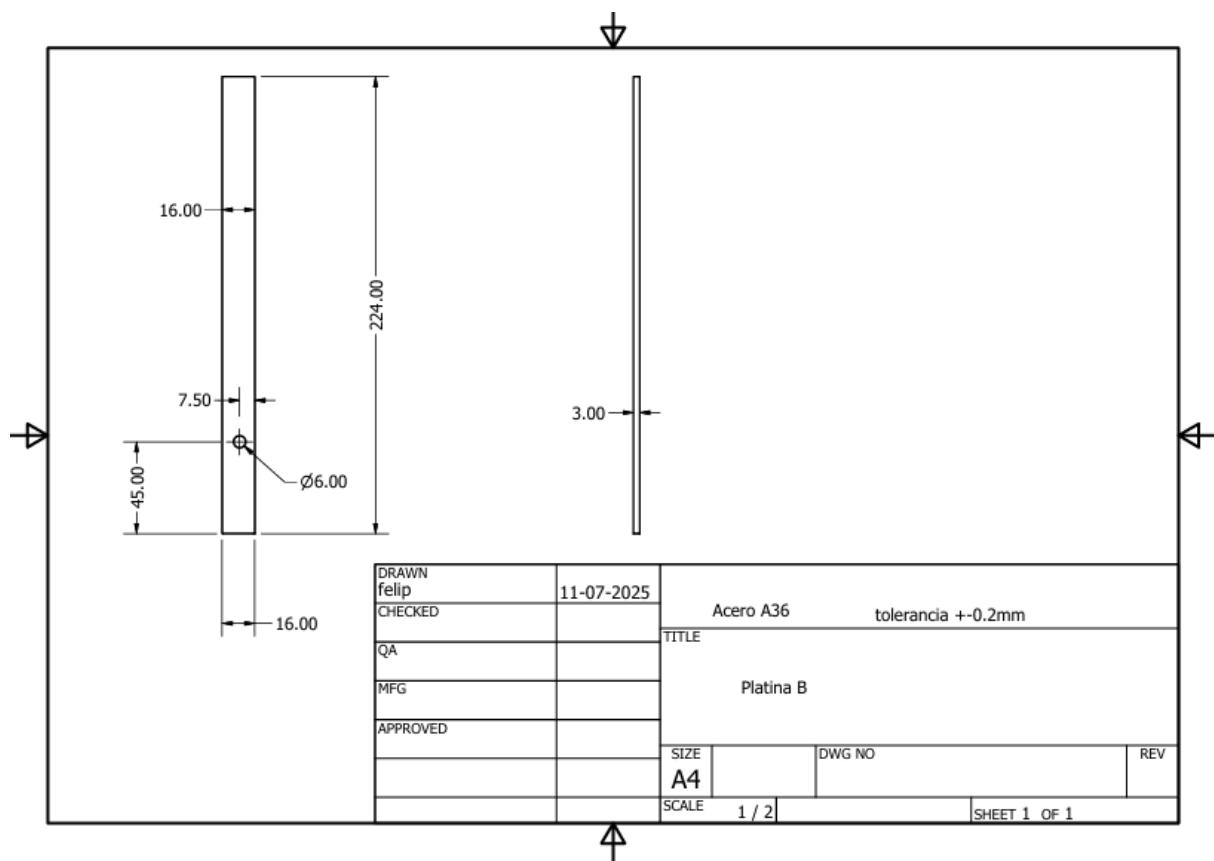
Anexo 5.2



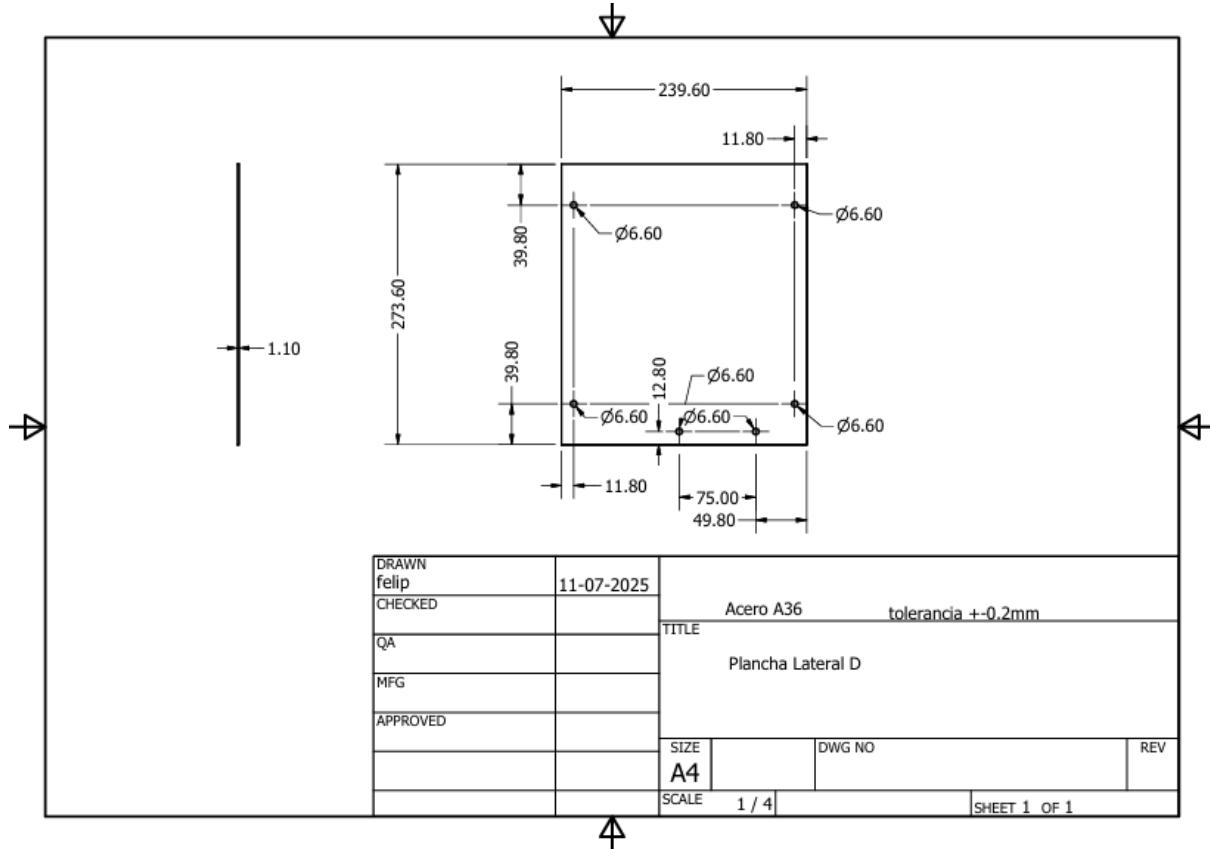
Anexo 5.3



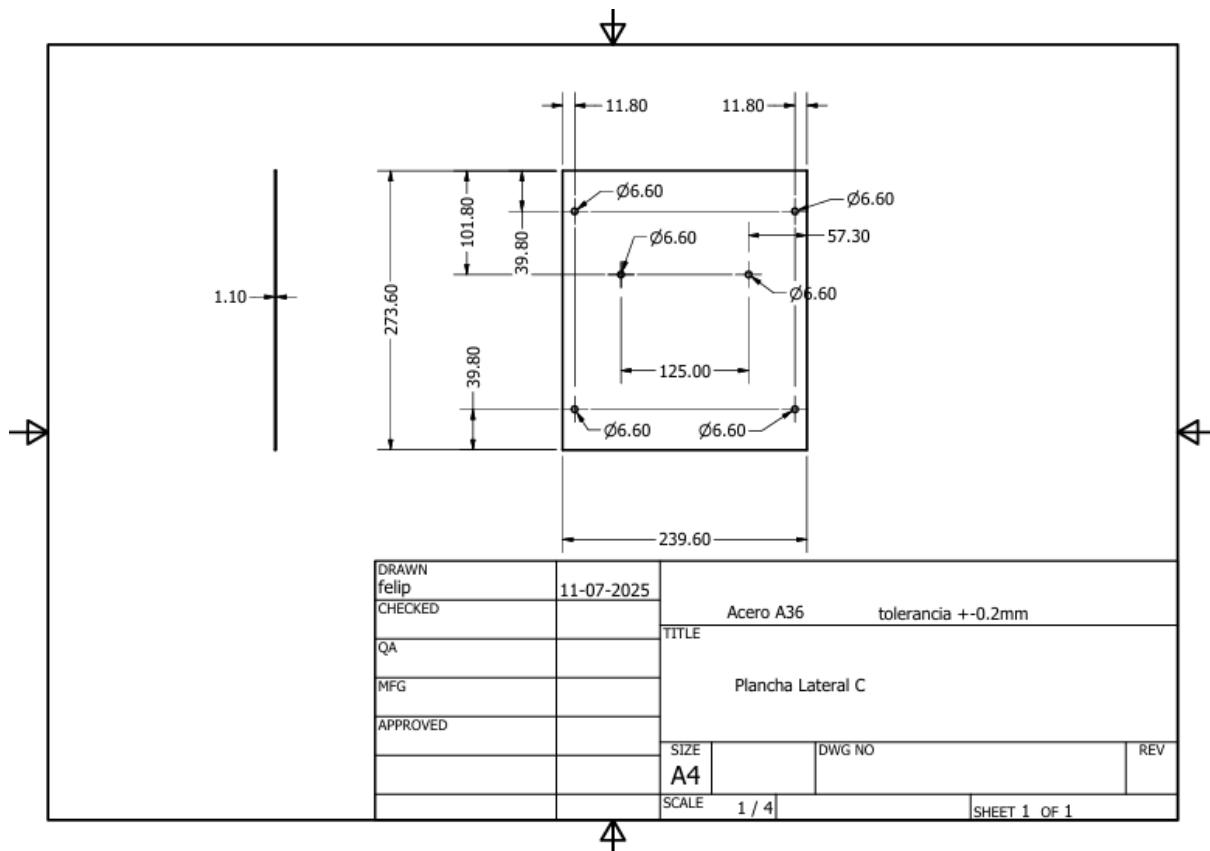
Anexo 5.4



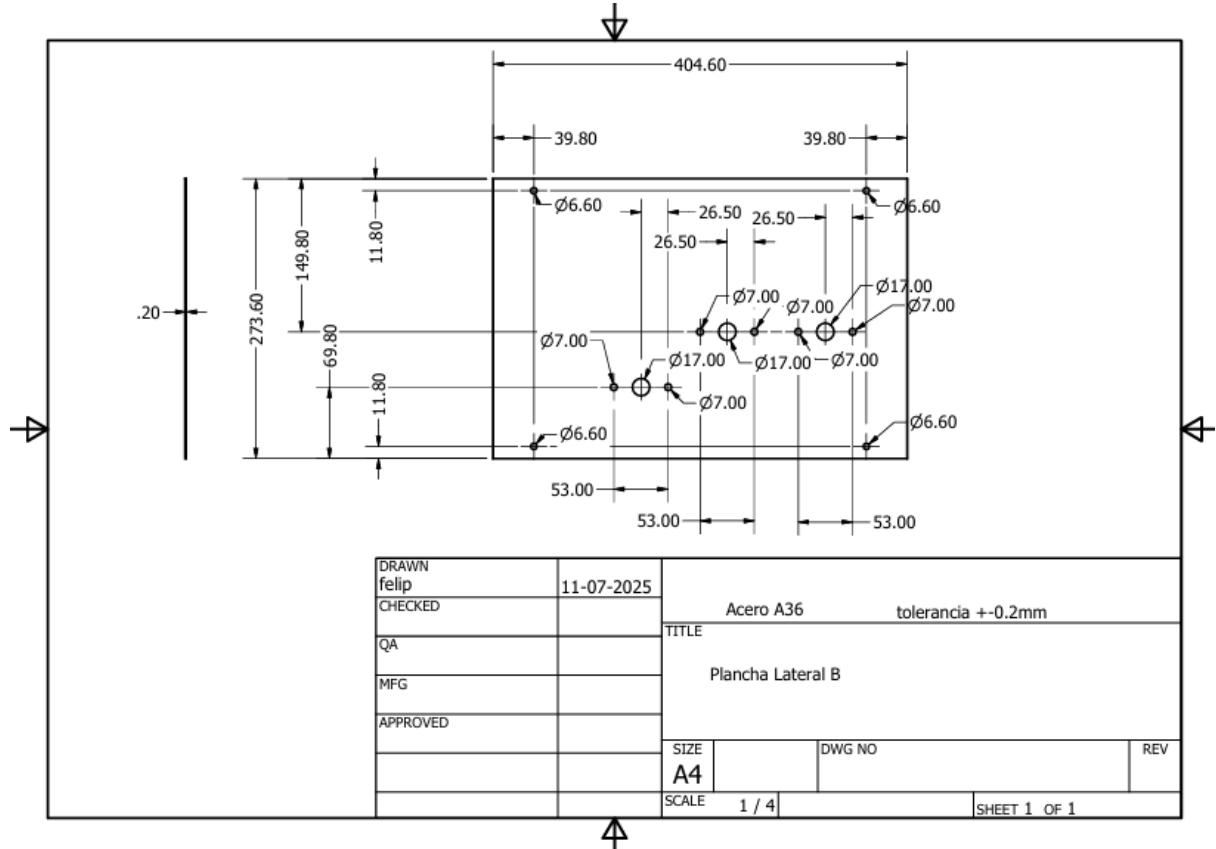
Anexo 5.5



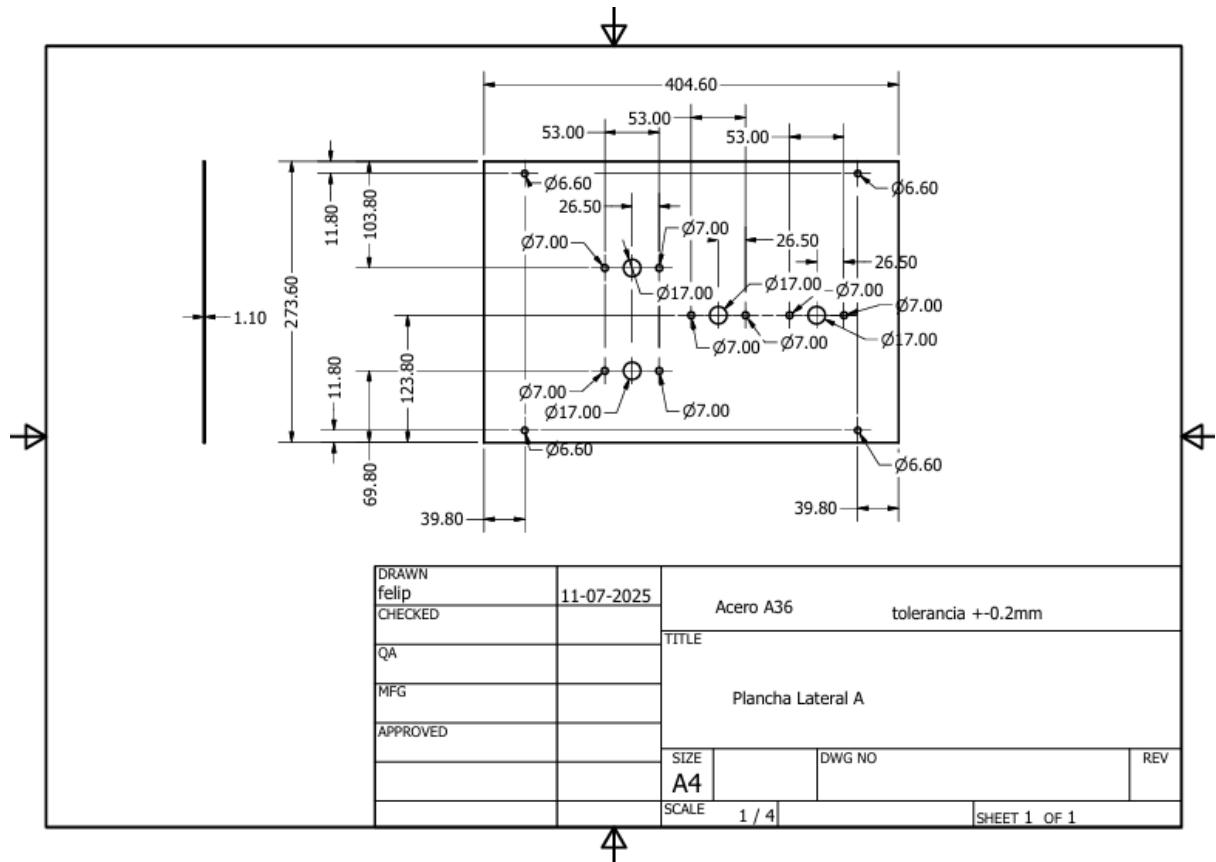
Anexo 5.6



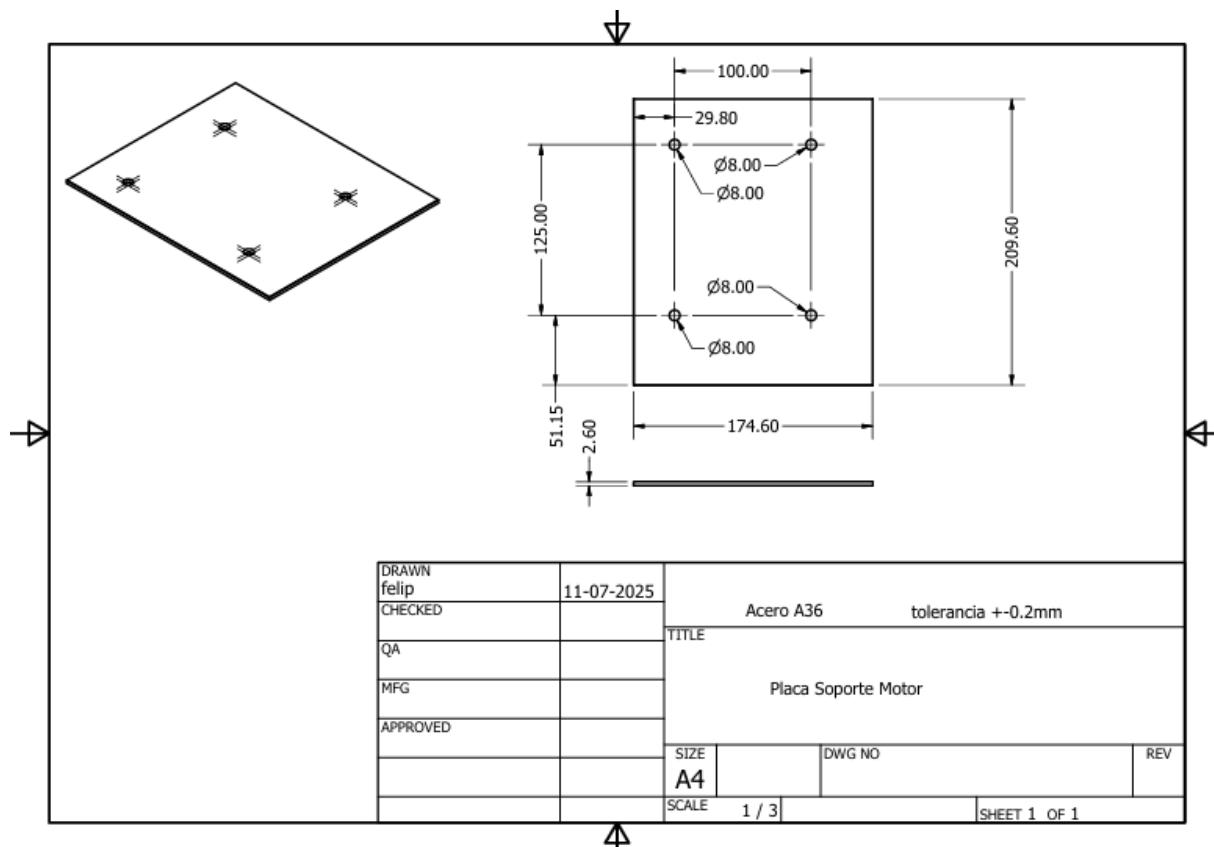
Anexo 5.7



Anexo 5.8

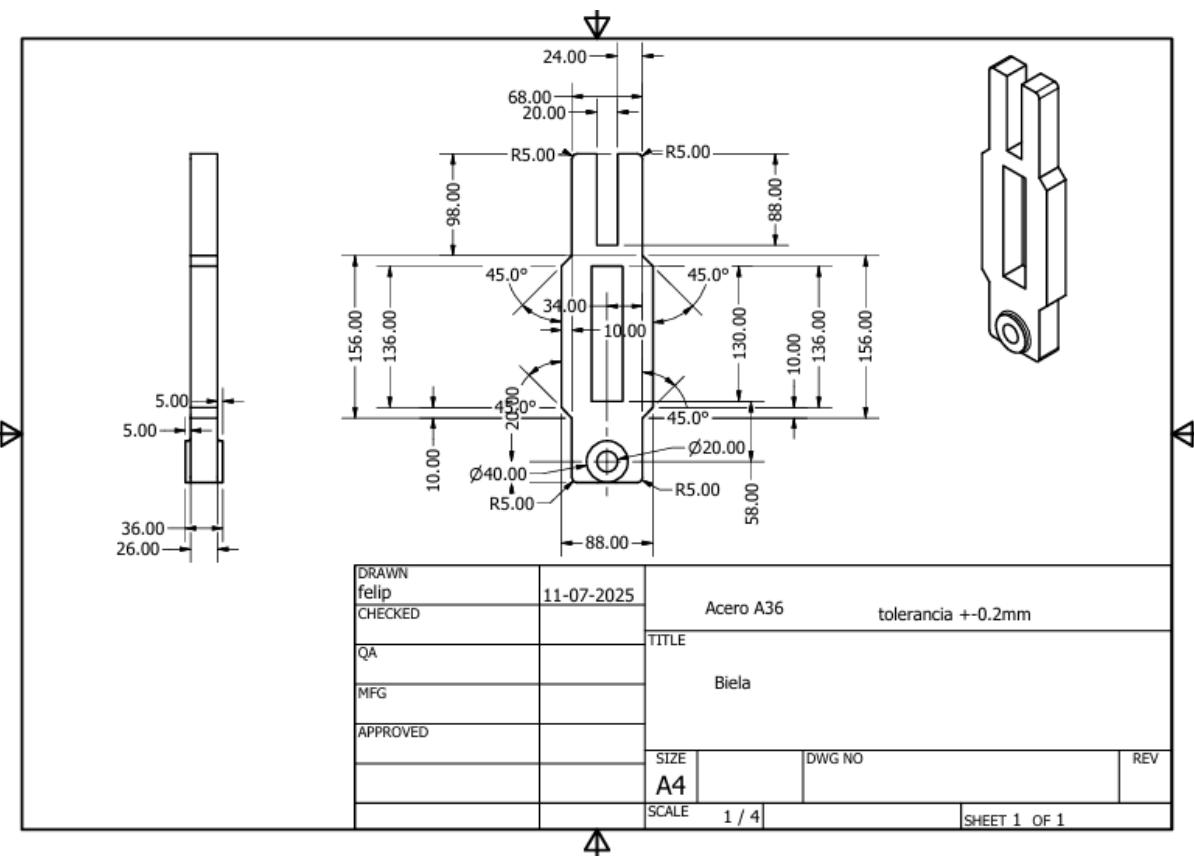


Anexo 5.9

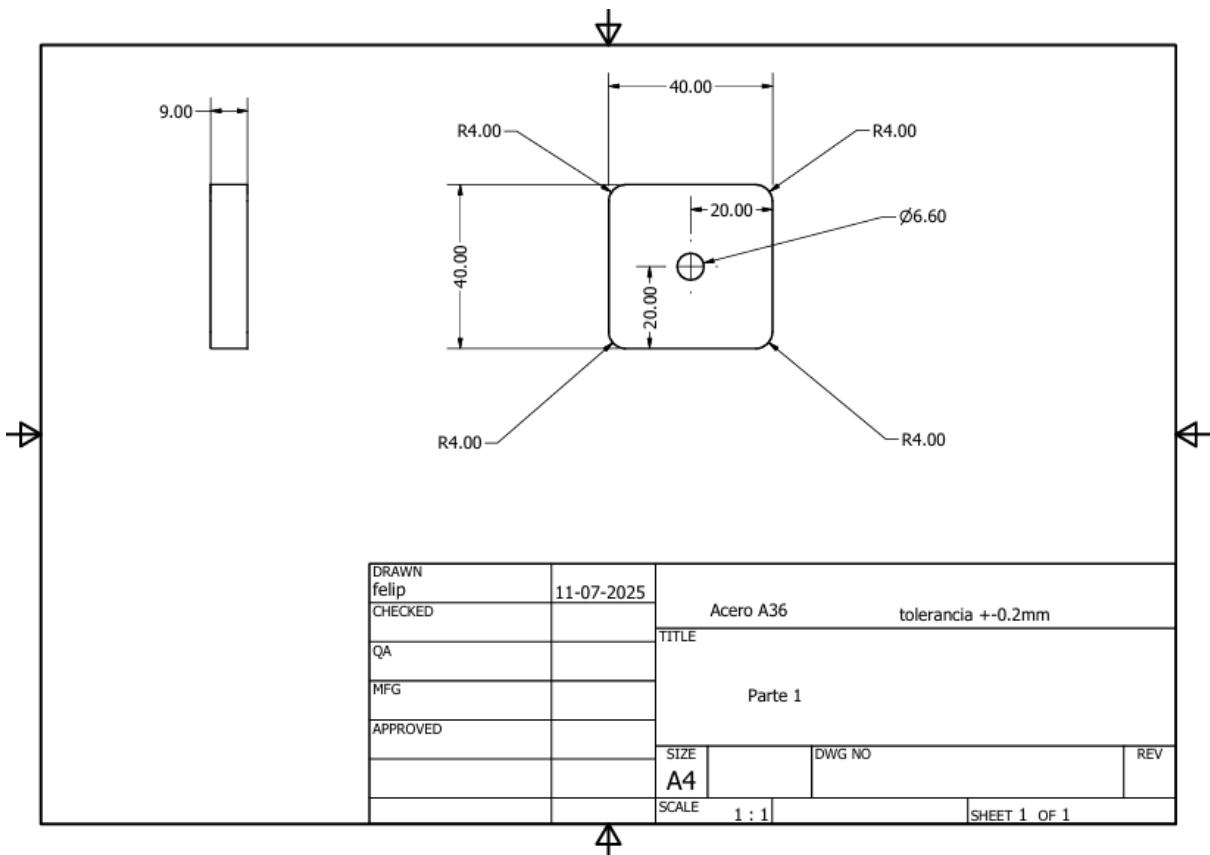


Anexo 6: Planos Biela

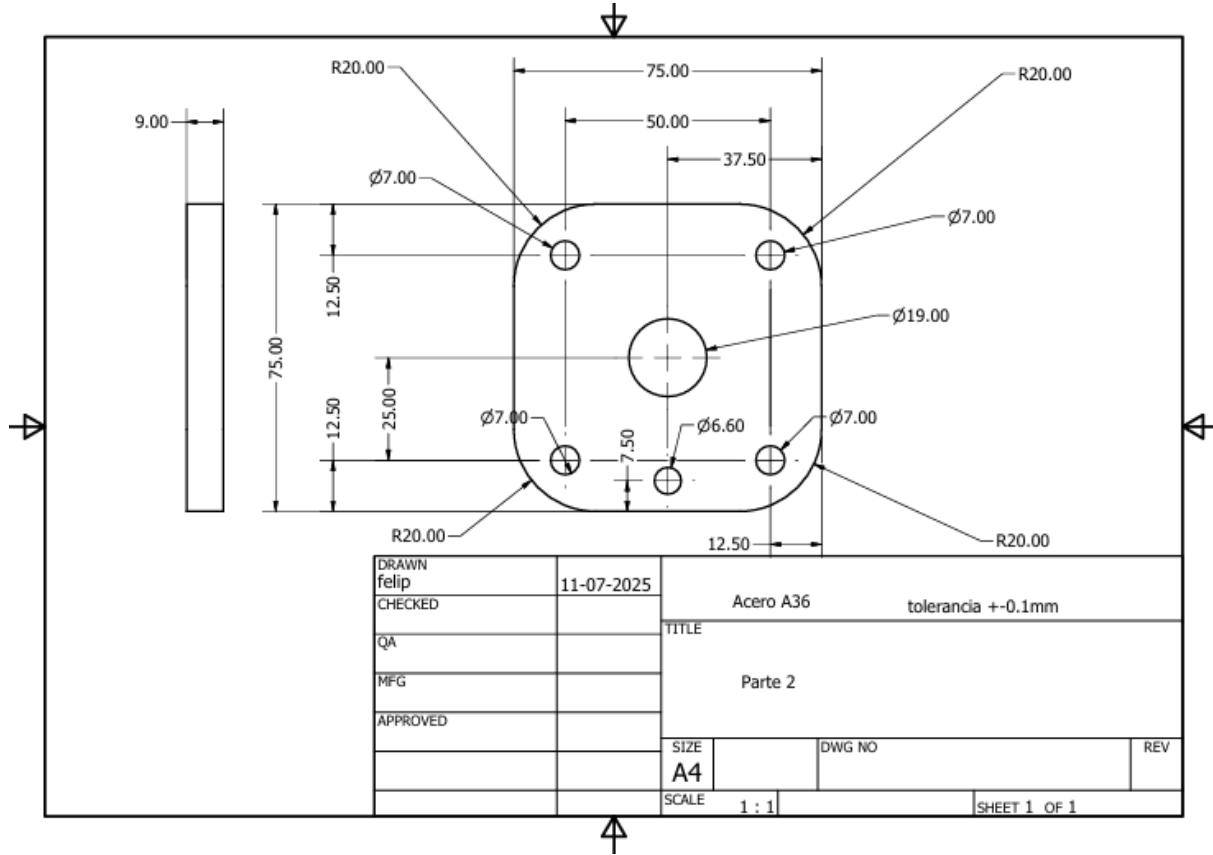
Anexo 6.1



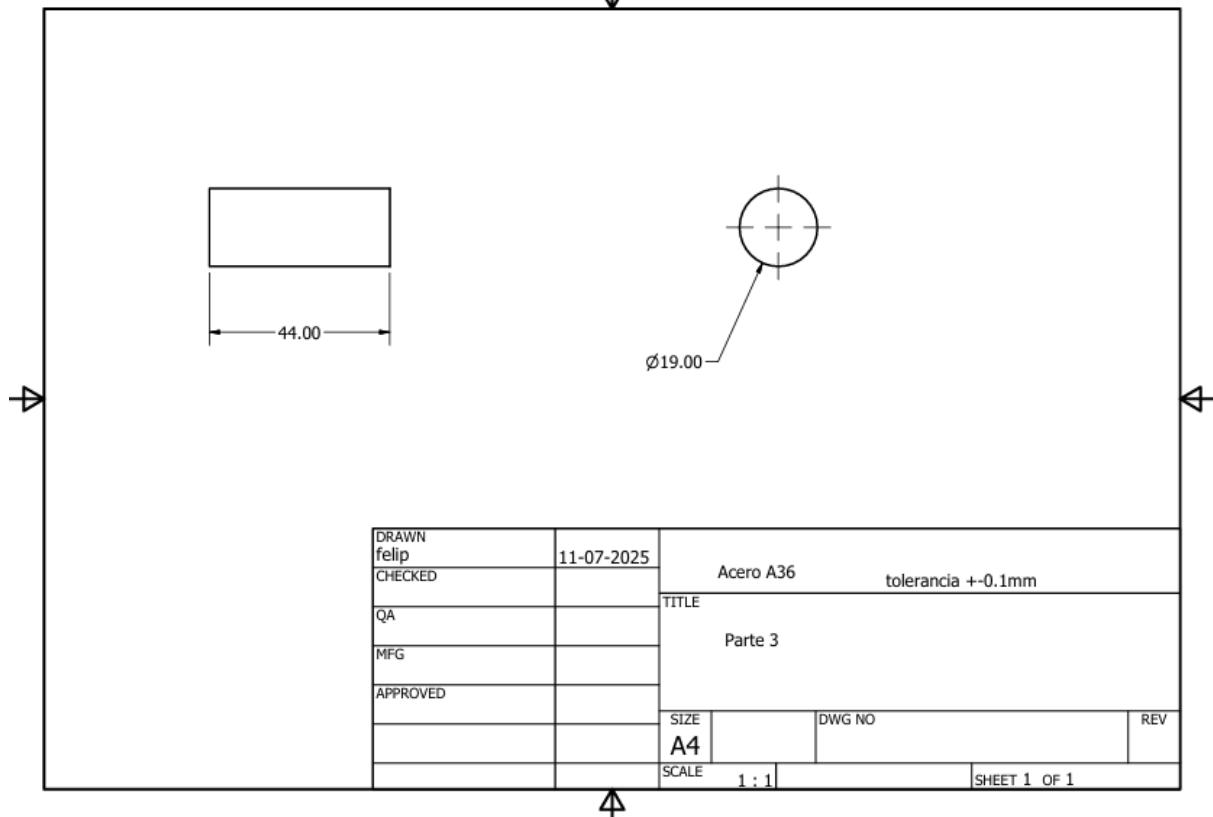
Anexo 6.2



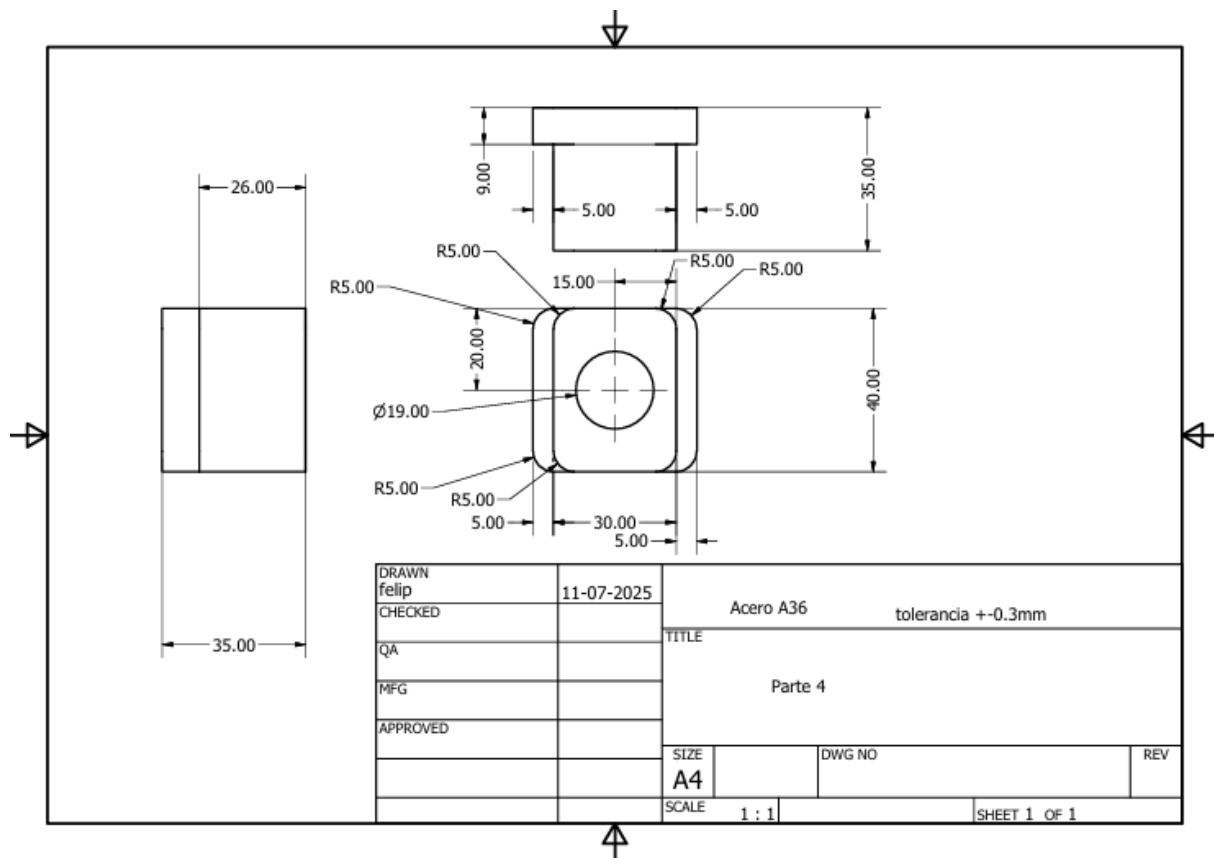
Anexo 6.3



Anexo 6.4

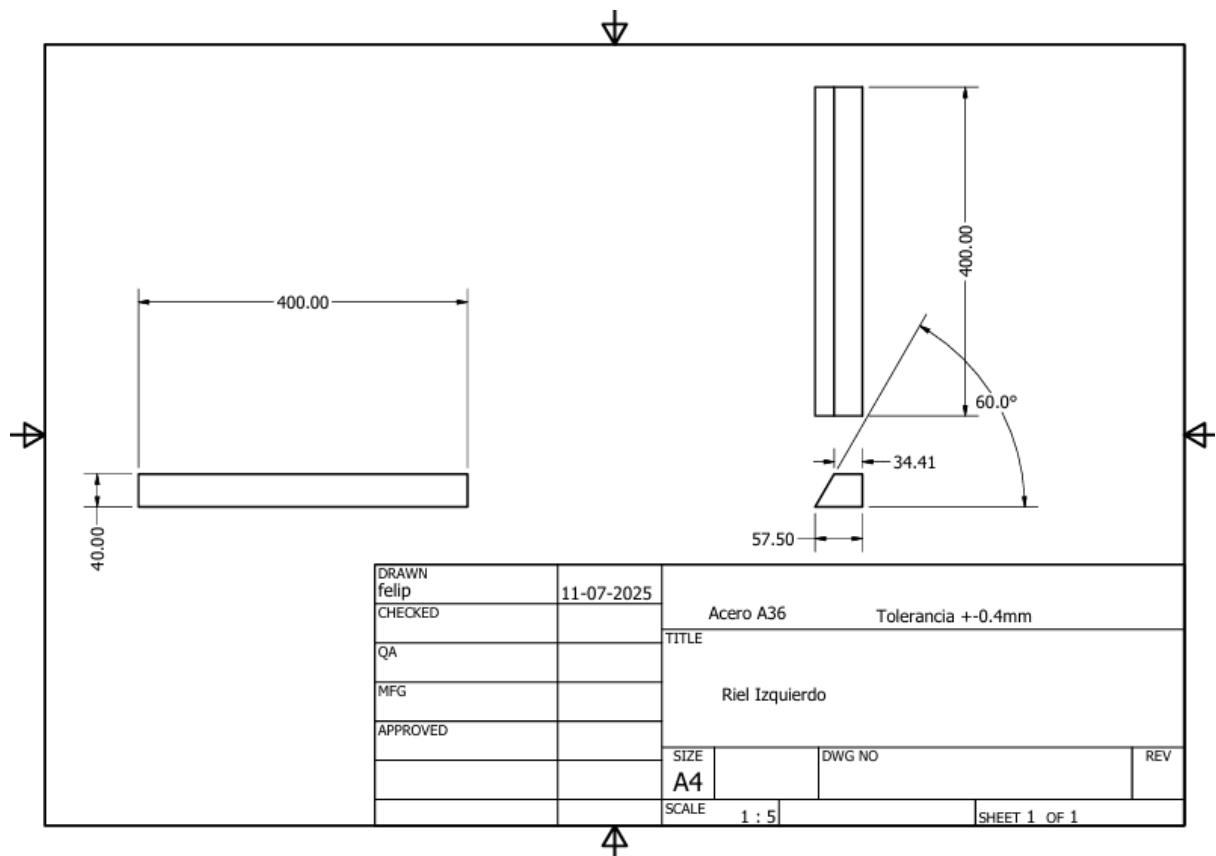


Anexo 6.5

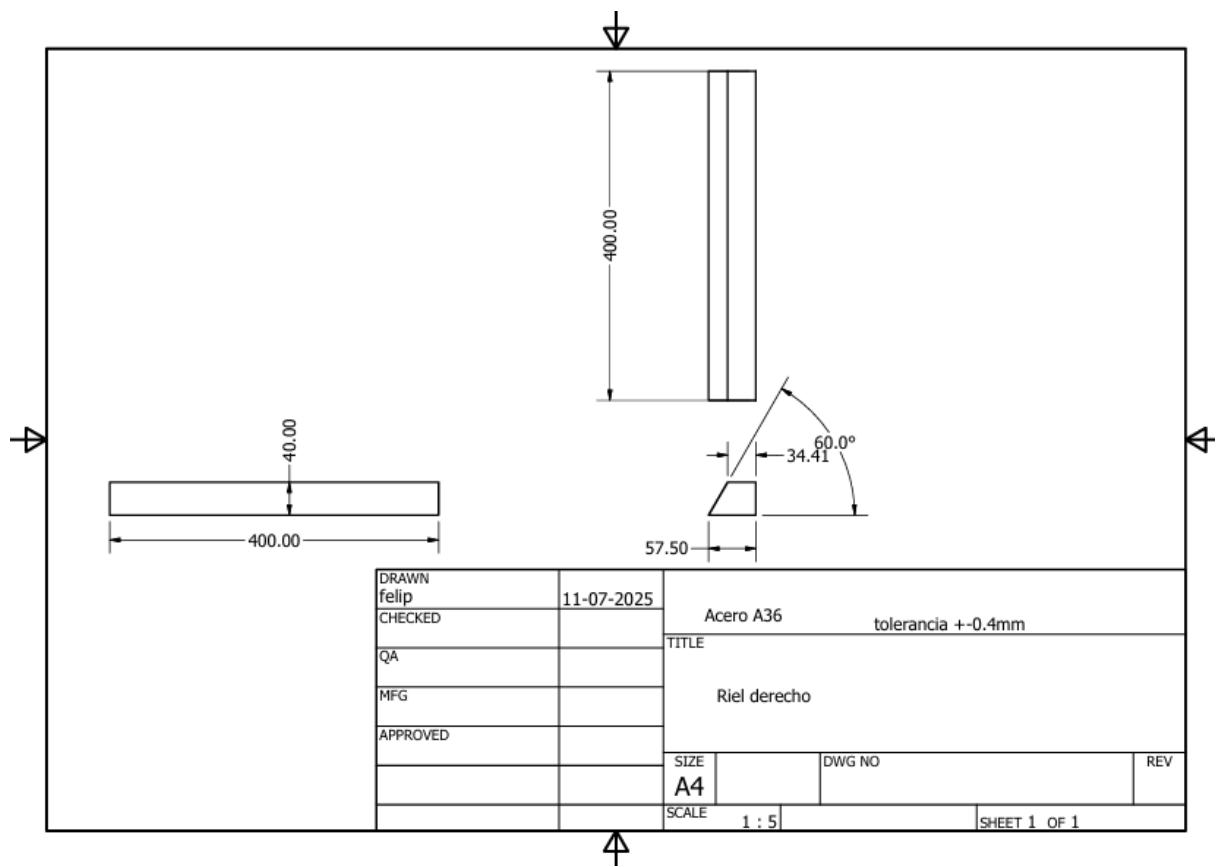


Anexo 7: Planos Torpedo

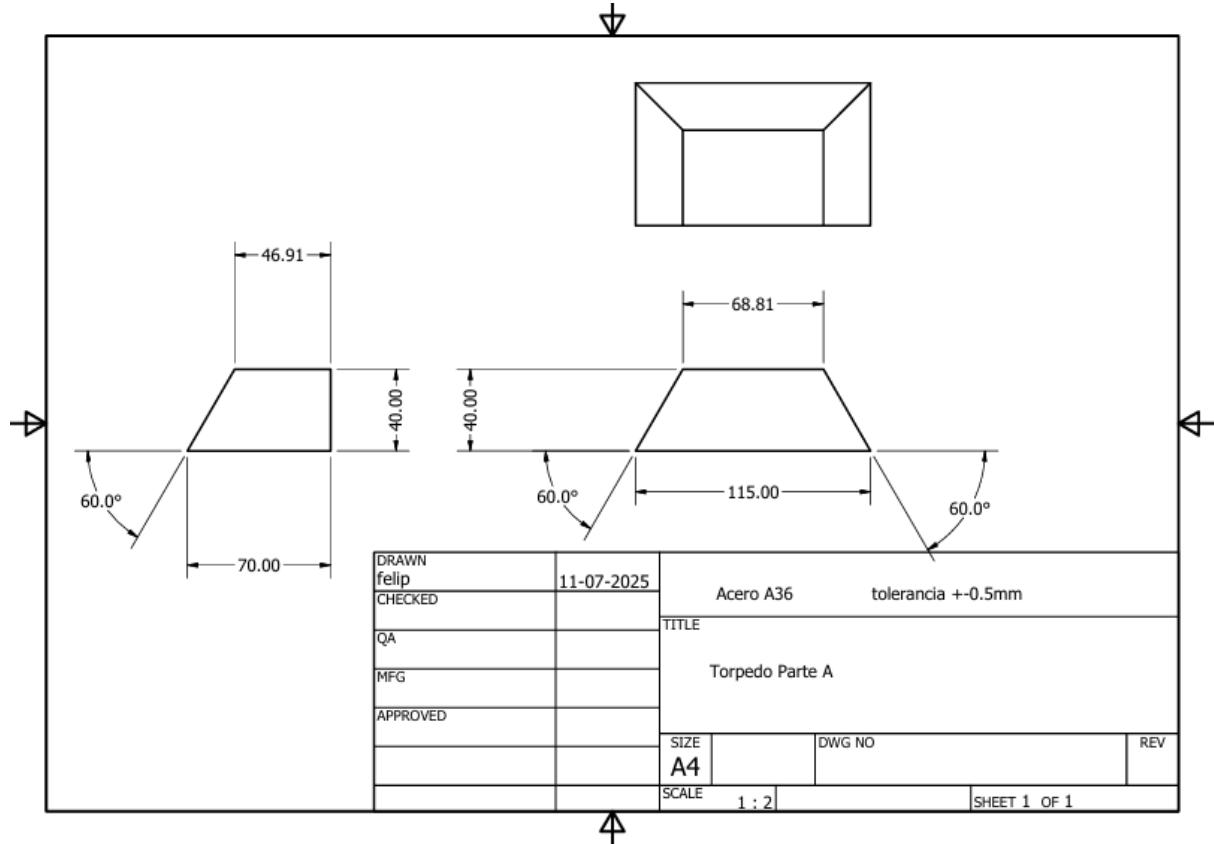
Anexo 7.1



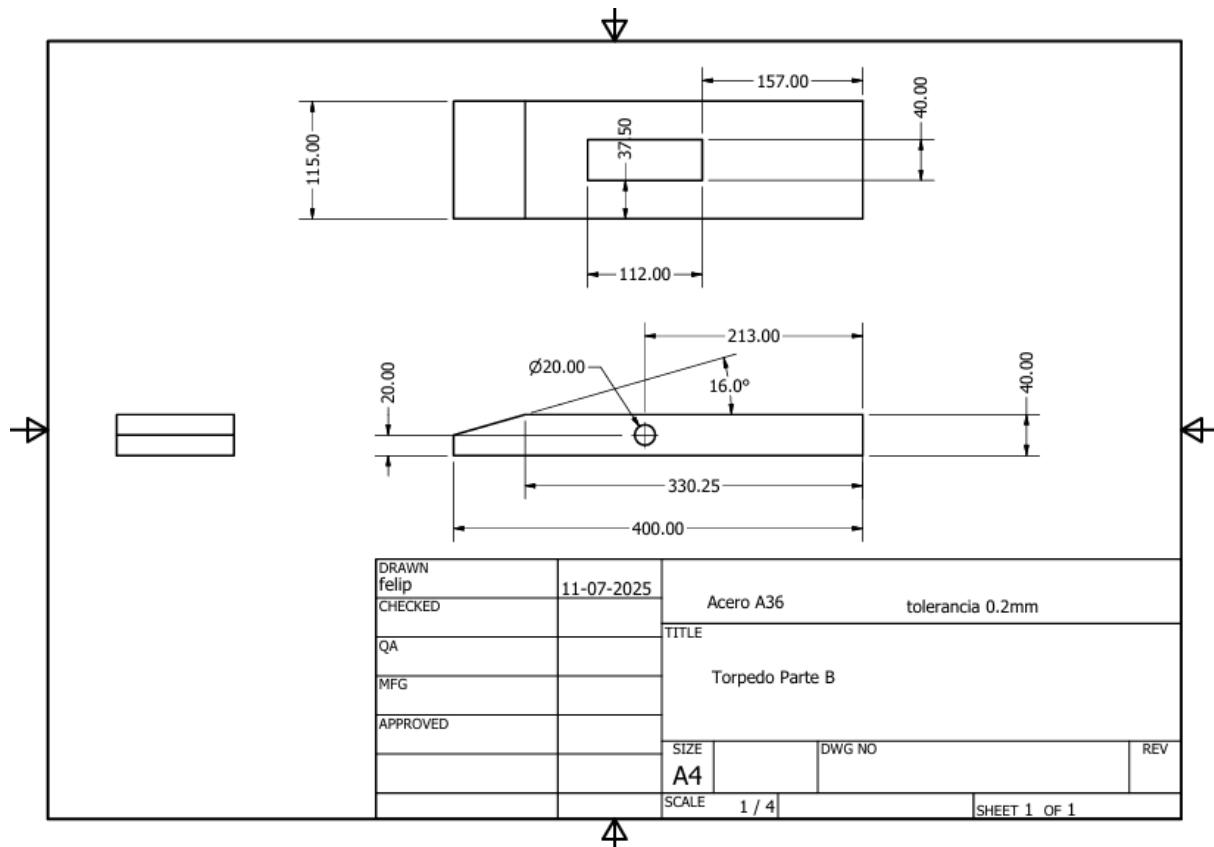
Anexo 7.2



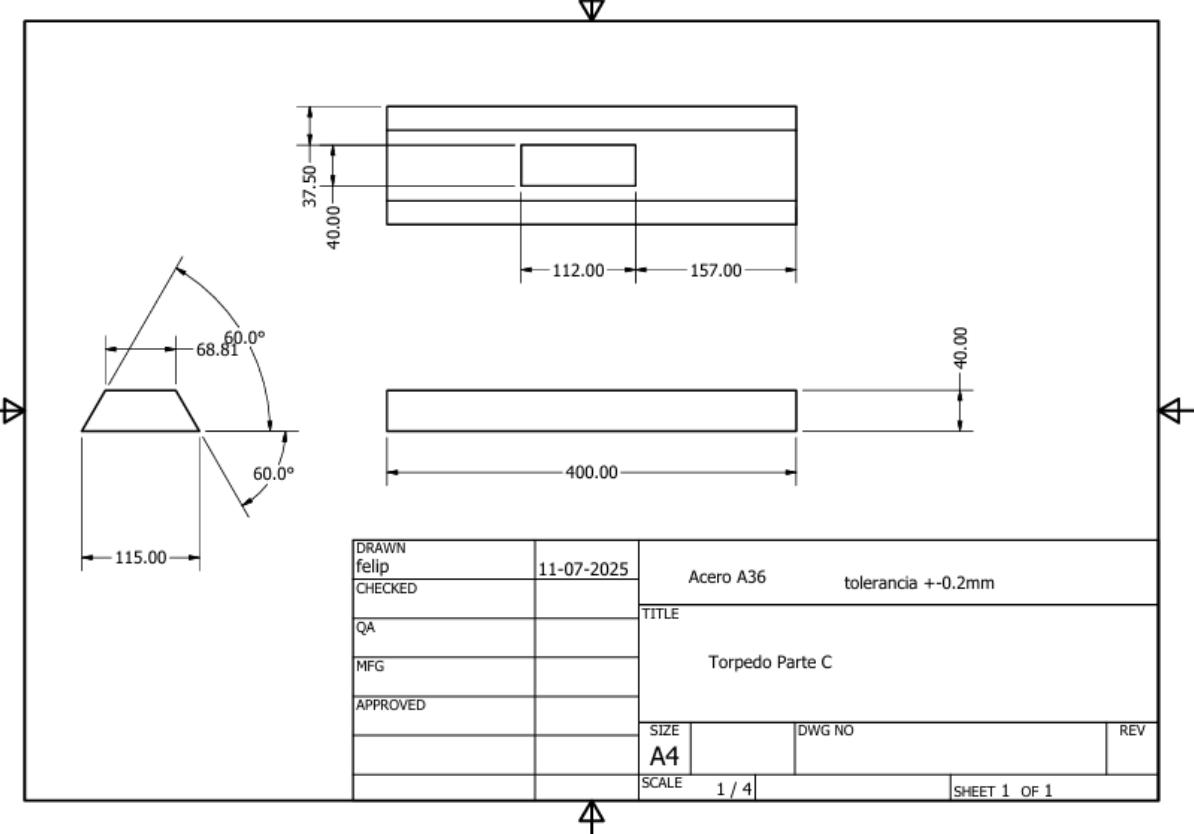
Anexo 7.3



Anexo 7.4

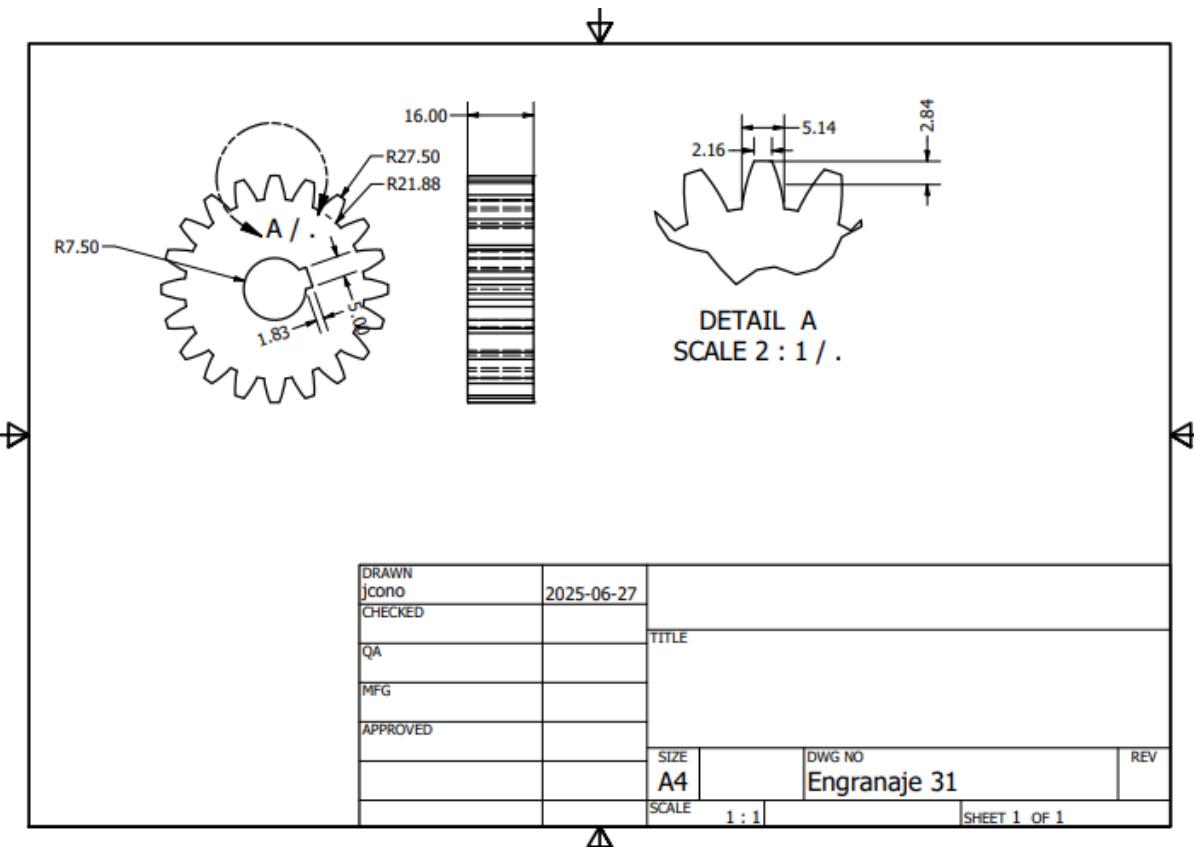


Anexo 7.5

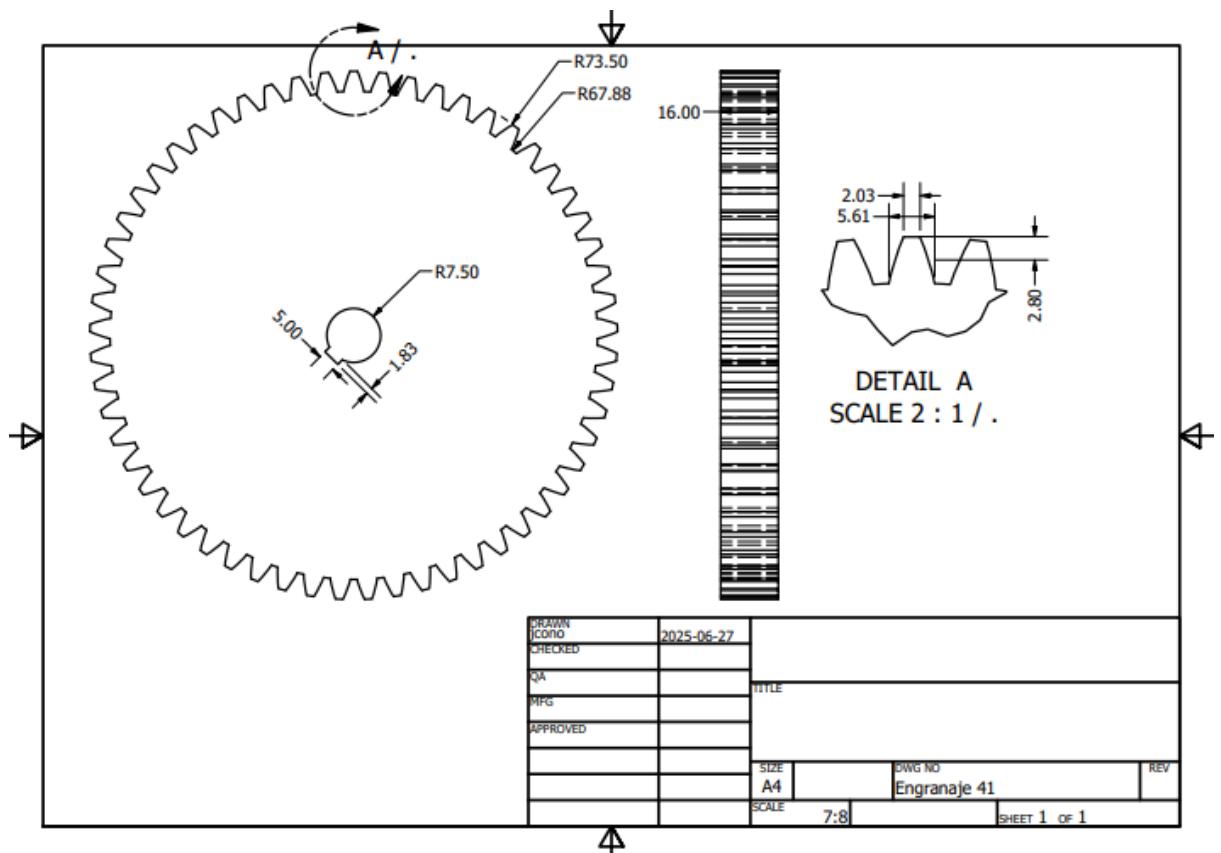


Anexo 8: planos de los engranajes

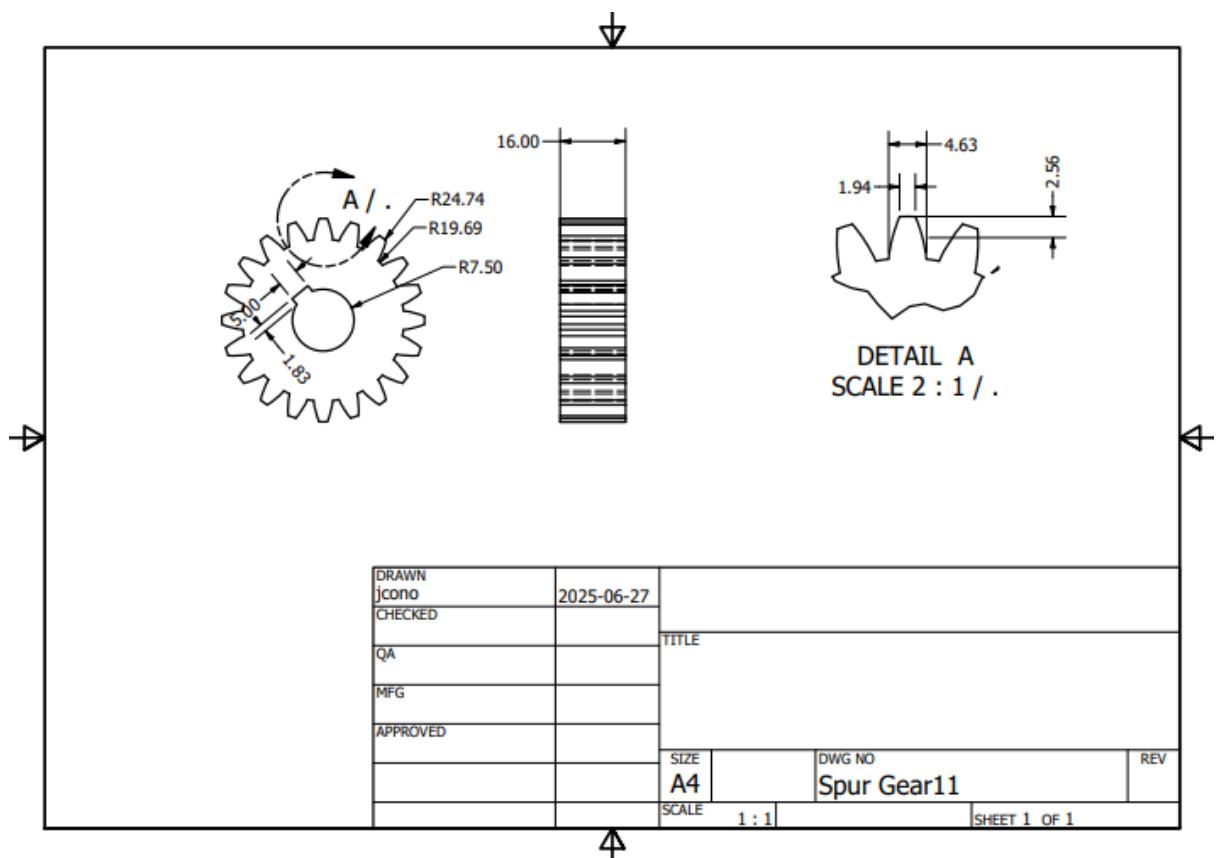
Anexo 8.1



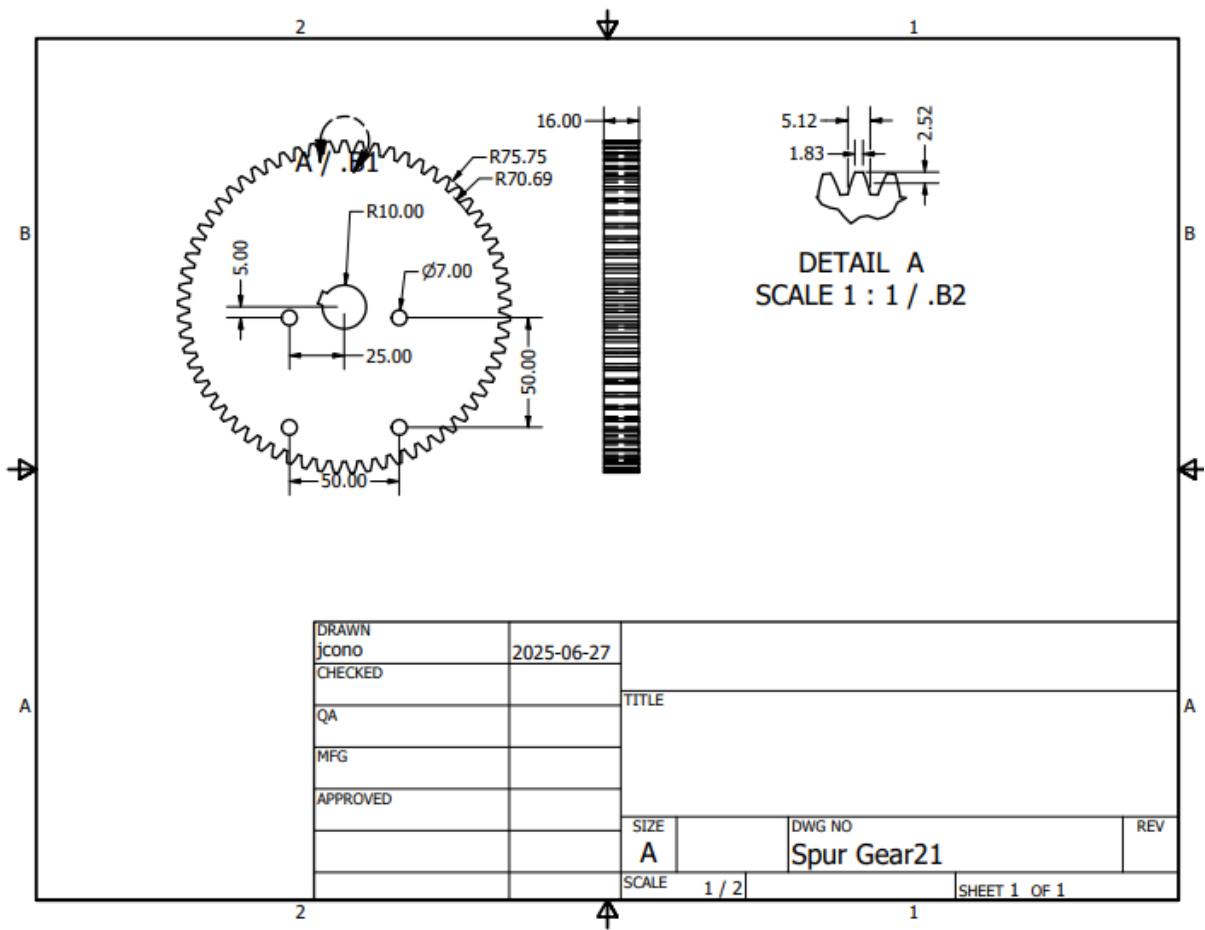
Anexo 8.2



Anexo 8.3

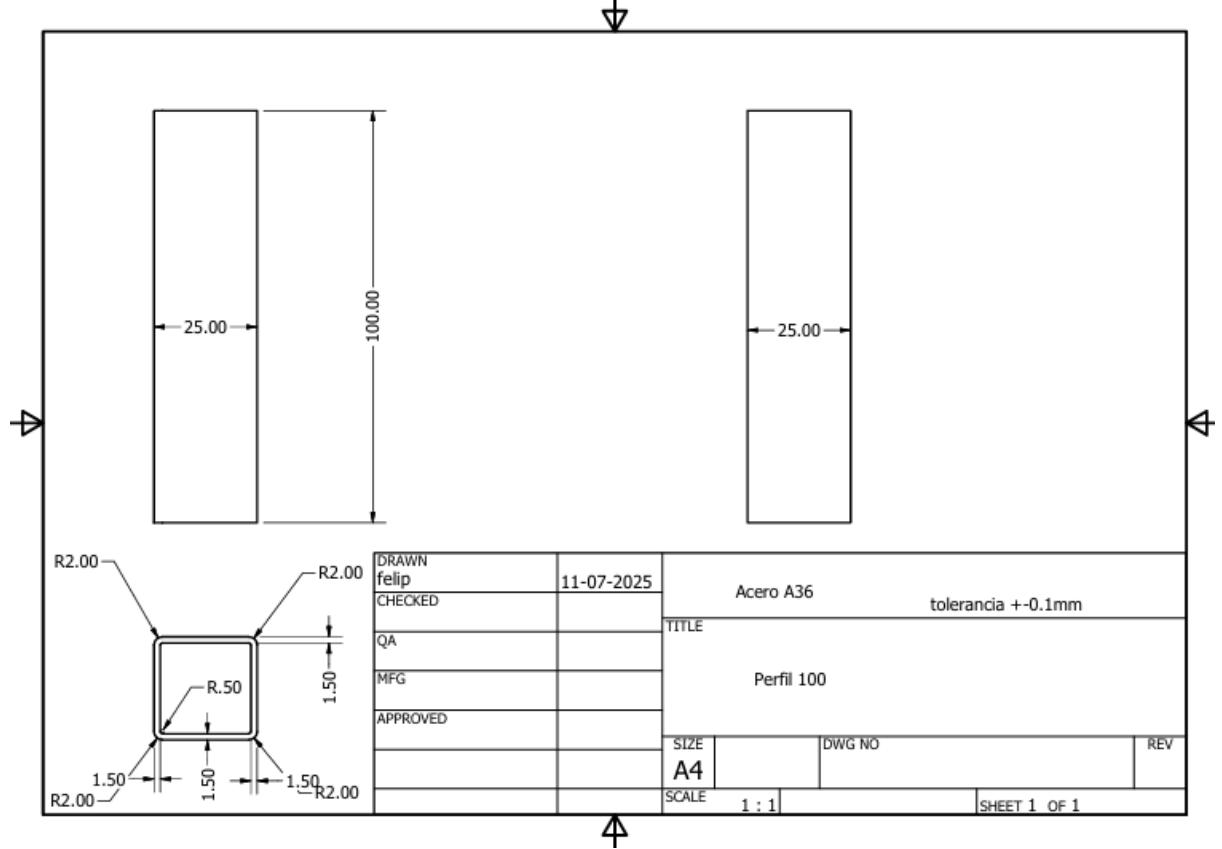


Anexo 8.4

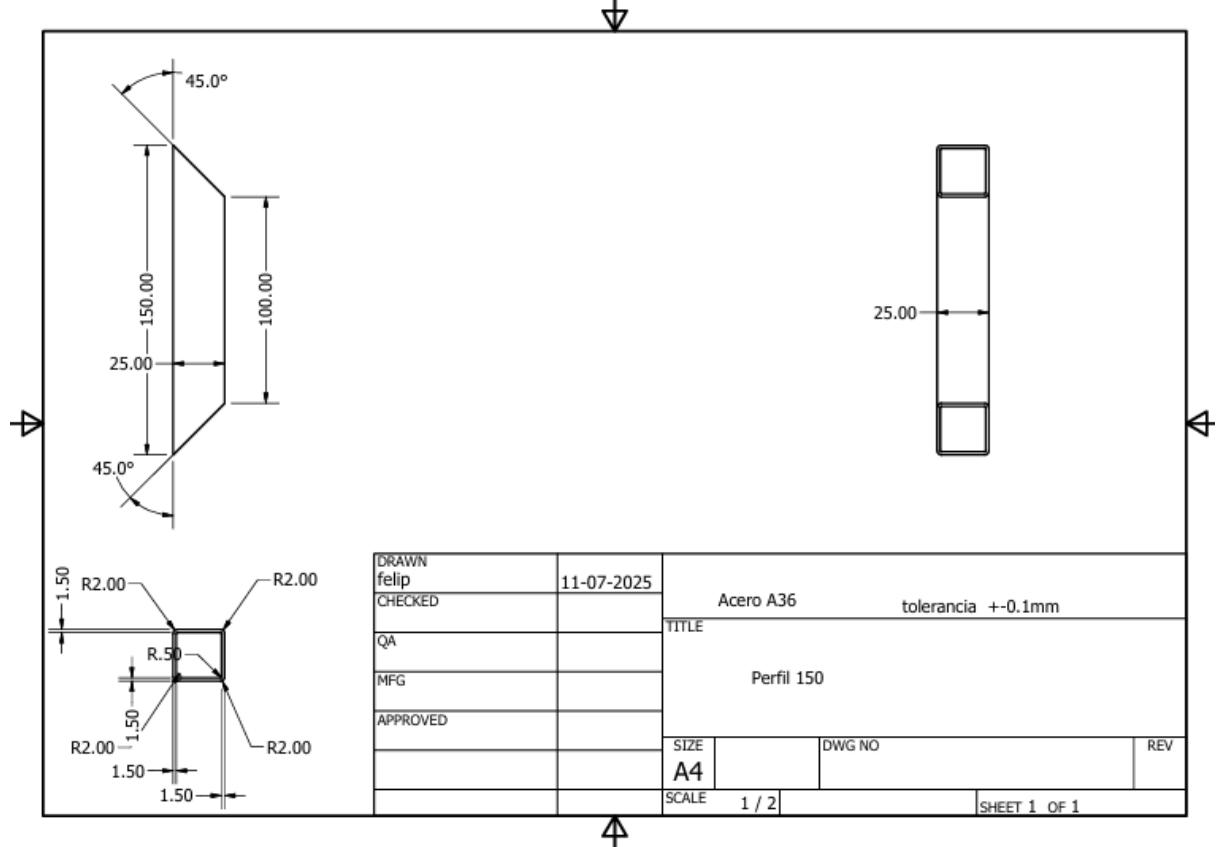


Anexo 22: Planos perfiles

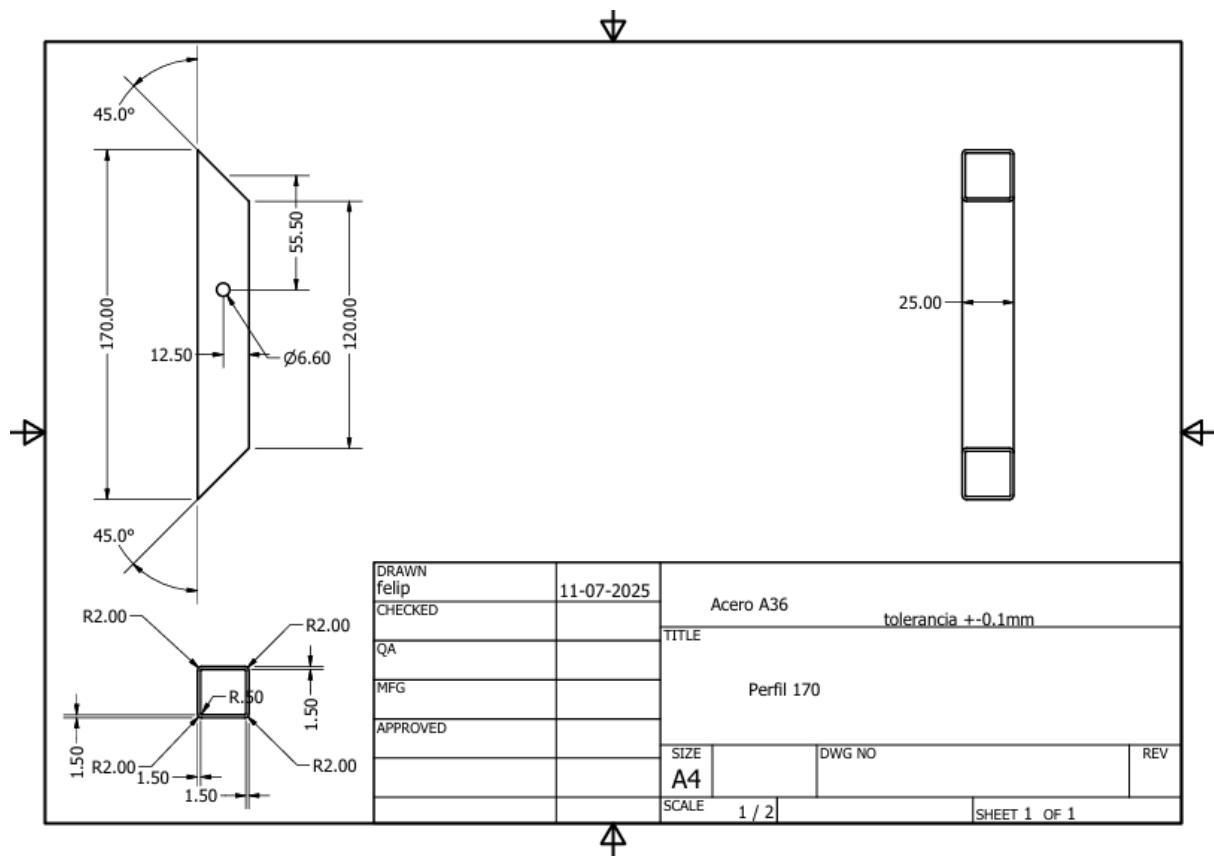
Anexo 22.1



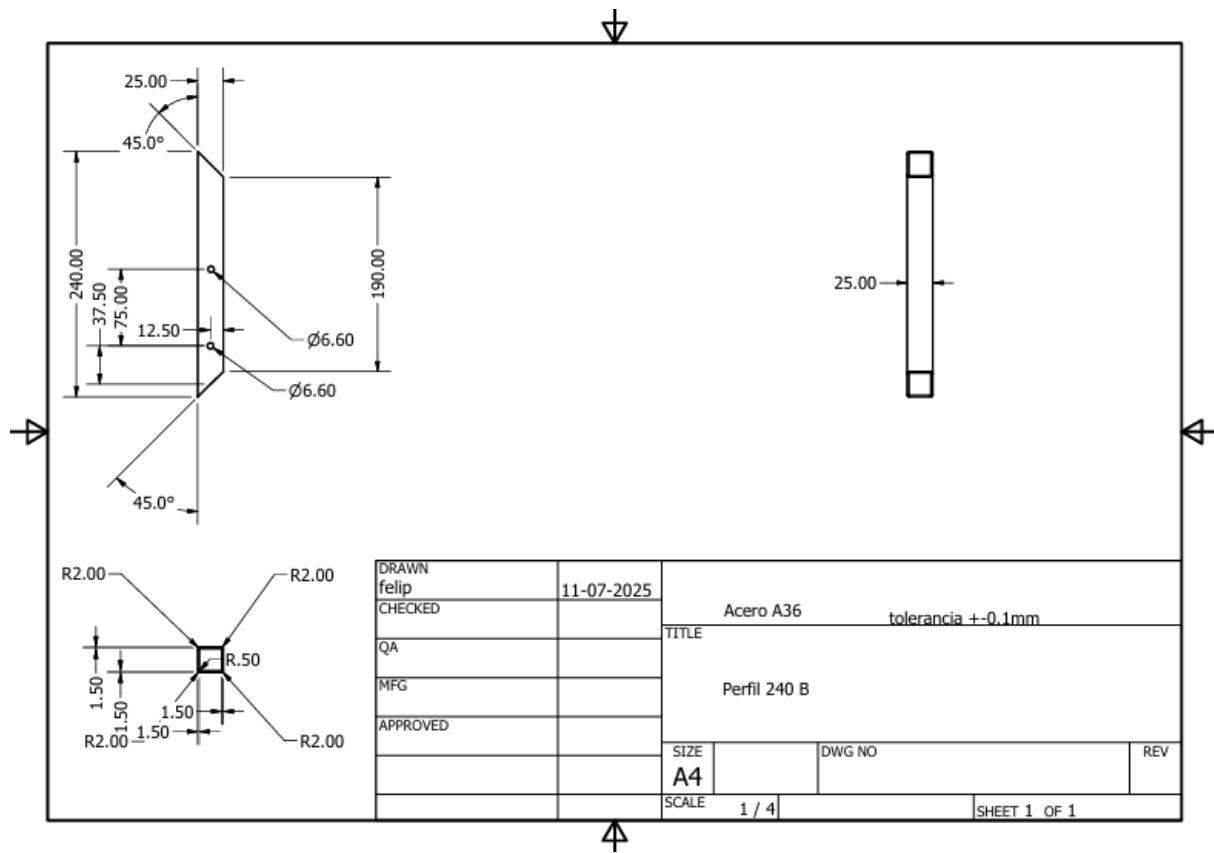
Anexo 22.2



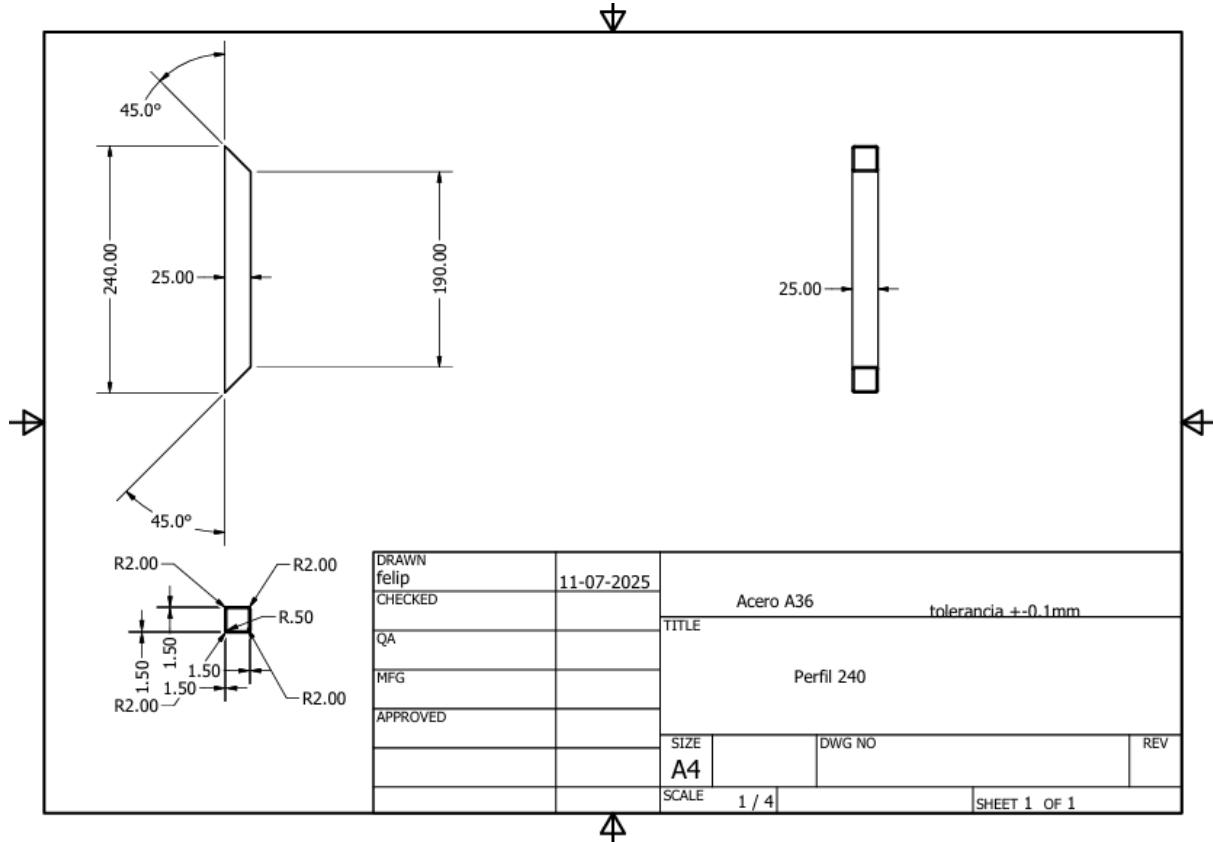
Anexo 22.3



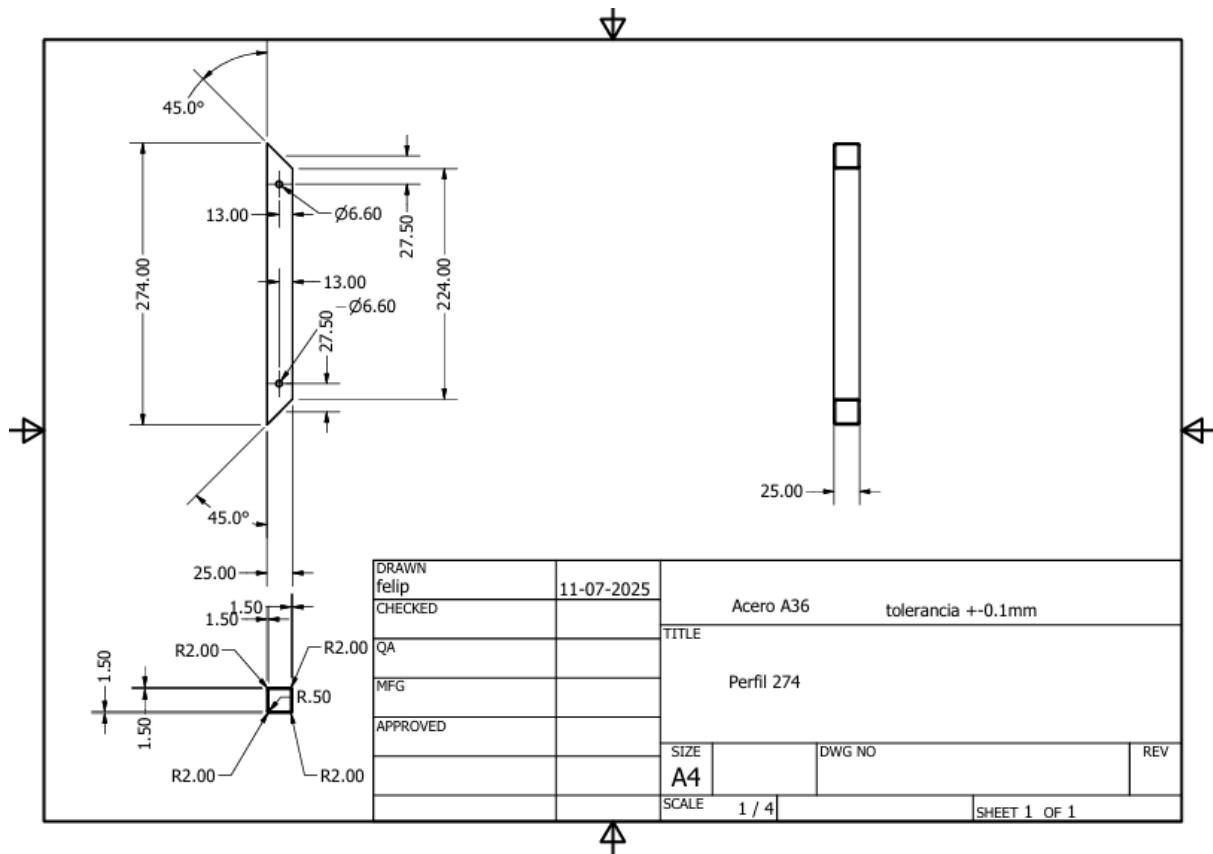
Anexo 22.4



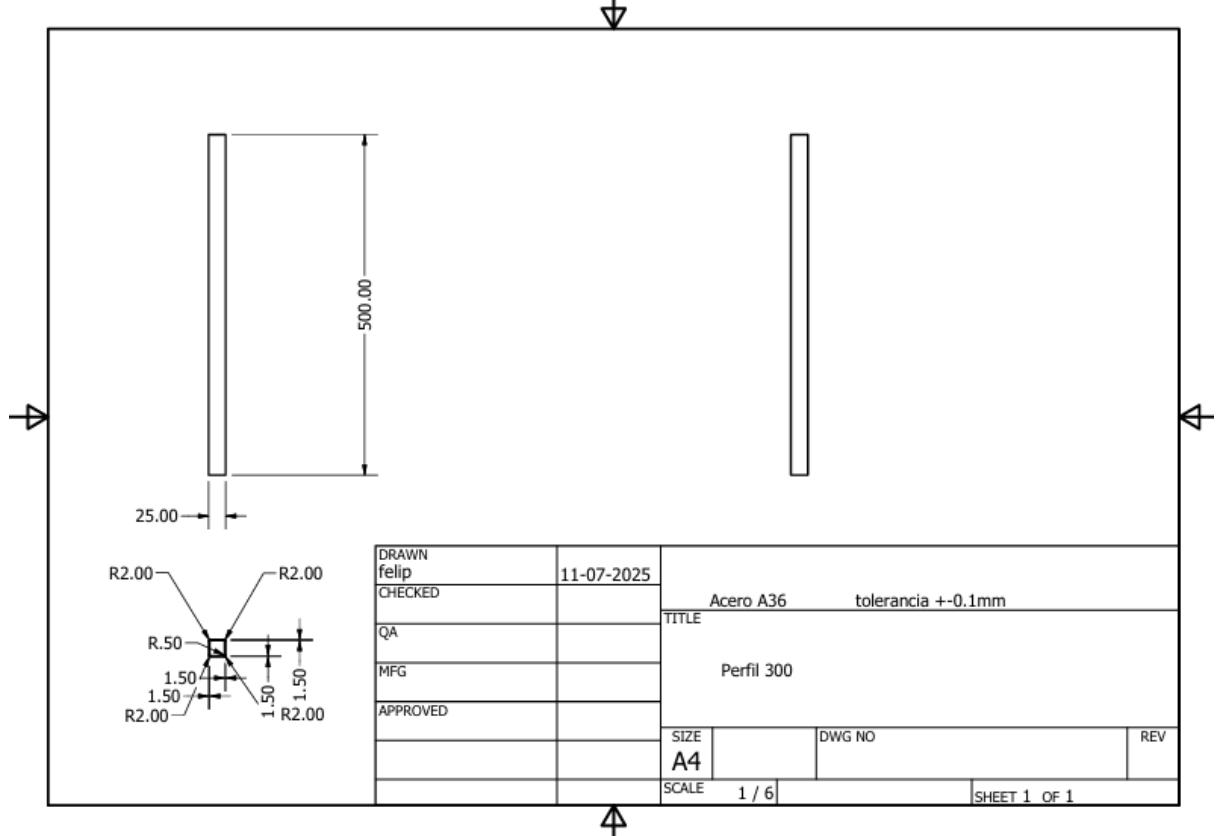
Anexo 22.5



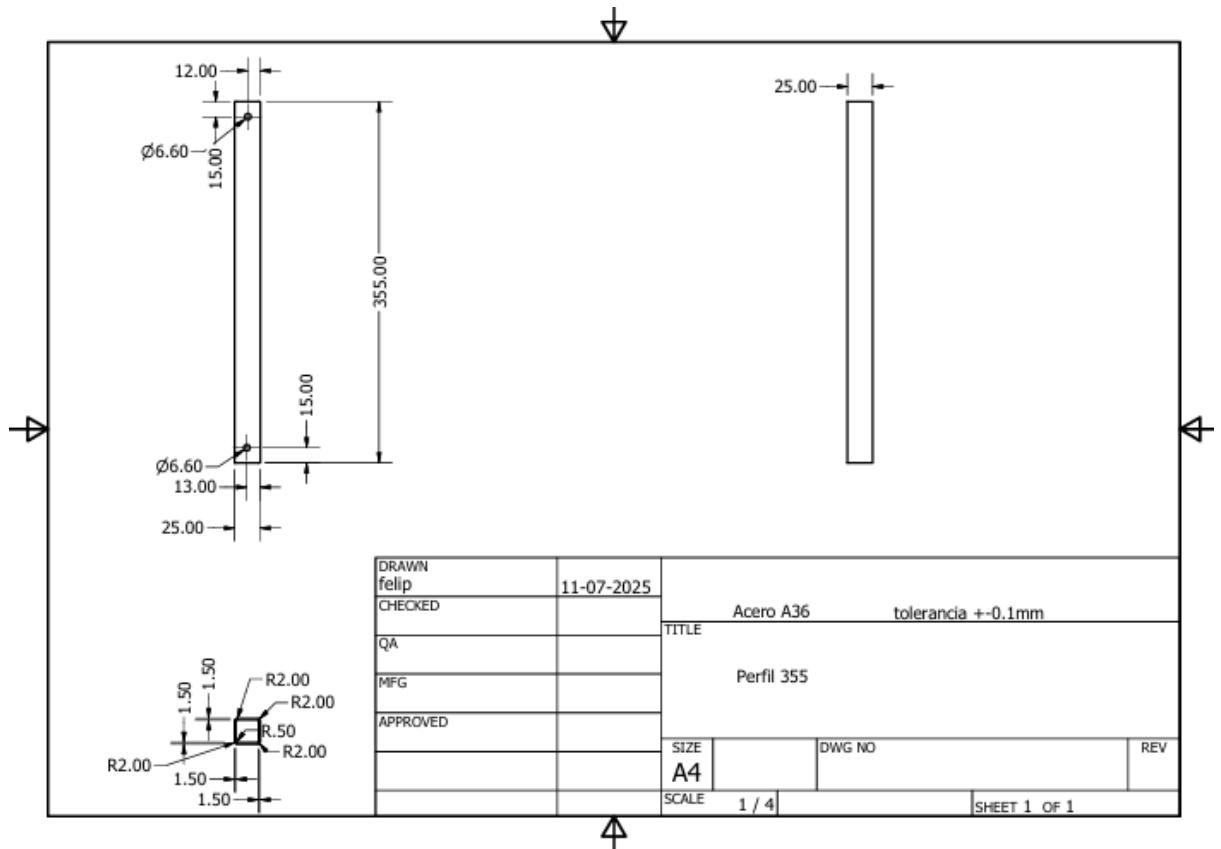
Anexo 22.6



Anexo 22.7

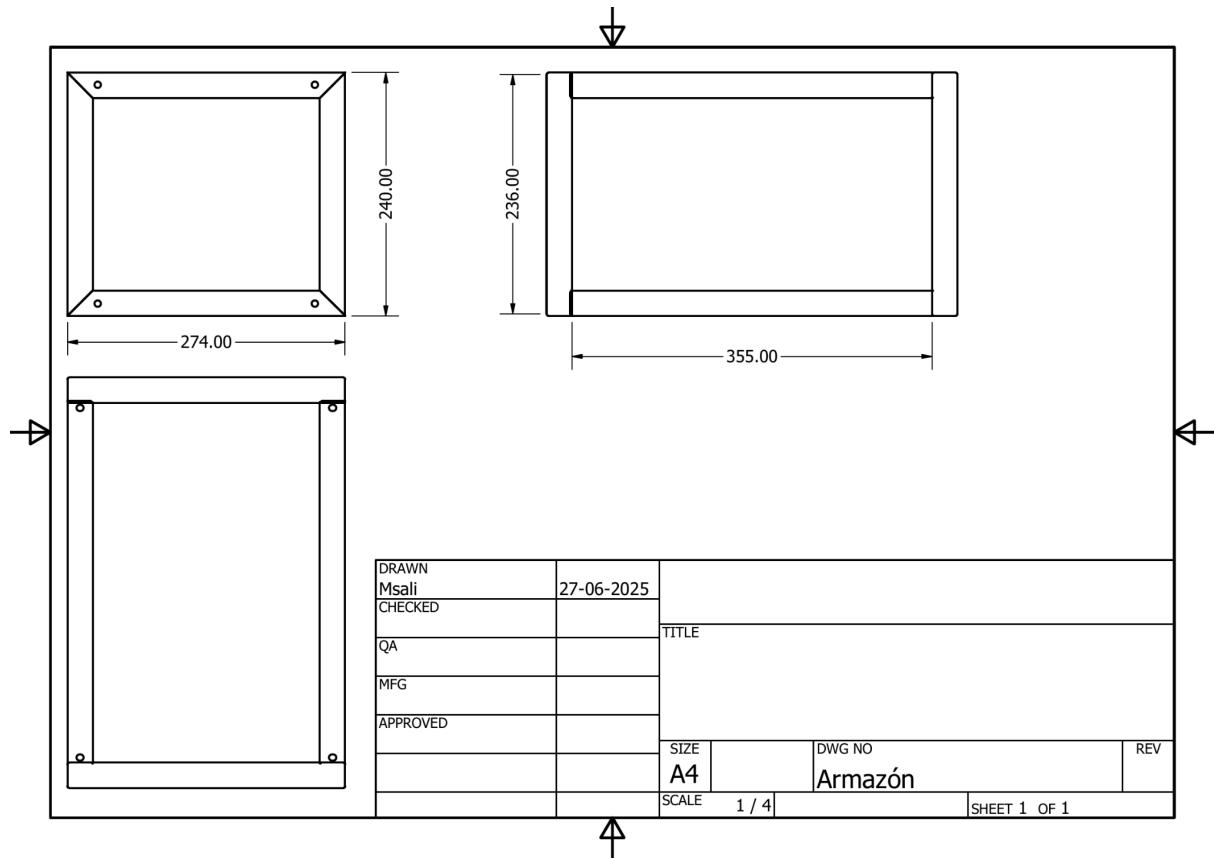


Anexo 22.8

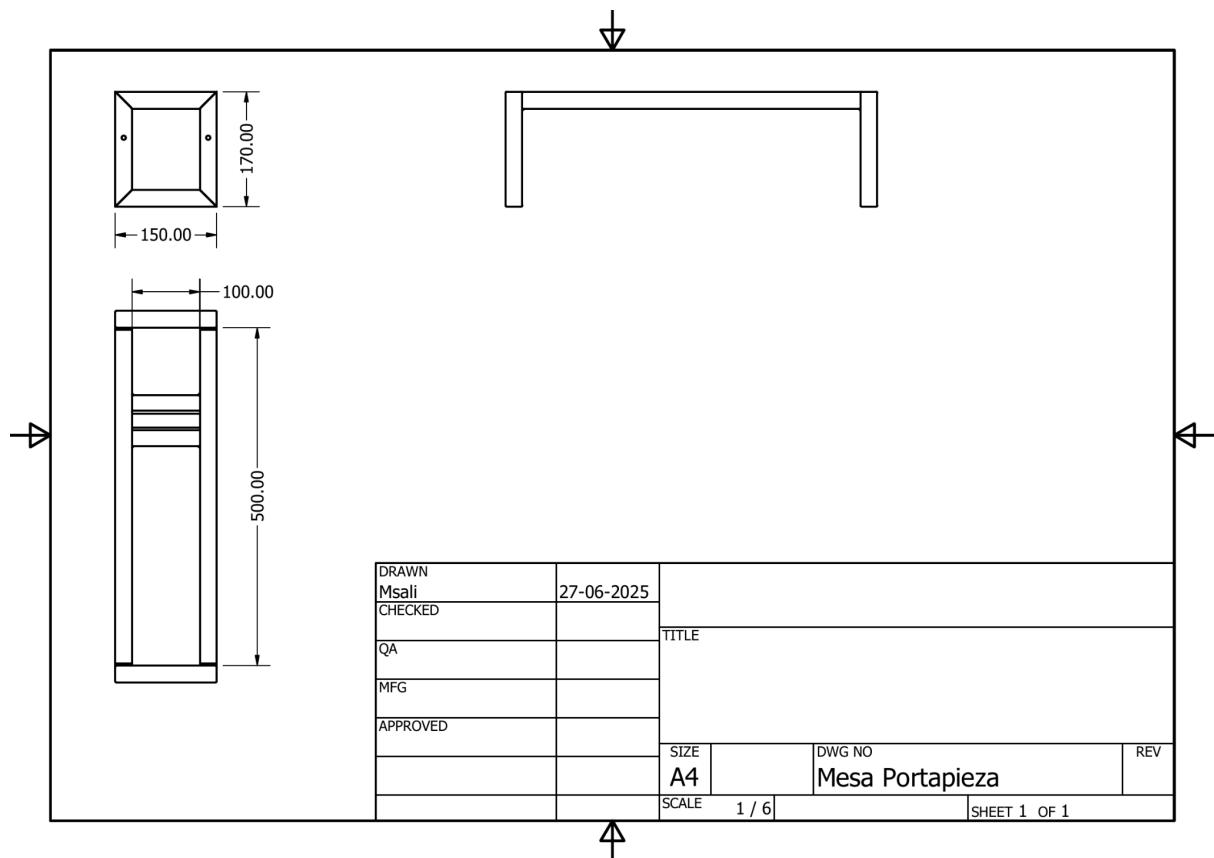


Anexo 9: Planos ensamble perfiles

9.1



9.2



Anexo 10: Reporte de Gasto

Producto	Monto
Plancha 3m x 1m x 1.5mm	41995
Motor	88017
Tornillo base giratorio	19520
Barra de acero	8560
Madera terciada 2.12m x 0.61m x 3mm	3653
Cola Fría (x2)	8990
Rodamientos (8 unidades)	32801
Insumos Herramientas (Discos de corte y brocas)	14931
Perfil Acero	14590

Insumos Materiales (Tornillos, Pernos y Tuercas)	17579
Pintura	5320
Total	255236

Anexo 11: Costos proyectados

[costos_fabricacion_Final3.xlsx](#)

Anexo 12:

Memoria de cálculos completa:

[Calculos_Capstone.pdf](#) / [Calculos_Capstone_Prototipo.pdf](#) / [Calculos_Uniones.pdf](#)

Categoría	Magnitud	Modelo	Prototipo Físico
Fuerza de Corte y Torque	Fuerza de corte total	4241.2 N	304.89 N
	Torque de salida en torpedo	559.84 Nm	40.24 Nm
	Torque de entrada	21.16 Nm	1.52 Nm
Potencia y Motor	Potencia útil requerida	1.66 kW	(no especificado)
	Eficiencia total del sistema	81.2 %	47.8 %
	Potencia requerida en el motor	2.05 kW (\approx 2.74 hp)	0.25 kW
Transmisión	Motor disponible	3 hp	0.33 hp
	Torque útil del motor	23.79 Nm	1.52 Nm
	Relación total de transmisión	26.46	26.46
Eje 1	Torque aplicado	71.36 Nm	4.56 Nm
	Reacciones en apoyo A (Ax, Ay)	1550.69 N, 580.43 N	99.16 N, 34.78 N
	Reacciones en apoyo B (Bx, By)	565.95 N, 212.04 N	36.19 N, 12.71 N
Eje 2	Momento combinado	159.65 Nm	10.13 Nm
	Rodamiento seleccionado	SKF 61804-2RS1	(no calculada explícitamente)
Eje 2	Torque aplicado	199.80 Nm	12.78 Nm

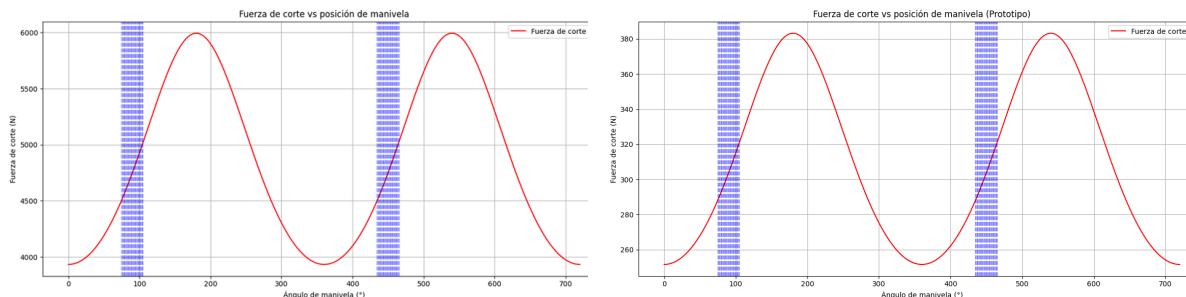
	Reacciones en apoyo C (Cx, Cy)	560.98 N, 204.18 N	35.87 N, 12.27 N
	Reacciones en apoyo D (Dx, Dy)	5101.41 N, 1856.76 N	326.20 N, 111.57 N
	Momento combinado	337.05 Nm	21.46 Nm
	Rodamiento seleccionado	SKF 61905-2RS1	(no calculada explícitamente)
Eje 3	Torque aplicado	629.38 Nm	40.24 Nm
	Reacciones en apoyo E (Ex, Ey)	4627.71 N, 1684.35 N	295.91 N, 101.21 N
	Reacciones en apoyo F (Fx, Fy)	-3702.17 N, -1347.48 N	-236.73 N, -80.97 N
	Momento combinado	659.49 Nm	42.14 Nm
	Rodamiento seleccionado	SKF 61906-2RS1	(no calculada explícitamente)
Eje 4 (Bielas)	Fuerza transmitida por la biela	16386.78 N	1178 N
	Diámetro por esfuerzo de corte	≥ 8.34 mm	≥ 2.24 mm
	Diámetro por aplastamiento	≥ 4.97 mm	≥ 0.36 mm
	Diámetro seleccionado (FS = 2)	16.68 mm	4.47 mm
Velocidad de Corte	Velocidad calculada	4.25 m/min	4.25 m/min

Fuente de Vibración	Frecuencia / Parámetro	Modelo	Prototipo
Torpedo (biela-manivela)	Aceleración máxima	0.389 m/s ²	0.389 m/s ²
	Masa del torpedo	42.248 kg	2.5 kg
	Fuerza de inercia	16.435 N	0.9725 N
	Aceleración inducida al bastidor	0.4478 m/s ²	0.12 m/s ²
Engranaje 1	Gear Mesh Frequency (GMF)	84.88 Hz	84.88 Hz
	Aceleración máxima	2.83 m/s ²	2.83 m/s ²
	Masa considerada	3.321 kg	0.561 kg
	Fuerza de excitación	9.398 N	1.588 N

	Aceleración inducida al bastidor	0.256 m/s ²	0.198 m/s ²
Engranaje 2	Gear Mesh Frequency (GMF)	30.7 Hz	30.7 Hz
	Aceleración máxima	0.373 m/s ²	0.373 m/s ²
	Masa considerada	3.443 kg	0.376 kg
	Fuerza de excitación	1.284 N	0.14 N
	Aceleración inducida al bastidor	0.035 m/s ²	0.018 m/s ²
Total vibración (RMS)	Aceleración RMS	0.517 m/s ²	0.234 m/s ²
Criterio de evaluación	Nivel aceptable (< 1 m/s ²)	✓ Cumple	✓ Cumple

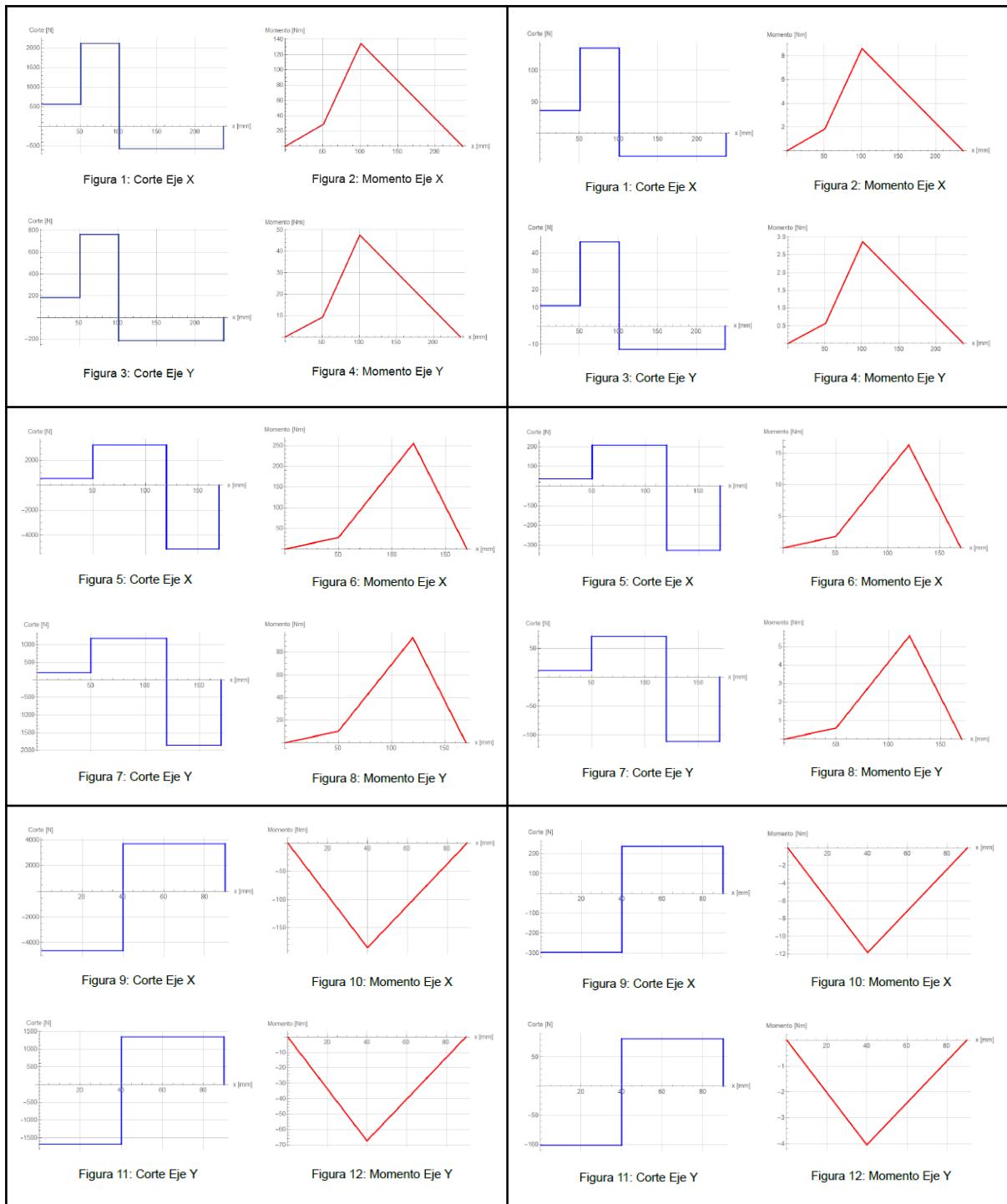
Componente	Pérdida térmica estimada [W]	ΔT estimado [°C]	Temperatura final [°C]
Motor trifásico	225	37,5	62,5
Engranajes	197	18,34	43,34
Guías del torpedo	2,94	–	– (insignificante)

Anexo 13:



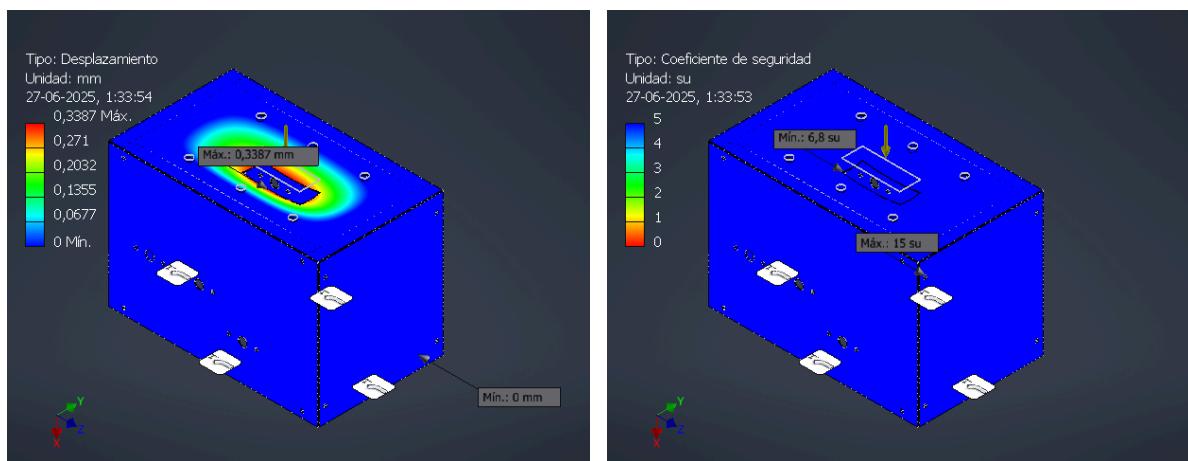
Anexo 14:

Modelo	Prototipo
--------	-----------



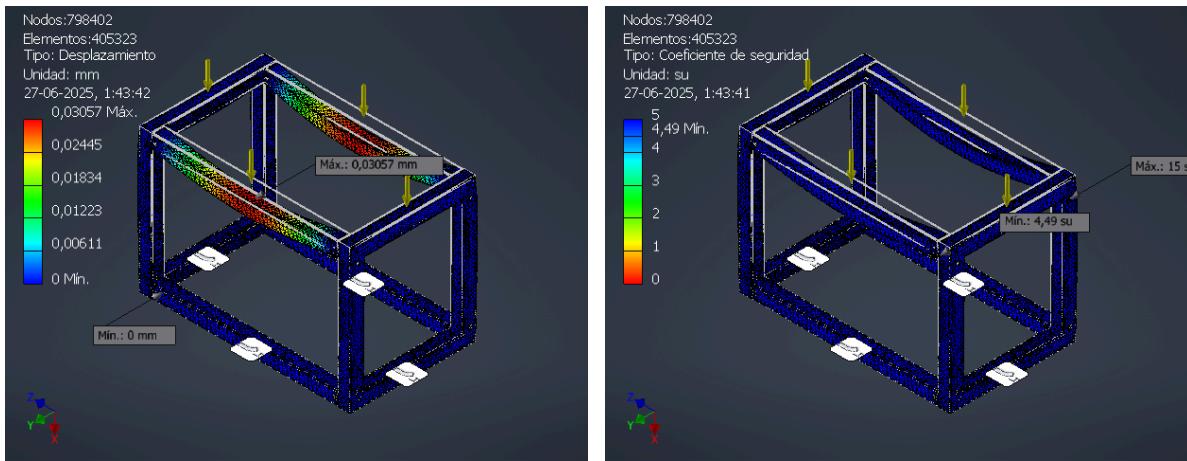
Anexo 13: Bastidor Armado

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	1113540 mm ³	
Masa	8,74129 kg	
Tensión de Von Mises	0,0000243901 MPa	30,4544 MPa
Primera tensión principal	-10,6728 MPa	33,2683 MPa
Tercera tensión principal	-35,3942 MPa	10,258 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,338732 mm
Coeficiente de seguridad	6,79705 su	15 su
Tensión XX	-26,5939 MPa	20,7351 MPa
Tensión XY	-10,9229 MPa	12,4321 MPa
Tensión XZ	-7,53858 MPa	7,24205 MPa
Tensión YY	-32,9363 MPa	31,4754 MPa
Tensión YZ	-10,6506 MPa	10,43 MPa
Tensión ZZ	-23,6805 MPa	22,5034 MPa
Desplazamiento X	-0,0000102353 mm	0,338709 mm
Desplazamiento Y	-0,00524542 mm	0,00525982 mm
Desplazamiento Z	-0,00266849 mm	0,00262296 mm
Deformación equivalente	0,000000000114649 su	0,000130671 su



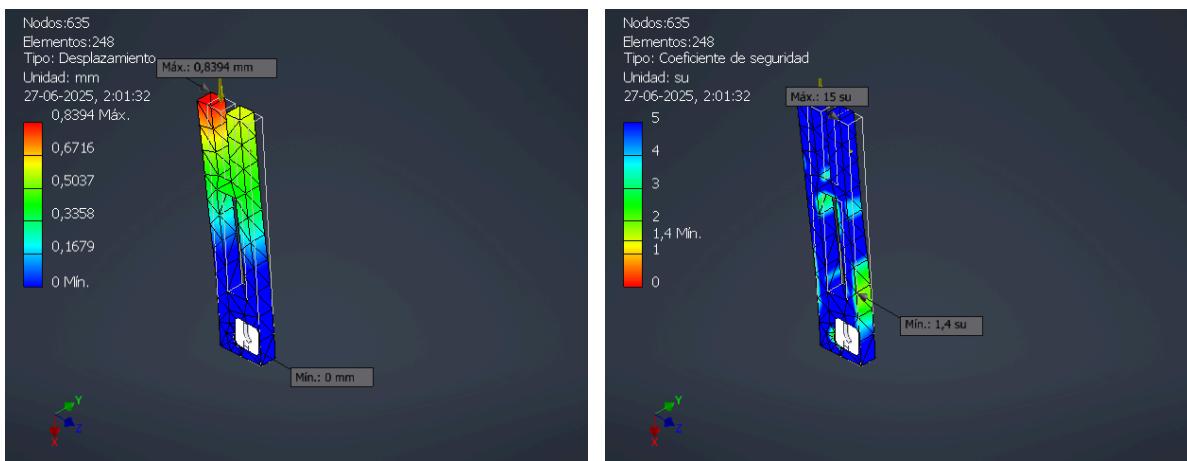
Anexo 14: Bastidor Interior

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	449571 mm ³	
Masa	3,52913 kg	
Tensión de Von Mises	0,00000138595 MPa	46,1026 MPa
Primera tensión principal	-4,57853 MPa	23,2852 MPa
Tercera tensión principal	-30,83 MPa	6,86317 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0305656 mm
Coeficiente de seguridad	4,48999 su	15 su
Tensión XX	-26,5072 MPa	11,0547 MPa
Tensión XY	-6,92692 MPa	7,14142 MPa
Tensión XZ	-11,4298 MPa	15,5858 MPa
Tensión YY	-10,9522 MPa	21,1445 MPa
Tensión YZ	-9,72232 MPa	10,7832 MPa
Tensión ZZ	-21,8621 MPa	12,3381 MPa
Desplazamiento X	-0,0000115473 mm	0,0303672 mm
Desplazamiento Y	-0,00373328 mm	0,00375337 mm
Desplazamiento Z	-0,00351253 mm	0,00351378 mm
Deformación equivalente	0,0000000000652383 su	0,00019032 su



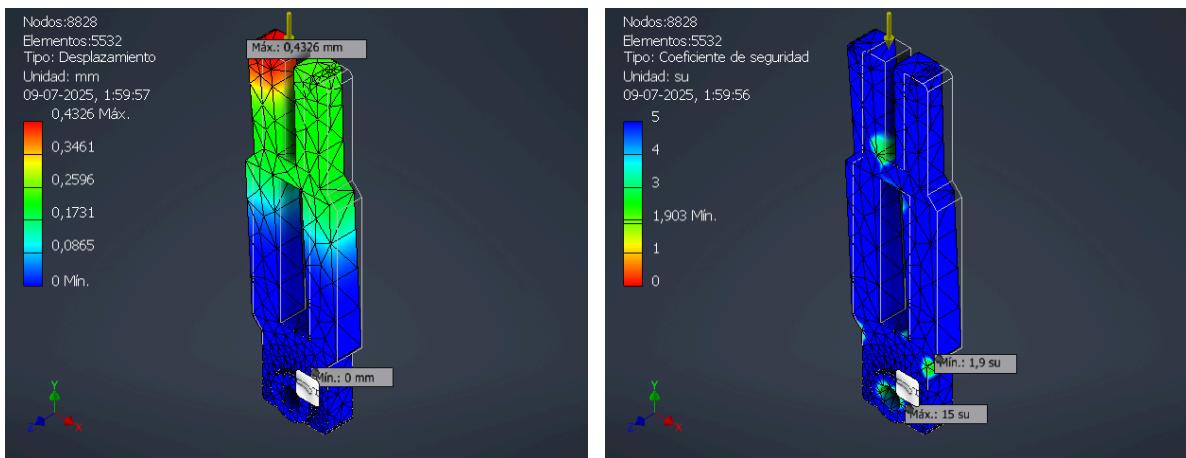
Anexo 15: Biela (Modo 1)

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	313497 mm ³	
Masa	2,46095 kg	
Tensión de Von Mises	0,00261399 MPa	147,909 MPa
Primera tensión principal	-10,3302 MPa	147,662 MPa
Tercera tensión principal	-130,571 MPa	12,3425 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,839446 mm
Coeficiente de seguridad	1,39951 su	15 su
Tensión XX	-130,545 MPa	145,84 MPa
Tensión XY	-9,39748 MPa	9,28399 MPa
Tensión XZ	-70,6166 MPa	49,7965 MPa
Tensión YY	-25,0222 MPa	28,358 MPa
Tensión YZ	-10,9038 MPa	6,28493 MPa
Tensión ZZ	-101,086 MPa	86,1581 MPa
Desplazamiento X	-0,0501944 mm	0,132137 mm
Desplazamiento Y	-0,00217704 mm	0,00283285 mm
Desplazamiento Z	-0,834557 mm	0,00763616 mm
Deformación equivalente	0,0000000127921 su	0,000624606 su



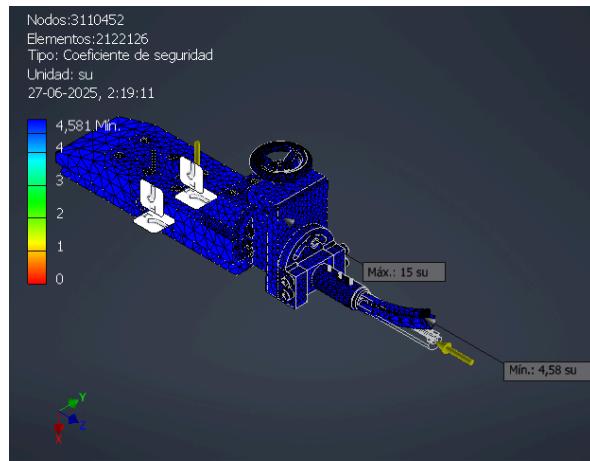
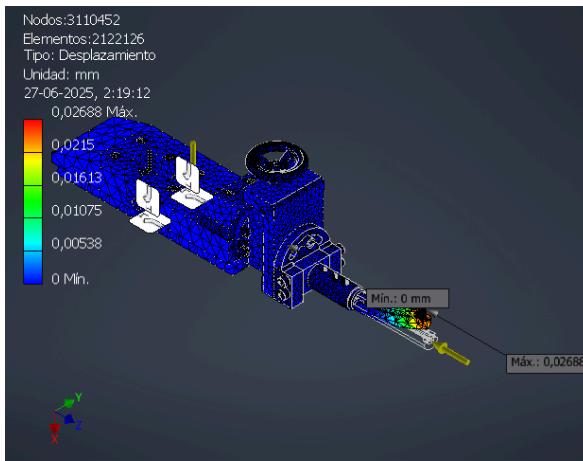
Anexo 16: Biela (Modo 2)

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	488348 mm ³	
Masa	3,83353 kg	
Tensión de Von Mises	0,000873086 MPa	108,779 MPa
Primera tensión principal	-26,3643 MPa	129,978 MPa
Tercera tensión principal	-113,312 MPa	24,8243 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,43263 mm
Coeficiente de seguridad	1,90294 su	15 su
Tensión XX	-75,1812 MPa	93,5482 MPa
Tensión XY	-50,7589 MPa	58,344 MPa
Tensión XZ	-26,4023 MPa	25,8438 MPa
Tensión YY	-99,4142 MPa	114,275 MPa
Tensión YZ	-33,2384 MPa	32,9735 MPa
Tensión ZZ	-26,5241 MPa	24,8334 MPa
Desplazamiento X	-0,431428 mm	0,00493391 mm
Desplazamiento Y	-0,0465043 mm	0,0462208 mm
Desplazamiento Z	-0,00171394 mm	0,00155013 mm
Deformación equivalente	0,00000000442257 su	0,000474876 su



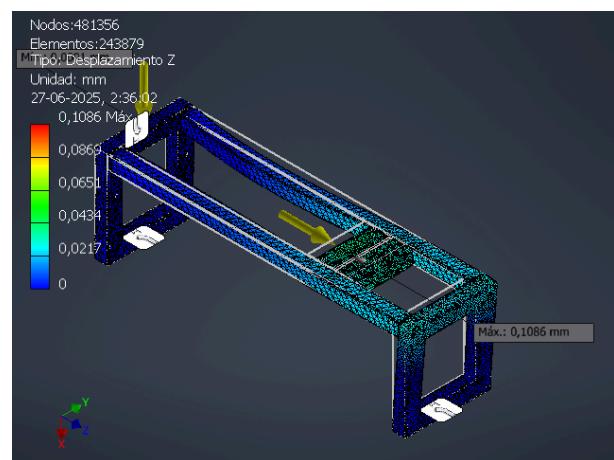
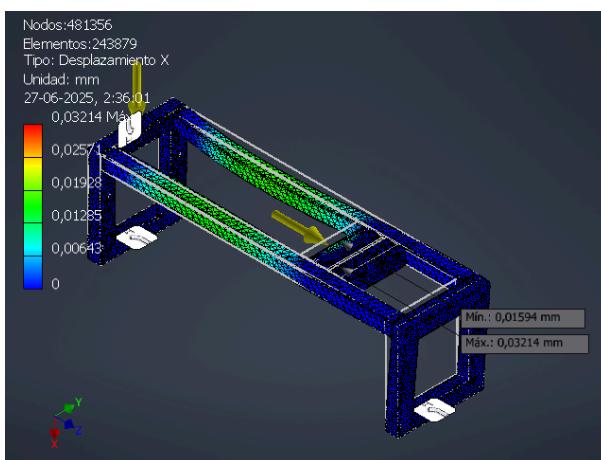
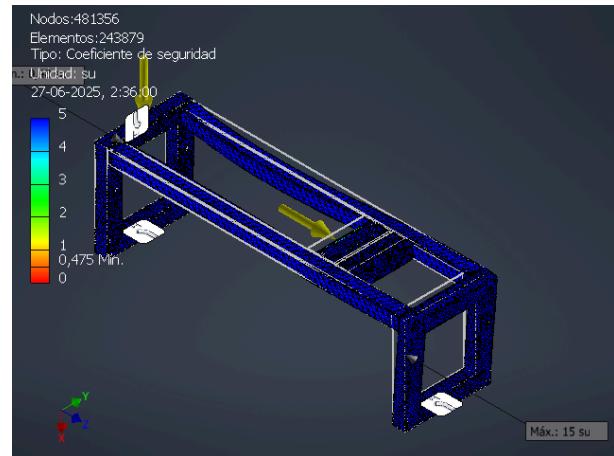
Anexo 17: Torpedo

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	5238920 mm ³	
Masa	41,1255 kg	
Tensión de Von Mises	0,000100593 MPa	45,1909 MPa
Primera tensión principal	-22,9275 MPa	20,5312 MPa
Tercera tensión principal	-55,4768 MPa	5,378 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0268802 mm
Coeficiente de seguridad	4,58057 su	15 su
Tensión XX	-52,4823 MPa	18,0264 MPa
Tensión XY	-20,8065 MPa	19,8063 MPa
Tensión XZ	-13,0524 MPa	8,27674 MPa
Tensión YY	-38,3958 MPa	7,49517 MPa
Tensión YZ	-8,48584 MPa	7,9911 MPa
Tensión ZZ	-50,8351 MPa	8,00108 MPa
Desplazamiento X	-0,0232251 mm	0,00224981 mm
Desplazamiento Y	-0,000266916 mm	0,000301735 mm
Desplazamiento Z	-0,0135936 mm	0,00122053 mm
Deformación equivalente	0,00000000435112 su	0,000199883 su



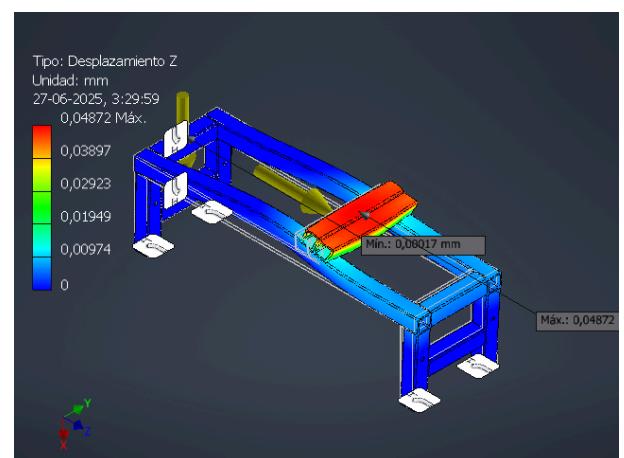
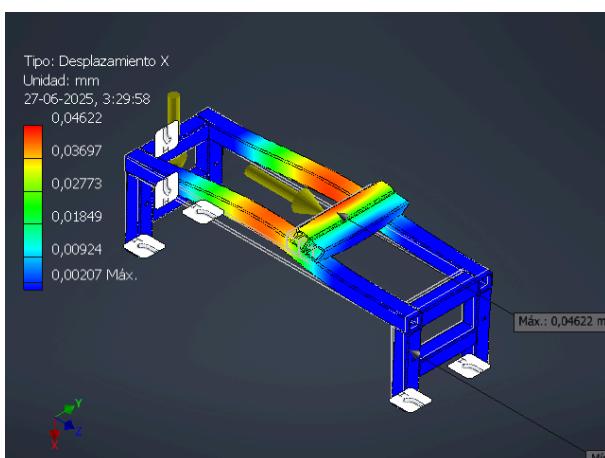
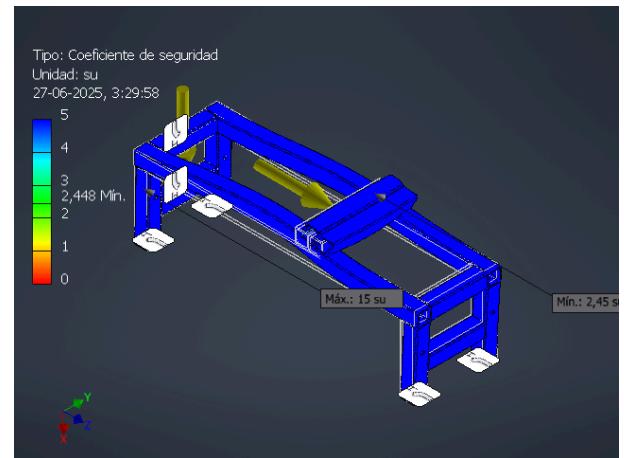
Anexo 18: Mesa Porta Pieza (Modo 1)

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	327508 mm ³	
Masa	2,57094 kg	
Tensión de Von Mises	0,000185014 MPa	435,789 MPa
Primera tensión principal	-95,4309 MPa	356,709 MPa
Tercera tensión principal	-269,723 MPa	59,4115 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,108948 mm
Coeficiente de seguridad	0,475001 su	15 su
Tensión XX	-201,936 MPa	197,892 MPa
Tensión XY	-61,7577 MPa	63,609 MPa
Tensión XZ	-205,229 MPa	115,518 MPa
Tensión YY	-123,015 MPa	133,854 MPa
Tensión YZ	-141,261 MPa	138,861 MPa
Tensión ZZ	-222,611 MPa	329,577 MPa
Desplazamiento X	-0,0159402 mm	0,0321366 mm
Desplazamiento Y	-0,0322583 mm	0,0324665 mm
Desplazamiento Z	-0,0000771942 mm	0,108567 mm
Deformación equivalente	0,00000000107513 su	0,00181116 su



Anexo 19: Mesa Porta Pieza (Modo 2)

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	490202 mm ³	
Masa	3,84808 kg	
Tensión de Von Mises	0,00184409 MPa	84,546 MPa
Primera tensión principal	-22,4224 MPa	107,386 MPa
Tercera tensión principal	-102,421 MPa	32,8765 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0653987 mm
Coeficiente de seguridad	2,44837 su	15 su
Tensión XX	-63,1897 MPa	75,7622 MPa
Tensión XY	-23,6971 MPa	12,5859 MPa
Tensión XZ	-44,3663 MPa	28,6402 MPa
Tensión YY	-44,9011 MPa	62,3484 MPa
Tensión YZ	-32,5824 MPa	31,8821 MPa
Tensión ZZ	-71,1978 MPa	81,7518 MPa
Desplazamiento X	-0,0462187 mm	0,0020732 mm
Desplazamiento Y	-0,0119918 mm	0,0119557 mm
Desplazamiento Z	-0,000166724 mm	0,0487174 mm
Deformación equivalente	0,00000000837161 su	0,000369472 su



Anexo 20:

- <https://listado.mercadolibre.com.ar/brochadoras-horizontal#!messageGeolocation>
- <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Horizontal-Broaching-Machine-Cheap-Price-Hydraulic-1601478528342.html?spm=a2700.7724857.0.0.73a1e745MKQuwT>
- https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-Sale-High-Quality-Hydraulic-Horizontal_1601478585044.html?spm=a2700.details.you_may_like.1.78a416beRCGtwz
- <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Horizontal-Hydraulic-Internal-Broaching-Machine-60421122254.html?spm=a2700.7724857.0.0.73a1e745MKQuwT>
- https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-781381943-brochadora-hidraulica-horizontal-camporesi-envios-interior-_JM#polycard_client=search-nordic&position=13&search_layout=stack&type=item&tracking_id=5b634aee-3448-4e84-8df6-b245573430df&wid=MLA781381943&sid=search
- https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-1495689389-brochadora-vertical-camporesi-b7-envios-al-pais-_JM?searchVariation=187849816477#polycard_client=search-nordic&searchVariation=187849816477&position=29&search_layout=stack&type=item&tracking_id=13cba9f1ded6-4011-8c24-c7c83c96984a&gid=1&pid=1

Anexo 21: Propiedades de los materiales utilizados

Materiales	Densidad (kg/m ³)	Límite elástico σ_y (MPa)	Resistencia última σ_u (MPa)	Módulo elástico E (GPa)	Dureza	Elongación (%)
Acero ASTM A36	7850	250	440	200	140 HB	22
Acero SAE 1020	7870	300	445	190	125 HB	22.5
Acero SAE 1080	7800	535	820	190	240 HB	11
PLA	1275	36	50	3.5	95 Shore D	6
Madera de Roble	700		99	12.1	5430 N (Janka)	