



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Diseño de una máquina trituradora de botellas de vidrio

Isaac Grun Valencia
Isaac López Pérez

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia
2025

Diseño de una máquina trituradora de botellas de vidrio

Isaac Grun Valencia
Isaac López Pérez

Director:

PhD Ingeniería Mecánica, David Alfonso Serje Martínez

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia
2025

Declaración de obra original

Nosotros, declaramos lo siguiente:

Hemos leído el Acuerdo 535 de 2010 del Consejo Directivo de la Pontificia Universidad Javeriana. «Política de Propiedad Intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Este anteproyecto representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en este anteproyecto, hemos realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

Hemos obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, hemos sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Isaac López Pérez



Isaac Grun Valencia

Fecha 26/11/2025

Resumen

En los últimos años ha venido creciendo el paradigma de la economía circular, modelo de producción y consumo que busca reducir el desaprovechamiento de residuos y maximizar el uso de recursos [1]. El reciclaje del vidrio es un tema que no ha tenido tanta visibilidad como el del plástico, teniendo en cuenta que es un recurso infinitamente reciclable [2]. Por lo tanto, en este proyecto, se llevará a cabo el diseño de una máquina trituradora de vidrio que pretende reducir su volumen, facilitar su reciclaje y transporte; la localización de la máquina se centrará en instituciones de educación superior para mejorar la separación de residuos y fortalecer la cultura del reciclaje. Para cumplir con cada uno de los objetivos específicos, se revisarán tecnologías de trituración, normativas, se entrevistará a expertos, se estudiarán los métodos de diseño actuales en la ingeniería, diseños conceptuales y selección de diseño conceptual, se hará un diseño detallado donde se incluyen los cálculos y análisis de las fuerzas que se presentarán, diseño CAD, selección de los componentes y materiales con los que se esperará construir.

Se espera obtener el diseño de detalle de una máquina trituradora de vidrio eficiente, segura y rentable, la cual cumpla con las especificaciones técnicas de seguridad y producto que estén establecidas. Asimismo, la máquina contribuirá a la economía circular, reciclando el vidrio, reduciendo su volumen y facilitando su reutilización.

Palabras clave: Máquina, vidrio, reciclaje, trituración, universidad.

Abstract

Within the last years, the paradigm of the circular economy has been growing, a production and consumption model that seeks to reduce waste squandering and maximize the use of resources [1]. Glass recycling is a subject that does not have as much visibility as plastic, considering it's an infinitely recyclable resource [2]. Hence, the design of a glass crusher machine will be conducted to reduce its volume and ease its recycling as well as its transportation; the location of the machine will be centered around universities, to improve the waste separation and reinforce the recycling culture. To accomplish each of the specific objectives, crushing technologies and regulations will be reviewed, and experts will be interviewed. Also, current engineering design methods will be studied, conceptual designs and the selection of the conceptual design, a detailed design will be done which will include the calculations and analysis of the forces that are present, a CAD design, the selection of components and materials which will be used for the construction of the machine.

Obtaining the detailed design of an efficient, safe, and profitable glass crusher machine is necessary, while achieving the established security and product technical specifications. In addition, the machine will contribute to the circular economy, recycling the glass, reducing its volume, and facilitating its reutilization.

Keywords: Machine, glass, recycling, trituration, university.

Contenido

	Pág.
1. Antecedentes.....	3
2. Marco teórico.....	4
2.1 Propiedades del vidrio.....	4
2.2 Métodos de trituración.....	6
2.3 Máquinas de trituración	7
2.3.1 Trituradora de impacto.....	7
2.3.2 Trituradora de mandíbula.....	8
2.3.3 Molinos de bolas.....	8
2.4 Seguridad en la trituración del vidrio	9
2.5 Reciclaje del vidrio	10
3. Estado del arte.....	11
3.1 Empresas que actualmente trituran y reciclan vidrio.....	11
3.1.1 Arenas de vidrio	11
3.1.2 DB Export beer bottle sand	12
3.2 Máquinas trituradoras de vidrio	13
3.2.1 Máquina <i>Eco innova Investigación y Medio Ambiente, S.L.</i>	13
3.2.2 Trituradora de vidrio G5.....	14
4. Planteamiento del problema.....	16
5. Justificación	17
6. Objetivos.....	19
6.1 Objetivo general	19
6.2 Objetivos específicos	19
7. Metodología.....	21
7.1 Objetivo 1: Especificaciones técnicas y funcionales	21
7.2 Objetivo 2: Concepto de diseño.....	22
7.3 Objetivo 3: Cálculos.....	23
7.4 Objetivo 4: Diseño de detalle.....	24
8. Resultados y discusión	24
8.1 Investigación de campo.....	24
8.1.1 Encuestas a universidades	24
8.1.2 Expertos/empresas.....	26
8.1.3 Análisis de investigación de campo	27

8.2	Requerimientos de diseño	31
8.2.1	Restricciones de diseño	31
8.2.2	Requerimientos del problema.....	32
8.2.3	Requerimientos normativos.....	32
8.2.4	Requerimientos funcionales y técnicos clave	33
8.3	Diseño conceptual	33
8.3.1	Caja negra.....	33
8.3.2	Caja transparente.....	34
8.3.3	Casa de la Calidad	36
8.3.4	Análisis morfológico	38
8.3.5	Diagramas de Pugh.....	40
8.3.6	Esquema conceptual.....	46
8.4	Diseño de detalle	46
8.4.1	Botellas de vidrio	47
8.4.2	Recepción de botellas	52
8.4.3	Sistema de trituración.....	55
8.4.4	Recolección.....	64
8.4.5	Estructura.....	66
8.4.6	Análisis de elementos finitos	71
9.	Recomendaciones	82
10.	Conclusiones	84

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Trituradora de impacto [11].....	7
Figura 2. Trituradora de mandíbula [13].....	8
Figura 3. Molino de bolas [15].	9
Figura 4. Productos ofrecidos por Arenas de vidrio [21].	12
Figura 5. Máquina “DB Export Beer Bottle Sand” [22].....	13
Figura 6. Vista isométrica maquina Eco innova Investigación y Medio Ambiente, S.L [24].	14
Figura 7. Trituradora de vidrio LCC G5V50 [25].....	15
Figura 8. Operario lanzando botella para romperla.....	29
Figura 9. Operario removiendo etiquetas de la botella.....	30
Figura 10. Caja negra.....	34
Figura 11. Caja transparente.....	36
Figura 12. Casa de la Calidad.....	37
Figura 13. Diseño Conceptual.....	46
Figura 14. Tamaño Estándar de Botella de Vino [39].....	48
Figura 15. Distancia de primer contacto.....	51
Figura 16. Sistema de recepción de botellas.....	53
Figura 17. Tobogán.....	54
Figura 18. Puerta basculante.....	54
Figura 19. Tapa de seguridad.....	55
Figura 20. Trituradora tipo Blake.....	56
Figura 21. Vista frontal de trituradora.....	56
Figura 22. Mandíbulas dentadas.....	57
Figura 23. Vista isométrica eje excéntrico.....	58
Figura 24. Vista frontal.....	59
Figura 25. D.C.L. mandíbula móvil.....	60
Figura 26. Aislantes en la placa de soporte de trituradora.....	64
Figura 27. Sistema de recolección de vidrio.....	65
Figura 28. Recámara del contenedor.....	65
Figura 29. Contenedor de vidrio triturado.....	66
Figura 30. Estructura.....	67
Figura 31. Estructura con placas.....	68
Figura 32. Perfiles Acero ASTM A36 [47].....	69
Figura 33. Laminas SAE 1020 cold rolled [48].....	69

Figura 34. Almohadillas aislantes de elastómero dentado VT [49]	70
Figura 35. Lámina perforada desmontable.....	71
Figura 36. Análisis de esfuerzo equivalente estructura	72
Figura 37. Análisis de deformación estructura	73
Figura 38. Deformación por vibraciones estructurales.....	75
Figura 39. Esfuerzo equivalente por vibraciones estructurales.....	75
Figura 40. Deformación eje excéntrico	76
Figura 41. Esfuerzo equivalente eje excéntrico.....	76
Figura 42. Deformación 1 mandíbula	77
Figura 43. Esfuerzo equivalente 1 mandíbula	78
Figura 44. Deformación 2 mandíbula	79
Figura 45. Esfuerzo equivalente 2 mandíbula	79

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de los vidrios [7].....	5
Tabla 2. Especificaciones LCC G5V50 [23].	15
Tabla 3. Diagrama morfológico.....	39
Tabla 4. Matriz de evaluación Pugh – Subsistema de recepción de botellas	41
Tabla 5. Matriz de evaluación Pugh – Subsistema de trituración.....	42
Tabla 6. Matriz de evaluación Pugh – Subsistema de almacenamiento final	43
Tabla 7. Matriz de evaluación Pugh – Alimentación del sistema de trituración	45
Tabla 8. Análisis de convergencia malla estructura	74

Introducción

En la actualidad, la extracción de arenas silíceas es un proceso ampliamente utilizado en la industria debido a que estas arenas son una fuente esencial de sílice, un material crucial en la fabricación de vidrio. Sin embargo, la extracción de arenas silíceas está vinculada a la destrucción de ecosistemas naturales, la alteración de paisajes, la contaminación del agua y el agotamiento de recursos. Un artículo de la ONU afirma que se extraen 18 kilos de arena por cada habitante en el planeta [3], haciendo de esta práctica algo insostenible. Para mitigar estos impactos ambientales, el reciclaje se ha convertido en una práctica fundamental que promueve la sostenibilidad.

El reciclaje del vidrio, en particular, juega un papel crucial debido a su amplia utilización en sectores como la fabricación de envases, la construcción, el sector automotriz, la electrónica y electrónica, cerámicas y la decoración. No obstante, el vidrio desechado presenta un desafío significativo debido a su lenta degradación y a la ocupación de espacio en vertederos sanitarios, lo que genera un impacto negativo en el medio ambiente. La carencia de máquinas trituradoras de vidrio eficientes y accesibles dificulta el proceso de reciclaje, limita la capacidad de reutilización del vidrio y contribuye al problema ambiental. Por tanto, se busca reducir el impacto ambiental, aumentar el aprovechamiento de recursos y promover una cultura de reciclaje con prácticas sostenibles y al mismo tiempo, procesar grandes cantidades de este material de forma eficiente y segura, produciendo fragmentos de tamaño uniforme, listos para su uso industrial en cuanto a granulometría.

El proceso de reciclaje del vidrio requiere varias etapas, siendo la trituración una de las más importantes. La trituración permite reducir el volumen del vidrio y prepararlo para su posterior reutilización en la fabricación de nuevos productos. En este contexto, el diseño y la implementación de una máquina trituradora de vidrio eficiente y accesible se convierten

en una necesidad imperante. Para abordar este problema, se propone el diseño de una máquina recicladora de botellas de vidrio, capaz de triturar las botellas depositadas en ella, separando previamente las etiquetas y discerniendo entre los distintos colores de las botellas. El objetivo principal de esta máquina es reducir el volumen del vidrio para fomentar y aumentar su reciclaje.

El alcance de este proyecto incluye el diseño de la máquina trituradora de vidrio, que, en una segunda etapa no incluida en este proyecto, se construiría y ubicaría en la PUJ de Cali y posteriormente en otras universidades de la ciudad de Cali. El proceso de diseño abarcará la investigación preliminar, la definición de requisitos y especificaciones, el diseño conceptual, la selección de componentes y, finalmente, el diseño de detalle. Del mismo modo, permitirá aplicar conocimientos de ingeniería mecánica, metodologías de diseño y técnicas de investigación para la recopilación y análisis de información relevante sobre procesos de reciclaje de vidrio y tecnologías de trituración.

1. Antecedentes

Los antecedentes de este trabajo se fundamentan en una revisión de la literatura relacionada con el vidrio, la trituración del vidrio, los principios de diseño de maquinaria trituradora, así como los aspectos técnicos y operativos involucrados en el reciclaje de este material. A través de esta revisión teórica, con el fin de identificar los requisitos clave para el diseño de una máquina trituradora de vidrio.

En este contexto, se exploran conceptos como las propiedades mecánicas, la resistencia de materiales, la selección de componentes y materiales, así como los aspectos de seguridad y eficiencia energética que deben considerarse en el diseño y construcción de una máquina trituradora de vidrio. Además, se examinan las tecnologías existentes en el mercado, sus ventajas y limitaciones, con el propósito de establecer una base sólida del proceso de trituración de vidrio.

Finalmente, se tendrá en cuenta la gestión sostenible de los recursos, el reciclaje juega un papel fundamental en la mitigación de la contaminación y la reducción de la huella ecológica. Dentro de este panorama, el vidrio se destaca como uno de los materiales más reciclables, no obstante, su procesamiento adecuado plantea desafíos técnicos significativos debido a su fragilidad que lo hace propenso a fracturas peligrosas e incontrolables al aplicar cargas de impacto o compresión, estas fracturas aumentan el riesgo de cortes y lesiones a operarios durante su manipulación. Además, al convertirse en material particulado se convierte altamente abrasivo, generando así un desgaste acelerado en los componentes mecánicos de las máquinas empleadas para llevar a cabo dicha tarea. En este sentido, el diseño y desarrollo de una máquina trituradora de vidrio para facilitar su reciclaje emerge como una solución para optimizar este proceso, reducir los riesgos asociados y aumentar la vida útil de los equipos implicados.

2. Marco teórico

2.1 Propiedades del vidrio

El vidrio es un material sólido, amorfo y transparente que se obtiene mediante la fusión de arena de sílice (SiO_2), carbonato de sodio (Na_2CO_3) y caliza (CaCO_3)[4]. El vidrio es un material inerte y no reacciona químicamente, lo que lo hace resistente a una gran cantidad de productos químicos como ácidos [5]. Estas propiedades hacen del vidrio un material versátil y ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones, incluyendo envases, ventanas, productos de laboratorio, productos químicos y dispositivos electrónicos.

La

presenta sobre las propiedades de varios tipos de vidrio. Este proyecto se enfoca en el vidrio Sodocálcico, que es con el cual se fabrican las botellas de vidrio. En general las propiedades físicas más importantes incluyen su transparencia para la luz visible, su dureza aproximada de 5,5 en la escala de Mohs [6], la densidad que generalmente esta entre 2,2 y 2,8 g/cm^3 , su punto de fusión ronda alrededor de los 1400-1600 °C, el coeficiente de dilatación térmica es aproximadamente $9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, tiene una baja conductividad térmica y el índice de refracción es de alrededor de 1,5.

2.2 Métodos de trituración

Actualmente, existen varios métodos para triturar una amplia variedad de materiales. Estos métodos son fundamentales para la reducción de su tamaño, facilitando su manejo, transporte, almacenamiento y reciclaje. Los métodos más comunes de trituración incluyen la trituración mecánica y la trituración térmica.

La trituración mecánica es el método más utilizado y comprende una variedad de técnicas que aplican fuerza mecánica para reducir el tamaño de los materiales. Entre los equipos más utilizados en este método se encuentran las trituradoras de martillos, trituradoras de impacto y trituradoras de rodillos. En este proceso, el material es alimentado a la trituradora, donde es aplastado por la acción de martillos o por el impacto de una superficie dura. La trituración mecánica es adecuada para una amplia gama de materiales, desde vidrio hasta plásticos, madera y metales blandos[8].

Por otro lado, la “trituración” térmica es menos común y se utiliza principalmente para materiales difíciles de triturar mediante métodos mecánicos, como materiales compuestos o con alta resistencia. En este método, el material se somete a altas temperaturas para ablandarlo antes de ser triturado. Esto puede facilitar el proceso de trituración al hacer que el material sea más quebradizo y fácil de manipular. Sin embargo, la trituración térmica tiende a ser más costosa y compleja que la trituración mecánica, por lo que se utiliza principalmente en aplicaciones donde es necesario triturar materiales muy resistentes o en procesos específicos de reciclaje [9].

2.3 Máquinas de trituración

2.3.1 Trituradora de impacto

La trituradora de impacto es un tipo de equipo de trituración mecánica que utiliza la fuerza del impacto para reducir el tamaño de los materiales. En este tipo de trituradora como pueden ver en la Figura 1, el material es alimentado a través de una abertura en la parte superior de la trituradora y luego se golpea contra una serie de barras o martillos giratorios que están montados en un rotor giratorio. El impacto de los martillos contra el material provoca la fractura y reducción del tamaño de este. Las trituradoras de impacto son adecuadas para triturar una amplia variedad de materiales, desde rocas duras hasta materiales blandos como el vidrio y el hormigón. Este tipo de trituradora es ampliamente utilizado en la industria minera, de construcción y de reciclaje, debido a su alta eficiencia y capacidad para producir un producto final de alta calidad [10].

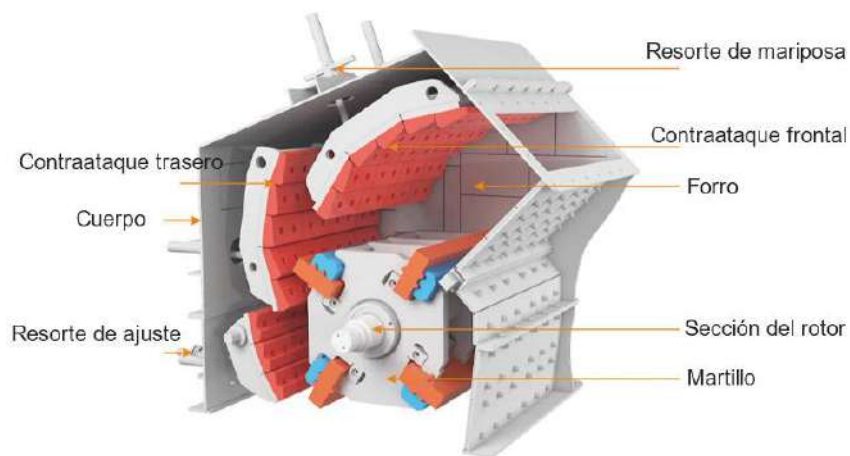


Figura 1. Trituradora de impacto [11].

2.3.2 Trituradora de mandíbula

Las trituradoras de mandíbulas son equipos utilizados principalmente en la trituración primaria de materiales duros y abrasivos. Estas máquinas consisten en una mandíbula móvil y una mandíbula fija, dispuestas en forma de "V". Usando como referencia la Figura 2 el material es introducido en la cavidad formada por las mandíbulas y triturado cuando la mandíbula móvil se mueve hacia la derecha y la izquierda contra la mandíbula fija. Las trituradoras de mandíbulas son ampliamente utilizadas en la industria minera, de construcción y de demolición para triturar rocas, minerales, concreto y otros materiales duros [12].

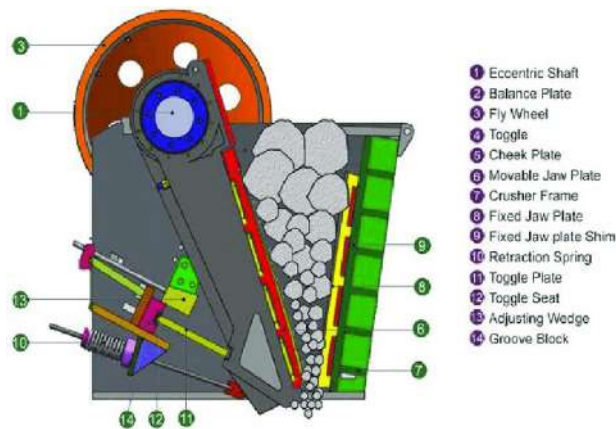


Figura 2. Trituradora de mandíbula [13]

2.3.3 Molinos de bolas

Los molinos de bolas son equipos utilizados para la molienda fina de materiales. Consisten en un tambor giratorio que contiene bolas de acero u otro material como medio de trituración (ver figura 3). El tambor gira sobre su eje horizontal, lo que hace que las bolas dentro del tambor caigan sobre el material a triturar, impactándolo y pulverizándolo. Los molinos de bolas se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la industria minera, la industria del cemento, la industria química y la industria de alimentos, entre

otras. Son especialmente eficaces para la molienda de materiales duros y abrasivos, así como para la molienda de materiales secos o húmedos [14].



Figura 3. Molino de bolas [15].

2.4 Seguridad en la trituración del vidrio

Durante la trituración del vidrio se deben tener en cuenta varios aspectos importantes, debido a que se pueden presentar ciertos riesgos para la salud y la seguridad de los operarios o personas que se encuentren cerca de donde se esté realizando dicha trituración, si no se maneja adecuadamente. Las astillas y fragmentos de vidrio pueden ser muy afilados y causar cortes profundos en la piel si se manejan sin precaución. Durante el proceso de trituración, el vidrio puede generar polvo fino que puede ser inhalado por los operarios. Este polvo puede irritar los ojos, la nariz y la garganta, y en algunos casos puede contener sílice cristalina, que es conocida por causar enfermedades respiratorias graves. Las partículas de vidrio pueden ser arrojadas al aire durante el proceso de trituración y causar lesiones en los ojos si no se utilizan gafas de protección adecuadas [16]

Es importante manipular el vidrio triturado con guantes resistentes a cortes y evitar el contacto directo con la piel para reducir el riesgo de cortes y abrasiones. Se deben implementar medidas para controlar la generación de polvo durante el proceso de trituración, como la instalación de sistemas de supresión de polvo o la utilización de

equipos de recolección de polvo. Sí, existe normatividad que regula el procesamiento del triturado de vidrio en términos de seguridad y salubridad, aunque no está unificada en una única norma específica para “trituradoras de vidrio”. En Colombia y a nivel internacional, el procesamiento de materiales peligrosos como el vidrio está regulado por normas de seguridad industrial, ambiental y de maquinaria, entre las que se destacan la resolución 2400 de 1979 (MinTrabajo Colombia) la cual es el reglamento de higiene y seguridad industrial. Aplica al diseño de máquinas que puedan generar riesgos físicos como cortes o exposición a polvo [17]. También, la OSHA y la NIOSH explican cómo, aunque el vidrio no sea un residuo peligroso per se, el polvo de sílice puede entrar en esta categoría por su capacidad de causar silicosis [18]

2.5 Reciclaje del vidrio

El reciclaje del vidrio es un proceso que aporta a la conservación de recursos naturales y a la protección del medio ambiente. Este proceso comienza con la recolección de los envases de vidrios usados. Se hace a través de contenedores de reciclaje que existan en la comunidad, programas de recogida selectiva o centros de reciclaje. Una vez se haya recolectado, el vidrio es transportado a una planta de reciclaje donde se clasifica por color. Generalmente esos colores son: transparente, ámbar y azul. Luego de hacer la respectiva clasificación, el vidrio es triturado en fragmentos más pequeños por medio de máquinas de trituración, para ser fundido posteriormente. En la etapa de fundición se eliminan las impurezas del vidrio y se forma el vidrio líquido, este es vertido en moldes para producir nuevas botellas, frascos, envases u otros productos de vidrio que se requieran. Una vez formado, el vidrio se enfría lentamente para evitar tensiones internas. Luego se almacena y se distribuye para su uso [19].

Los beneficios del reciclaje del vidrio son muy amplios. Ayuda a conservar los recursos naturales, como la arena, la piedra caliza y el carbonato de sodio, que son utilizados en la fabricación de vidrio nuevo. En paralelo se reduce la alteración del equilibrio de la superficie terrestre. También, se ve reducida la cantidad de residuos que van a los vertederos, disminuyendo la contaminación. Fabricar vidrio reciclado requiere menos energía que la fabricación de vidrio nuevo, por lo que, ayuda a reducir las emisiones de

gases de efecto invernadero, la contaminación atmosférica y representa un ahorro de energía en la industria. Esto se le suma la creación de empleos en la industria del reciclaje. En resumen, el reciclaje del vidrio es un proceso eficiente y sostenible que proporciona beneficios ambientales, económicos y sociales [19].

3. Estado del arte

3.1 Empresas que actualmente trituran y reciclan vidrio

3.1.1 Arenas de vidrio

Arenas de Vidrio es un emprendimiento que promueve la recuperación y extensión del ciclo de vida de las botellas de vidrio no retornables para reutilizarlo y emplearlo en la construcción. Se han dedicado a investigar las posibles aplicaciones del vidrio como sustituto de la arena en la construcción. Asimismo, ha identificado los tipos de granulometría necesarios para diferentes aplicaciones y también ha desarrollado un producto de mantenimiento de pavimentos que incorpora polvo de vidrio de descartes industriales. Esta técnica ha permitido la generación de asfalto para crear y arreglar caminos en el Uruguay [20].



Figura 4. Productos ofrecidos por Arenas de vidrio [21].

3.1.2 DB Export beer bottle sand

DB Export Beer Bottle Sand es una iniciativa de reciclaje por una cervecera en Nueva Zelanda llamada DB Berberies, la cual transforma botellas vacías de su propia en marca en un sustituto de arena. La “máquina de arena de botellas de cerveza” de esta empresa, tritura cada botella en 200 gramos de arena, las cuales son distribuidas a compañías de construcción, manufactureras de concreto, campos de golf, y compañías de drenaje. Esta arena ayuda a reponer las playas de Nueva Zelanda y reduce la dependencia del país de extraer arenas de las costas [22].



Figura 5. Máquina “DB Export Beer Bottle Sand” [22].

Esta empresa también está asociada con la compañía más grande de reciclaje de Nueva Zelanda, de modo que puedan combinar las botellas “DB Export” con los demás desechos de vidrio que de otro modo terminarían en vertederos; así, esperan crear cantidades comerciales de arena. La meta de la compañía es convertir 500 000 botellas de cerveza en 100 toneladas de sustituto de arena anualmente [23].

3.2 Máquinas trituradoras de vidrio

3.2.1 Máquina *Eco innova Investigación y Medio Ambiente, S.L.*

La máquina recicladora de vidrio desarrollada por Ecoinnova Investigación y Medio Ambiente, S.L., está diseñada para el reciclaje de vidrio principalmente procedente de residuos domésticos y de cortinas de cristal con el fin de obtener calcín. Es una máquina en forma de cubo completamente hermética, con una abertura en la parte superior para introducir los envases de vidrio. Utiliza tecnología de sensorización óptica para separar automáticamente el vidrio por colores: verde, opaco, ámbar y transparente. Tritura el vidrio y lo separa de los residuos contaminantes como metal o plástico. Deposita el vidrio

triturado y limpio en bolsas para ser transportado como calcín a las plantas donde va a ser convertido nuevamente en vidrio [24].

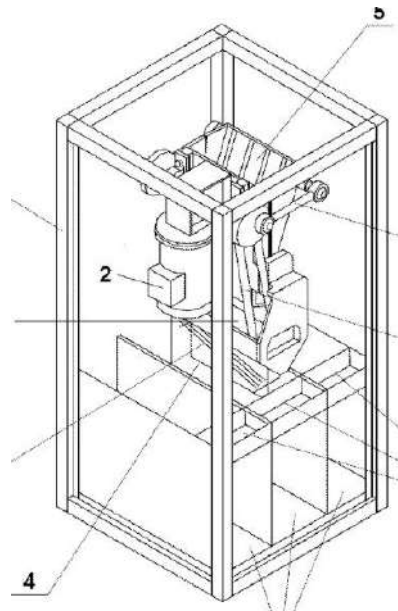


Figura 6. Vista isométrica maquina Eco innova Investigación y Medio Ambiente, S.L [24].

3.2.2 Trituradora de vidrio G5

La trituradora de vidrio LCC G5V50 es diseñada y fabricada por la empresa Lean Compacting Company, la cual es ofrecida para clientes que requieran ayuda y busquen facilitar la gestión de residuos. Se trata de una máquina destructora de botellas de llenado fácil, la cual permite obtener tamaños de grano o partícula variable. Es capaz de reducir el volumen del vidrio con una relación 5:1. Puede triturar botellas hasta de dos litros, tiene la capacidad de procesar hasta 100 botellas por minuto y cuenta con luz indicadora de llenado de contenedor [25].



Figura 7. Trituradora de vidrio LCC G5V50 [25]

Las especificaciones de esta trituradora se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones LCC G5V50 [25].

Dimensiones: Alto · Ancho · Fondo (mm)	1955 · 710 · 1255
Peso (kg)	320
Altura de llenado (mm)	1650
Reducción	5:1
Potencia	Motor monofásico de 220 V, 5 Hz y 1,5kW
Tamaño ajustable de los trozos de vidrio	De 2 a 15 mm
Nivel de ruido	70 dB
Grado de protección	IP54
Rendimiento	Mas de dos toneladas por hora

Según la descripción ofrecida por la empresa esta máquina cuenta con una seguridad total en su manipulación, reduce los costos hasta en un 60% y ahorra espacio, tiempo y dinero. Tomando en cuenta que permite procesar el vidrio inmediatamente después de su uso, es diseñada pensando en negocios que usen una gran cantidad de botellas no retornables, evitándoles los traslados de este a los sitios de reciclaje de vidrio, facilitando así el orden

en la zona de almacenamiento y permitiendo la interacción directa con los gestores de residuos [25].

4. Planteamiento del problema

Según un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la arena es el segundo recurso natural más explotado del mundo, después del agua [26]. Es un recurso no renovable que se utiliza en grandes cantidades para fabricar muchos productos. Se utiliza en la construcción de carreteras y edificios, así como en otras aplicaciones como el vidrio. En Colombia, se reportó la extracción de arenas de sílice correspondiente a 1'260.878 m³ entre los años 2012 y 2016 [27]; en donde al comparar este valor con su utilización, se evidencia que las arenas silíceas que se producen en el país son consumidas por la industria local; principalmente, para la fabricación de vidrio. Para el año 2023, se estimó que Colombia produce 12 millones de toneladas de residuos anuales, de las cuales solo se recicla un 17% [28]. Por otro lado, a pesar de los esfuerzos realizados para promover el reciclaje, las tasas para el vidrio siguen siendo bajas en comparación con otros materiales, como el papel, el plástico y el metal. Según datos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, el vidrio es uno de los materiales que más se aprovecha; sin embargo, representa solo el 7% del material reciclado [29]; es decir, que solo se reciclan 142 mil toneladas de vidrio, muy por debajo de la media de otros materiales.

Adicionalmente, titulares como “El 78% de los hogares colombianos no recicla” [30] de una noticia de la revista Semana nos indica que los índices de reciclaje en los hogares son bajos, siendo solo del 22%. Además, se observa que la participación en programas de reciclaje varía según la edad de las personas. Según una encuesta realizada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el porcentaje de personas que reciclan en Colombia es mayor entre los jóvenes de entre 18 y 35 años, con un 45%, mientras que, entre los adultos mayores de 60 años, este porcentaje disminuye al 25% [31]. Tomando esto en cuenta, promover el reciclaje desde las instituciones como las

universidades hará que a futuro el porcentaje de reciclaje aumente; ya que los jóvenes crecerán y formarán sus hogares con esa consciencia. Por lo tanto, estrategias como esta, promoverían el reciclaje del vidrio.

Teniendo en cuenta la información mencionada anteriormente, se plantea la pregunta a resolver: ¿Cómo puede una máquina trituradora de vidrio contribuir a reciclar con consciencia y mitigar la explotación de arena y promover el reciclaje de vidrio en Cali?

5. Justificación

La extracción de arena está ligada a la degradación de la biodiversidad y el medio ambiente; por lo tanto, se propone el diseño de una máquina que permita recolectar y triturar botellas de vidrio para transformarla en materia prima. De este modo, al utilizar vidrio reciclado y triturado como materia prima, se pueden reducir los costos de producción de las empresas al entregarlo ya molido o triturado como valor agregado y facilitar su almacenamiento al reducir el volumen.

Según la Agencia de Protección Medioambiental de EE. UU. (EPA), por cada tonelada de materiales reciclados se impacta al medio ambiente de este modo: La contaminación atmosférica se reduce en un 20%, la contaminación del agua se reduce en un 50%, las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen en un 60% el consumo de energía se reduce en un 74% y se ahorra espacio en los vertederos [32]. Por lo que integrar esta tecnología en los procesos industriales, promueve la economía circular, avanzando hacia una sociedad más sostenible y responsable.

El vidrio, a pesar de ser un material 100% reciclable, representa un grave problema ambiental cuando no se gestiona adecuadamente. Una botella de vidrio puede tardar más de 4000 años en degradarse en el medio ambiente, lo que evidencia su persistencia en los vertederos y la urgencia de promover su reciclaje [33]. Además, la fabricación de vidrio a partir de materias primas vírgenes como arena de sílice, carbonato de sodio y piedra caliza

no solo implica la extracción intensiva de recursos naturales, sino también la alteración de ecosistemas y el uso excesivo de agua. Este proceso, altamente demandante en términos energéticos, genera más de 60 megatoneladas de CO₂ al año solo en la industria de envases y planchas de vidrio, contribuyendo significativamente al calentamiento global [33]. Por otro lado, el reciclaje de vidrio permite ahorrar entre un 20% y 30% de energía en comparación con la producción de vidrio nuevo, debido a que el punto de fusión del vidrio reciclado es menor [34]. Por ello, el reciclaje del vidrio no solo es una alternativa viable, sino necesaria para reducir su impacto ambiental y promover un modelo de producción más sostenible.

Las universidades son el lugar indicado para empezar a implementar este tipo de desarrollos, teniendo en cuenta que son grandes comunidades en las cuales se forman los profesionales del futuro. Por este motivo, llevar a cabo este proyecto será un ejemplo de buenas prácticas sostenibles, las cuales van a promover la cultura del reciclaje entre la comunidad estudiantil y el personal administrativo, fomentando la responsabilidad ambiental y social entre la comunidad universitaria, la cual se va a expandir cuando los estudiantes salgan al mundo laboral. Al mismo tiempo, será una oportunidad para que las universidades lleven a cabo investigaciones sobre el reciclaje del vidrio y otros procesos de reciclaje e, incluso, se pueden implementar trabajos prácticos con la máquina donde los mismos estudiantes hagan uso del manejo de estas nuevas tecnologías y en la gestión de residuos como un complemento en su formación académica.

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Diseñar una máquina recolectora trituradora de vidrio que lo transforme en materia prima, reduciendo la necesidad de extracción de arena y disminuyendo la huella de carbono en Colombia.

6.2 Objetivos específicos

1. Definir las especificaciones técnicas y funcionales de la máquina trituradora de vidrio.
2. Desarrollar un concepto de diseño que optimice el proceso de trituración de vidrio, asegurando la máxima recuperación de material y minimizando la generación de residuos durante la operación.
3. Realizar cálculos detallados que denoten la funcionalidad de la máquina trituradora, considerando las fuerzas involucradas en el proceso de trituración acorde a las propiedades específicas del vidrio.
4. Elaborar un diseño de detalle que incluya la selección de componentes, materiales y definición de geometría de la máquina trituradora de vidrio.

7. Metodología

7.1 Objetivo 1: Especificaciones técnicas y funcionales

Se realizó una revisión de la literatura que estuvo relacionada con las tecnologías de trituración de vidrios y demás procesos o maquinas industriales. Este paso comenzó con el estado del arte y el marco teórico; sin embargo, se profundizó sobre esa investigación en bases de datos y consultando con empresas que tuvieran este tipo de productos en el mercado. Del mismo modo, se elaboró una consulta sobre las posibles normativas que se aplicaban en el área, tanto como para construir máquinas, así como de reciclaje. Posteriormente, se llevaron a cabo encuestas y entrevistas de preguntas abiertas con expertos y técnicos, en las áreas de diseño de máquinas y reciclaje del vidrio para recopilar información de primera mano sobre las necesidades. También, se contactaron a las empresas que contaban con máquinas trituradoras de vidrio para identificar cuáles eran los problemas que presentan las máquinas actuales, con el fin de incluirlos y corregirlos en el desarrollo de este proyecto.

Simultáneamente, se llevó a cabo un estudio de campo a tres universidades de la ciudad de Cali, en donde se consultó la cantidad de vidrio reciclado, si utilizaban algún método especial de reciclaje, si se vendía (precio), o se donaba. Teniendo en cuenta que la máquina a diseñar se quiere ubicar en zonas comunes de universidades como en sus plazuelas, estos datos sirvieron como indicadores para tener en cuenta en las especificaciones, tanto de la máquina, como en la capacidad de procesamiento, tamaño de alimentación, capacidad de almacenaje de la máquina, espacio disponible y estética. Así mismo, se indagó acerca de la industria de producción de botellas de vidrio, para determinar las características del vidrio como materia prima utilizada para fabricar estos

productos, permitiendo definir el tamaño de partícula de vidrio de salida y si era conveniente o no hacer la separación de colores.

Se realizó un análisis detallado de los requisitos funcionales y técnicos, teniendo en cuenta los parámetros definidos durante toda la investigación para validarlos. Finalmente, se documentó detalladamente todas las especificaciones técnicas y funcionales definidas para la máquina trituradora de botellas de vidrio; cabe aclarar que este apartado se hizo de manera cuantitativa y cualitativa. Así mismo, se definió qué tipo de especificación era cada una, distinguiendo entre los requerimientos necesarios y los deseables, incluyendo el porqué de las decisiones tomadas y posibles alternativas consideradas.

7.2 Objetivo 2: Concepto de diseño

Durante el desarrollo del concepto de diseño se ejecutó un análisis de tecnologías existentes y de casos de éxito en el área de la trituración del vidrio. Para ello se buscaron referencias en libros que trataran temas sobre la disposición de residuos sólidos, en los cuales se vieran involucradas la planeación y el diseño de sistemas eficientes y responsables con el medio ambiente: por ejemplo, el *“Handbook of solid waste management”* de George Tchobanoglous y Frank Kreith [35]. Con lo anterior, se esperaba que la máquina contribuyera así a la economía circular y a la sostenibilidad natural.

Para el proceso diseño, se usó como insumo el libro *“The mechanical design process”* de David G. Ullman [36], tratándose de un referente para aplicar lo que se pretendía hacer durante este proyecto. A partir de esto, se efectuaron lluvias de ideas, desde las cuales derivaron numerosos conceptos para el diseño de la máquina, teniendo en cuenta las necesidades identificadas. A partir de esto, se generó un diagrama morfológico donde se propusieron ideas de sistemas para ejecutar cada proceso independiente. Posteriormente, en la evaluación de conceptos se compararon ideas y soluciones a partir de criterios objetivos como costo, factibilidad técnica y aceptación del cliente, empleando métodos como la matriz de decisión Pugh. Una vez seleccionada la idea según las características se procedió a realizar un diseño general, posterior a lo cual, mediante pruebas se prosiguió

con un proceso iterativo de rediseño para suplir satisfactoriamente las necesidades de la máquina.

7.3 Objetivo 3: Cálculos

Primeramente, se realizó una caracterización del material, donde se estudiaron las propiedades físicas del vidrio que afectaban su comportamiento mecánico, tal como los son su dureza y resistencia a la compresión, según la geometría más crítica. Luego, se procedió a hacer el análisis de fuerzas involucradas, identificando y cuantificando esas fuerzas durante el proceso de trituración, teniendo en cuenta los esfuerzos de compresión, torsión, cortante y flexión de los diferentes elementos. Con el fin de garantizar la integridad estructural y la durabilidad de la máquina trituradora de vidrio, se realizaron cálculos detallados de resistencia de materiales y análisis estructurales para los componentes críticos del sistema. Estos cálculos permitieron determinar las cargas máximas que podían soportar dichos elementos durante el funcionamiento operativo, especialmente en condiciones de carga cíclica y esfuerzos combinados (compresión, flexión, torsión y corte). Con base en los anterior, se debían tener en cuenta los cálculos de potencia y velocidades de rotación para la selección del motor del proceso de triturado. Luego, se efectuó el modelado estructural (diseño) de la máquina, utilizando softwares CAD (Computer Assited Design) o diseño asistido por cómputo como SolidWorks y ANSYS (simulación), con el objetivo de encontrar valores como el factor de seguridad estático, esfuerzos nominales de von mises, deformación unitaria y cálculos de resistencia a la fatiga. Este proceso se llevó a cabo luego de haber identificado los elementos críticos de la geometría preliminar, los puntos de apoyo o restricciones de movimiento y esfuerzo, las características del material seleccionado, los detalles geométricos como concentradores de esfuerzo, uniones atornilladas o soldadas y las fuerzas a las que se sometería cada componente a analizar. Para el proceso se generó un mallado adecuado, se registraron los resultados y se aplicó el criterio de convergencia, mediante el cual se itera el proceso redefiniendo la malla hasta que el valor sea confiable. Por último, se compararon los resultados con los cálculos realizados.

7.4 Objetivo 4: Diseño de detalle

En este punto, se incluyeron las especificaciones técnicas de la máquina, como lo eran su tamaño, voltaje de operación y capacidad de procesamiento, en conjunción con las medidas, tolerancias, acabados, la lista de materiales y componentes necesarios. Aunado a lo anterior, usando la herramienta SolidWorks, se generaron los planos de detalle, planos de montaje y de fabricación con las respectivas medidas de cada pieza, así como el ensamblaje del sistema global.

8. Resultados y discusión

8.1 Investigación de campo

8.1.1 Encuestas a universidades

8.1.1.1 ICESI

La encuesta aplicada a la Universidad Icesi permitió identificar el estado actual de la gestión de residuos de vidrio dentro del campus y evidenciar varias oportunidades de mejora en el marco de una transición hacia prácticas más sostenibles. En primer lugar, se destaca que actualmente no se reciclan botellas de vidrio, debido a que las empresas gestoras no las reciben y, por lo tanto, este material debe ser entregado a la empresa de recolección general (Promoambiental) sin ningún tipo de separación o tratamiento diferenciado. Esto representa una pérdida significativa de un recurso que, como se ha planteado en el marco teórico, es infinitamente reciclable y cuya reutilización puede

disminuir el impacto ambiental y económico asociado a la extracción de materias primas como la arena silíceas.

Adicionalmente, se identificó que no se realiza ningún tipo de pesaje o cuantificación del vidrio generado ni reciclado, lo cual impide conocer el volumen real de residuos producidos y limita la toma de decisiones basadas en datos. Tampoco se vende ni se valorizan las botellas como insumo, lo que reduce el incentivo para establecer sistemas de reciclaje estructurados. No obstante, es positivo resaltar que la institución sí está interesada en encontrar soluciones sostenibles para la gestión de residuos. Actualmente realiza una separación manual de residuos en una mesa de clasificación y ha manifestado interés en incorporar maquinaria como compactadoras que mejoren su operatividad.

Este contexto reafirma la pertinencia del diseño de una máquina trituradora de botellas de vidrio, como la propuesta en este trabajo, que permita automatizar el proceso, reducir el volumen del residuo, facilitar su recolección y promover una verdadera economía circular dentro del entorno universitario. Así, se contribuiría no solo a una mejor gestión de residuos, sino también a la formación de una cultura ambiental sólida entre los estudiantes y el personal administrativo.

8.1.1.2 Pontificia Universidad Javeriana

En la Pontificia Universidad Javeriana se llevó a cabo una búsqueda del personal responsable del manejo de residuos, siendo identificada como encargada la funcionaria Isabella Tello. No obstante, a pesar de haberse realizado dos intentos para establecer contacto presencial con ella en su oficina, en ambas ocasiones no fue posible encontrarla. Adicionalmente, se le envió un correo electrónico solicitando información, pero no se obtuvo respuesta.

8.1.1.3 Universidad Autónoma de Occidente

En el caso de la Universidad Autónoma de Occidente, se realizó la búsqueda del personal encargado del manejo de residuos, identificándose a la señora Ana Lasso como la persona

referente en este tema. En un primer acercamiento, la señora Lasso proporcionó información relacionada con el manejo de residuos orgánicos y reciclables como papel y cartón, pero manifestó no tener conocimiento sobre el manejo específico del vidrio. Posteriormente, se recibió un mensaje de su parte en el que indicó que dicha información podría ser proporcionada por el área de "Servicio a la Comunidad". Sin embargo, al acudir a esta dependencia, se informó que no era posible entregar dicha información sin un permiso especial que autorizara su uso con fines académicos. Debido a limitaciones de tiempo, no fue posible gestionar dicho permiso.

8.1.2 Expertos/empresas

8.1.2.1 Reciglass o Ricardo Gómez

Lo más cercano que se llegó a estar de una empresa que se dedique a la recolección de vidrio fue con Ricardo Gómez, empresario de la ciudad de Cali, el cual cuenta con una empresa de recolección de botellas de vidrio ubicada en el barrio la floresta. En Reciglass, se encargan principalmente de recolectar las botellas de vidrio, triturarlas separándolas por color y vendiéndolas a una empresa que se encarga de darle otra vida a este material.

En dos ocasiones se trató de organizar una visita a su empresa, pero nunca se logró llegar a un acuerdo. De igual forma, logramos recolectar material audiovisual, del proceso de remoción de etiquetas y del proceso de trituración. El vidrio es triturado manualmente por trabajadores de la misma empresa, los cuales lanzan las botellas a unos costales usando elementos de protección mínimos como guantes y gafas. El proceso de remoción de etiquetas se hace de la misma manera; manual y con equipo de protección mínimo. Se vierten las botellas en una mezcla de soda caustica y jabón, los cuales cumplen la función de enjabonar la botella para quitar la mugre y las etiquetas. Luego, se enjuaga la botella en agua limpia y se vierte en ácido (sin especificación del tipo ni la finalidad), se juaga nuevamente con agua y el último paso el verterlas en hipoclorito, para finalmente pasar las botellas al secado.

Por motivos de confidencialidad, no se logró obtener el valor al que venden el kilo de vidrio triturado, las cantidades de material que se obtienen por cada color del vidrio, ni el nombre de la empresa a la que ellos le venden. Otro motivo por el cual no se logró revelar la información solicitada, es debido a que Ricardo Gómez se encuentra interesado en adoptar

la idea de crear o implementar maquinas que faciliten el proceso de triturado para cumplir con los fines de su empresa.

8.1.3 Análisis de investigación de campo

La investigación de campo realizada incluyó dos escenarios clave para comprender el estado actual de la gestión de residuos de vidrio: la Universidad Icesi y la empresa *Reciglass* en la ciudad de Cali. Ambos casos permitieron identificar desafíos comunes y oportunidades de mejora que justifican el desarrollo de soluciones tecnológicas como la máquina trituradora propuesta en este proyecto.

La encuesta aplicada al personal encargado del reciclaje en la Universidad Icesi expone una realidad compartida por muchas instituciones educativas en Colombia: la ausencia de infraestructura tecnológica para la gestión eficiente del vidrio. Actualmente, este material no se recicla de manera estructurada ni se cuantifica, y los procesos se realizan de forma completamente manual. Esta situación limita el aprovechamiento de un residuo que, como se ha señalado en el marco teórico, es 100 % reciclable y puede reintegrarse infinitamente al ciclo productivo.

Además, la falta de pesaje o valorización del vidrio impide reconocerlo como un recurso económico, lo que debilita los incentivos institucionales para establecer sistemas de reciclaje formales. La universidad realiza separación manual de residuos en mesas de clasificación, pero no cuenta con mecanismos para transformar o dar valor agregado al vidrio generado.

Desde el enfoque teórico y técnico, esta situación refuerza la pertinencia del diseño de una máquina trituradora automatizada que facilite la recolección, el tratamiento y la comercialización del vidrio triturado. Asimismo, la encuesta permitió validar criterios técnicos considerados en la fase de diseño conceptual. Por ejemplo, se observó una alta valoración del bajo nivel de ruido (calificación de 10), así como de la eficiencia energética

y la autonomía (7 y 8, respectivamente), lo que respalda la inclusión de componentes como sensores y controladores PLC con pantalla táctil para una operación más eficiente y adaptada al entorno universitario.

Cabe resaltar que la sobreexplotación de materias primas como la arena silícea, usada comúnmente en la fabricación de vidrio, ha sido señalada como una preocupación ambiental por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [37]. De ahí que el reciclaje eficiente del vidrio tenga un impacto directo en la reducción de la demanda de estos recursos naturales.

Por otro lado, la investigación de campo desarrollada con la empresa *Reciglass* permitió contrastar la realidad operativa del reciclaje de vidrio en el sector privado con la situación observada en el ámbito universitario. Aunque el acceso a información cuantitativa fue restringido por motivos de confidencialidad, los datos cualitativos y materiales audiovisuales recolectados resultaron altamente reveladores para comprender las prácticas actuales del reciclaje artesanal de vidrio en pequeñas empresas colombianas.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la precariedad de las condiciones laborales y operativas bajo las cuales se realiza la trituración y limpieza del vidrio. La ejecución manual de procesos peligrosos, con un mínimo nivel de protección personal y sin automatización, expone no solo a los trabajadores, sino también a la empresa, a riesgos operacionales, sanitarios y legales. Este punto refuerza la necesidad urgente de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles, seguras y eficientes que puedan ser adoptadas por actores no industrializados del sector reciclador.



Figura 8. Operario lanzando botella para romperla

Además, se evidenció una falta de estandarización en los procesos técnicos, particularmente en el tratamiento químico para la remoción de etiquetas, lo que genera interrogantes sobre la trazabilidad, inocuidad y sostenibilidad del procedimiento. El uso de sustancias como soda cáustica, ácidos y desinfectantes sin justificación técnica documentada ni protocolos certificados, representa una brecha significativa frente a las prácticas seguras de producción limpia promovidas por la normativa ambiental nacional.



Figura 9. Operario removiendo etiquetas de la botella

El hecho de que el empresario esté interesado en adquirir maquinaria para optimizar sus procesos confirma que existe una demanda latente en el mercado para equipos como el que se propone en este proyecto. Esta validación externa, surgida desde un entorno real de producción, refuerza la viabilidad del diseño desde una perspectiva técnica y comercial.

Además, pone de manifiesto que la necesidad de soluciones no se limita al ámbito educativo, sino que abarca también al ecosistema de pequeñas y medianas empresas de reciclaje.

En conjunto, la observación técnica de Reciglass permitió no solo complementar la visión institucional obtenida con la Universidad Icesi, sino también identificar una brecha estructural compartida: la carencia de tecnologías apropiadas para el manejo del vidrio en contextos no industrializados. Esto otorga al diseño de la máquina trituradora una doble relevancia: por un lado, como herramienta educativa y de gestión de residuos en universidades, y por otro, como posible solución adaptable al sector informal o semi-formal del reciclaje urbano.

8.2 Requerimientos de diseño

El diseño de una máquina trituradora de vidrio debe cumplir requisitos técnicos, funcionales, económicos y normativos para garantizar su viabilidad. Además de lo mecánico y operativo, debe integrar criterios ambientales, de seguridad y adaptación a contextos con recursos limitados. Su objetivo es apoyar la gestión sostenible de residuos y promover la economía circular, especialmente en instituciones educativas que impulsan innovación y formación en sostenibilidad.

8.2.1 Restricciones de diseño

- Los operarios no tendrán ningún tipo de intervención con la máquina mientras esta esté operando. Al alcanzar la capacidad máxima de almacenamiento de vidrio triturado, se debe hacer el cambio por un compartimiento vacío; es este el único momento en el cual el operario estará manipulando la máquina sin tener en cuenta los mantenimientos.
- La máquina debe ir de la mano con los sistemas de reciclaje actuales de vidrio, por lo tanto, el material triturado debe cumplir con los requisitos necesarios para asegurar su reutilización posterior. En estos, se incluyen el tamaño de partícula (< 1 cm).
- La máquina debe funcionar a 110 voltios, asegurando su funcionamiento en Colombia, donde el voltaje doméstico es de ese valor.
- La máquina no debe emitir ningún contaminante de vidrio particulado al exterior bajo nivel de ruido y su consumo energético deberá ser bajo. Lo anterior permite obtener una máquina amigable con el medio ambiente, y aumentado su propósito de sostenibilidad y conservación de su entorno.
- Las limitaciones del espacio no son relevantes suponiendo que serán ubicadas en espacios amplios como plazoletas; sin embargo, se quiere una máquina que sea similar a una máquina expendedora, para ello las medidas de la máquina trituradora de vidrio serán similares a las del ECOBOT, el cual tiene medidas aproximadas de 1,83 m de altura, 1,1 m de largo y 0,7 m de ancho, (medidas obtenidas de la

máquina ubicada en el centro comercial Chipichape, ubicado al norte de la ciudad de Cali).

- La máquina deberá triturar una botella por vez y escuchar la trituración por parte del usuario siempre salvaguardando la seguridad del usuario y las personas que estén a su alrededor.
- La botella deberá entrar sin etiqueta a la máquina de triturado, el usuario debe encargarse de retirar dicha etiqueta y depositarla en su respectivo basurero.

8.2.2 Requerimientos del problema

A partir del análisis realizado, los siguientes requerimientos han sido identificados:

Sostenibilidad ambiental: La máquina debe facilitar la reutilización del vidrio y reducir el uso de arena silíceo, cuya explotación genera impactos ambientales significativos.

Adaptabilidad al entorno universitario: El diseño debe permitir la ubicación en espacios comunes como plazoletas, con dimensiones similares a las de una máquina expendedora.

Seguridad operativa: La operación debe ser completamente automatizada, evitando la exposición del usuario al material durante la trituración y cumpliendo con la normatividad de seguridad industrial.

Viabilidad técnica y energética: Debe operar a 110V, compatible con la red eléctrica colombiana, y tener un consumo energético bajo para fomentar su implementación masiva.

8.2.3 Requerimientos normativos

Resolución 2400 de 1979 del Ministerio de Trabajo en Colombia: establece parámetros de seguridad e higiene industrial para maquinaria, aplicando a los mecanismos de protección, diseño sin aristas cortantes expuestas, y operación segura [17]

OSHA/NIOSH (EE. UU.): recomiendan medidas de control para polvo de sílice generado durante el triturado, el cual es considerado potencialmente dañino para la salud respiratoria [18]

Normas técnicas internacionales (ISO 12100, ISO 13849-1): aplicables al diseño seguro de maquinaria, especialmente en sistemas automáticos de trituración y resguardo de partes móviles [38].

El cumplimiento de estas normativas no solo garantiza la seguridad del usuario final, sino que también fortalece la viabilidad legal y técnica del proyecto, especialmente en entornos institucionales donde se exige el cumplimiento estricto de normativas laborales y ambientales.

8.2.4 Requerimientos funcionales y técnicos clave

Los siguientes requerimientos funcionales y técnicos constituyen aspectos esenciales para garantizar la operatividad, eficiencia y adaptabilidad de la máquina trituradora de vidrio en diversos contextos, tanto institucionales como empresariales:

Capacidad máxima de procesamiento: Al menos 30 kilos por hora en un ambiente universitario, permitiendo eficiencia operativa durante horarios pico en campus universitarios. Para un ambiente industrial se debe aumentar esta capacidad considerablemente.

Compatibilidad eléctrica: Alimentación monofásica de 110 V a 60 Hz.

Facilidad de vaciado: Compartimentos modulares extraíbles para el vidrio triturado.

8.3 Diseño conceptual

8.3.1 Caja negra

Con el fin de representar de manera esquemática el funcionamiento general de la máquina trituradora de vidrio, se recurre al modelo de caja negra, una herramienta empleada en ingeniería de sistemas que permite identificar las entradas y salidas del sistema sin describir el detalle interno de los procesos. Esta representación es útil para definir de forma clara los requerimientos funcionales del diseño, así como para delimitar las variables que deben controlarse o gestionarse en su operación.

En este caso, la máquina trituradora de botellas de vidrio se concibe como un sistema que recibe materiales, energía e información, y entrega un producto transformado acompañado de señales de salida. En la Figura X se presenta el modelo de caja negra propuesto para el sistema desarrollado.



Figura 10. Caja negra

Este modelo no solo permite visualizar de forma clara el propósito funcional de la máquina, sino que también facilita la conexión entre los requerimientos del diseño y las necesidades identificadas durante la investigación de campo. Además, sienta las bases para el desarrollo del modelo de caja transparente, en el que se abordará la descomposición funcional interna del sistema, así como la interacción entre sus componentes.

8.3.2 Caja transparente

Tras haber identificado las entradas y salidas del sistema mediante el modelo de caja negra, se procede a representar la *caja transparente*, una herramienta que permite descomponer funcionalmente el sistema, detallando los procesos internos que hacen

posible la transformación de las botellas de vidrio en un insumo triturado, apto para su reutilización industrial.

Este modelo facilita la comprensión de la secuencia lógica, tecnológica y operativa que sigue el material dentro de la máquina, y permite estructurar el diseño de sus componentes mecánicos, eléctricos y de control automatizado. Además, ayuda a visualizar los subsistemas involucrados, identificar puntos críticos del proceso y alinear el diseño con los requerimientos funcionales y normativos definidos en etapas anteriores.

En la **Figura 11** se presenta la caja transparente del sistema, donde se describe el recorrido del material desde su ingreso hasta su salida, evidenciando cada etapa clave del proceso:

El diagrama funcional incluye los siguientes subsistemas:

- **Recepción de botellas:** Punto de ingreso del material.
- **Sistema de trituración:** Núcleo del proceso, encargado de transformar el vidrio en partículas de tamaño controlado.
- **Sistema de almacenamiento:** Contenedor modular que recoge el producto final, y desde donde se generan señales de estado para control y mantenimiento.

Adicionalmente, se identifican salidas complementarias como el calor residual y las vibraciones, resultado inevitable del trabajo mecánico interno.

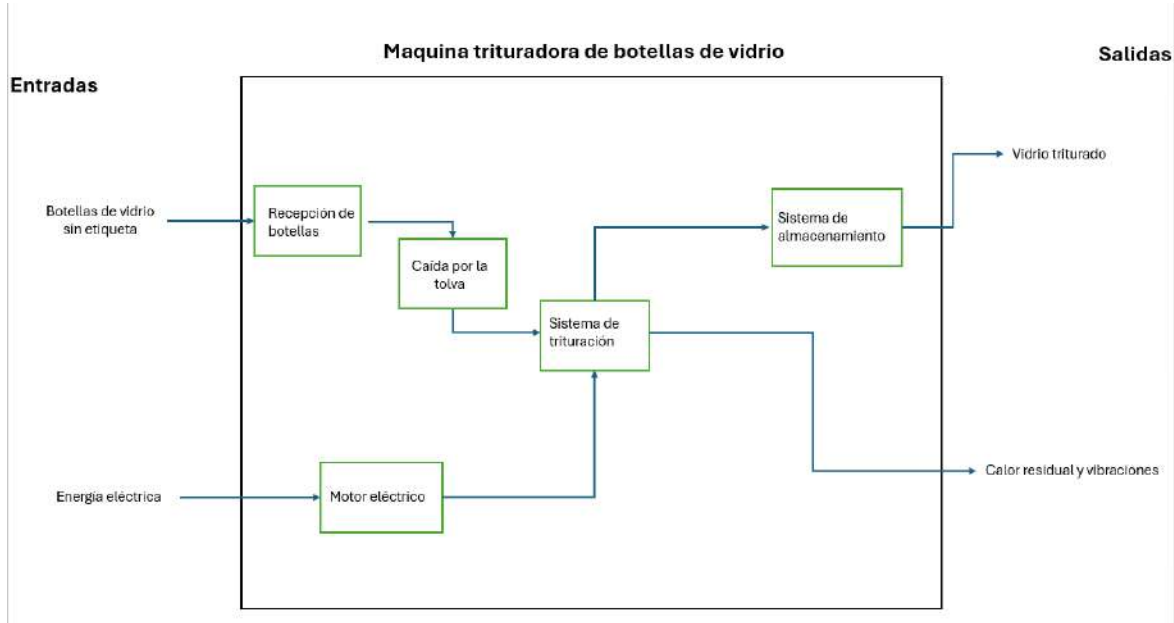


Figura 11. Caja transparente

Este diagrama funcional evidencia cómo a través de un diseño mecánico integrado y selección de componentes específicos, es posible cumplir con los objetivos de eficiencia, seguridad y sostenibilidad que requiere la máquina para su implementación en espacios universitarios.

8.3.3 Casa de la Calidad

La casa de la calidad es una herramienta del método QFD (Quality Function Deployment) utilizada en ingeniería para establecer una relación directa entre las necesidades y expectativas del cliente y los requisitos técnicos ingenieriles del proyecto en curso. A

continuación, la figura presenta la casa de la calidad referente al sistema de trituración de botellas de vidrio.

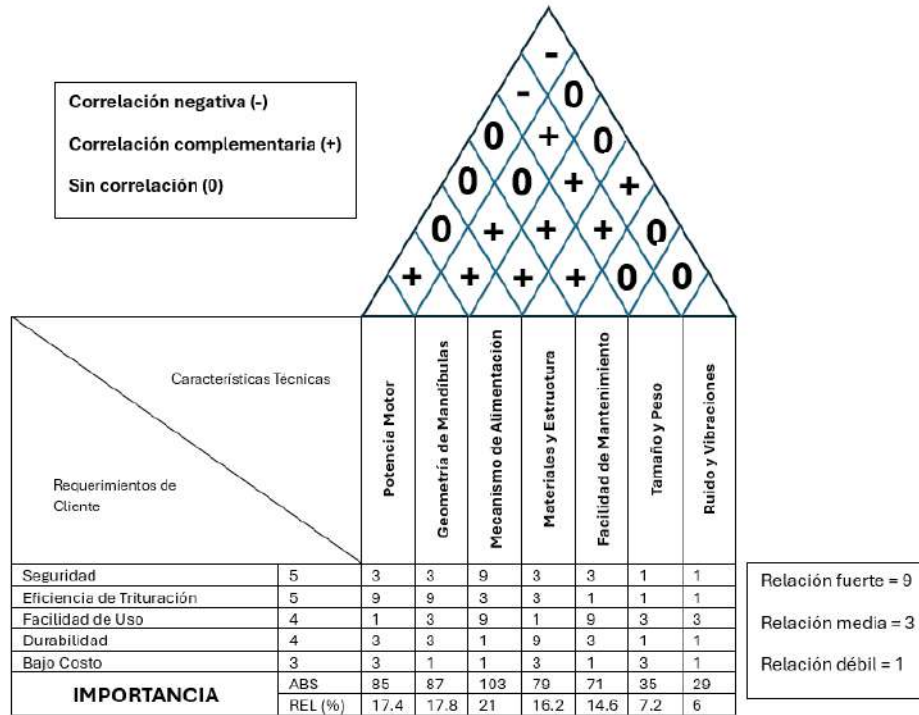


Figura 12. Casa de la Calidad

El análisis QFD permitió identificar que los aspectos más críticos para el diseño de una trituradora de botellas de vidrio de uso doméstico son el mecanismo de alimentación, la geometría de trituración y la selección del motor, ya que influyen directamente en la seguridad, la eficiencia y la facilidad de uso, que fueron las necesidades del cliente con mayor peso. De la misma manera, se determina que los requerimientos de mayor importancia para un potencial cliente radican en la seguridad, de operación, así como la eficiencia del proceso de trituración, en conjunto con una operación simple.

También se determinó que la elección de materiales resistentes y la facilidad de mantenimiento son factores técnicos relevantes para garantizar la durabilidad sin elevar excesivamente los costos.

En conjunto, los resultados muestran que el diseño debe priorizar un sistema de alimentación seguro y controlado, una mecánica de trituración eficiente y un motor de torque alto y bajo consumo, complementados con protecciones efectivas y componentes modulares que simplifiquen el mantenimiento y reduzcan el costo total del equipo.

8.3.4 Análisis morfológico

El análisis morfológico presenta una matriz donde se descompone el sistema global en subsistemas constitutivos y propone diversas opciones de diseño e implementación para dichos subsistemas, con lo cual, posteriormente se genera una combinación para la configuración final del sistema global. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone el análisis morfológico del sistema de trituración de botellas de vidrio, nombrando cada subsistema que lo compone y las alternativas potenciales de diseño.

Tabla 3. Diagrama morfológico

Subsistema	opción 1	opción 2	opción 3
Recepción de botellas	Ducto inclinado 	Banda transportadora 	Brazo robótico 
Trituración	Mandíbulas de acero 	Molino de martillos 	Disco con cuchillas 
Recolección	Contenedores 	Bolsas plásticas 	Tolvas con compactación 
Alimentación	Motor eléctrico 	Sistema de actuador hidráulico 	

8.3.5 Diagramas de Pugh

Para garantizar el diseño óptimo de la máquina trituradora de vidrio, se analizaron diferentes alternativas para cada subsistema que se identificó en la caja transparente utilizando matrices de decisión tipo Pugh. Los criterios de evaluación fueron definidos con base en parámetros como funcionalidad, costos, facilidad de mantenimiento, confiabilidad y compatibilidad con el entorno universitario y se le asignó una puntuación numérica del 1 al 5 a cada alternativa en cada criterio dependiendo del nivel de éxito con el cual cumple en cada subsistema, siendo 5 el valor máximo deseado y 1 el valor mínimo deseado. La alternativa con mayor puntaje es la más recomendable. A continuación, se expone el análisis para cada uno.

8.3.5.1 Recepción de botellas

El subsistema de recepción de botellas define el punto de interacción entre el usuario y la máquina, siendo crucial para garantizar un ingreso adecuado, seguro y compatible con distintos tamaños de botellas. Su diseño debe asegurar compatibilidad con sensores de activación, control del flujo y facilidad de integración con etapas posteriores del sistema.

Tabla 4. Matriz de evaluación Pugh – Subsistema de recepción de botellas

Opción	Eficiencia	Costo	Mantenimiento	Facilidad de integración	Seguridad	Puntaje total
Ranura inclinada (tobogán)	4	3	2	3	4	16
Banda transportadora	2	5	2	2	2	13
Brazo robótico	3	3	4	2	5	17

El mayor puntaje fue obtenido por el brazo robótico con 17 puntos, destacándose por su alta seguridad (5), facilidad de mantenimiento y un desempeño funcional moderadamente bueno. Sin embargo, su elevado costo y complejidad lo hacen poco viable en un entorno universitario donde se espera simplicidad operativa y mantenimiento de bajo costo.

La ranura inclinada, con 16 puntos, presentó una excelente relación entre eficiencia, seguridad y facilidad de integración, además de un costo razonable. Su mantenimiento es fácil y económico, su simplicidad y compatibilidad con sensores de activación automática la convierten en una solución muy conveniente.

Por otro lado, la banda transportadora, aunque sobresale por su bajo costo de fabricación, tuvo el menor puntaje (13 puntos) debido a sus limitaciones en seguridad y eficiencia, así como una menor facilidad de integración.

La opción seleccionada fue la ranura inclinada, por permitir un control más efectivo del flujo de entrada, evitar atascos y facilitar el acoplamiento con la trituradora. Además, este tipo de sistemas es ampliamente utilizado en plantas de reciclaje por su eficiencia y bajo requerimiento de mantenimiento.

8.3.5.2 Trituración

El subsistema de trituración constituye el núcleo funcional de la máquina, ya que es responsable de transformar las botellas de vidrio en partículas de tamaño adecuado para

su recolección, almacenamiento y posterior reutilización industrial. Por lo tanto, su selección es crítica para asegurar la eficiencia general del sistema, así como su confiabilidad operativa.

Tabla 5. Matriz de evaluación Pugh – Subsistema de trituración

Opción	Eficiencia	Costo	Mantenimiento	Consumo energético	Durabilidad	Puntaje total
Mandíbulas de acero dentadas	4	4	4	5	5	22
Molinos de martillos	5	3	3	2	4	17
Discos con cuchillas	4	2	2	3	2	13

La alternativa con mayor puntuación fue las mandíbulas de acero, con 22 puntos, sobresaliendo en durabilidad (5), bajo consumo energético (5), y facilidad de mantenimiento (4), además de una eficiencia operativa elevada (4). Esta opción ofrece un sistema robusto, con alta resistencia al desgaste y un funcionamiento estable en condiciones continuas, lo cual la hace ideal para aplicaciones de reciclaje de materiales duros como el vidrio.

Los molinos de martillos, aunque mostraron la mayor eficiencia (5), presentaron desventajas en consumo energético (2) y mantenimiento (3), alcanzando un total de 17 puntos. Su capacidad para triturar grandes volúmenes es reconocida, pero su implementación en espacios compactos y de bajo consumo no resulta ideal.

Los discos con cuchillas fueron la opción con menor puntaje (13 puntos), debido a su baja durabilidad (2), mantenimiento exigente (2) y eficiencia moderada. Este sistema tiende a desgastarse rápidamente cuando se aplica sobre materiales tan abrasivos como el vidrio, además de implicar un mayor riesgo de obstrucción y rotura de elementos de corte.

A pesar de que los rodillos dentados podrían ofrecer ventajas en términos de distribución uniforme de carga, su implementación en este diseño específico resultaba más compleja desde el punto de vista mecánico. Por ello, se optó por las mandíbulas dentadas de acero que se entrelazan, ya que ofrecen un rendimiento similar, con menor complejidad estructural e integración más sencilla con el resto del sistema.

En conclusión, se seleccionó el sistema de trituración por mandíbulas dentadas de acero, por su equilibrio entre eficiencia, durabilidad, bajo mantenimiento y compatibilidad con el diseño general de la máquina.

8.3.5.3 Recolección o almacenamiento final

El subsistema de recolección o almacenamiento final tiene como objetivo contener el vidrio triturado de forma segura, práctica y eficiente, permitiendo su posterior vaciado o transporte sin comprometer la integridad del material ni la seguridad del operario. Para esta etapa se evaluaron tres alternativas: contenedores fijos, bolsas plásticas y tolvas con compactación.

Tabla 6. Matriz de evaluación Pugh – Subsistema de almacenamiento final

Opción	Facilidad de vaciado	Costo	Durabilidad	Espacio requerido	Practicidad	Puntaje total
Contenedores fijos	3	5	5	3	5	21
Bolsas plásticas	5	5	3	2	4	22
Tolvas con compactación	4	3	5	3	4	19

La alternativa con mejor puntaje fue la de bolsas plásticas, con 22 puntos, destacándose por su excelente facilidad de vaciado (5), bajo costo (5), alta durabilidad (5) y practicidad general (5). Sin embargo, esta opción presenta una limitación relevante en cuanto al espacio requerido (2), ya que puede generar acumulación de bolsas y mayores necesidades logísticas si no se retiran con frecuencia.

Las tolvas con compactación obtuvieron 20 puntos, siendo una alternativa robusta, duradera (5) y práctica (4), con la ventaja adicional de maximizar el espacio disponible mediante la compresión del material. No obstante, su mayor costo (4) y necesidad de componentes mecánicos adicionales las hacen menos viables dentro del presupuesto estimado para el proyecto.

Los contenedores fijos, a pesar de su buen costo (5) y aceptable practicidad (4), obtuvieron 18 puntos debido a su menor facilidad de vaciado (3) y durabilidad limitada (3). No obstante, su simplicidad estructural, bajo costo de implementación y seguridad los convierten en una solución adecuada cuando se requiere un diseño funcional y de bajo mantenimiento.

Por lo tanto, se selecciona la opción de contenedores fijos con tapa, priorizando su bajo costo, seguridad operativa y facilidad de integración con el diseño general de la máquina. Aunque otras alternativas ofrecen mejores valores en algunas categorías, esta opción representa una solución equilibrada y económicamente viable para el contexto del proyecto.

8.3.5.4 Generación de Potencia

La elección del sistema de generación de potencia para el sistema de trituración es determinante para garantizar el funcionamiento continuo, eficiente y sostenible del sistema de trituración de la máquina. Se evaluaron tres alternativas: motor eléctrico, sistema hidráulico y sistema híbrido.

Tabla 7. Matriz de evaluación Pugh – Alimentación del sistema de trituración

Opción	Eficiencia	Costo	Facilidad de mantenimiento	Disponibilidad	Consumo energético	Puntaje total
Motor eléctrico	5	3	5	5	5	23
Sistema hidráulico	2	3	3	3	5	16
Sistema híbrido	5	4	5	4	3	21

La opción con mejor desempeño fue el motor eléctrico, con un total de 23 puntos, sobresaliendo en todos los criterios evaluados: eficiencia (5), facilidad de mantenimiento (5), disponibilidad (5) y consumo energético (5), además de un costo razonable (3). Esta tecnología es ampliamente utilizada en sistemas industriales por su fiabilidad, bajo nivel de ruido, facilidad de integración y disponibilidad en el mercado colombiano con alimentación estándar de 110 V a 60 Hz.

El sistema híbrido alcanzó 21 puntos, con muy buenos resultados en eficiencia, mantenimiento y disponibilidad, pero fue penalizado por su mayor complejidad y consumo energético (3). Aunque representa una alternativa versátil y técnicamente viable, su implementación implica mayores costos y necesidades de regulación de potencia.

El sistema hidráulico, con 18 puntos, fue la alternativa con menor rendimiento general. Presenta un alto costo inicial, puesto que se hace necesaria la implementación de un motor y una bomba (3), baja eficiencia (2), menor disponibilidad de componentes en el mercado local (3) y mayor complejidad de mantenimiento (3) haciéndolo poco adecuado para un sistema compacto y automatizado como el propuesto.

En consecuencia, se seleccionó el motor eléctrico como sistema de alimentación para la trituración, ya que ofrece el mejor equilibrio entre rendimiento, simplicidad operativa, disponibilidad, y sostenibilidad energética, alineándose con los principios de eficiencia y bajo impacto ambiental del diseño general.

8.3.6 Esquema conceptual

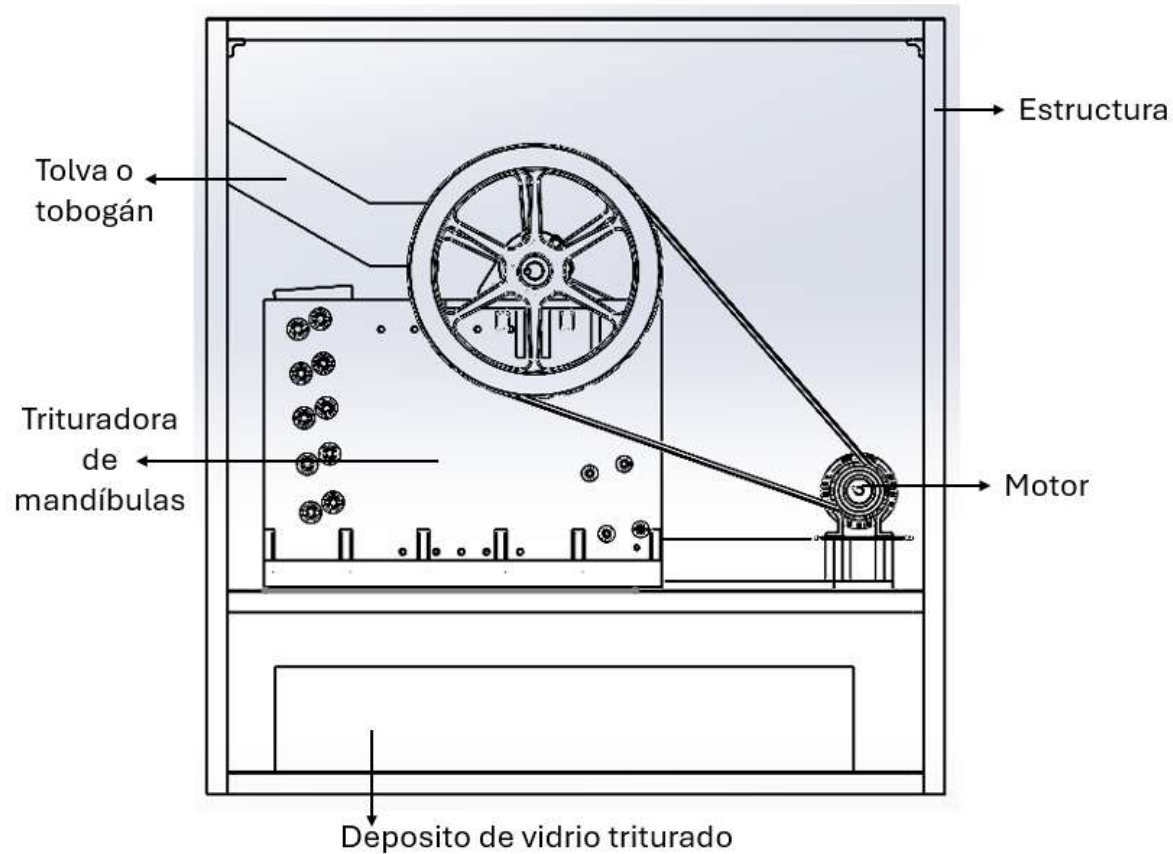


Figura 13. Diseño Conceptual

8.4 Diseño de detalle

El diseño de detalle constituye la etapa en la cual las soluciones conceptuales definidas previamente se transforman en componentes, mecanismos y estructuras plenamente especificados, dimensionados y listos para su fabricación. En esta fase se establecen las características geométricas, materiales, procesos de manufactura, ajustes, tolerancias y elementos comerciales que integran cada subsistema de la máquina trituradora de botellas de vidrio.

El objetivo central del diseño de detalle es garantizar que cada componente cumpla con los requisitos funcionales, operativos y de seguridad planteados en el proyecto, asegurando al mismo tiempo su viabilidad técnica y económica. Para ello, se desarrollan análisis de cargas, esfuerzos y modos de falla; se seleccionan materiales adecuados para las condiciones de trabajo; se definen los elementos de transmisión y apoyo; y se realizan validaciones numéricas mediante herramientas de simulación, tanto estáticas como dinámicas, cuando la criticidad del subsistema lo amerita.

Si bien todos los subsistemas de la máquina son diseñados con el nivel de especificidad requerido —estructura, sistema de trituración, mecanismos de accionamiento, sistemas de apoyo y elementos auxiliares—, el subsistema de trituración recibe un tratamiento de mayor profundidad debido a su papel central en la operación y a las elevadas solicitaciones mecánicas asociadas al fracturamiento del vidrio. En consecuencia, se desarrollan estudios detallados del eje, las mandíbulas, acompañados de análisis computacionales orientados a validar su comportamiento bajo las condiciones reales de servicio.

El presente capítulo consolida todos los aspectos técnicos necesarios para materializar el diseño final de la máquina, integrando criterios de ingeniería mecánica aplicada con consideraciones de seguridad industrial y manufacturabilidad. De esta manera, el diseño de detalle se convierte en la base para la construcción del prototipo virtual y para la eventual fabricación de la máquina, cumpliendo plenamente con los objetivos trazados en el proyecto.

8.4.1 Botellas de vidrio

Con respecto a los rangos de los grosores de vidrio de las botellas en circulación comercial, se encontró que, para contenidos como cerveza, vino, gaseosas y bebidas varias, el espesor del vidrio varía en un rango entre 2.5 – 3.5 mm en el cuerpo, teniendo en cuenta que secciones como la base y la boca presentan un grosor mayor, usualmente entre 5 – 8 mm, a fin de adoptar una mejor resistencia al tratarse de secciones sometidas a esfuerzos elevados.

Asimismo, contenedores para champagne y vino burbujeante presentan un grosor de vidrio promedio ligeramente más alto que las botellas mencionadas antes, debido a la presión elevada generada por la carbonación. El grosor de estas botellas alcanza los 4 mm en el cuerpo y en puntos de esfuerzo concentrado puede llegar a los 8 milímetros. A modo de especificación, se determina que las botellas que el sistema debe triturar son las más grandes que se consiguen comercialmente, es decir, de vino o champagne, que rondan los 30 centímetros de altura y 7.5 centímetros de diámetro en la base, como se muestra en la figura.

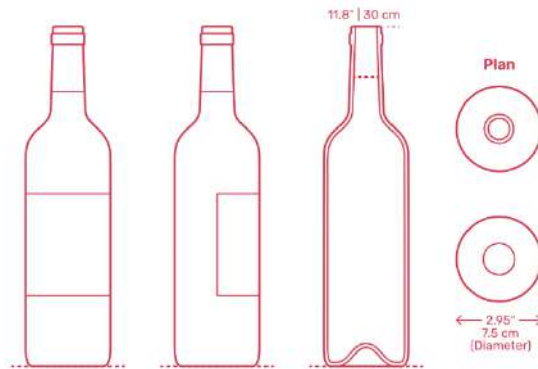


Figura 14. Tamaño Estándar de Botella de Vino [39]

8.4.1.1 Cálculo de la fuerza aproximada para ruptura de botella

Para estimar la magnitud de la fuerza necesaria para generar ruptura en las botellas, es necesario entender que este fenómeno puede darse por uno de dos mecanismos principales: fractura por flexión o fractura por contacto. El primero se caracteriza porque la botella actúa como una viga y la carga ejercida por las mandíbulas da lugar a esfuerzos de tensión en las caras de la botella opuestas a la carga; por otra parte, el segundo consiste en un mecanismo en el que el contacto diente – botella tiene área despreciable, es decir, los dientes son lo suficientemente afilados para que el contacto sea prácticamente lineal, lo cual desencadena en grietas localizadas que se propagan rápidamente (ayudadas por los defectos propios del material), generando así la falla. La diferencia entre ambos mecanismos de ruptura radica en que las fuerzas necesarias para destruir la botella por contacto son considerablemente menores que si se tratase de una ruptura por flexión. En

realidad, en la mayoría de las ocasiones el vidrio termina fallando a esfuerzos menores debido a que las tensiones locales superan la resistencia del vidrio. Este fenómeno se explica mediante la teoría de Irwin, por George R. Irwin, la cual es un conjunto de fórmulas y relaciones que explican la fractura por propagación de defecto o grieta superficial.

Conceptos clave

- **Intensidad de tensión (K_I):** Es un parámetro que describe la concentración de esfuerzos cerca de la punta de una grieta, dependiendo de la carga aplicada y del tamaño y la forma de la grieta.
- **Tenacidad a la fractura (K_{IC}):** Es una propiedad del material que cuantifica su resistencia a la propagación de grietas

La relación entre ambos conceptos radica en que la grieta se propagará cuando el valor de la intensidad de tensión en la punta de la grieta sea igual o mayor que la tenacidad a la fractura del material, es decir $K_I \geq K_{IC}$

Una de las ecuaciones fundamentales derivadas de esta teoría es la ecuación de Irwin para la tenacidad a la fractura:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$$

Donde

$\sigma =$ tensión aplicada al material

$a =$ longitud de grieta o tamaño de defecto

En el caso del presente proyecto, las mandíbulas escogidas poseen dientes afilados, a partir de lo cual se estima la fuerza aproximada de ruptura de la botella mediante las siguientes fórmulas y cálculos.

Para este modelo, se tienen en cuenta parámetros como tenacidad a la fractura (K_{IC}), longitud transversal de contacto (L_{TR}), es decir, la longitud del contacto del diente a lo largo

del borde de la botella, tamaño de defecto del vidrio (a) y ancho efectivo de contacto w (pequeño si los dientes son afilados).

Entonces, usando la ecuación de Irwin,

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{\pi a}}$$

Donde:

σ_c = tensión crítica necesaria para incrementar defecto

Y = factor geométrico

Para el cálculo se utiliza una tenacidad de $K_{IC} = 0.8 \text{ MPa} \sqrt{m}$ [40], un factor geométrico de $Y = 1$ y un tamaño de defecto promedio de $a = 100 \mu\text{m}$ [40]

Entonces,

$$\sigma_c \approx \frac{0.8 \text{ MPa} \sqrt{m}}{1 \sqrt{\pi(1 \times 10e - 4 \text{ m})}}$$

$$\sigma_c = 45.1 \text{ Mpa}$$

Este es el esfuerzo crítico a partir del cual se incrementará el defecto del vidrio, facilitando la falla y posterior destrucción.

Seguidamente, se calcula el área de contacto entre los dientes y la superficie de la botella, para esto, se tiene una longitud transversal de contacto = 20 mm y un ancho efectivo de contacto de 0.2 mm. Así, se tiene que el área de contacto es

$$A = L_{TR} \cdot w$$

Entonces,

$$\text{Área de contacto por diente} = 20\text{mm} \cdot 0.2 \text{ mm} = 4\text{mm}^2$$

Las botellas más grandes para triturar tienen una altura de 200 mm al cuello de botella, mientras que la distancia entre dientes es de 30 mm, teniendo esto en cuenta durante el primer contacto la botella está expuesta a 6 dientes que son los que están comprendidos entre los 180 mm que se muestran en la siguiente imagen.

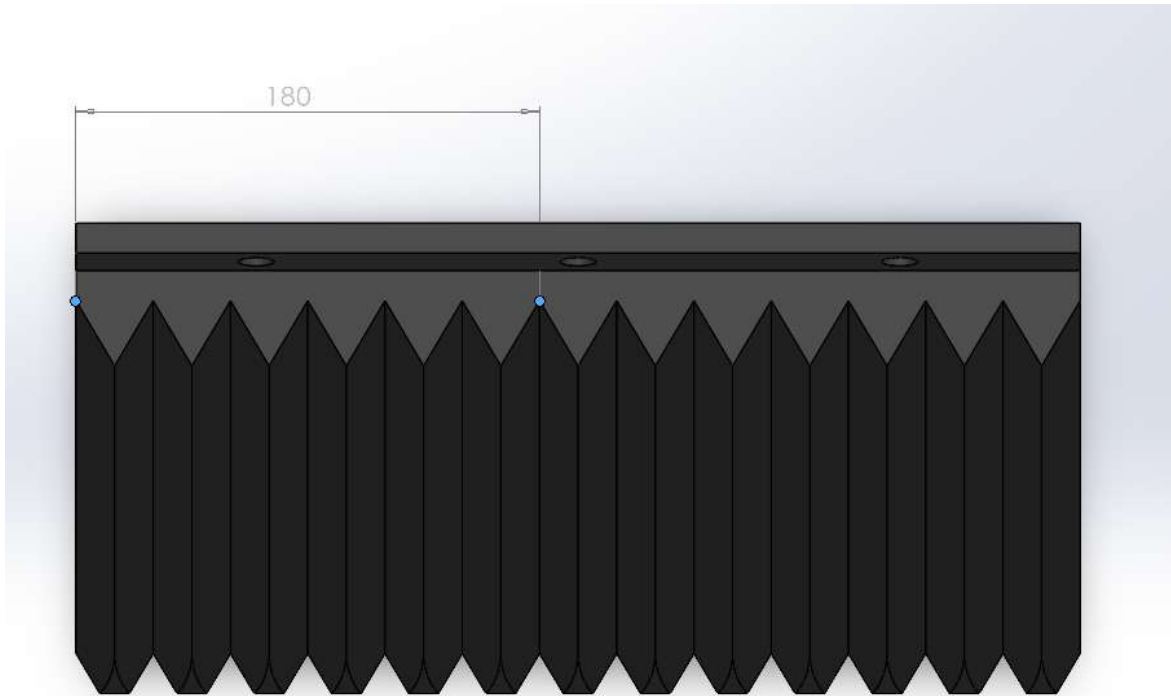


Figura 15. Distancia de primer contacto

Tomando esto en cuenta se debe multiplicar el área de contacto por diente por la cantidad total de dientes, para conocer el área total de contacto por mandíbula.

$$\text{Área total de contacto} = (4\text{mm}^2) * (6 \text{ dientes}) = 24\text{mm}^2$$

Teniendo esto, es posible proceder a la estimación de la fuerza, así:

$$F = \sigma_c \cdot A$$

Por lo tanto,

$$F \approx 45.1 \text{ MPa} \cdot 24\text{mm}^2$$

$$F \approx 1082.4 \text{ N}$$

Cabe aclarar que, debido a los defectos superficiales del vidrio sodocálcico del que las botellas están compuestas, los esfuerzos permisibles de tensión son bastante menores que los de compresión, esto debido a que estas microgrietas se comportan como concentradores de esfuerzo que últimamente terminan ocasionando que el vidrio falle por tensión. Por otra parte, la propia estructura atómica del vidrio causa que las fuerzas compresivas se distribuyan más eficazmente a lo largo del material, soportando varias decenas de veces más esfuerzo que si fuera sometido a tensión. Esto es importante ya que, en el diseño de la trituradora de vidrio, el momento crítico para generar la ruptura de las botellas se caracteriza porque las mandíbulas dentadas están en contacto con la botella y es en este punto donde se generan esfuerzos compresivos que se resisten a la falla. Sin embargo, esto ocasiona que en los lados de la botella que no están en contacto con la superficie de las mandíbulas haya lugar a esfuerzos de tensión, siendo este punto donde la criticidad es mayor, generando la falla en última instancia.

8.4.2 Recepción de botellas

El subsistema de recepción de botellas representa el punto de interacción entre el usuario y la máquina, siendo crítico para garantizar una alimentación eficiente, segura y ergonómica. Con base en los criterios definidos, se diseñó un tobogán, que aprovecha la gravedad para facilitar el desplazamiento de las botellas hasta la cámara de trituración, como se observa a continuación.

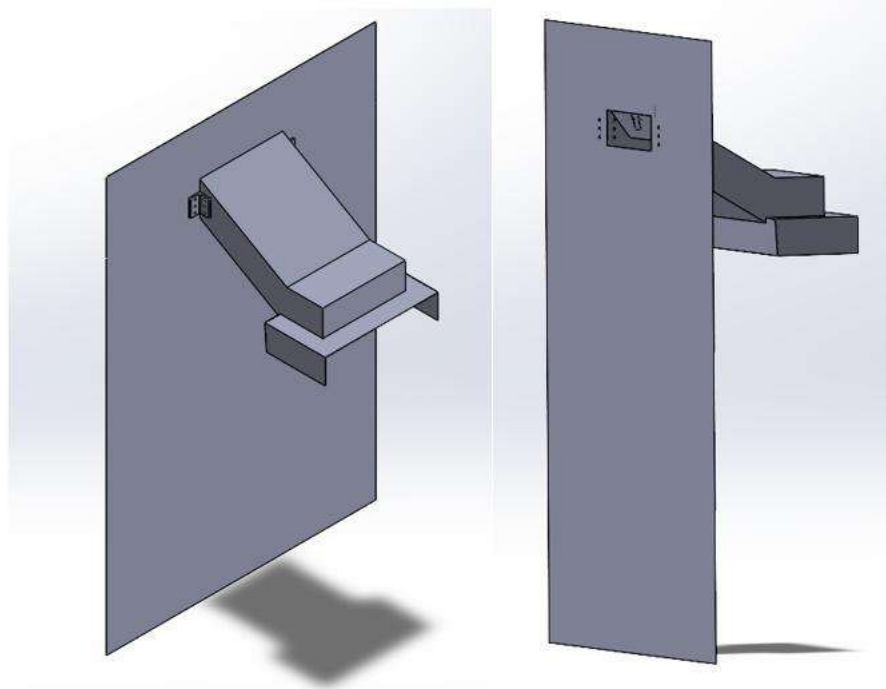


Figura 16. Sistema de recepción de botellas

Se estableció una altura de carga de 1.50 metros, aproximada a la altura del hombro de un usuario promedio adulto, para mejorar la ergonomía y permitir un flujo descendente natural hacia el subsistema de almacenamiento previo y demás. La entrada tiene una inclinación de 30° , lo que asegura el movimiento eficiente de las botellas sin requerir sistemas mecánicos de empuje.

El tobogán receptor fue diseñado en acero inoxidable AISI 304. El material seleccionado ofrece alta resistencia a la corrosión.

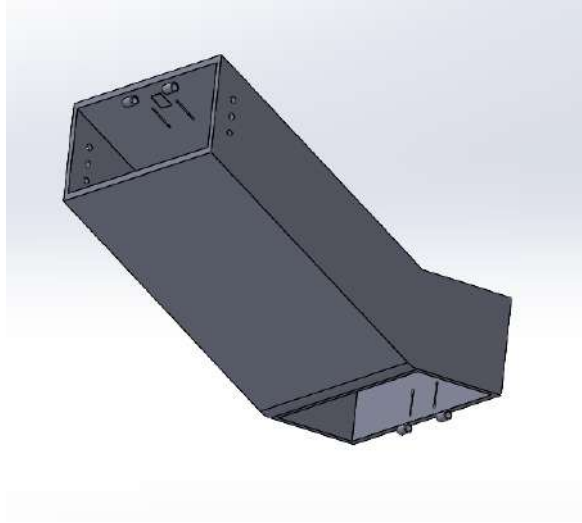


Figura 17. Tobogán

Adicionalmente, se incorporaron dos compuertas basculantes antirretorno, situadas en las aberturas superior e inferior del tobogán. Su función radica en evitar que fragmentos de vidrio o residuos puedan salir del sistema, garantizando la seguridad del operador. El diseño de dichas compuertas se aprecia en la siguiente figura.

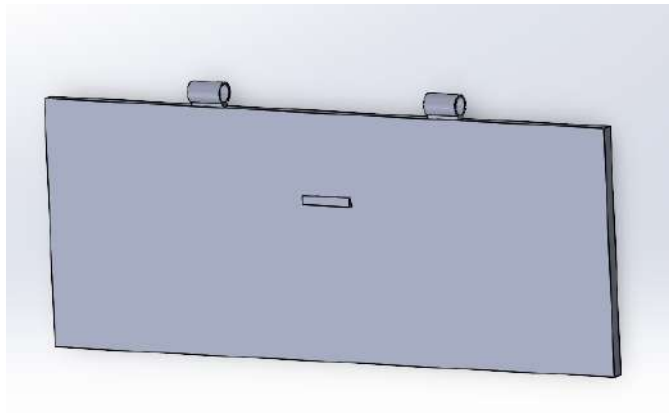


Figura 18. Puerta basculante

Como medida adicional de seguridad y protección del mecanismo, se diseñó una tapa, situada en la salida inferior del tobogán, cuya función radica en evitar el paso de esquirlas de vidrio desde la cámara de trituración a cualquier otro lugar del mecanismo que pueda ocasionar daños. La tapa está ubicada justo arriba de la abertura mayor de las mandíbulas, rodeando el espacio y creando un sello entre la cámara de trituración y el resto de la máquina.

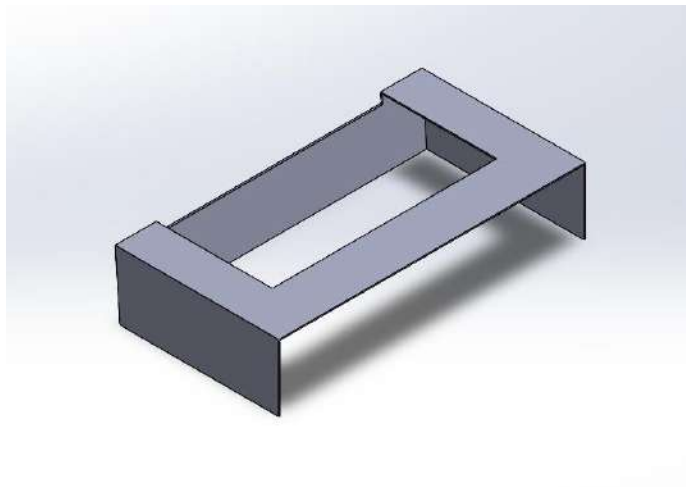


Figura 19. Tapa de seguridad

8.4.3 Sistema de trituración

El subsistema de trituración representa el núcleo operativo de la máquina, encargado de romper las botellas de vidrio mediante esfuerzos de tensión. Con base en los criterios técnicos definidos y la evaluación conceptual, se optó por un sistema de mandíbulas tipo Blake, compuesto por una mandíbula fija y una mandíbula móvil accionada por un eje excéntrico, es decir, un eje cuya línea central presenta desfase respecto al centro del elemento accionante. Esta configuración ha demostrado ser altamente eficiente para procesos de trituración primaria de materiales duros, como rocas y vidrio [41].

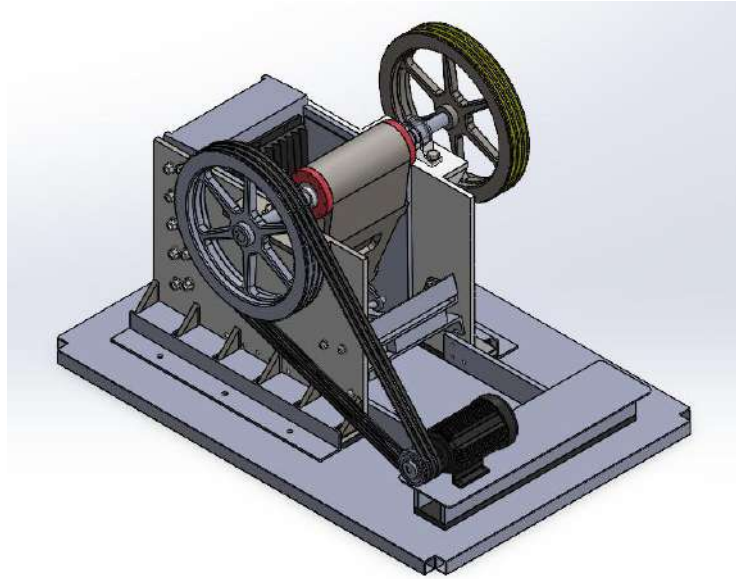


Figura 20. Trituradora tipo Blake

Con el fin de ilustrar al lector el mecanismo mediante el cual este sistema logra el proceso de trituración, se muestra la siguiente vista, a su vez señalando componentes importantes en la operación.

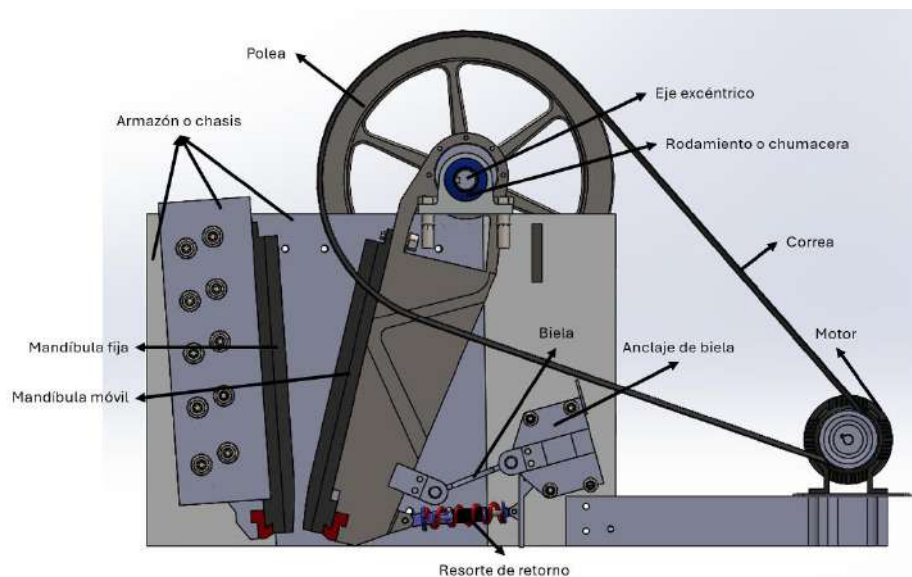


Figura 21. Vista frontal de trituradora

Para garantizar resistencia al desgaste, impacto y ciclos de carga repetitiva, se seleccionaron materiales distintos para los dos componentes principales del sistema:

8.4.3.1 Dimensiones del sistema

A partir de las condiciones operativas se definen las siguientes dimensiones:

Mandíbulas

- Longitud: 390 mm
- Altura útil: 600 mm
- Espesor: 26 mm
- Ángulo entre mandíbulas: 17°
- Material: Acero AISI 4140

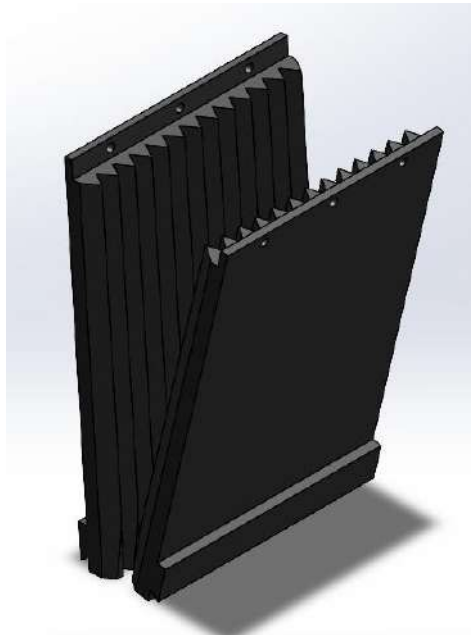


Figura 22. Mandíbulas dentadas

Eje excéntrico

- Diámetro de eje excéntrico: 50 mm
- Diámetro de excéntrica (elemento accionante): 126 mm
- Longitud total: 1010 mm
- Longitud de la excéntrica: 390 mm
- Material: Acero SAE 4140

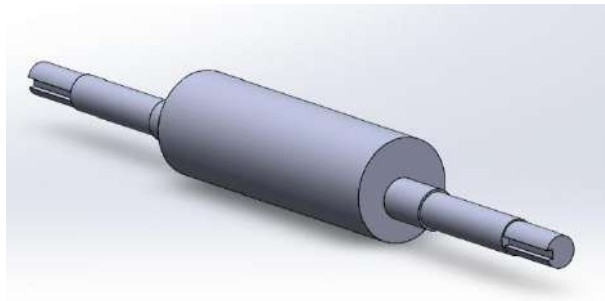


Figura 23. Vista isométrica eje excéntrico

A continuación, se muestra una vista frontal del eje que ilustra las distintas secciones.

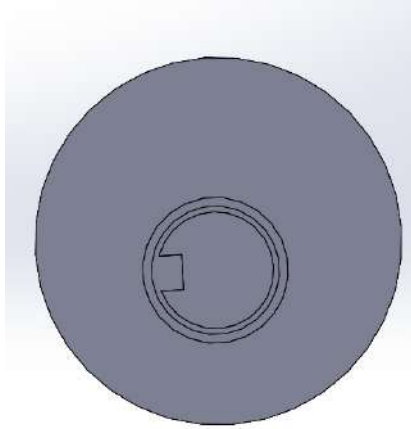


Figura 24. Vista frontal

En esta figura, se aprecia el elemento accionante o excéntrica como la sección de mayor diámetro, así como el eje excéntrico ligeramente desplazado del centro del elemento accionante.

8.4.3.2 Cálculo de fuerza del eje

El vidrio sodocálcico, tiene una resistencia a la compresión aproximada de 275 MPa [40]. Cuando se encuentra en forma de esfera. Se usará este valor para realizar los cálculos, asumiendo que es el valor más crítico, teniendo en cuenta que ya encontramos que el valor para romper las botellas a tensión es aproximadamente de 1080 MPa como se puede ver en el apartado 8.4.1.1, además de que las botellas tienen una resistencia a la compresión menor que dichas esferas.

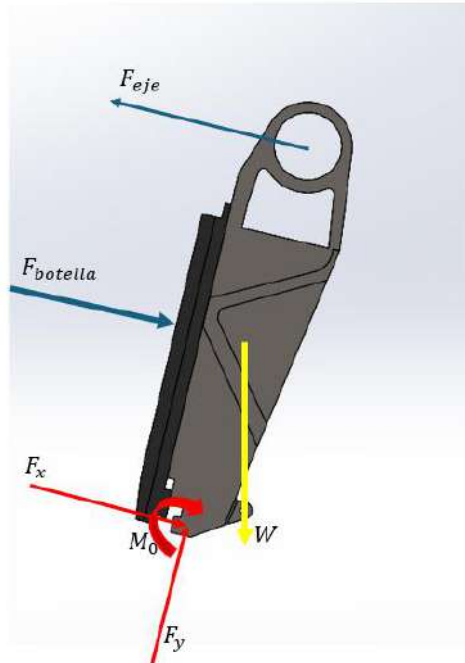


Figura 25. D.C.L. mandíbula móvil

$$\sum F_y = F_y - W_y = 0$$

$$\sum F_x = F_B + F_x - F_{eje} = 0$$

$$\sum M = M_o = 0$$

$$M_o = F_B(0.44m) + F_{eje}(0.78m) = 0$$

$$F_{eje} = \frac{F_B(0.44m)}{(0.78m)}$$

$$F_B = 275N * 24mm^2 = 6600N$$

$$F_{eje} = \frac{6600N(0.44m)}{(0.78m)} = 3724.07N$$

8.4.3.3 Selección del motor y sistema de transmisión

Se parte del cálculo de la fuerza que debe ejercer el eje excéntrico para accionar la mandíbula móvil durante la trituración:

$$\text{Torque} = F_{\text{eje}} * r_{\text{excéntrico}} = 3724.07N * 0.063m = 234.55Nm$$

Este valor de torque corresponde al momento que debe entregar el eje excéntrico para vencer la resistencia del vidrio durante la trituración.

Se selecciona una velocidad angular de operación para el eje excéntrico de 200 rpm. Este valor se encuentra en el rango de típico de velocidades reportado para trituradoras de mandíbula [42].

$$w = 200 \text{ rpm} = 20.94 \text{ rad/s}$$

Con el torque y la velocidad angular se obtiene la potencia mecánica requerida

$$P = 234.55Nm * \frac{20.94 \text{ rad}}{s} = 4911.5W$$

$$P_{\text{necesaria}} = n * 4911.5W$$

Para garantizar un margen frente a pérdidas por fricción, variaciones de carga u otros imprevistos, se aplica un factor de seguridad.

$$n = 1.5 = \text{factor de seguridad}$$

$$P_{\text{necesaria}} = 1.5 * 4911.5W = 7367.2W$$

A partir de la potencia necesaria se hace la selección del motor IE3-MS 160 M [43], este motor cuenta con las siguientes características:

$$P = 7.5 \text{ kW}$$

$$w = 950 \text{ rpm}$$

Se calcula una relación de transmisión para reducir la velocidad del motor a la velocidad de operación del eje.

$$\text{Relacion de transmision} = \frac{950rpm}{200rpm} = 4.75$$

Se escoge una relación de transmisión de 5 por disponibilidad, indicando que la polea del eje será 5 veces más grande que la del motor. Es importante aclarar que, debido a que la referencia de motor seleccionada no cuenta con un modelo 3D descargable, se utiliza para representación, la polea del modelo de la trituradora presentado, siendo de posterior revisión la selección o modelado de la polea apropiada, de acuerdo con el eje motor seleccionado en catálogo y en concordancia con la relación de transmisión calculada.

La nueva velocidad angular de salida es:

$$w = \frac{950rpm}{5} = 190rpm$$

$$w = 190rpm = 19.89rad/s$$

Se calcula el torque resultante:

$$T = \frac{7500W}{19.89rad/s} = 377.07 Nm$$

Este valor de torque supera ampliamente el requerido, lo cual valida la selección del motor y del sistema de transmisión, permitiendo la operación del sistema de trituración.

8.4.3.4 Selección de materiales

Las mandíbulas se fabricarán en acero AISI 4140, un acero aleado de cromo-molibdeno que, tras un tratamiento térmico de temple y revenido, puede alcanzar durezas entre 55 y 60 HRC y límites elásticos superiores a 1.000 MPa [44]. Su alta resistencia a la fatiga y al desgaste abrasivo lo convierte en un material idóneo para componentes sometidos a impactos repetidos [44].

En particular, este equipo estará expuesto a desgaste abrasivo a tres cuerpos, un fenómeno crítico en procesos donde un material duro, como el vidrio sodocálcico, actúa como partícula intermedia entre dos superficies metálicas en contacto. En este caso, las

partículas de vidrio actúan como agente abrasivo entre las dos mandíbulas metálicas. A diferencia del desgaste a dos cuerpos, donde las superficies deslizan directamente una sobre otra, en el desgaste a tres cuerpos el material abrasivo se intercala y circular libremente, generando micro cortes, astillamientos superficiales y pérdida progresiva de material [44].

El eje excéntrico, encargado de transmitir el movimiento del motor al eje por su parte, será fabricado en acero SAE 4140 con temple superficial por inducción, lo cual mejora la dureza en zonas críticas sin comprometer la tenacidad general del eje. Este material ofrece buena maquinabilidad, un límite elástico cercano a los 1000 MPa [44].

8.4.3.5 Aislantes antivibración

Con el fin de asegurar una operación segura y suave, se implementó una adecuación al montaje de la trituradora en el que se incluyen una serie de “almohadillas” aislantes cuya función es absorber gran parte de las vibraciones generadas por la operación de la trituradora. Esto, a largo plazo, posibilita una mayor vida útil de la estructura propia de la trituradora, así como del chasis al que va acoplada, entendiendo que vibraciones excesivas sostenidas en el tiempo dan lugar a regiones de fatiga que pueden terminar siendo catastróficas. Para ilustrar estos aditamentos en el diseño, se presentan las siguientes figuras. Asimismo, se presenta la referencia de las almohadillas que se usarían en el prototipo real del sistema.

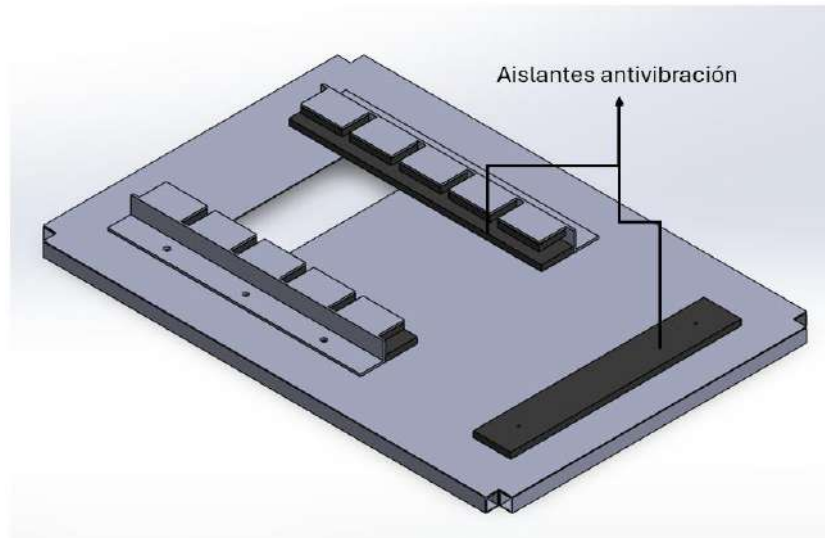


Figura 26. Aislantes en la placa de soporte de trituradora

8.4.4 Recolección

La recolección de vidrio triturado tiene lugar mediante la implementación de un contenedor trasladable con rodachines que se deslizará al interior de una cámara situada en la parte inferior de la máquina trituradora. Con el fin de garantizar una operación segura, ergonómica y compatible con entornos universitarios, se diseñó un sistema de acceso compuesto por: una compuerta frontal abatible, con bisagras y cerradura de leva para evitar apertura accidental. Guías metálicas internas, que permiten el deslizamiento tipo cajón del contenedor hacia afuera, sin necesidad de levantarlo.

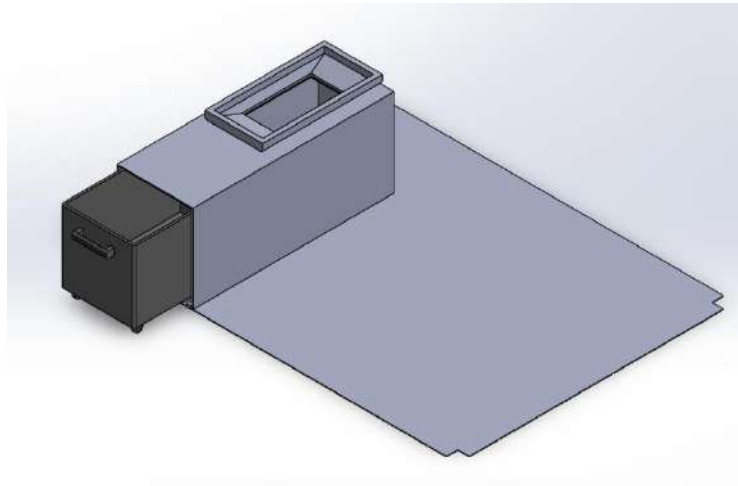


Figura 27. Sistema de recolección de vidrio

Esta cámara contará con una especie de embudo que coincide perfectamente con la placa en la que reposa la trituradora, brindando seguridad y eficiencia en la operación, a la vez que evita el desperdicio de vidrio que no caiga dentro del contenedor.

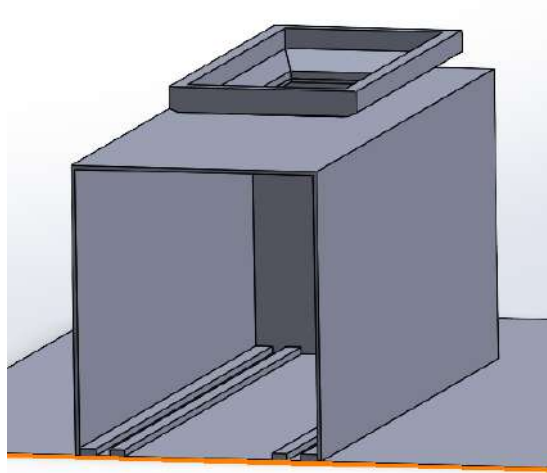


Figura 28. Recámara del contenedor

Tras el análisis de alternativas, se seleccionó el uso de un contenedor trasladable mediante rodachines, buscando priorizar la seguridad operativa, facilidad de integración, bajo costo y compatibilidad con el entorno universitario.

Para esto, se debe fabricar un depósito de polietileno de alta densidad (HDPE), por su resistencia al impacto, abrasión y agentes químicos. Las dimensiones serán de 300 mm de altura, 300 mm de ancho y 500 mm de largo, permitiendo una capacidad de 40 litros, lo que equivale aproximadamente a 100 kg de vidrio triturado, considerando una densidad promedio del vidrio sodocálcico de 2.50 kg/L [45].



Figura 29. Contenedor de vidrio triturado

8.4.5 Estructura

La estructura de la máquina trituradora constituye el elemento principal de soporte para todos los subsistemas funcionales que conforman el proceso de reciclaje de botellas de vidrio, desde la recepción del material hasta su almacenamiento final. Además, proporciona rigidez y estabilidad durante la operación, esta estructura debe garantizar condiciones de seguridad, accesibilidad para mantenimiento, aislamiento del ruido y compatibilidad con el entorno universitario en el que se instalará el equipo.

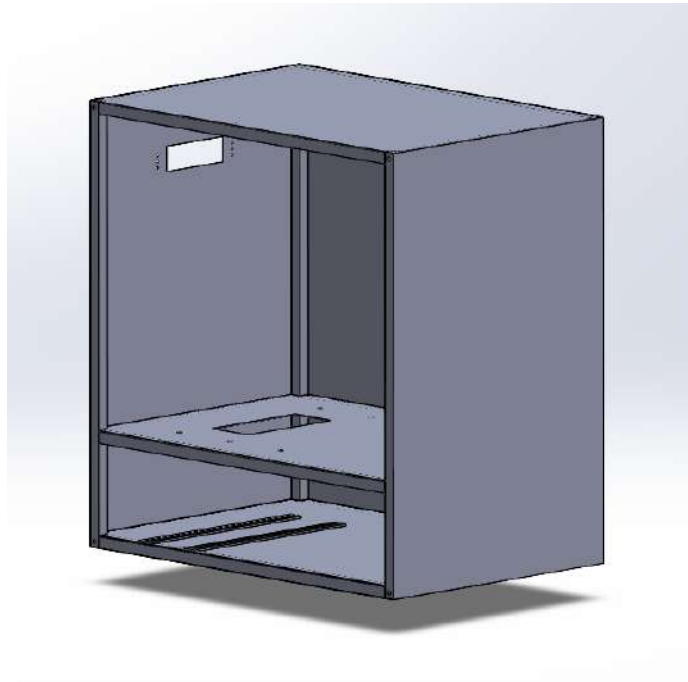


Figura 30. Estructura

Las placas que cubren el sistema y proporcionan la principal capa de seguridad consisten en 3 láminas soldadas a la estructura principal: dos a los laterales y una en la sección posterior del sistema. La lámina que va situada en la parte frontal de la máquina se une a la estructura mediante uniones atornilladas ya que esto permite su remoción y acceso al mecanismo de trituración, dado el caso de que se requieran inspecciones o mantenimientos.

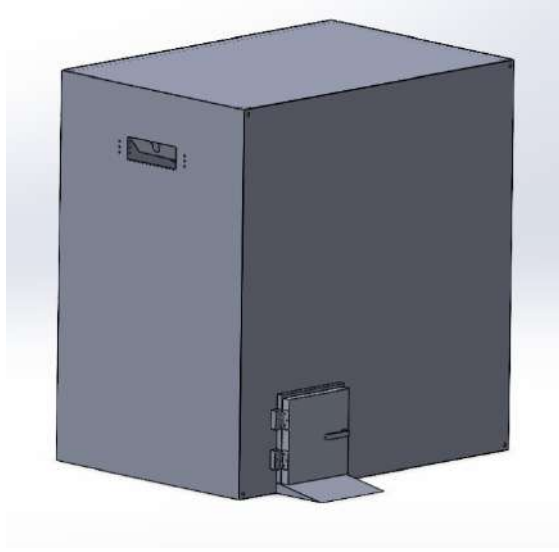


Figura 31. Estructura con placas

8.4.5.1 Dimensiones y configuración general

Considerando las restricciones espaciales establecidas en la sección 8 del presente documento, se ha optado por un diseño vertical compacto con proporciones similares a una máquina expendedora. Las dimensiones que se tendrán son altura, largo y ancho.

La disposición interna de los componentes se organiza de forma modular, distribuidos verticalmente según la secuencia operativa del proceso, permitiendo un flujo continuo y gravitacional del material:

- Zona superior: recepción de botellas.
- Zona intermedia: trituración.
- Zona inferior: almacenamiento del vidrio triturado.

8.4.5.2 Materiales de Construcción

Para garantizar la integridad estructural y una vida útil prolongada bajo condiciones de carga cíclica y vibración mecánica, se seleccionaron materiales comunes en la construcción de maquinaria industrial.

Perfiles estructurales: De Acero estructural, en sección cuadrada de 50x50x3 mm, para columnas, marcos perimetrales y refuerzos internos.



Figura 32. Perfiles Acero ASTM A36 [46]

Láminas exteriores: Acero SAE 1020 cold rolled, calibre 16 (1,52 mm), para paneles frontales, traseros y laterales, con recubrimiento de pintura electrostática horneada de alta resistencia a la abrasión y a la corrosión.



Figura 33. Laminas SAE 1020 cold rolled [47]

8.4.5.3 Uniones

Las uniones se realizarán principalmente por soldadura MIG bajo norma AWS D1.1[48], asegurando continuidad estructural y resistencia a esfuerzos dinámicos. Para los

componentes desmontables, se emplearán tornillos de grado 8.8 [49], permitiendo mantenimiento preventivo y correctivo.

8.4.5.4 Aislamiento antivibratorio

La operación de la máquina puede generar niveles de ruido indeseables, especialmente durante la fase de trituración. Para mitigar esta condición y cumplir con parámetros de confort acústico en ambientes universitarios, se integrará un sistema de aislamiento sonoro pasivo compuesto por paneles de espuma acústica de poliuretano con un espesor de 30 mm, instalados en la cara interna de los paneles metálicos.

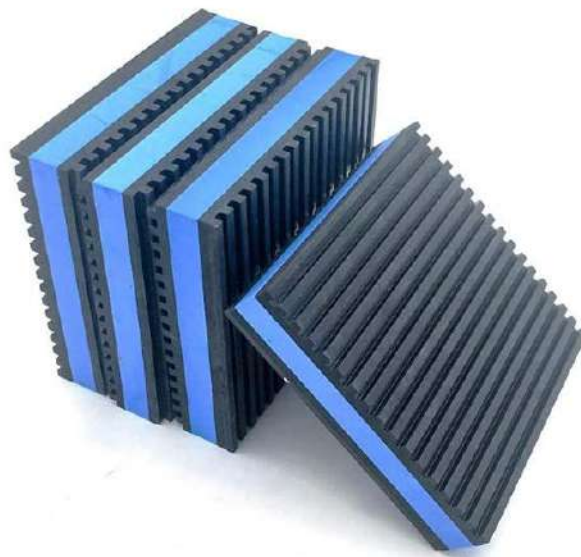


Figura 34. Almohadillas aislantes de elastómero dentado VT [50]

8.4.5.5 Accesibilidad y mantenimiento

La estructura contempla una lámina desmontable, lo que permite acceder con facilidad a los módulos internos para inspección, limpieza, retiro de vidrio triturado y mantenimiento del motor.

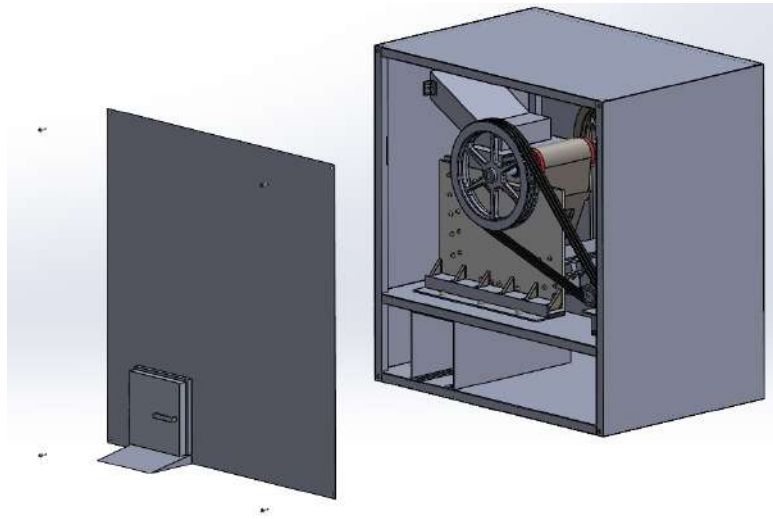


Figura 35. Lámina perforada desmontable

8.4.6 Análisis de elementos finitos

Con el fin de garantizar la integridad estructural y el desempeño mecánico de la máquina trituradora de botellas de vidrio propuesta, se llevó a cabo una serie de simulaciones en mediante el software ANSYS.

Las simulaciones se enfocaron en tres elementos críticos del sistema, la estructura o el chasis de la máquina, el eje principal de trituración y las mandíbulas trituradoras. Estos componentes concentran una gran parte de las cargas a las cuales está sometido el sistema durante el proceso de fractura del vidrio, por lo que su validación es indispensable para asegurar que el equipo opere de manera segura y confiable.

8.4.6.1 Validación de la estructura

La estructura de la máquina soporta el peso de todos los elementos y piezas que van ubicados dentro de ella, entre esos elementos está la trituradora que según el cálculo de “mass properties” en SolidWorks tiene una masa de 187 kg, que se traduce en una fuerza de 1833 N en dirección Y negativa. Nosotros para este caso y siendo conservadores usaremos una fuerza de 2000 N.

Tabla 8. Análisis de convergencia malla estructura

Nodos	Elementos	Esfuerzo equivalente (Pa)	Error rel.
6523	2984	9.52E+06	
17549	9295	1.19E+07	20.16%
31458	17698	3.73E+07	68.00%
39452	22763	4.33E+07	14.01%
40079	23410	4.53E+07	4.35%

Como se puede observar en la tabla anterior, se realizó convergencia en la malla del elemento, la cual consto de 5 iteraciones que fue cuando el error relativo lanzo un valor menor al 5%.

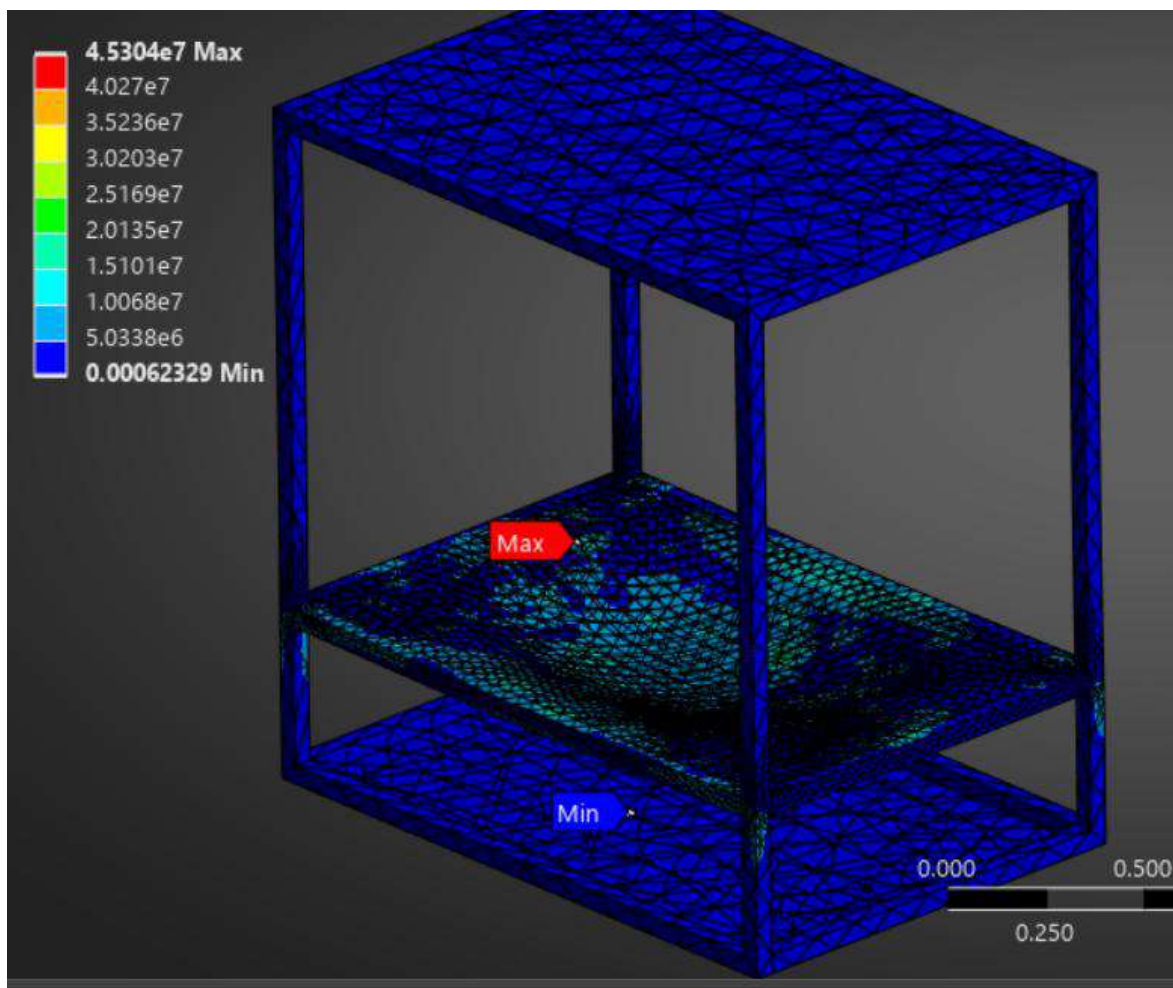


Figura 36. Análisis de esfuerzo equivalente estructura

El esfuerzo máximo que sufre la estructura de la maquina trituradora de vidrio es de 45.3 MPa, mientras que el límite elástico del acero ASTM36 es de 250 MPa. Por lo que se obtiene el siguiente factor de seguridad según su fórmula.

$$\eta = \frac{\sigma_{Max}}{\sigma_{Permisible}}$$

$$\eta = \frac{250 \text{ MPa}}{45.3 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 5.5$$

Este factor evidencia que la estructura es mucho más resistente de lo requerido y ofrece una elevada robustez frente a los impactos del proceso de trituración. No obstante, este valor indica un sobredimensionamiento, reflejado en mayor uso de material, incremento de peso y costos más altos de fabricación.

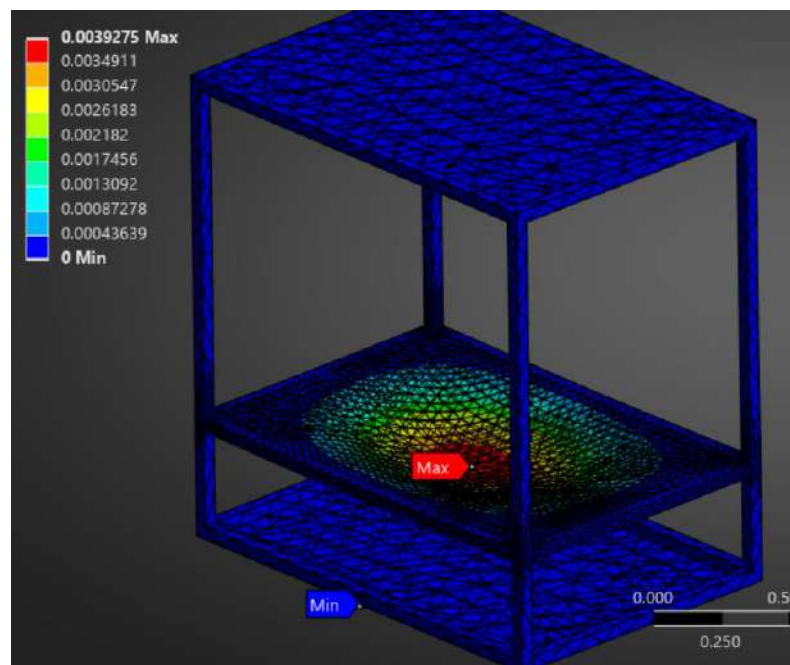


Figura 37. Análisis de deformación estructural

Por otro lado, la deformación máxima de la estructura es de 0.0039275 m o de 3.9 mm bajo las condiciones de carga evaluadas. Este desplazamiento es aceptable para la estructura ya que no compromete la alineación del sistema, integridad de los componentes ni el funcionamiento del equipo.

8.4.6.2 Análisis modal y simulación estructural transitorio

Con el fin de evaluar el comportamiento dinámico de la estructura y verificar el riesgo de daños por vibraciones, se realizó un análisis modal en bajo las mismas condiciones de apoyo empleadas en el análisis estático.

Tabla 9. Análisis de convergencia malla estructura

Modo	Frecuencia (HZ)
1	12.483
2	13.664
3	17.635
4	56.808
5	69.54
6	71.266

Al identificar las frecuencias naturales de la estructura, podemos observar que se encuentran relativamente cerca a la frecuencia de operación del motor de 950 rpm o 15.83 Hz, lo que podría implicar un riesgo potencial si la excitación del motor se transmitiera directamente al bastidor. Sin embargo, en el diseño propuesto, el motor se encuentra montado sobre una subbase independiente equipada con soportes antivibración, reduciendo la propagación de vibraciones.

Posteriormente, se realizó un análisis transitorio, incorporando las fuerzas variables en el tiempo debido a las vibraciones y efectos de inercia que produce el funcionamiento del sistema triturador. Los resultados se pueden observar en las siguientes figuras.

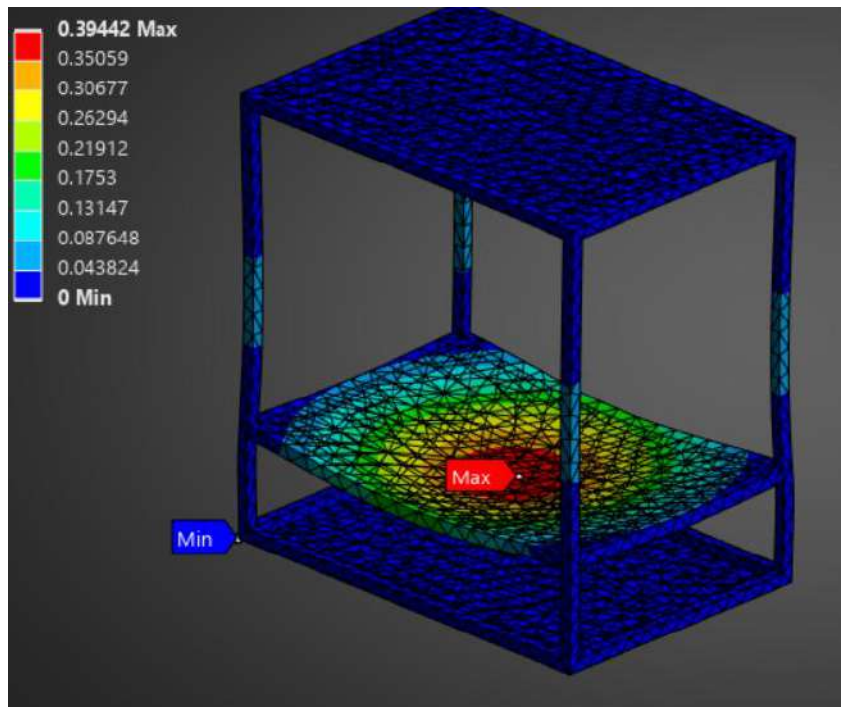


Figura 38. Deformación por vibraciones estructurales

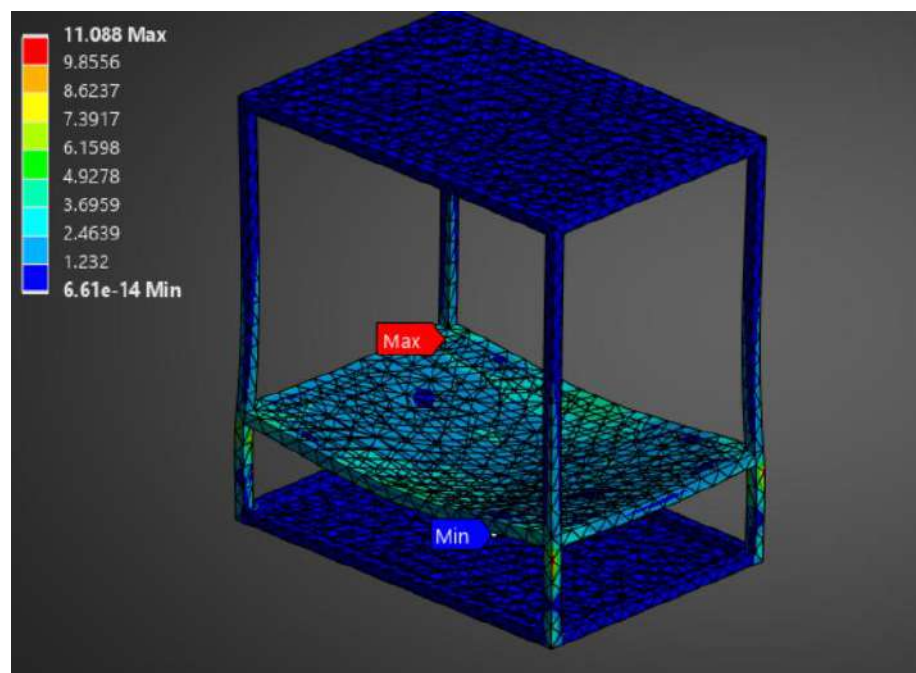


Figura 39. Esfuerzo equivalente por vibraciones estructurales

Los resultados muestran una deformación máxima de 0.394 mm en la estructura del bastidor y un esfuerzo equivalente de von Mises máximo de 11.088 MPa. Volviendo a comparar este valor con el del acero estructural obtenemos el siguiente resultado:

$$\eta = \frac{\sigma_{Max}}{\sigma_{Permisible}}$$

$$\eta = \frac{250 \text{ MPa}}{11.088 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 22.54$$

Este resultado indica que aun en condiciones transitorias, la estructura trabaja muy por debajo de su capacidad máxima, sin ningún tipo de riesgos. Mientras que la deformación máxima es muy pequeña frente a las dimensiones globales de la máquina.

8.4.6.3 Validación eje

Para el eje, fabricado en acero SAE 4140, se utilizaron apoyos en el segundo escalón del eje, lugar donde están ubicadas las chumaceras. Se aplica una fuerza de 3724.07 N la cual fue la que se encontró en los cálculos.

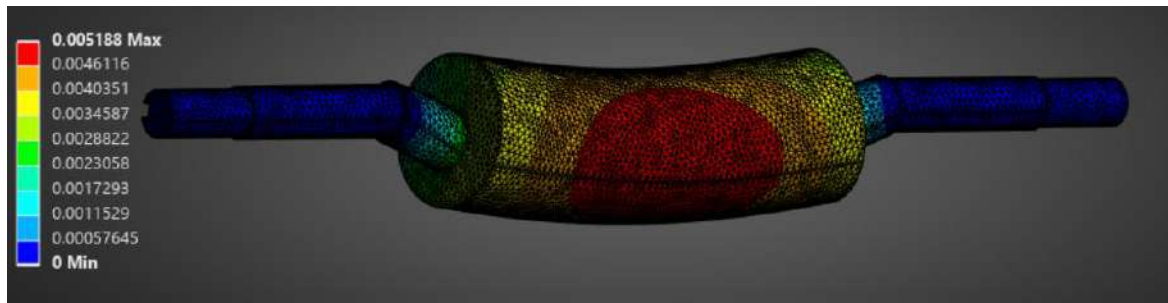


Figura 40. Deformación eje excéntrico

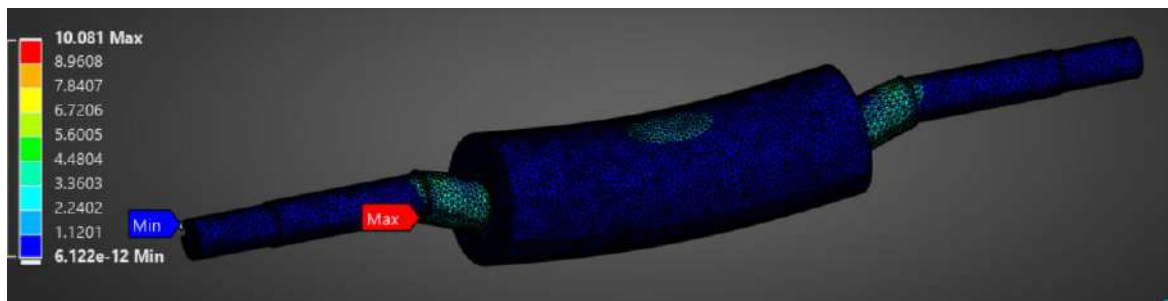


Figura 41. Esfuerzo equivalente eje excéntrico

Como podemos observar, Los resultados muestran un esfuerzo equivalente de von Mises máximo de 10.081 MPa y una deformación máxima de 0.005188 mm. Al compararse este esfuerzo con el límite elástico típico del acero SAE 4140, Se encuentra como en las

simulaciones anteriores, que el eje trabaja muy por debajo de su capacidad resistente sin riesgo de plastificación ni fallo por sobreesfuerzo. De igual forma, la deformación calculada es prácticamente despreciable frente a la longitud del eje, por lo que no se prevén problemas de desalineación o interferencia con otros componentes.

8.4.6.4 Validación mandíbulas

Para el caso de las mandíbulas se fijó la parte posterior de y se le aplico la fuerza encontrada a partir del cálculo de la resistencia a la compresión del vidrio cuando se encuentra en esferas, la cual es la escena más crítica en la que puede llegar a trabajar la máquina. Esta fuerza es de 6600 MPa.

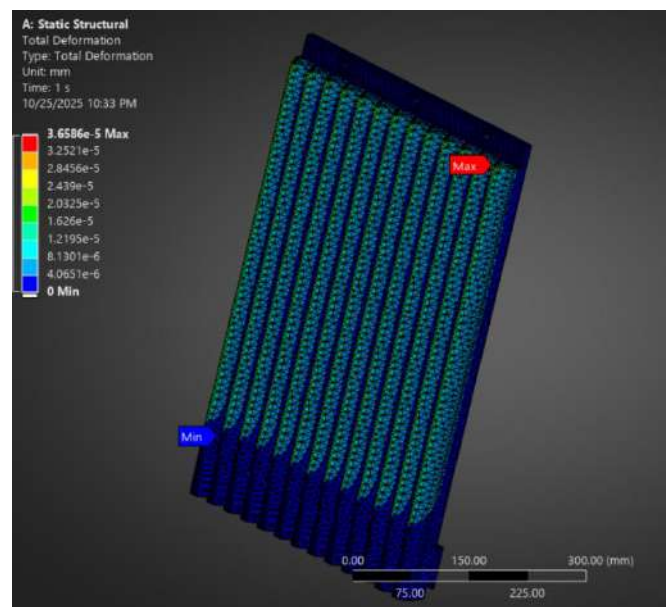


Figura 42. Deformación 1 mandíbula

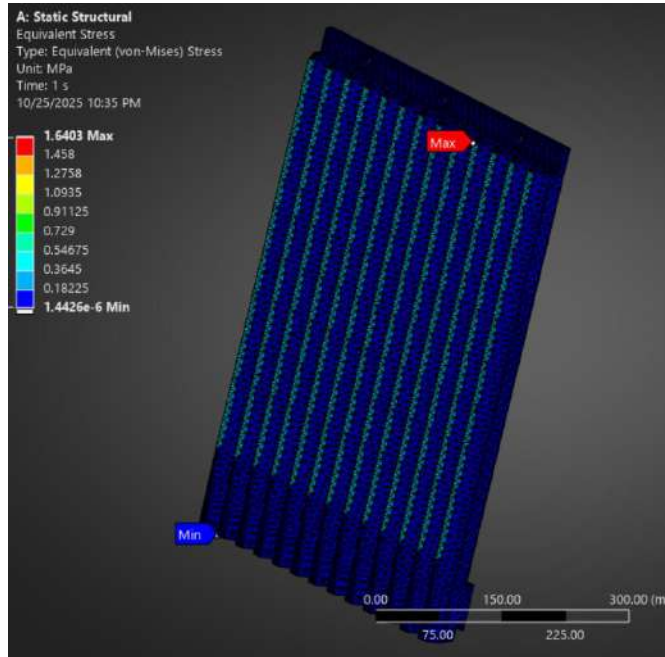


Figura 43. Esfuerzo equivalente 1 mandíbula

Los resultados que se pueden observar en las imágenes anteriores no son muy diferentes a los de las otras piezas analizadas, Son prácticamente insignificantes en comparación con las dimensiones de la pieza y con el esfuerzo máximo que resiste el material con el cual se fabrican las mandíbulas.

De igual forma se realizó otro análisis con las mismas condiciones de frontera y fuerzas, pero cambiando la zona donde es aplicada la fuerza, con la intención de ver si eso generaba grandes cambios. Como pueden ver en las figuras 44 y 45. Se puede concluir que al aplicar la fuerza sobre las aristas de los dientes el material va a sufrir menos que si se llegase a aplicar en una zona plana. Sin embargo, así aumente la deformación y el esfuerzo equivalente de von Mises, sigue siendo insignificante para el material y no va a fallar.

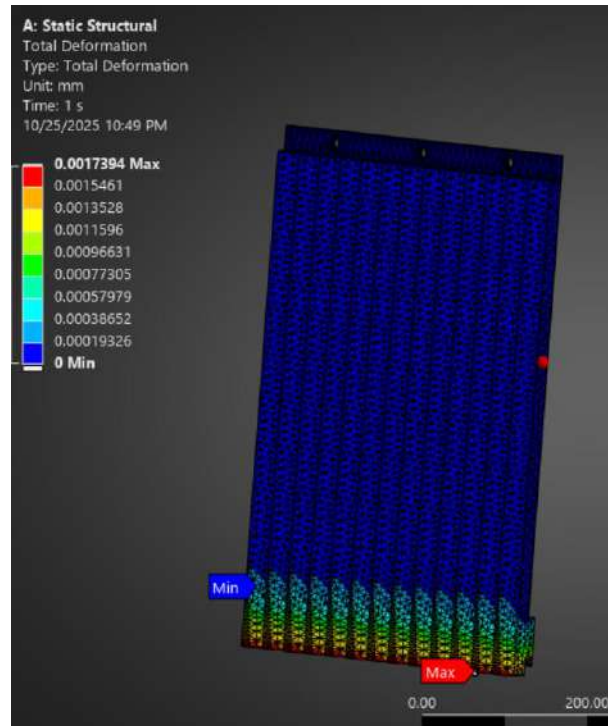


Figura 44. Deformación 2 mandíbula

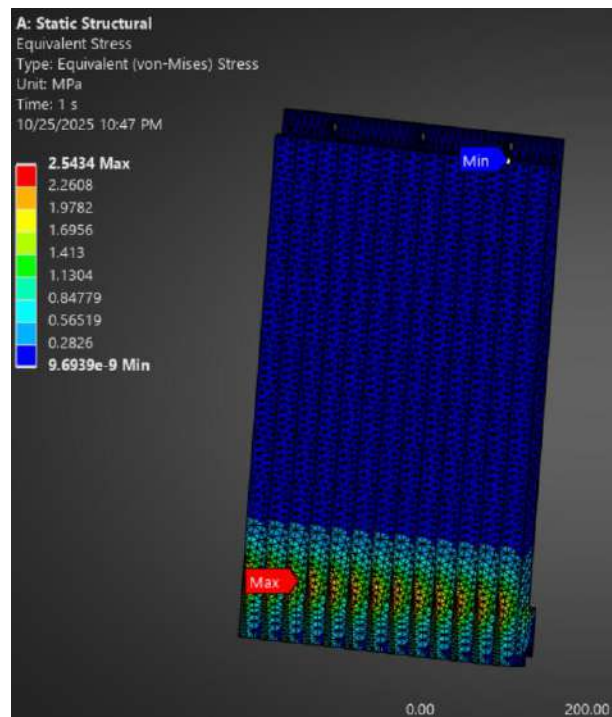


Figura 45. Esfuerzo equivalente 2 mandíbula

8.4.7 Especificaciones finales

A continuación, se incluye una tabla las especificaciones más relevantes de la máquina.

Tabla 10. Especificaciones de la maquina

Categoría	Especificación	Valor / Descripción
Aplicación y uso	Entorno de operación	Espacios universitarios (plazoletas, zonas comunes interiores)
Aplicación y uso	Tipo de residuo	Botellas de vidrio
Aplicación y uso	Rango típico de botellas	330 mL a 750 mL
Aplicación y uso	Modo de alimentación	Una botella a la vez mediante ranura inclinada
Aplicación y uso	Remoción de etiquetas	Realizada por el usuario
Principio de funcionamiento	Tipo de máquina	Trituradora de mandíbulas tipo Blake
Principio de funcionamiento	Configuración	Mandíbula fija + mandíbula móvil con eje excéntrico
Principio de funcionamiento	Modo de trituración	Tensión + compresión del vidrio
Parámetros de proceso	Velocidad del eje excéntrico	200 rpm
Parámetros de proceso	Torque requerido	234.55 N·m
Parámetros de proceso	Fuerza sobre mandíbula móvil	3724.07 N
Parámetros de proceso	Potencia requerida	4.91 kW
Parámetros de proceso	Potencia instalada	7.5 kW

Sistema de trituración	Longitud de mandíbulas	390 mm
Sistema de trituración	Altura útil	600 mm
Sistema de trituración	Espesor	26 mm
Sistema de trituración	Ángulo entre mandíbulas	17°
Sistema de trituración	Material mandíbulas	SAE 4140
Sistema de trituración	Material eje	SAE 4140
Sistema de trituración	Diámetro del eje	50 mm
Sistema de trituración	Diámetro excéntrico	126 mm
Sistema de trituración	Longitud total eje	1010 mm
Sistema de trituración	Tamaño máximo partícula	20 mm
Accionamiento	Tipo de motor	Asíncrono trifásico IE3-MS 160 M
Accionamiento	Potencia nominal	7.5 kW
Accionamiento	Velocidad nominal	950 rpm
Accionamiento	Relación transmisión	5: 1
Accionamiento	Tipo transmisión	Poleas y correa
Estructura	Tipo de estructura	Bastidor metálico vertical tipo expendedora
Estructura	Material perfiles	ASTM A36
Estructura	Sección perfiles	50x50x3 mm
Estructura	Material cerramiento	SAE 1020 CR, cal 16
Estructura	Uniones	Soldadura MIG AWS D1.1
Dimensiones y capacidad	Dimensiones aprox.	1850 x 1760 x 1205 mm
Dimensiones y capacidad	Dimensiones contenedor	300 x 300 x 500 mm
Dimensiones y capacidad	Volumen contenedor	40 L

Dimensiones y capacidad	Capacidad almacenamiento	~100 kg
Control y seguridad	Activación	Sensor de presencia de botella (No incluido en esta etapa del proyecto)
Control y seguridad	Elementos de seguridad	Tapa de seguridad y cerramiento total
Control y seguridad	Control de polvo	Cámara cerrada + contenedor hermético
Confort y entorno	Aislamiento vibratorio	Almohadillas elastoméricas
Requerimientos eléctricos	Tensión entorno	110 V AC
Requerimientos eléctricos	Motor	Trifásico 7.5 kW, 950 rpm

9. Recomendaciones

El nivel de seguridad es adecuado, existe oportunidad de optimizar el diseño reduciendo espesores o seleccionando perfiles más eficientes. Finalmente, este FS estático elevado no reemplaza la necesidad de análisis dinámicos adicionales (armónico y fatiga) para validar el comportamiento real en operación.

Es importante tener en cuenta siempre las medidas de seguridad durante la operación de cualquier tipo de maquinaria. En este caso, y de llegarse a materializar en algún momento, se debe asegurar que la localización del dispositivo consista, principalmente en un entorno apropiadamente demarcado y describiendo brevemente el funcionamiento de la máquina, así como mecanismos de parada automática que puedan intervenir ante cualquier eventualidad o falla.

En el apartado de análisis de las mandíbulas dentadas, hay posibilidad de reducir la separación que existe en la región inferior de estas, que es de donde sale el material triturado. Esto, con el propósito de alcanzar un tamaño de material más reducido (pulverizado), optimizando y maximizando las capacidades de la trituradora de Blake. Del mismo modo, realizar análisis adicionales de vibración durante operación posibilitaría una mejora en cuanto a estabilidad estructural y reducción de fatiga.

Se podría optar por una planta motriz de alta eficiencia, que minimice costos de consumo energético, en conjunción con la implementación de un variador de velocidad. De la misma forma, podría estudiarse la posibilidad de añadir un sistema de apagado automático en inactividad.

Es menester establecer un plan de mantenimiento preventivo, que incluya la revisión periódica de los dientes, lubricación de componentes y verificación de uniones mecánicas. Para prolongar la vida útil, se aconseja utilizar aceros templados o aleaciones resistentes en las partes sometidas a mayor desgaste.

Finalmente, evaluar la viabilidad económica del prototipo, analizando proveedores locales, alternativas de fabricación y costos de operación. Esto permitirá determinar decisiones informadas para su implementación a mayor escala, no solo como modelo experimental en instituciones educativas, entendiendo que la escalabilidad y posicionamiento en entornos industriales daría lugar a la estimación de un periodo de tiempo para el retorno de la inversión de una posible maquina trituradora industrial.

10. Conclusiones

El diseño propuesto cumple con los requerimientos funcionales establecidos, logrando un sistema capaz de reducir botellas de vidrio a tamaños apropiados para su transporte, reciclaje o reutilización, con un mecanismo de trituración adecuado para operaciones a pequeña escala o uso doméstico.

La selección de componentes mecánicos y eléctricos fue realizada de manera técnica y coherente, considerando criterios de resistencia, durabilidad, eficiencia energética y disponibilidad comercial. Esto permite asegurar la viabilidad del diseño y facilita su futura implementación.

El análisis estructural y de operación demostró que el equipo puede trabajar de forma estable y segura, siempre que se integren correctamente las protecciones físicas y los sistemas de seguridad recomendados, lo que reduce riesgos para el usuario y mejora la confiabilidad del mecanismo.

El proceso de diseño evidenció la importancia de optimizar la transferencia de fuerzas en el sistema de trituración, lo cual influye directamente en el consumo energético, el rendimiento del triturado y la vida útil de las cuchillas o martillos.

El proyecto contribuye al aprovechamiento y gestión responsable de residuos de vidrio, aportando una alternativa práctica para su reducción de volumen y facilitando su incorporación a procesos de reciclaje. Con ello, el diseño responde tanto a necesidades técnicas como a objetivos ambientales y de sostenibilidad.

Aunque el prototipo conceptual muestra resultados satisfactorios, es necesario llevar a cabo pruebas experimentales y ajustes, especialmente en términos de parámetros de operación, geometría de dientes y elementos estructurales, con el fin de perfeccionar el desempeño final del prototipo materializado.

En conjunto, el diseño desarrollado constituye una base sólida para la construcción y validación de una máquina trituradora de botellas de vidrio funcional, segura y eficiente, susceptible de mejoras futuras y adaptable a diversas necesidades de operación.

Bibliografía

- [1] J. Korhonen, A. Honkasalo, and J. Seppälä, “Circular Economy: The Concept and its Limitations,” *Ecological Economics*, vol. 143, pp. 37–46, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.ECOLECON.2017.06.041.
- [2] P. M. Barbato, E. Olsson, and L. Rigamonti, “Quality degradation in glass recycling: substitutability model proposal,” *Waste Management*, vol. 182, pp. 124–131, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.WASMAN.2024.04.027.
- [3] “La explotación insostenible de arena destruye ríos y mares | Noticias ONU.” Accessed: Aug. 25, 2024. [Online]. Available: <https://news.un.org/es/story/2019/05/1455611>
- [4] W. D. Callister and J. G. David Rethwisch, “MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING”.
- [5] “Propiedades Del Vidrio | PDF | Lentes | Radiación electromagnética.” Accessed: May 24, 2024. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/391557774/Propiedades-Del-Vidrio>
- [6] Hernandez Juan, “¿Qué dureza tiene el vidrio? - Vidrierias.mx.” Accessed: May 24, 2024. [Online]. Available: <https://vidrierias.mx/que-dureza-tiene-el-vidrio/>
- [7] “Tabla propiedades vidrios.” Accessed: May 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.vidrasa.com/esp/propvid.html>
- [8] E. G. Kelly, D. J. Spottiswood, and R. García Díaz, “Introducción al procesamiento de minerales,” 1990.
- [9] “Thermal waste treatment innovations - Thermal processing technology.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://recyclinginside.com/recycling-technology/thermal-processing-technology/>

- [10] “How does an impact crusher work? | RUBBLE MASTER.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.rubblemaster.com/us/blog/how-does-an-impact-crusher-work>
- [11] “Trituradora de Impacto de Alta Calidad | DASWELL.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://daswell.com/es/crusher-machine/impact-crusher/>
- [12] “Trituradoras de mandíbula: alta calidad y fiabilidad de RETSCH.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.retsch.es/es/productos/molienda/trituradoras-de-mandibulas/>
- [13] “Diagrama de una planta industrial trituradora de roca. La mandíbula... | Download Scientific Diagram.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-15-Diagrama-de-una-planta-industrial-trituradora-de-roca-La-mandibula-derecha_fig7_322072045
- [14] “Molienda de Bolas - CarboSystem.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://carbosystem.com/como-funciona-un-molino-de-bolas/>
- [15] “Molino de bolas.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://es.globalzk.com/mobile/plus/view.php?aid=11>
- [16] “Silica, Crystalline - Health Effects | Occupational Safety and Health Administration.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/silica-crystalline/health-effects>
- [17] Alcaldía de Bogotá, “Resolución 2400 de 1979 ‘Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo.’”
- [18] Center for the Disease Control, “OSHA-NIOSH Heat Safety Tool App,” <https://www.cdc.gov/niosh/heat-stress/communication-resources/app.html>.
- [19] S. A. Delbari and L. A. Hof, “Glass Waste Circular Economy - Advancing to High-Value Glass Sheets Recovery using Industry 4.0 and 5.0 technologies,” *J Clean Prod*, p. 142629, May 2024, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2024.142629.

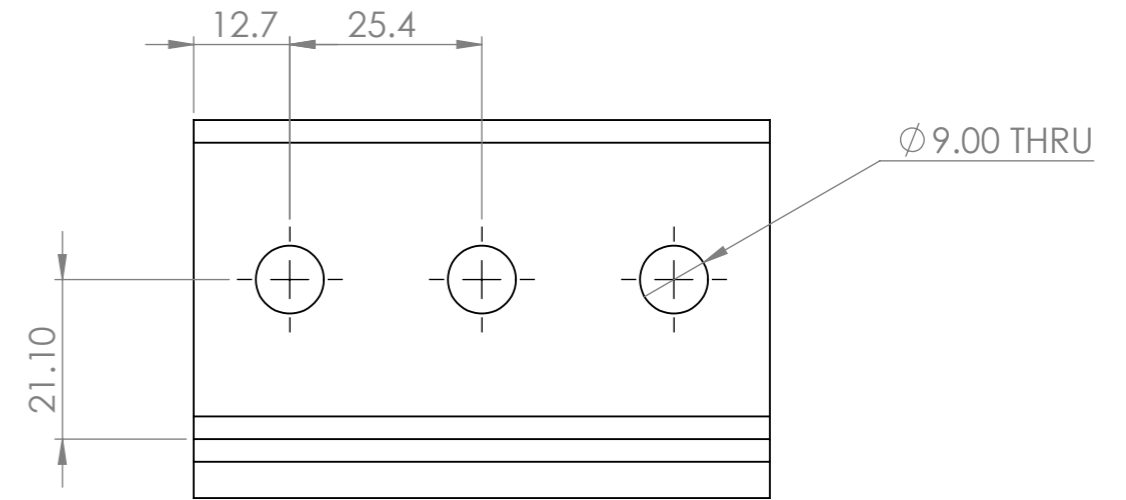
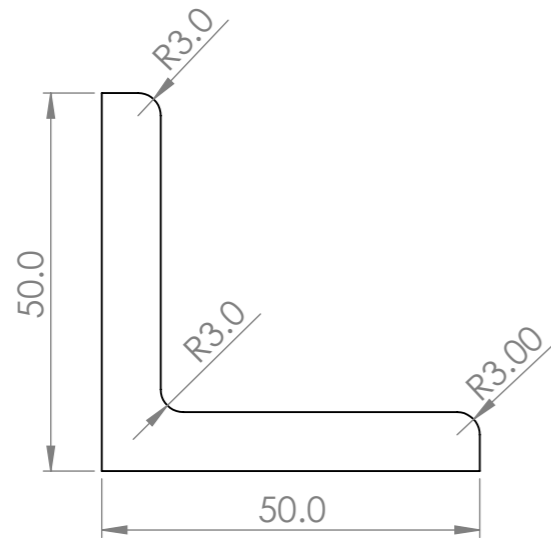
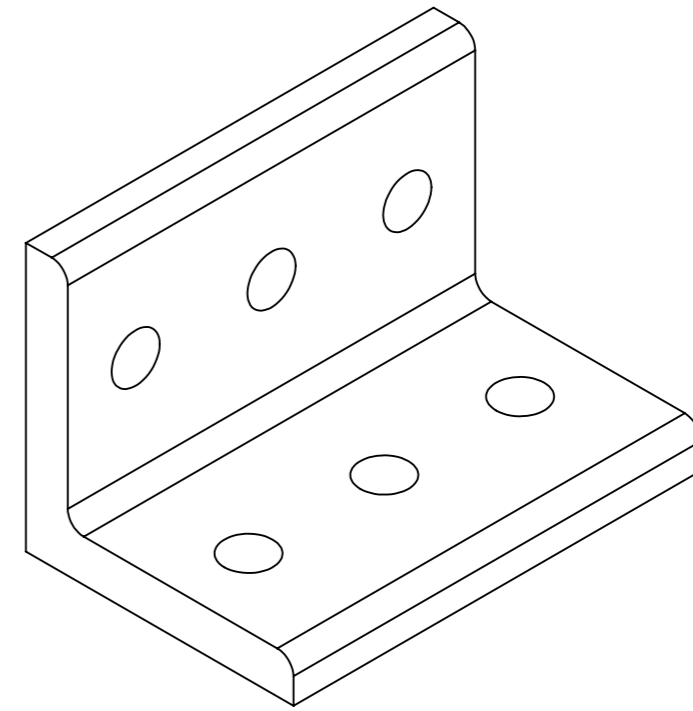
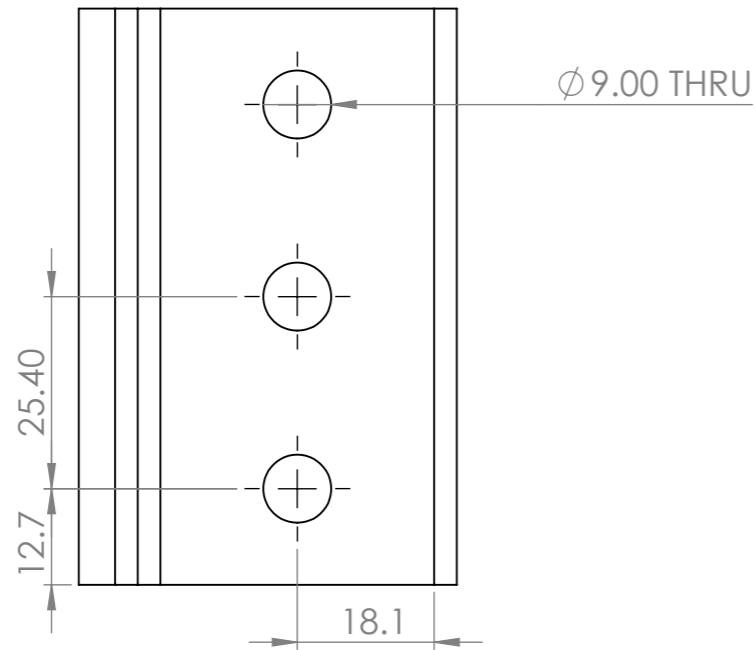
- [20] “ARENAS DE VIDRIO ■ Economía circular - YouTube.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=7NYjNOlpINQ>
- [21] “Hacer del vidrio arena: la iniciativa de reciclaje que crece en Uruguay | Internacionales | 5Días.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.5dias.com.py/internacionales/hacer-del-vidrio-arena-la-iniciativa-de-reciclaje-que-crece-en-uruguay>
- [22] “DB Breweries | DB Export | DB Export Beer Bottle Sand.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://caples.org/2018-winners-results/?id=5&cat=Ambient%2FGuerilla%2FOutdoor>
- [23] “Beer Bottle to Sand to Road - Road Science.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.roadscience.co.nz/news/beer-bottle-to-sand-to-road>
- [24] “RECICLAJE: MAQUINA RECICLADORA DE VIDRIO | Economía de la energía.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.economiadelaenergia.com/2011/05/reciclaje-maquina-recicladora-de-vidrio/>
- [25] “Trituradora de vidrio G5 - Lean Compacting Company.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://lcc.eco/producto/trituradora-de-vidrio-g5/>
- [26] A. Vander Velpen *et al.*, *Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis 2022*. 2022. [Online]. Available: www.un.org/Depts/Cartographic/
- [27] “Arenas silíceas,” 2012.
- [28] “Colombia recicla solo el 17% de las 12 millones de toneladas de basura que produce | El Nuevo Siglo.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.elnuevosiglo.com.co/ambiente-y-ciencia/colombia-recicla-solo-el-17-de-las-12-toneladas-de-basura-que-produce>
- [29] “Hoy no se habla de basura, sino de residuos que son insumos para productos: Minambiente - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.” Accessed: May 27, 2024. [Online].

- Available: <https://www.minambiente.gov.co/hoy-no-se-habla-de-basura-sino-de-residuos-que-son-insumos-para-productos-minambiente/>
- [30] “El 78% de los hogares colombianos no recicla.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/el-78-de-los-hogares-colombianos-no-recicla/44231/>
- [31] “DANE - Calidad de vida (ECV).” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/calidad-de-vida-ecv>
- [32] “Cifras que maneja el sector del reciclaje en el mundo.” Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://manchasoft.com/cifras-que-maneja-el-sector-del-reciclaje-en-el-mundo/>
- [33] Ayuntamiento de alderete, “1 botella de vidrio tarda 4000 años en degradarse.”
- [34] Recuperaciones de vidrio norte, “Descubre a que temperatura se funde el vidrio.”
- [35] G. Tchobanoglous and F. Kreith, *Handbook of Solid Waste Management*. McGraw-Hill Education, 2002. Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071356237>
- [36] D. G. Ullman, “The mechanical design process,” p. 465.
- [37] UN Environment Programme, “Our use of sand brings us ‘up against the wall’, says UNEP report,” https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/our-use-sand-brings-us-against-wall-says-unep-report?utm_source=chatgpt.com.
- [38] UNE Normalización Española, “Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo,” <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049405>.
- [39] enbotella.com, “Tamaños de Botellas de Vino ¿Cuáles existen?,” <https://www.enbotella.com/es/blog/tamanos-de-botellas-de-vino-cuales->

existen.html?srsIid=AfmBOoqD99cmsuXxpR0zTxpZa1CdBzYblmVTBRSI8ryDFInq_VCKnoy-.

- [40] Stanford Advanced Materials, “Resistencia a la fractura: Aumento de la resistencia de los materiales,” [https://www.samaterials.es/content/fracture-toughness-enhancing-material-resilience.html#:~:text=5.,templado\)%20tendr%C3%A1n%20valores%20ligeramente%20superiores](https://www.samaterials.es/content/fracture-toughness-enhancing-material-resilience.html#:~:text=5.,templado)%20tendr%C3%A1n%20valores%20ligeramente%20superiores).
- [41] D. H. Gieskieng, “Jaw Crusher Capacities, Blake and Single-Toggle Or Overhead Eccentric Types,” *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 1952.
- [42] J. G. Donovan, “FRACTURE TOUGHNESS BASED MODELS FOR THE PREDICTION OF POWER CONSUMPTION, PRODUCT SIZE, AND CAPACITY OF JAW CRUSHERS,” 2003.
- [43] E. M. CEMER, “MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS .”
- [44] AZO Materials, “AISI 4140 Alloy Steel (UNS G41400),” 2012.
- [45] Matweb, “Mo-Sci Corporation GL-0191 Soda-Lime Glass Spheres.”
- [46] GNEE Professional Exported Steel Supplier, “Acero de tubo cuadrado ASTM A36,” <https://www.marinesteels.com/steel-pipe-and-fitting/astm-a36square-tube-steel.html>.
- [47] Hierros HB S.A., “Lámina Cold Rolled (CR),” <https://www.hierroshb.com/producto/lamina-cold-rolled-cr/>.
- [48] American National Standards Institute, “AWS D1.1:2025 – Changes to Structural Welding Code – Steel,” <https://blog.ansi.org/ansi/aws-d1-1-2025-structural-welding-code-steel/>.
- [49] Bolt Depot, “Bolt Grade Markings and Strength Chart,” 2025.
- [50] Veinsa, “Almohadillas aislantes Elastómero dentado VT,” <https://veinsa.com/producto/almohadillas-aislantes-elastomero-dentado-vt/>.

Anexos



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Ángulo tobogán - lámina

tolerancias

tipo de soldadura

long.
0.1 mm

ang.

Diseño

Isaac López e Isaac Grun

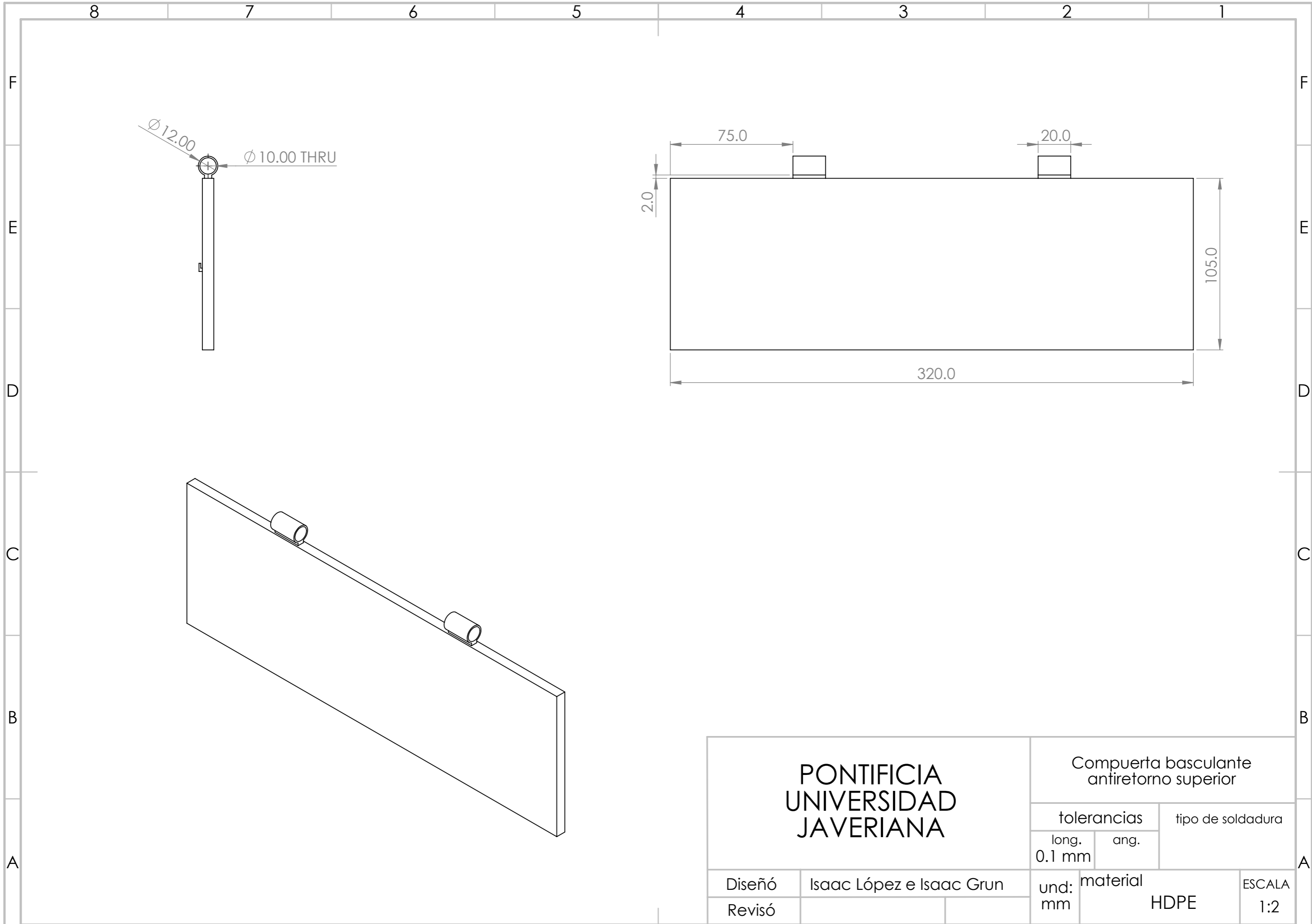
und:
mm

material

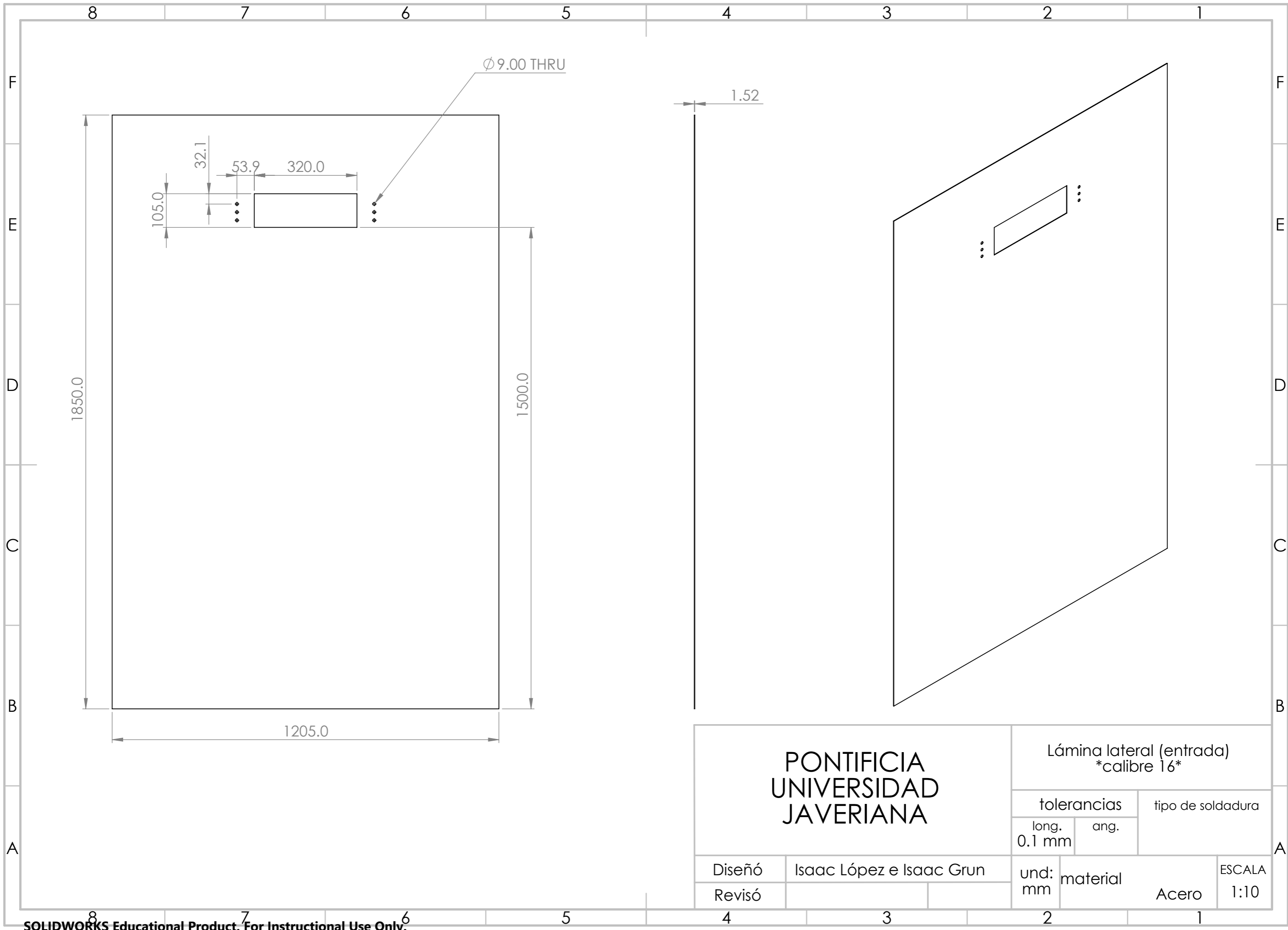
Acero

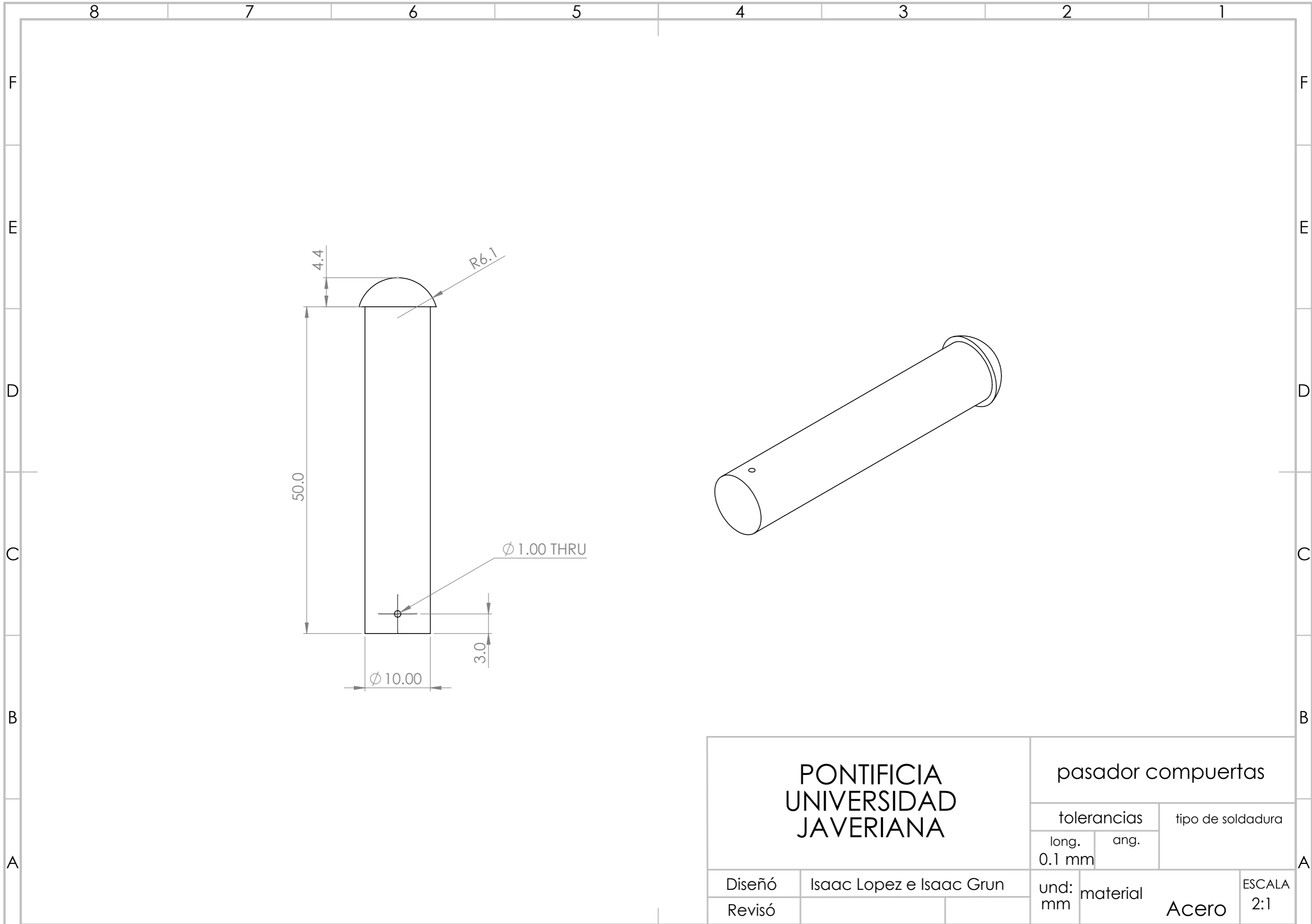
ESCALA

1:1

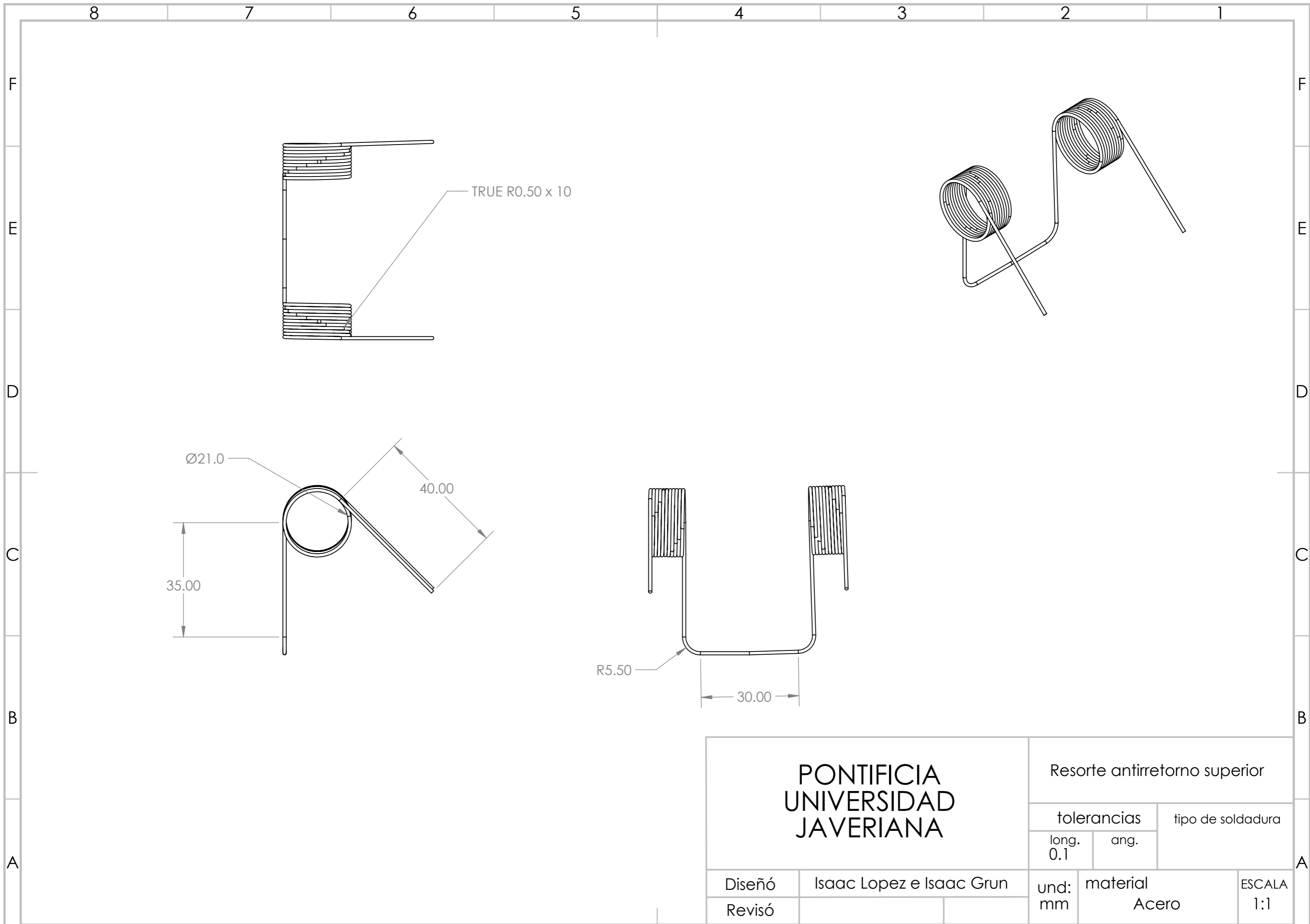


<p align="center">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Compuerta basculante antiretorno superior		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1 mm	ang.	
Diseño	Isaac López e Isaac Grun		und: material	ESCALA
Revisó			mm HDPE	1:2

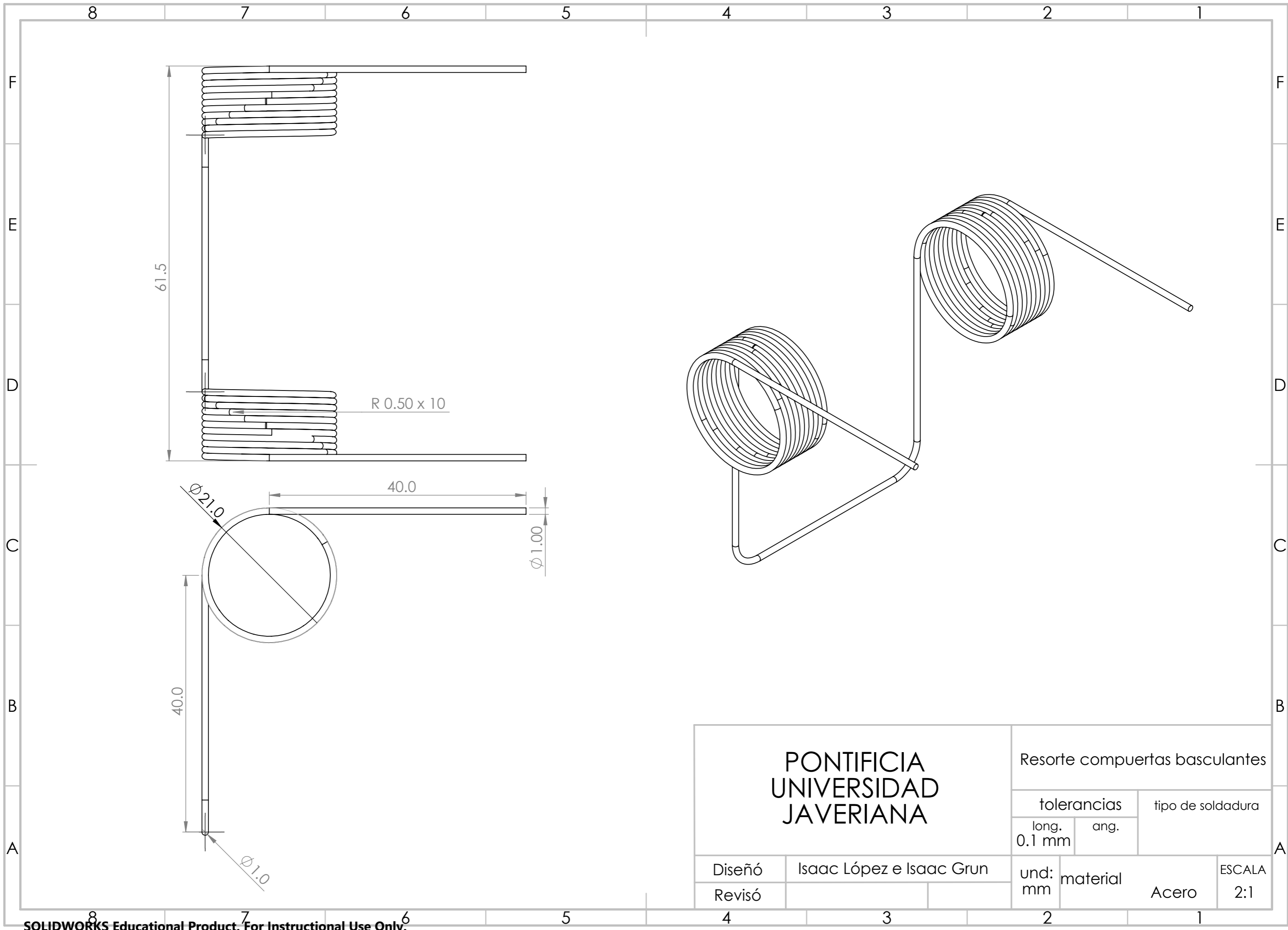




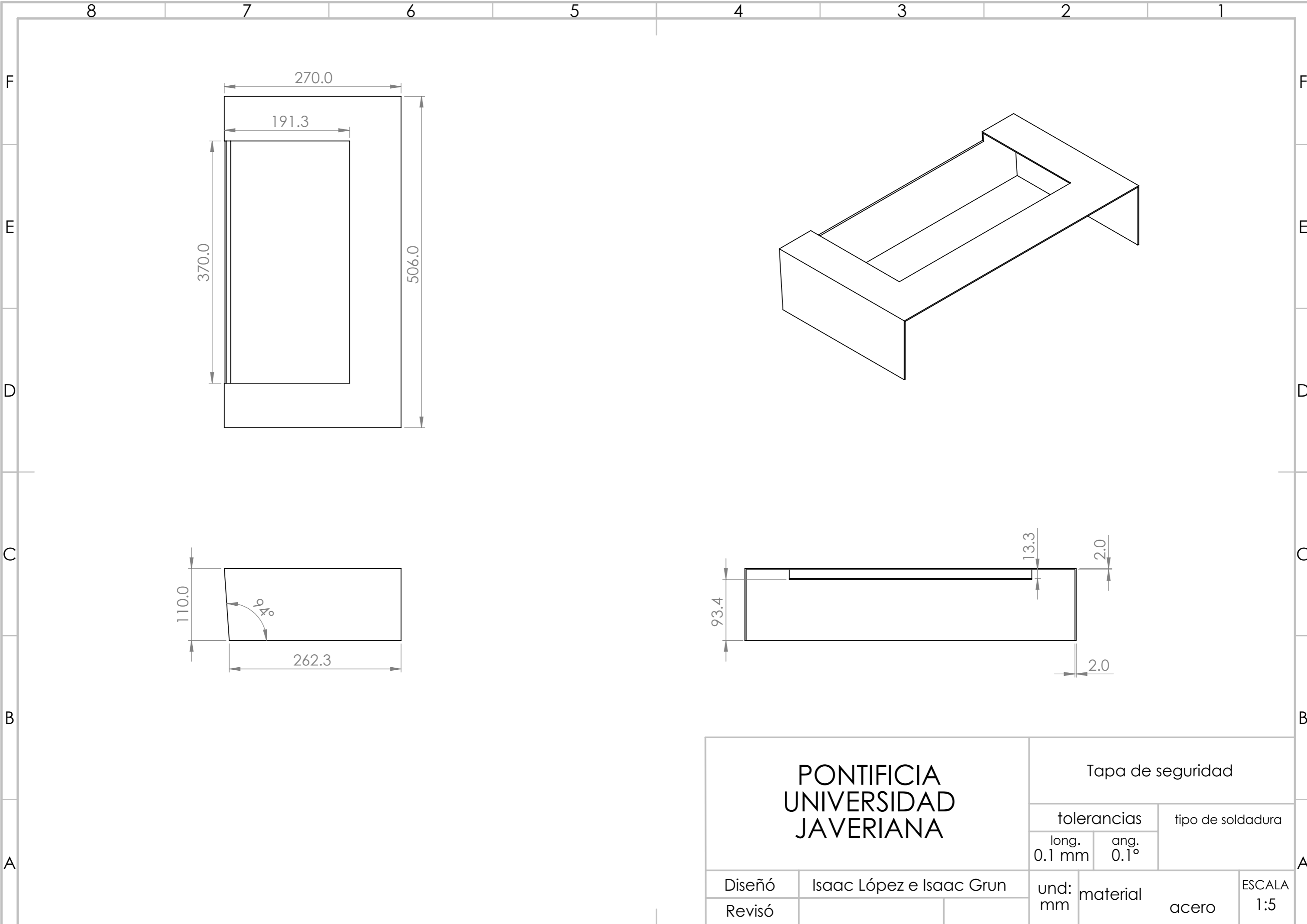
<p>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		pasador compuertas				
		tolerancias		tipo de soldadura		
		long. 0.1 mm	ang.			
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material	Acero	ESCALA 2:1
Revisó						



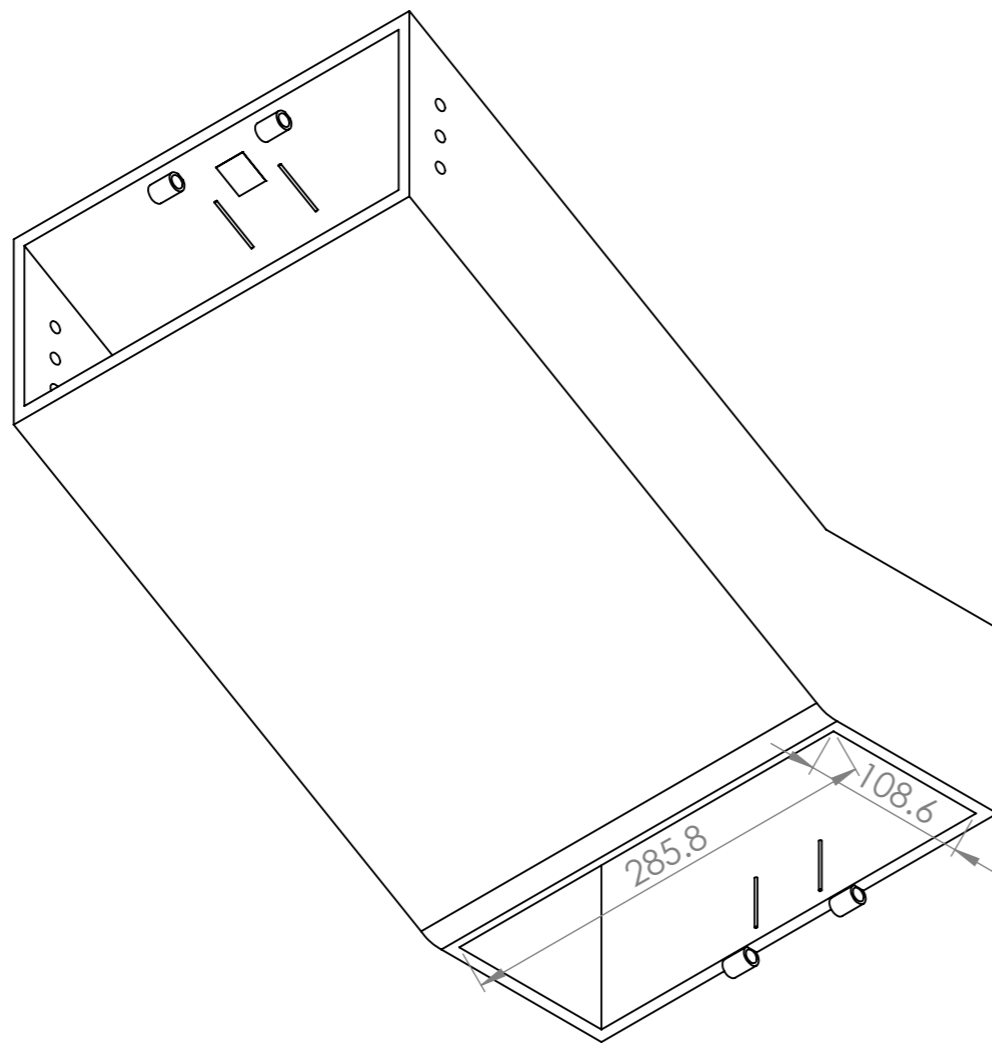
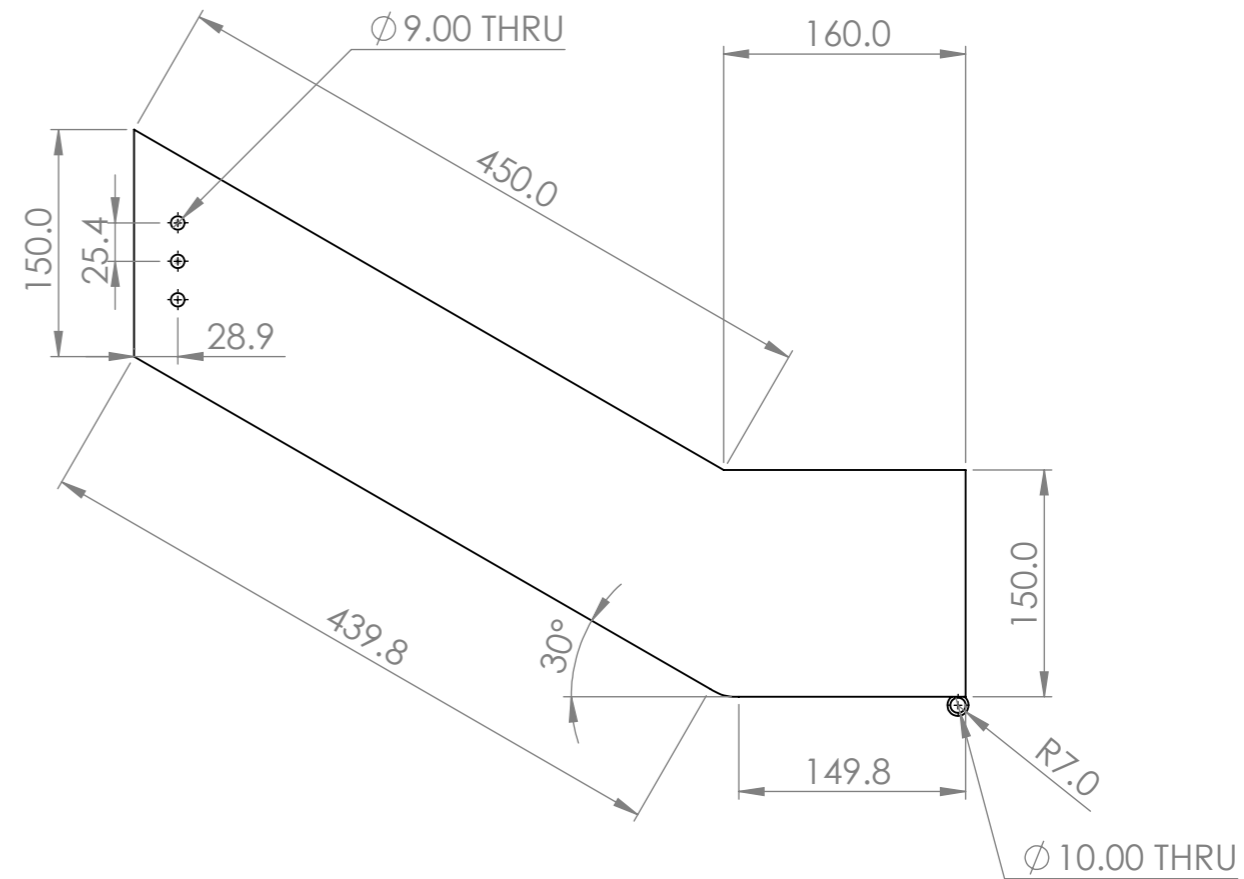
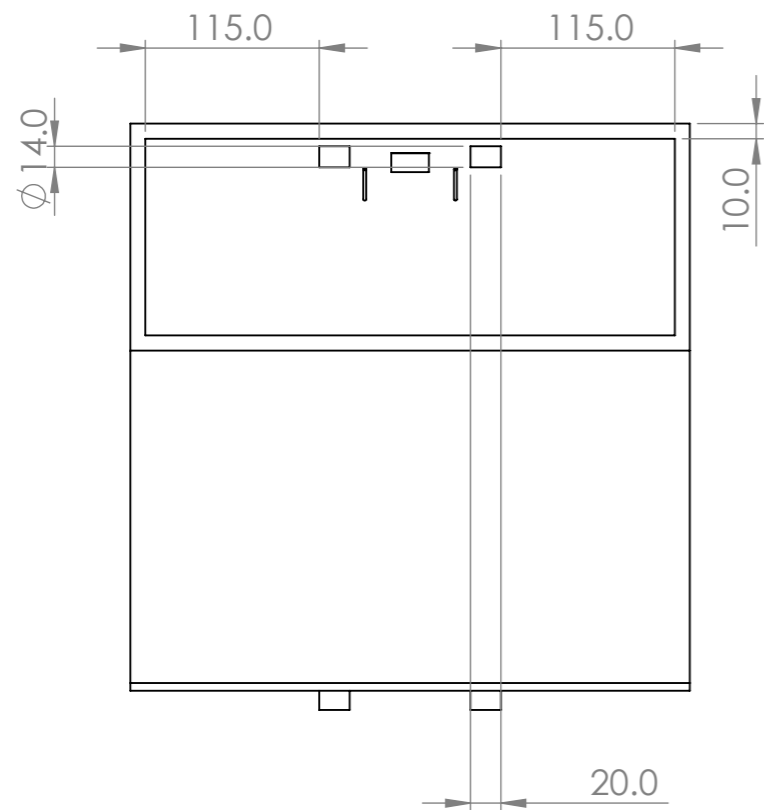
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Resorte antirretorno superior		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1	ang.	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und: mm	material Acero	ESCALA 1:1
Revisó				



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Resorte compuertas basculantes			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1 mm	ang.		
Diseño	Isaac López e Isaac Grun		und: mm	material	ACERO
Revisó				Acero	ESCALA 2:1



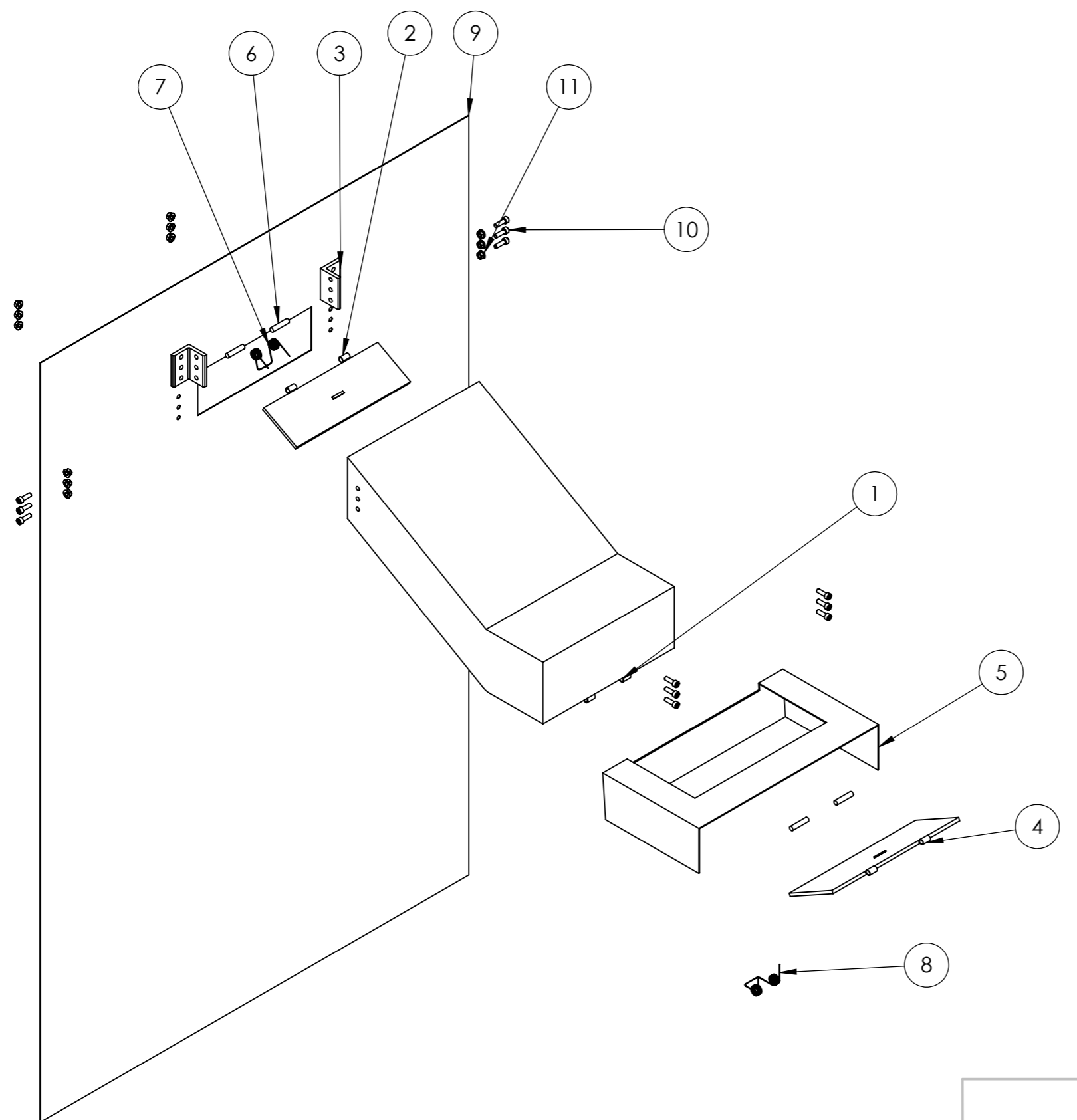
<p style="text-align: center;">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Tapa de seguridad			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1 mm	ang. 0.1°		
Diseño	Isaac López e Isaac Grun	und: mm	material	acero	ESCALA 1:5
Revisó					

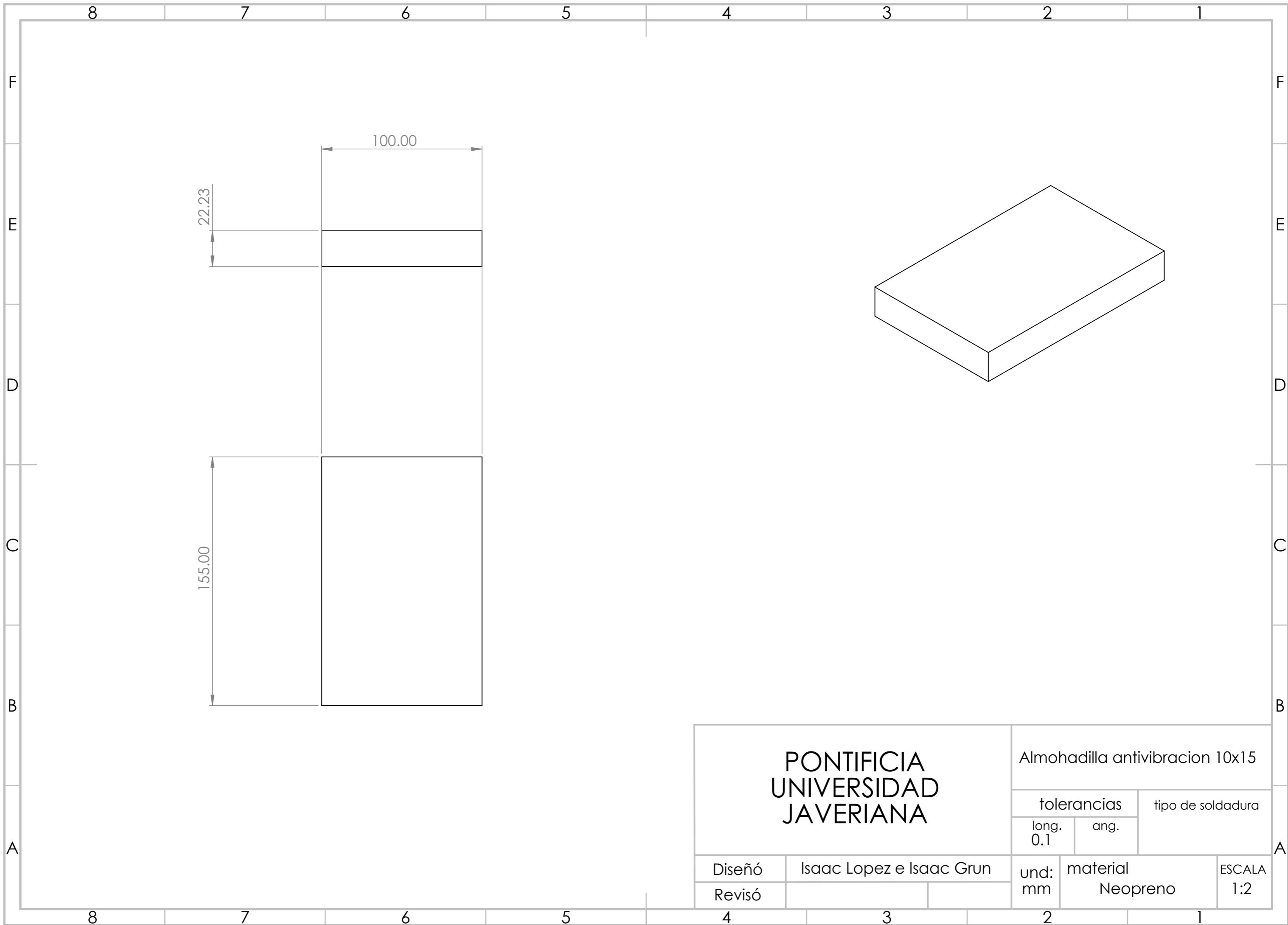


PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Tobogán		
		tolerancias	tipo de soldadura	
		long. 0.1 mm	ang. 0.1°	
Diseño	Isaac López e Isaac Grun	und: mm	material	ESCALA 1:5
Revisó			acero	

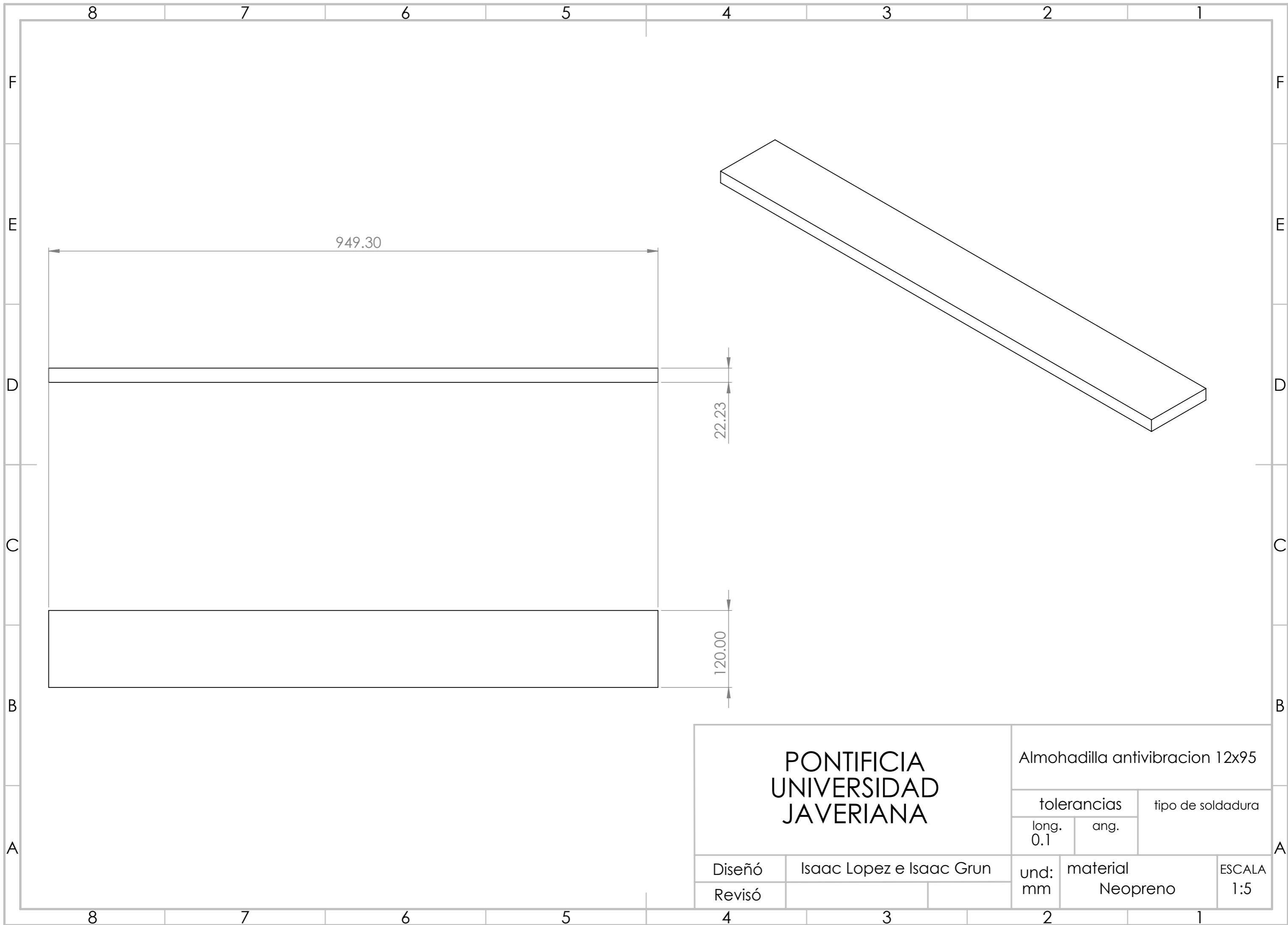
ITEM #.	NOMBRE	QTY.
1	toboganbotellas	1
2	compuerta tobogan	1
3	angulotobogan	2
4	compuerta tobogan inferior 2	1
5	tapaseguridad 2	1
6	Pasador	4
7	Resorte antirretorno superior	1
8	Resorte antirretorno	1
9	Lamina lateral	2
10	B18.3.1M - 8 x 1.25 x 25 Hex SHCS -- 25NHX	12
11	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M8 x 1.25 -N	12

<p style="text-align: center;">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		pasador compuertas			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material	ESCALA 1:10
Revisó					

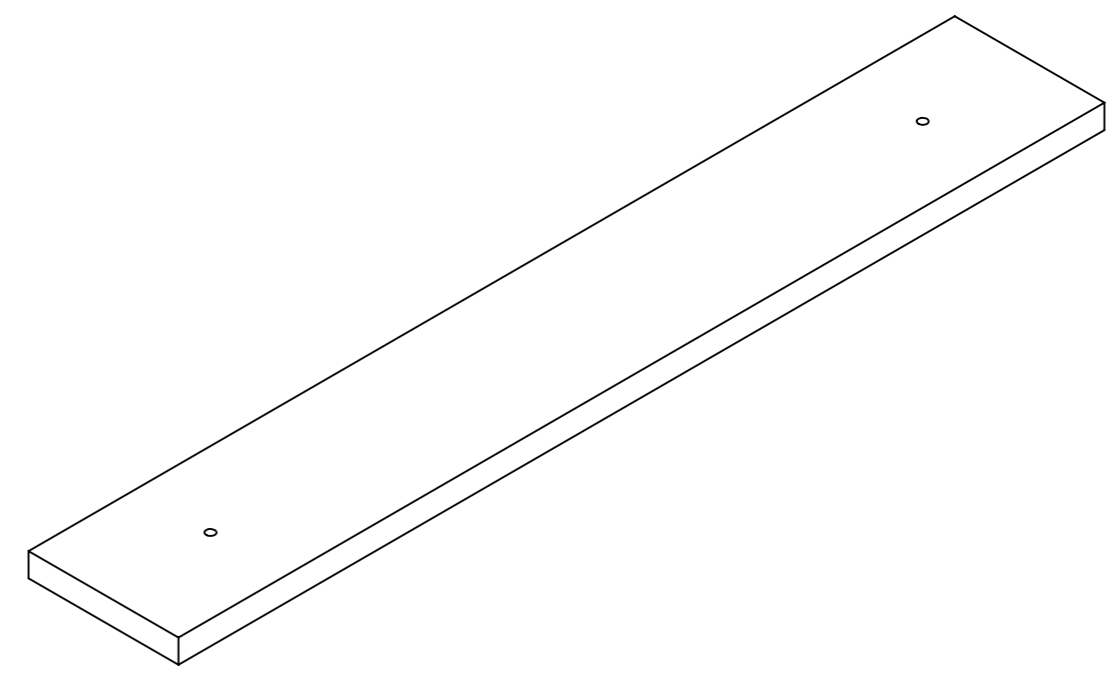
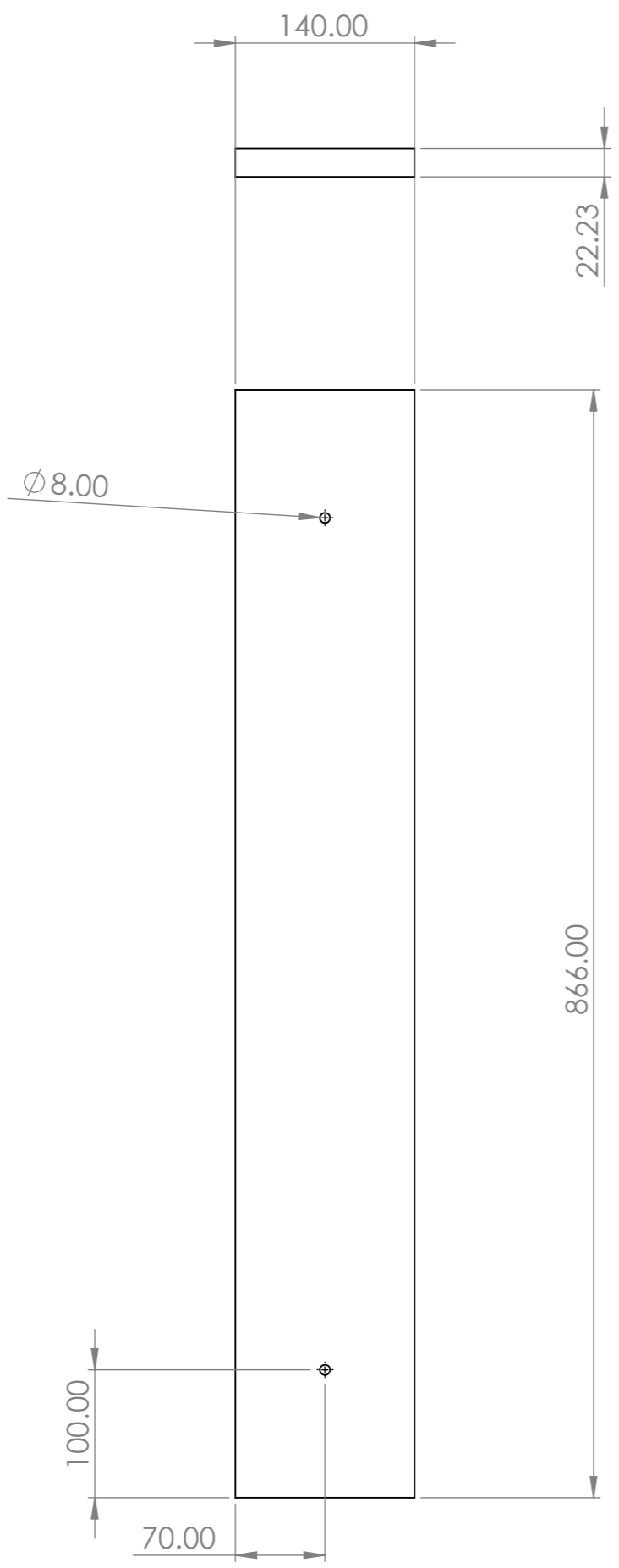
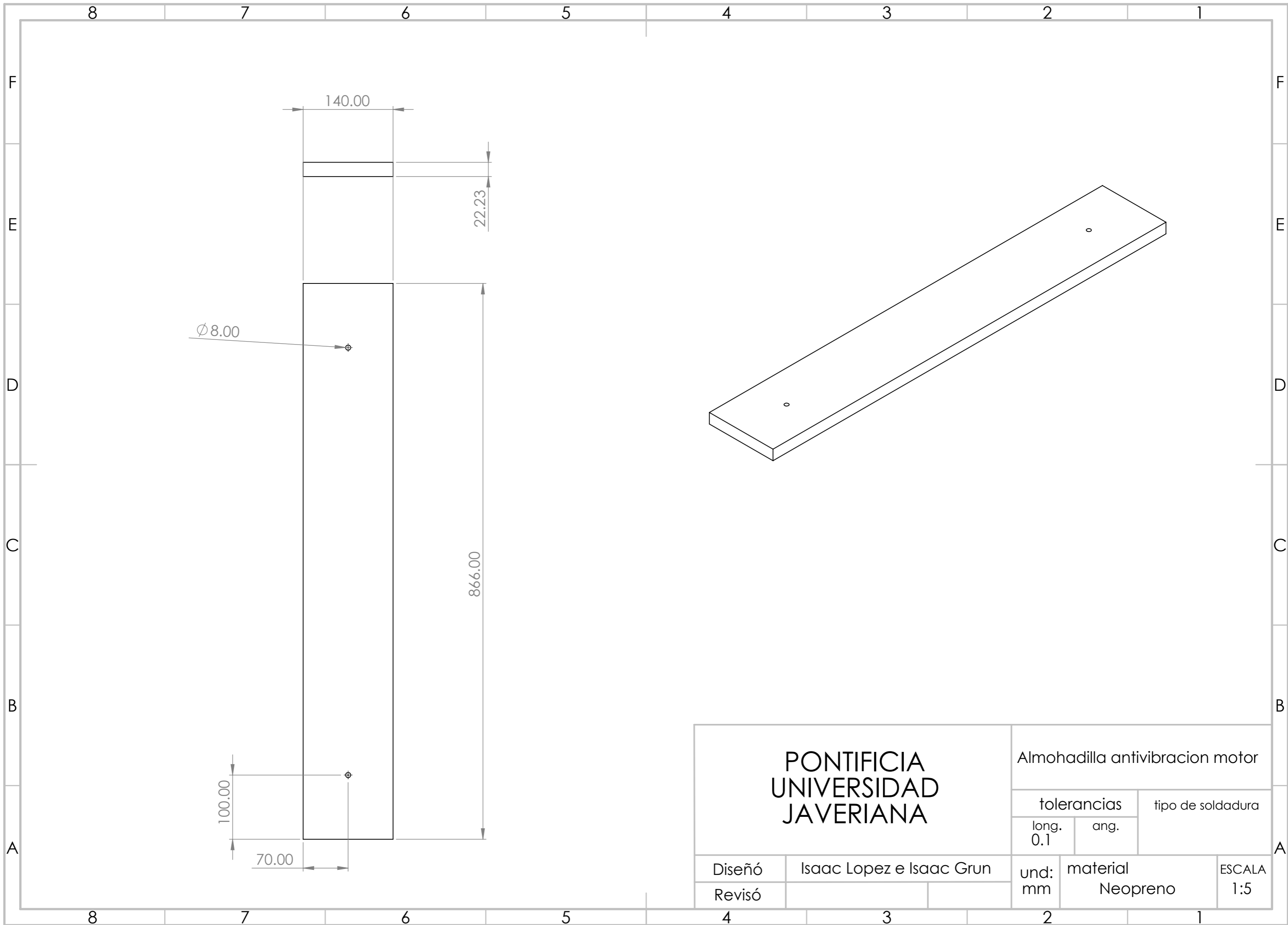




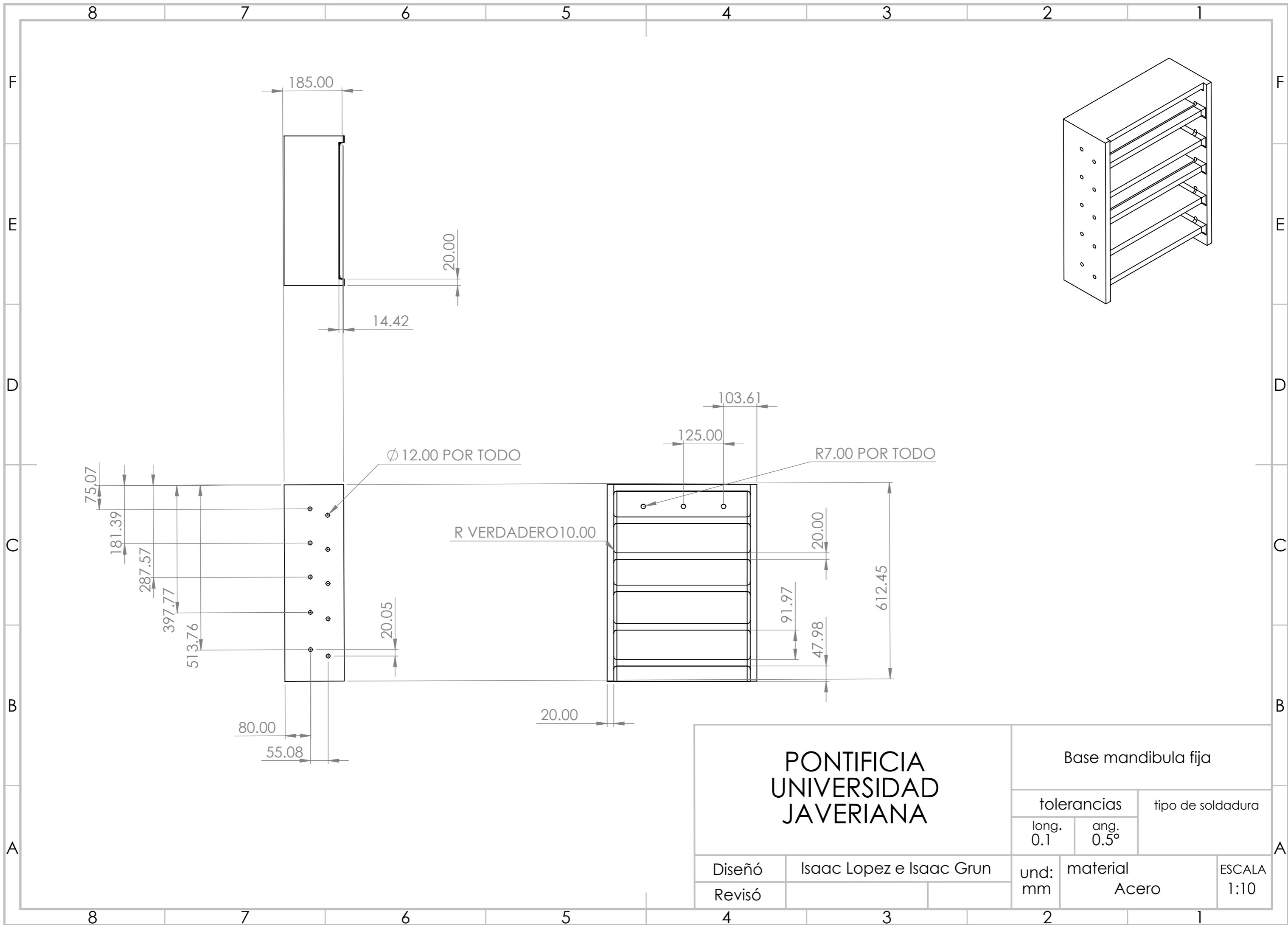
<p align="center">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Almohadilla antivibracion 10x15		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1	ang.	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und:	material	ESCALA 1:2
Revisó		mm	Neopreno	



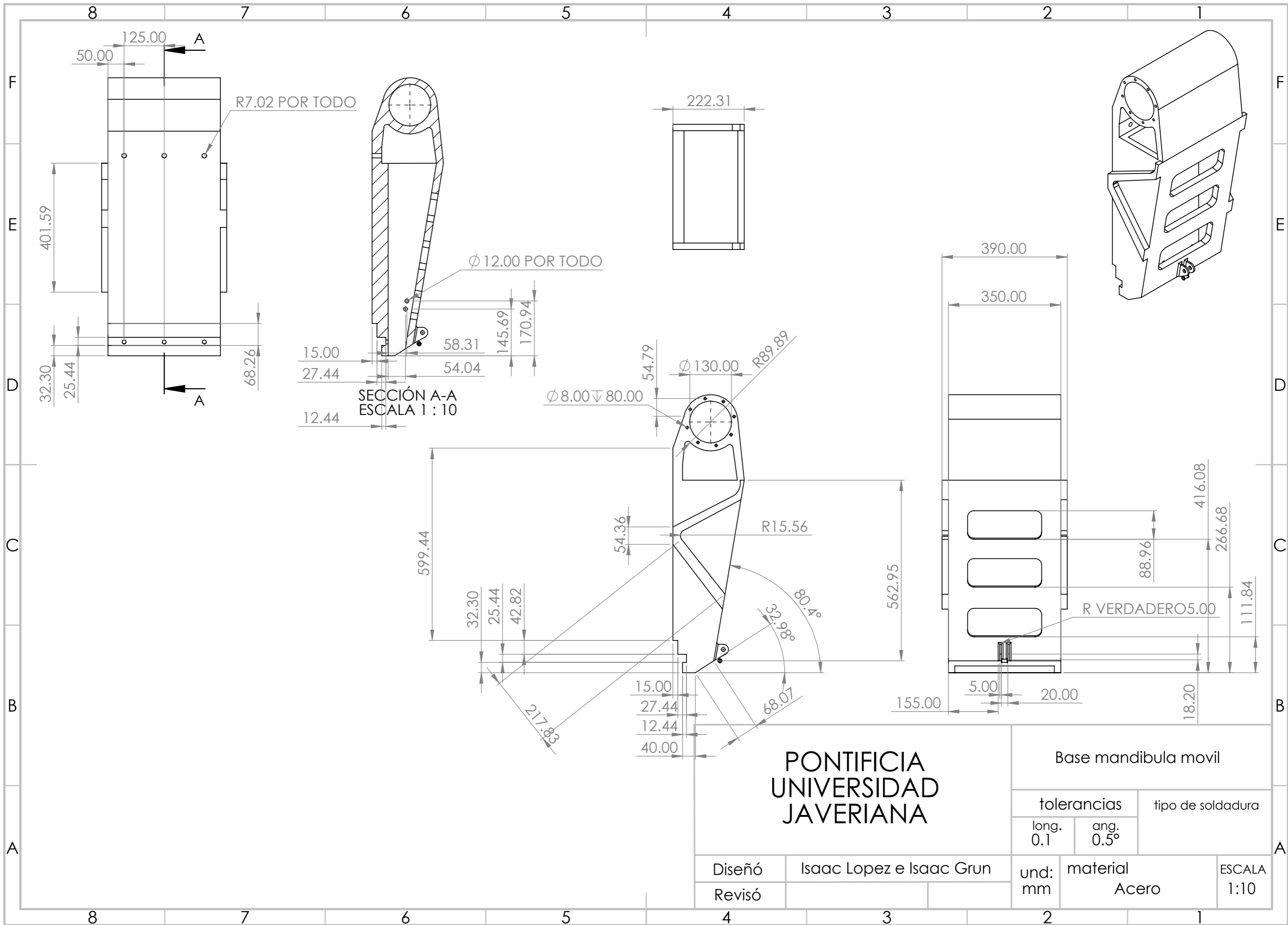
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Almohadilla antivibracion 12x95			
		tolerancias long. 0.1 ang.		tipo de soldadura	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material	ESCALA
Revisó				Neopreno	1:5



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Almohadilla antivibracion motor			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und:	material	ESCALA 1:5
Revisó			mm	Neopreno	



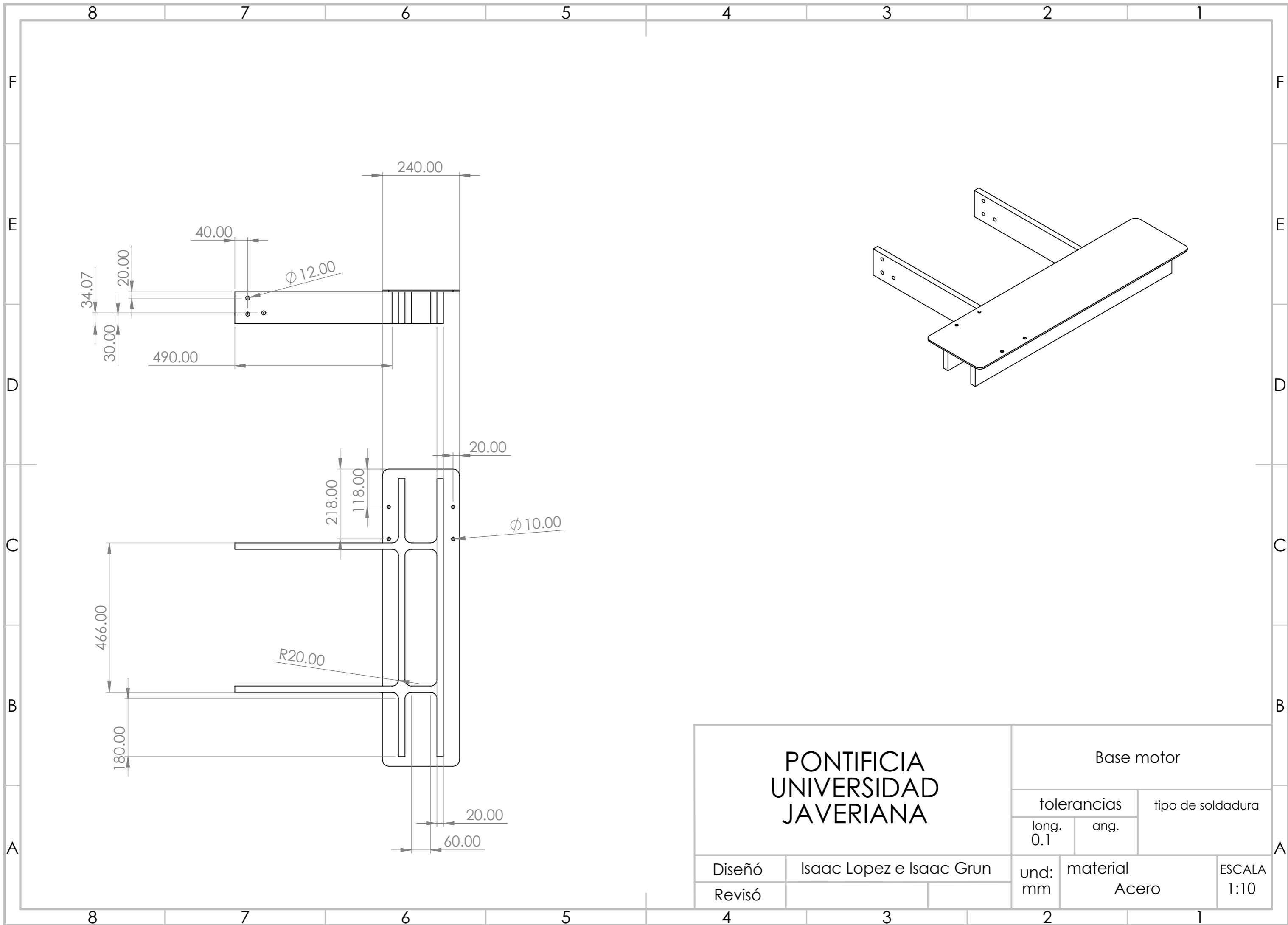
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Base mandibula fija		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1	ang. 0.5°	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material
Revisó				Acero
				ESCALA 1:10



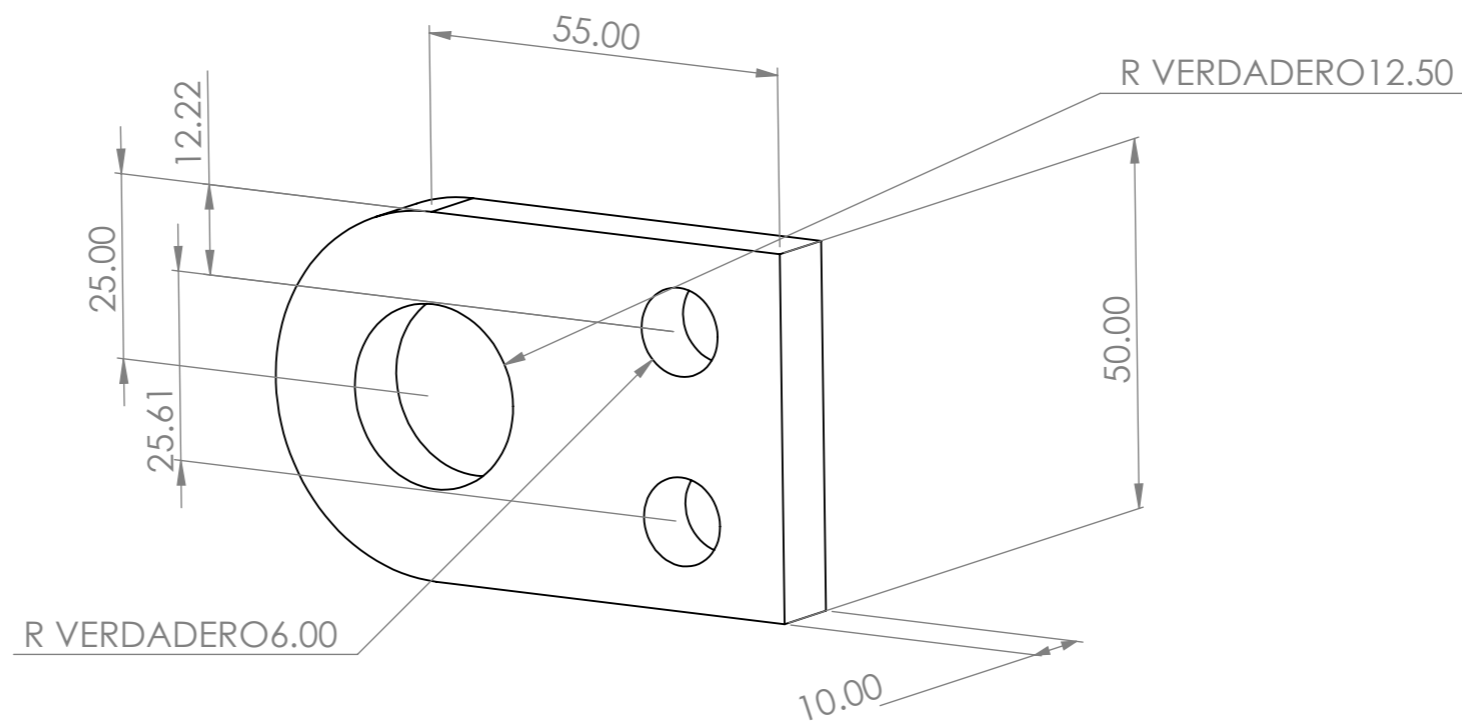
SECCIÓN A-A
ESCALA 1:10

PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Base mandibula movil				
tolerancias		tipo de soldadura		
long. 0.1	ang. 0.5°			
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und: mm	material Acero	ESCALA 1:10
Revisó				



<p>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Base motor		
		tolerancias	tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und:	material	ESCALA
Revisó		mm	Acero	1:10



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Bisagra de palanca

tolerancias

tipo de soldadura

long.
0.1

ang.

Diseño

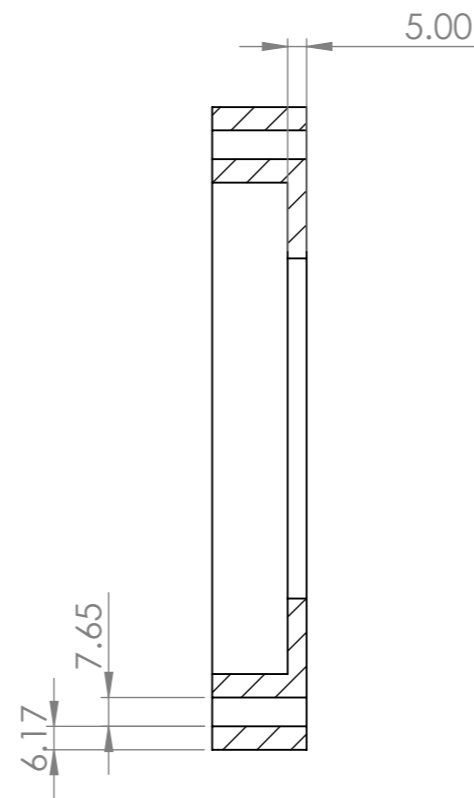
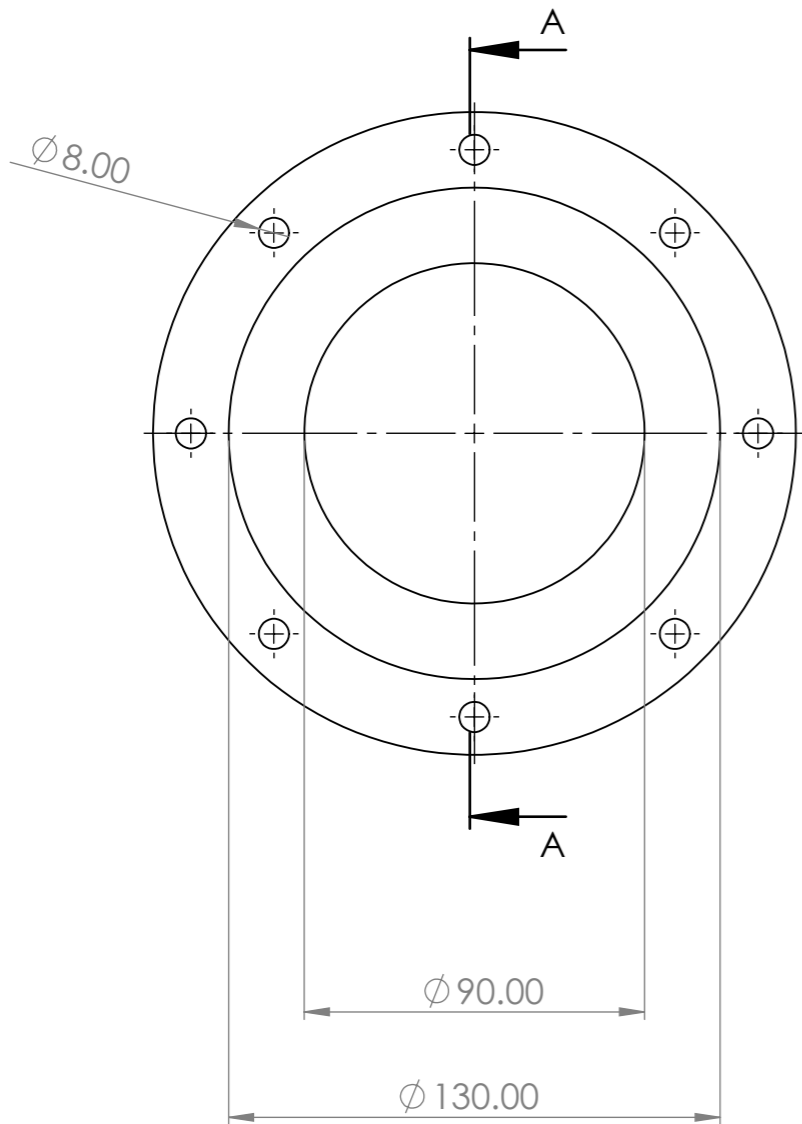
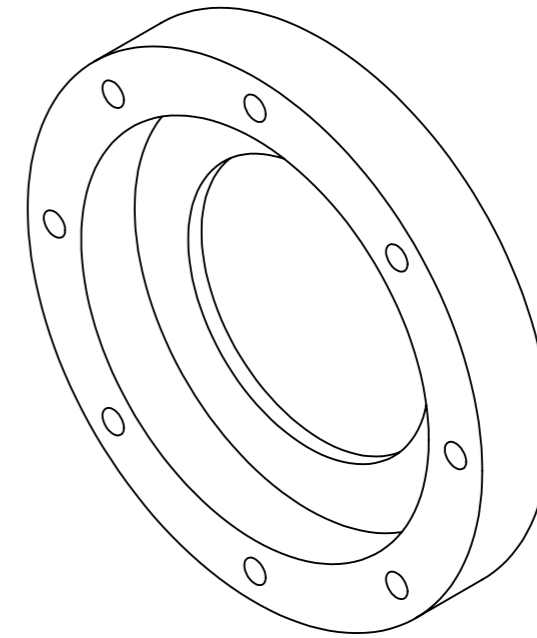
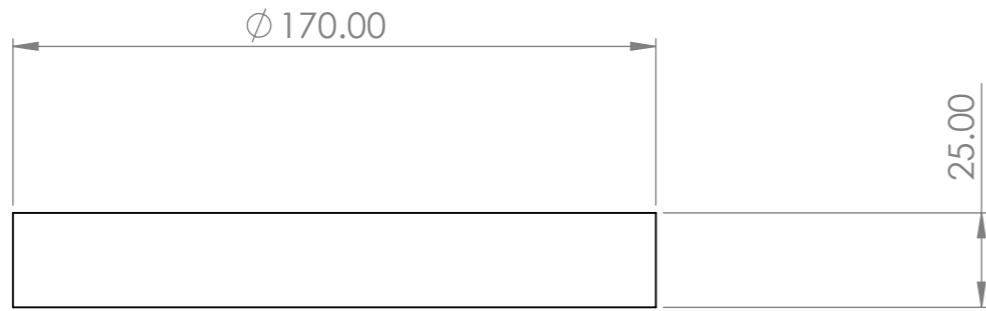
Isaac Lopez e Isaac Grun

und:
mm

material
Acero

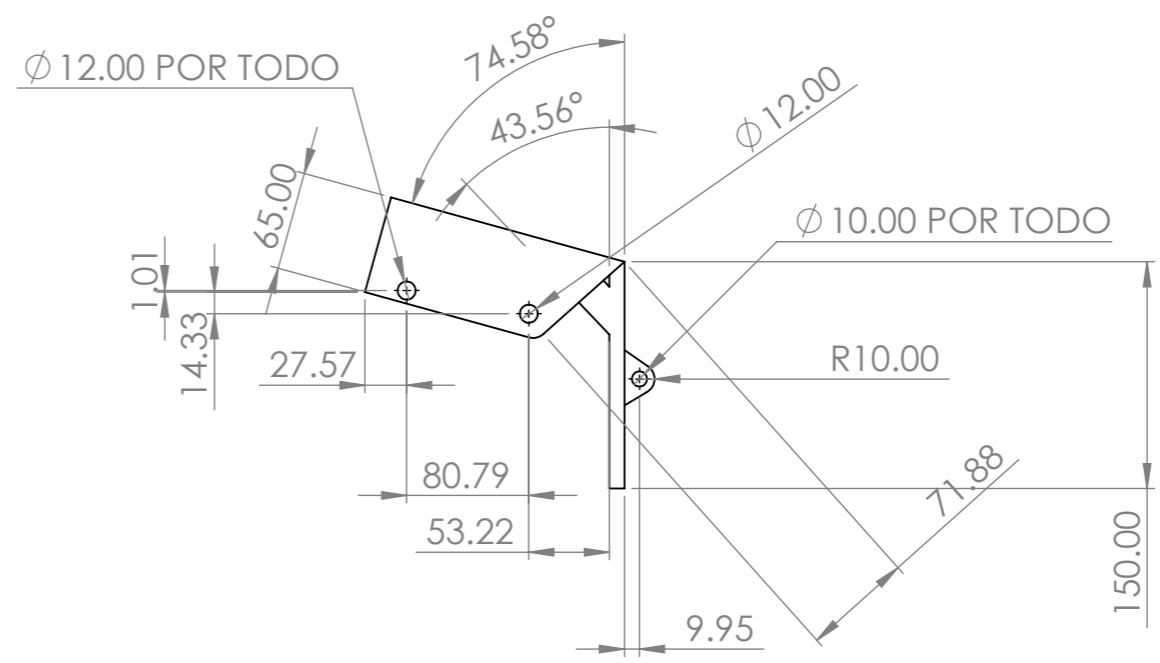
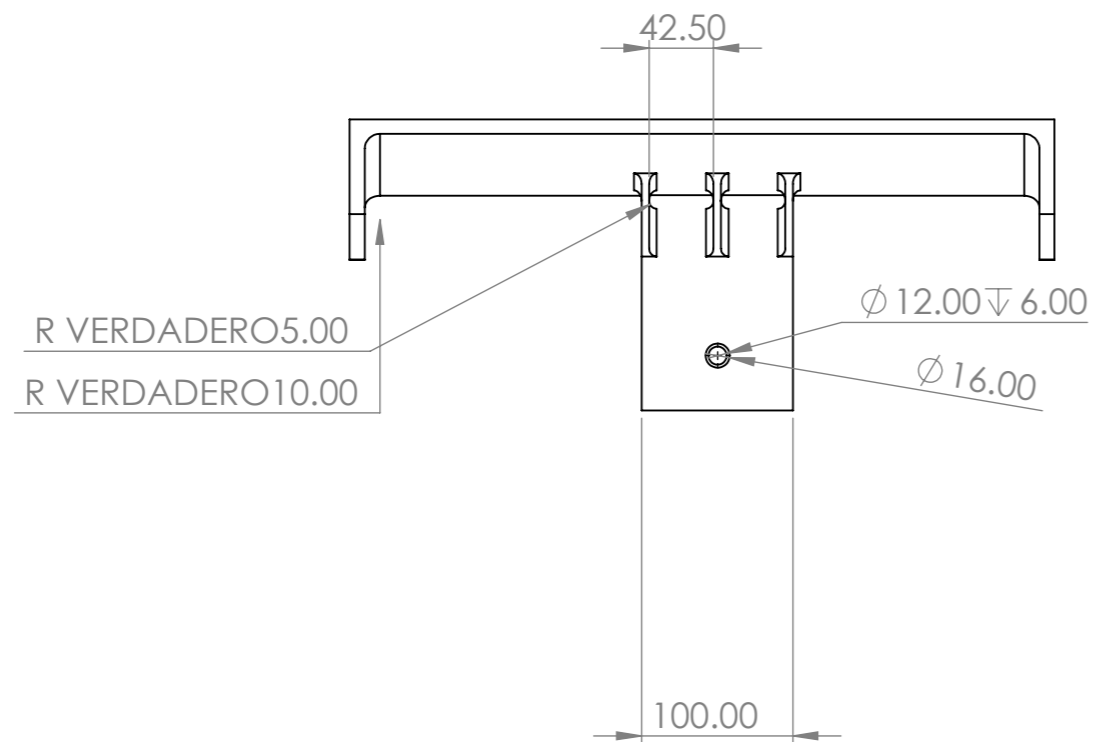
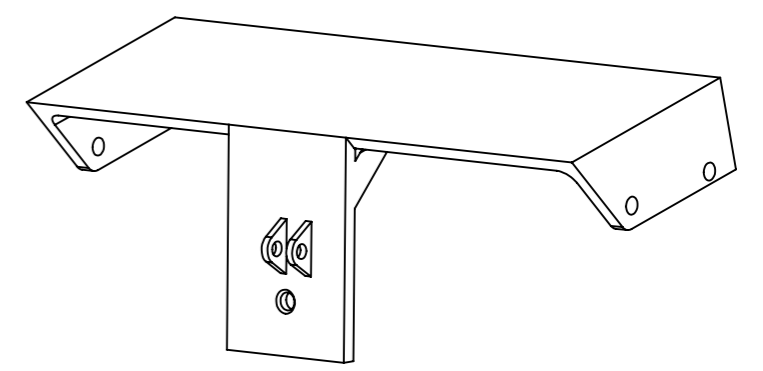
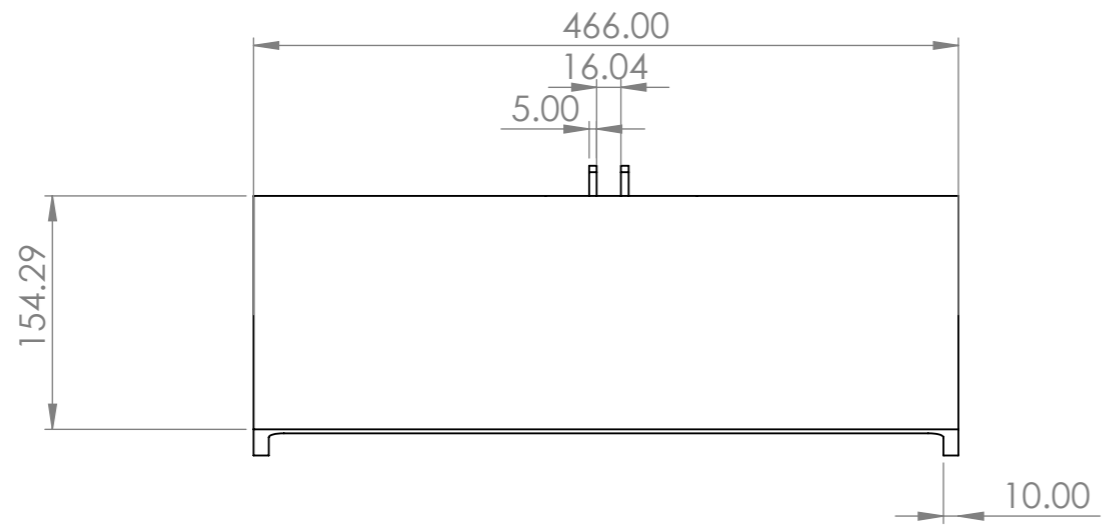
ESCALA
1:1

Revisó

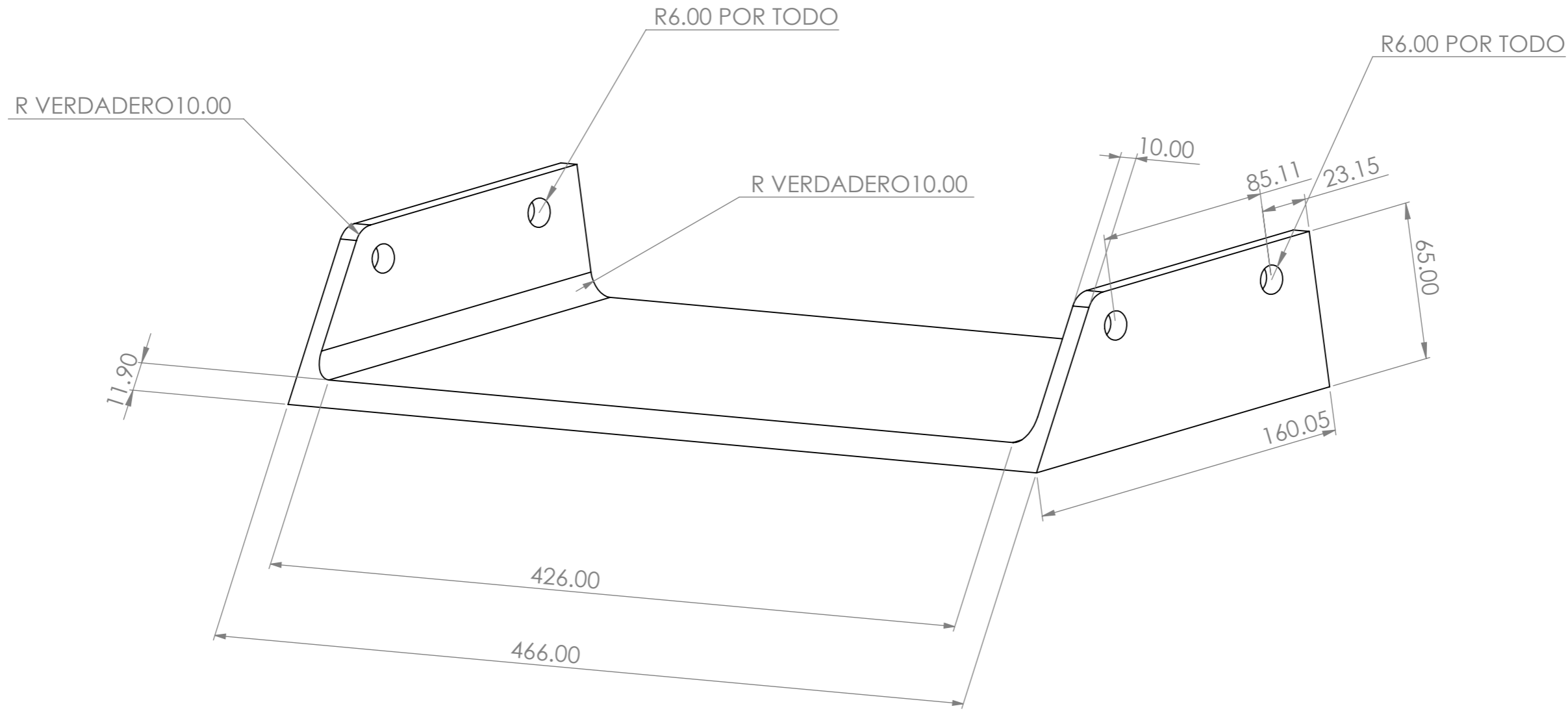


SECCIÓN A-A

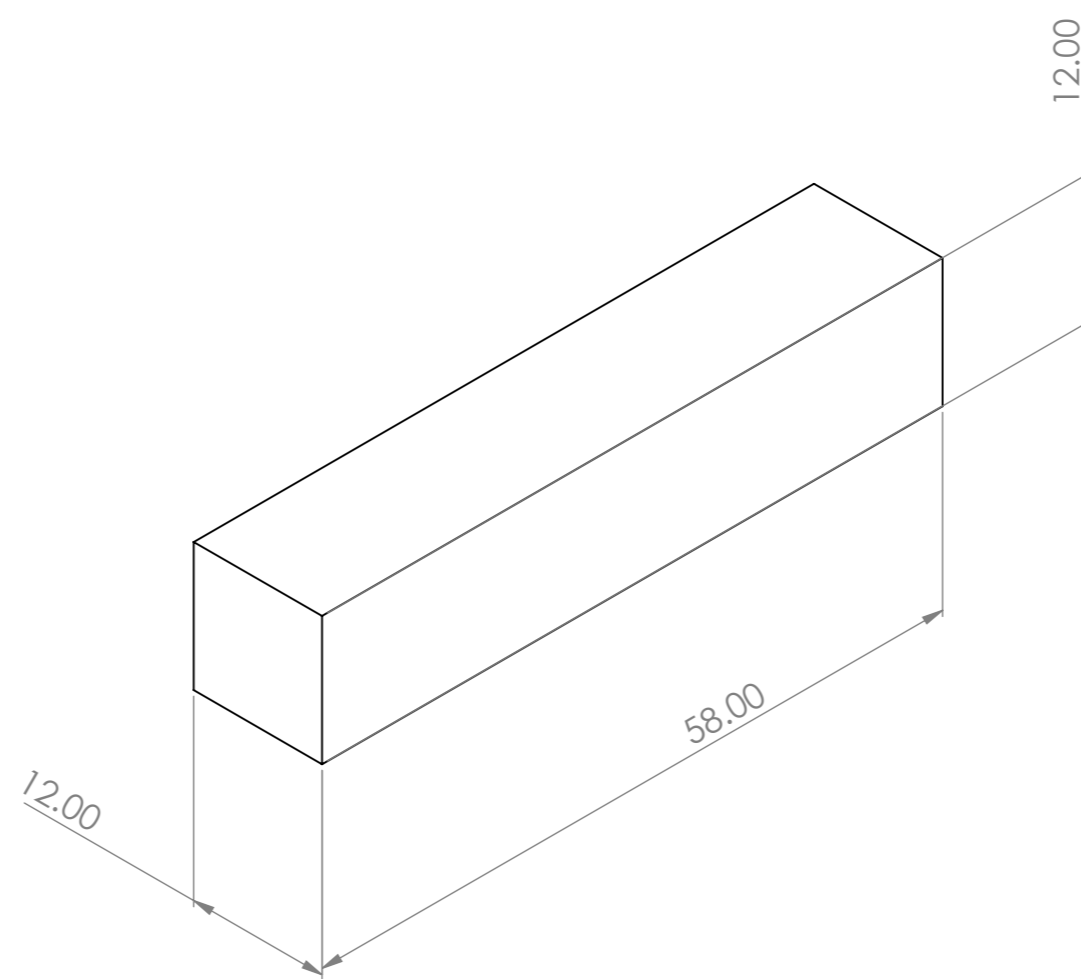
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Brida eje		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1	ang.	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und: mm	material Acero	ESCALA 1:2
Revisó				



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Carcasa de palanca y resorte		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1	ang. 0.5°	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero
Revisó				ESCALA 1:5



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Carcasa de palanca			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:2
Revisó					



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Chaveta eje

tolerancias

tipo de soldadura

long.
0.1

ang.

Diseño

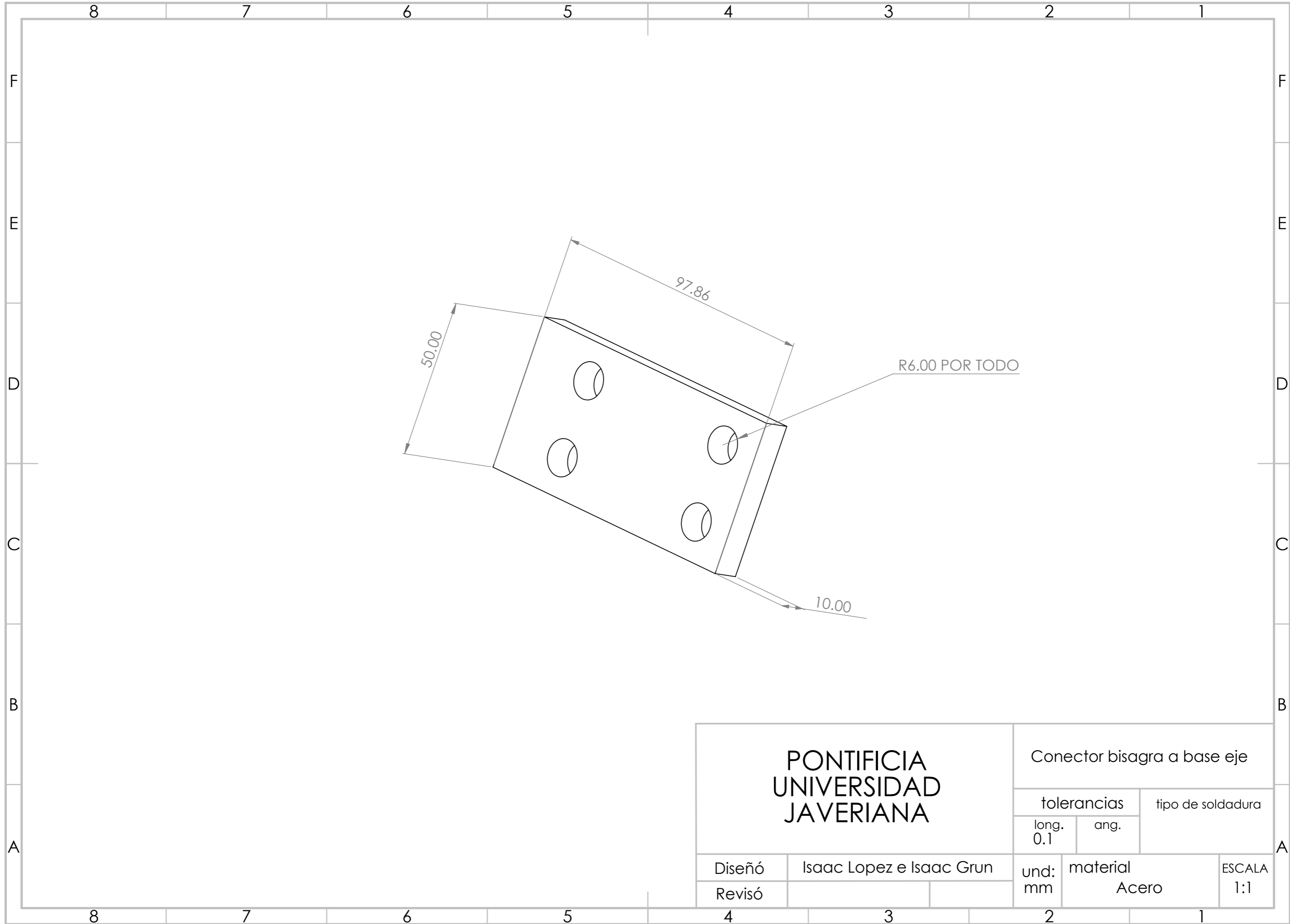
Isaac Lopez e Isaac Grun

und:
mm

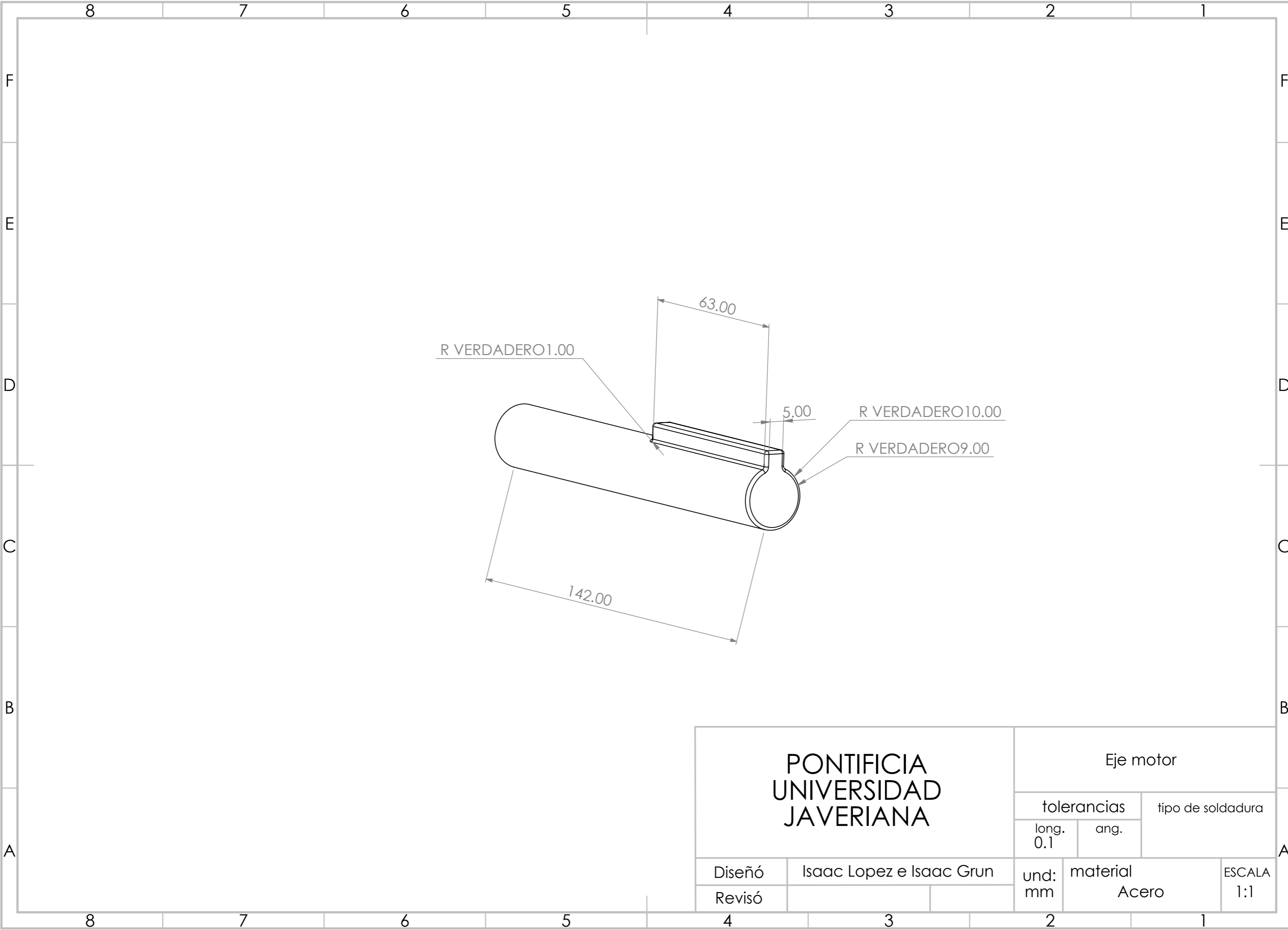
material
Acero

ESCALA
2:1

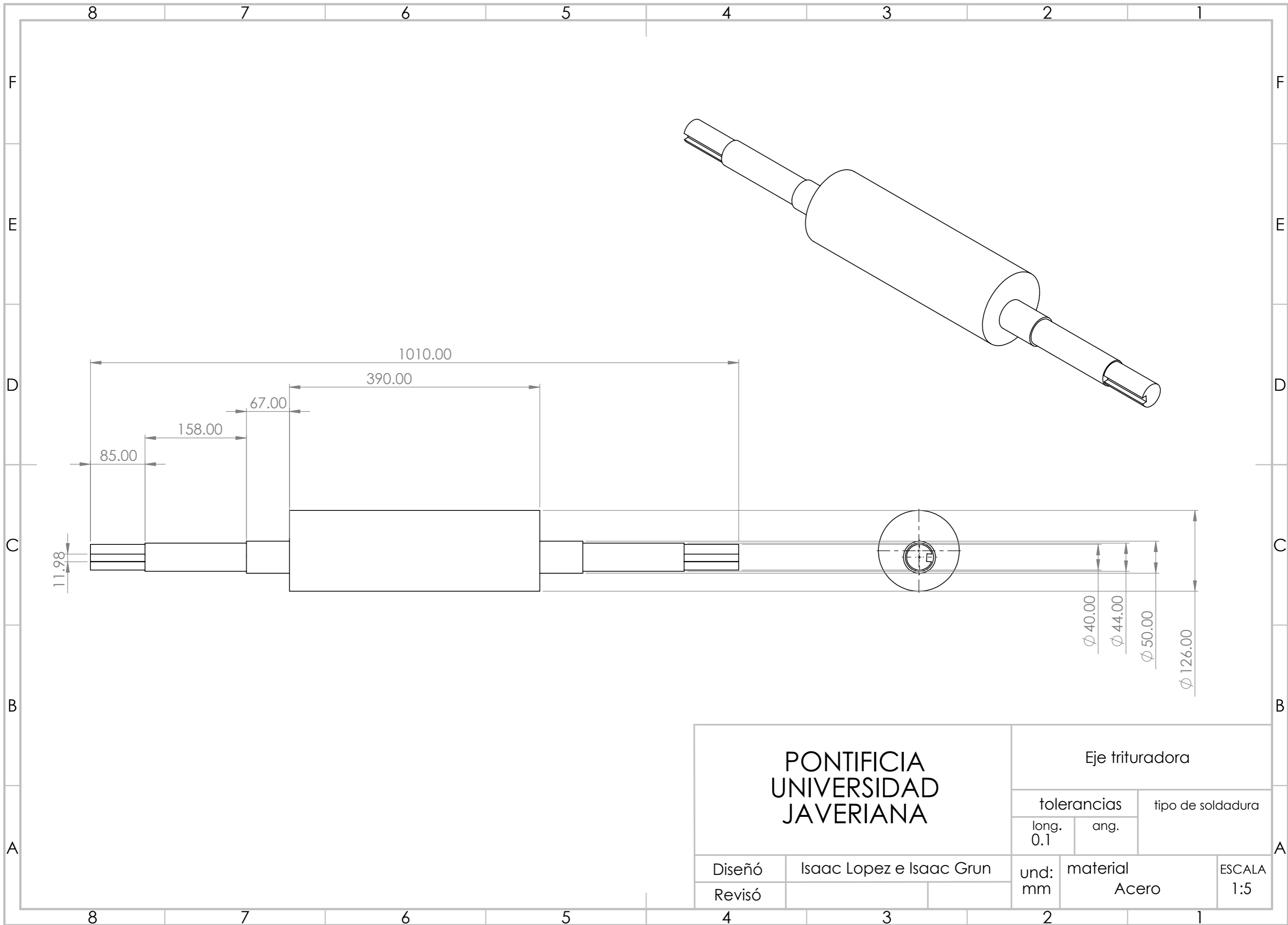
Revisó



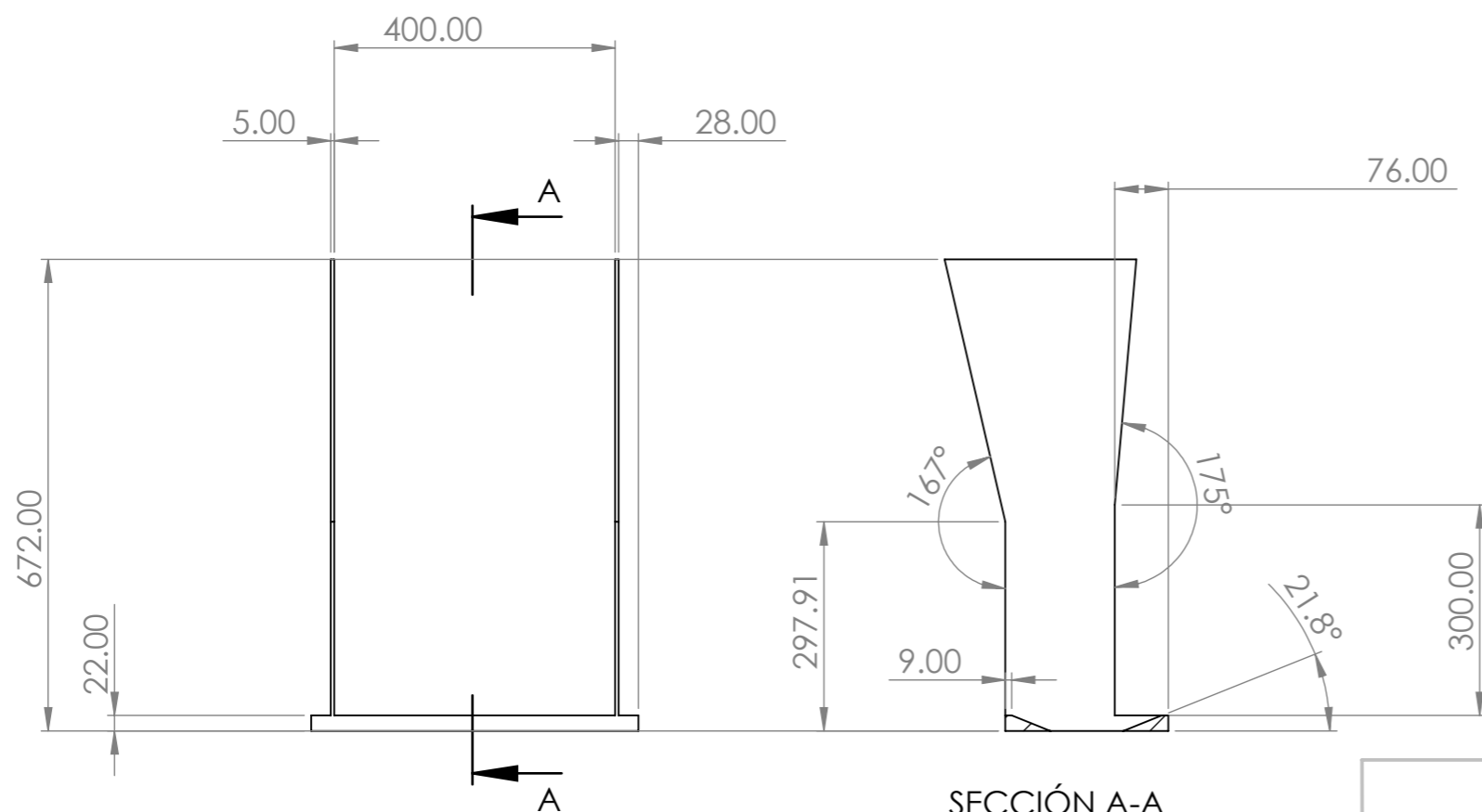
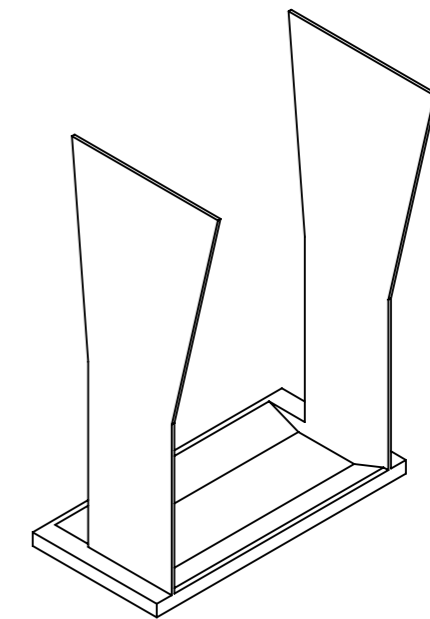
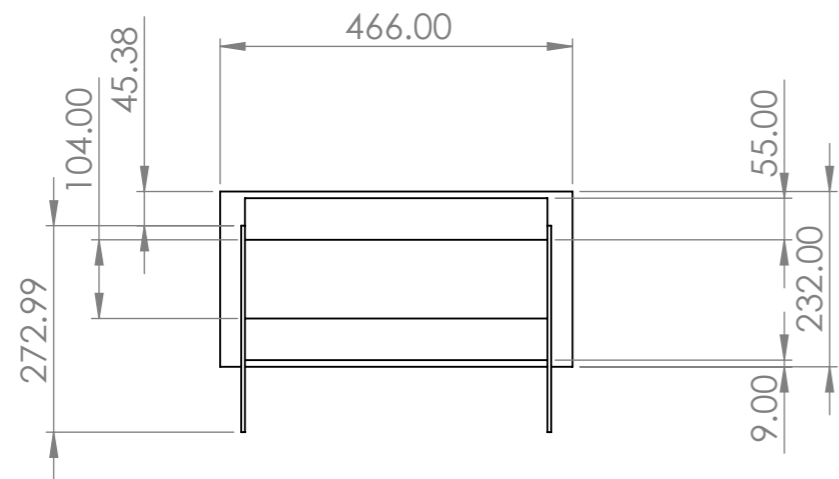
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Conector bisagra a base eje			
		tolerancias long. 0.1 ang.		tipo de soldadura	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:1
Revisó					



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Eje motor			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:1
Revisó					



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Eje trituradora		
		tolerancias		tipo de soldadura
Diseño		long. 0.1	ang.	
Revisó		material Acero		
Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm		



SECCIÓN A-A

PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Embudo trituracion

tolerancias

tipo de soldadura

long.
0.1

ang.

Diseño

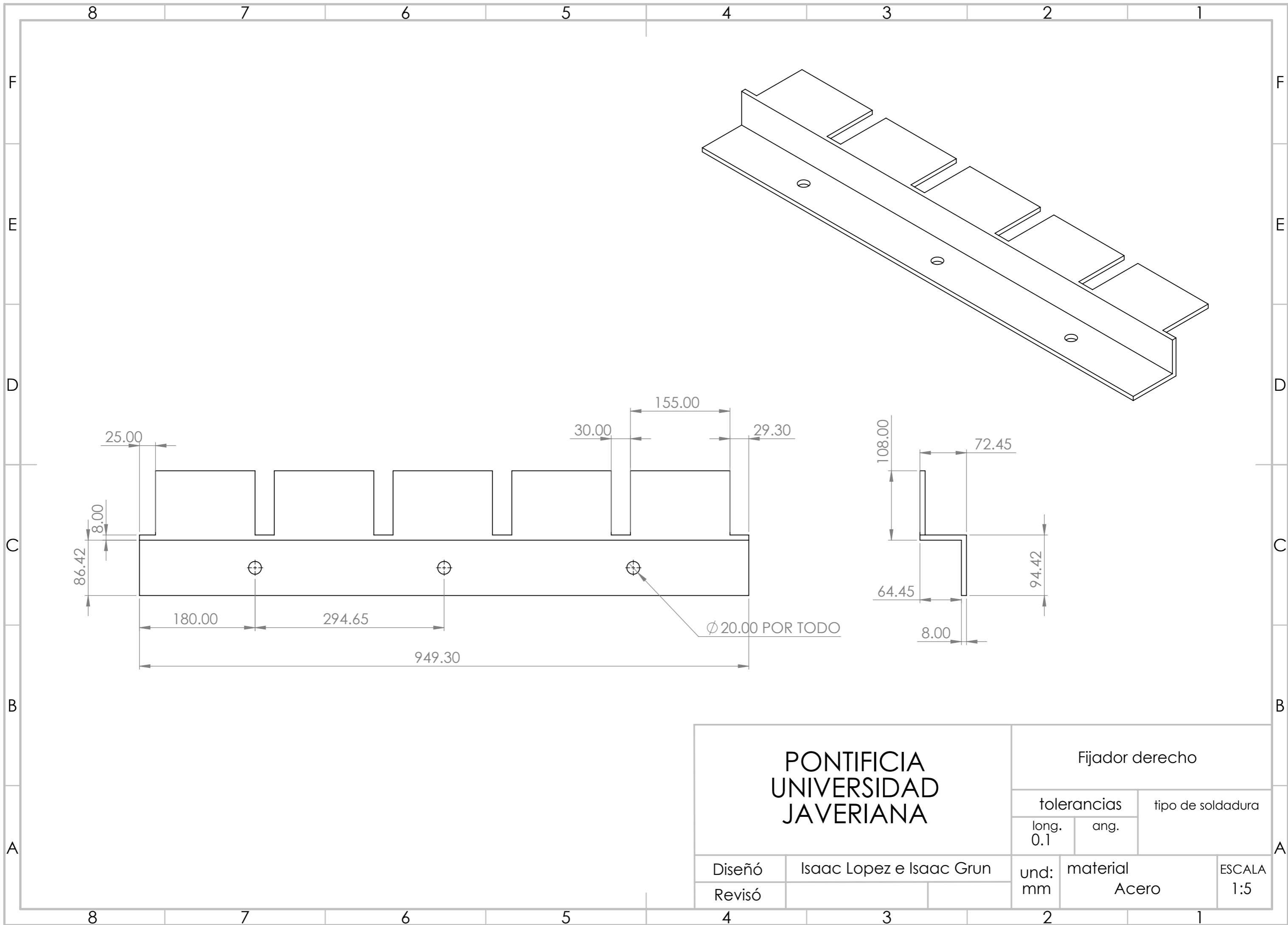
Isaac Lopez e Isaac Grun

und:
mm

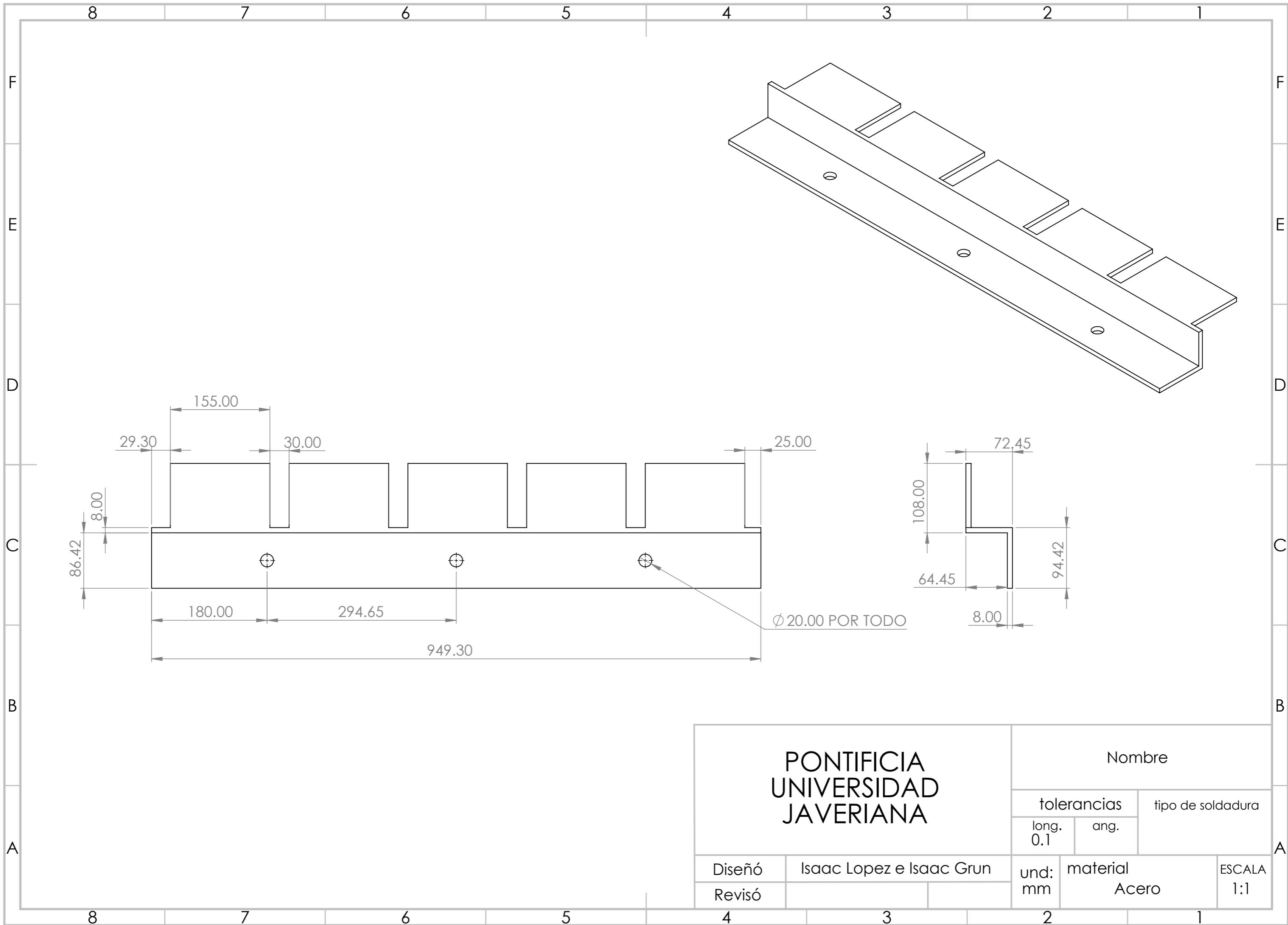
material
Acero

ESCALA
1:10

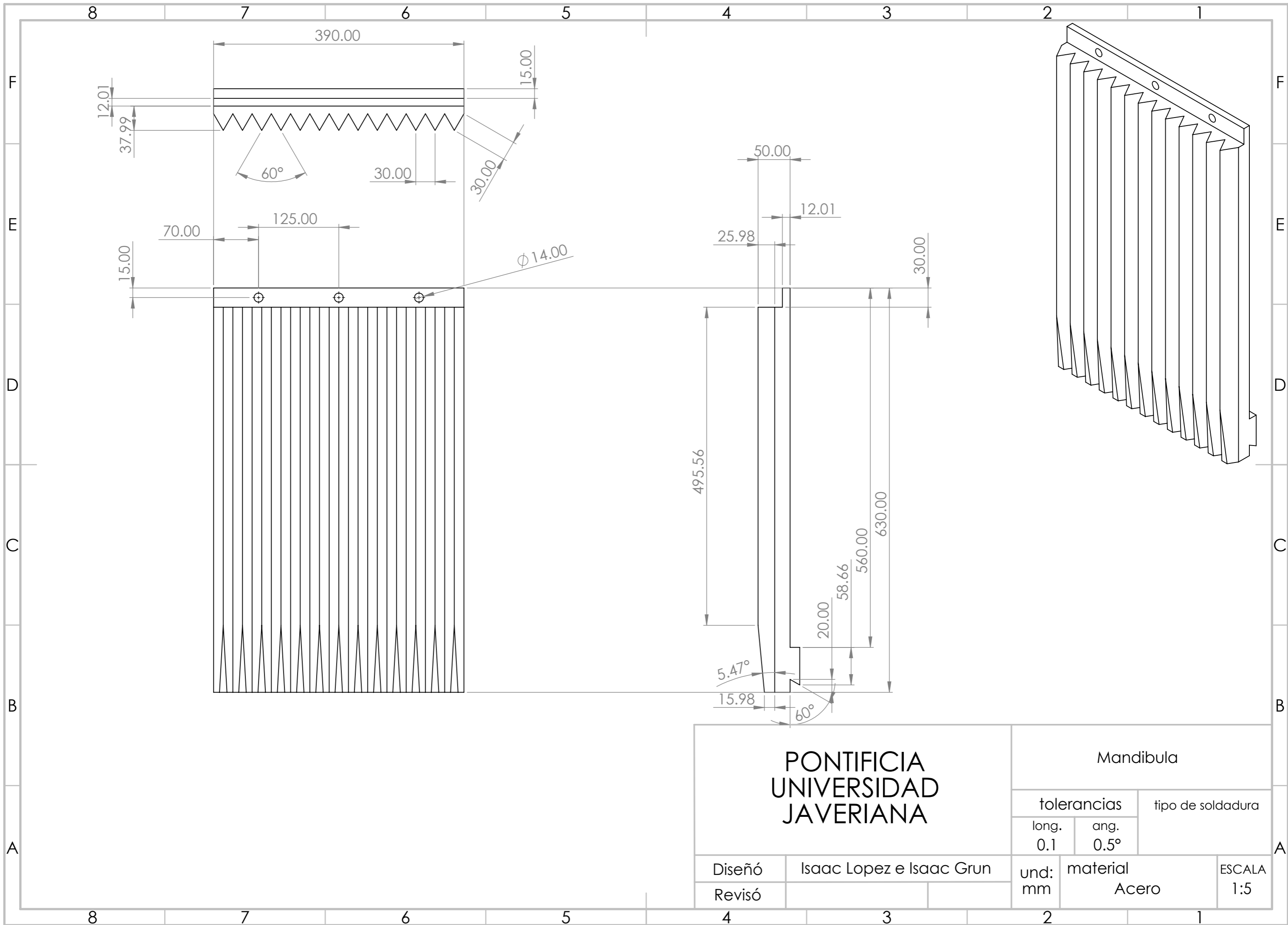
Revisó

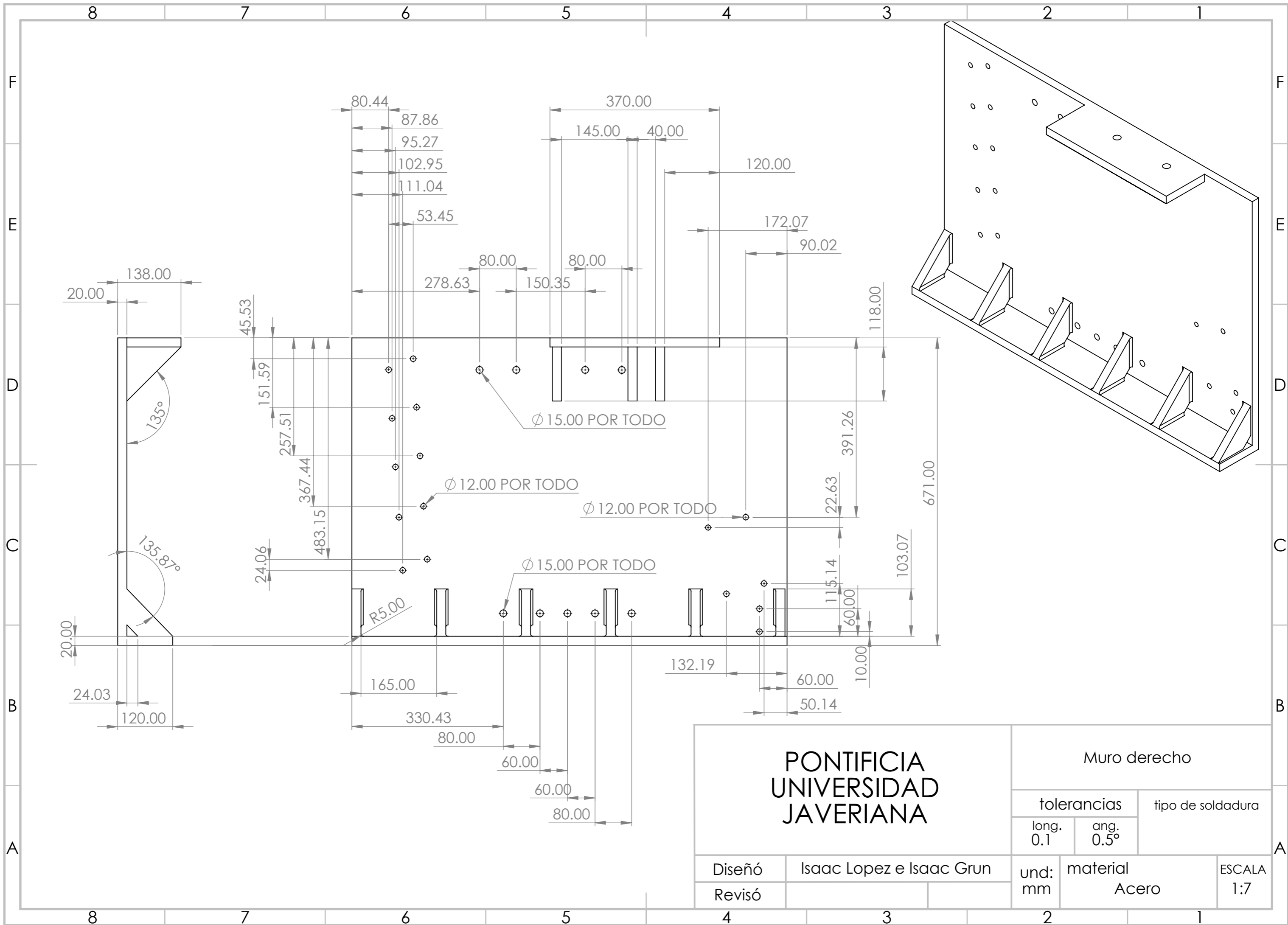


PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Fijador derecho		
		tolerancias		tipo de soldadura
Diseño		long. 0.1	ang.	
Revisó		material Acero		
Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm		



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Nombre			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:1
Revisó					



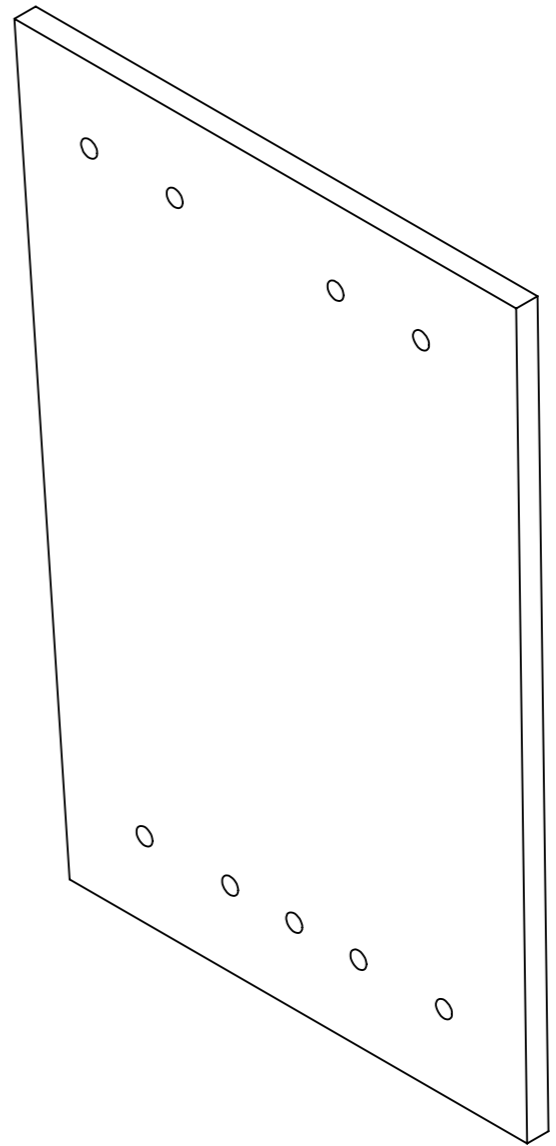
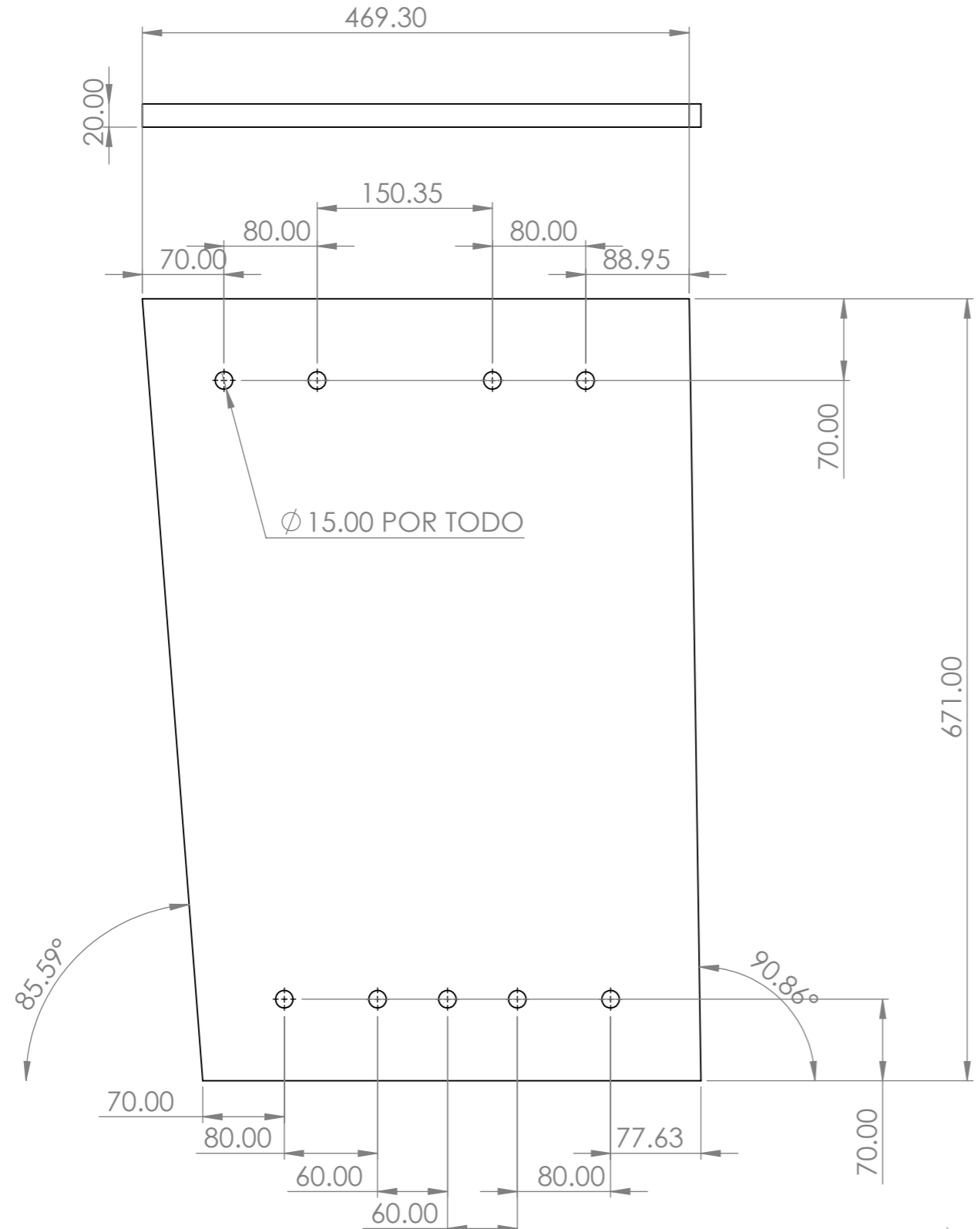
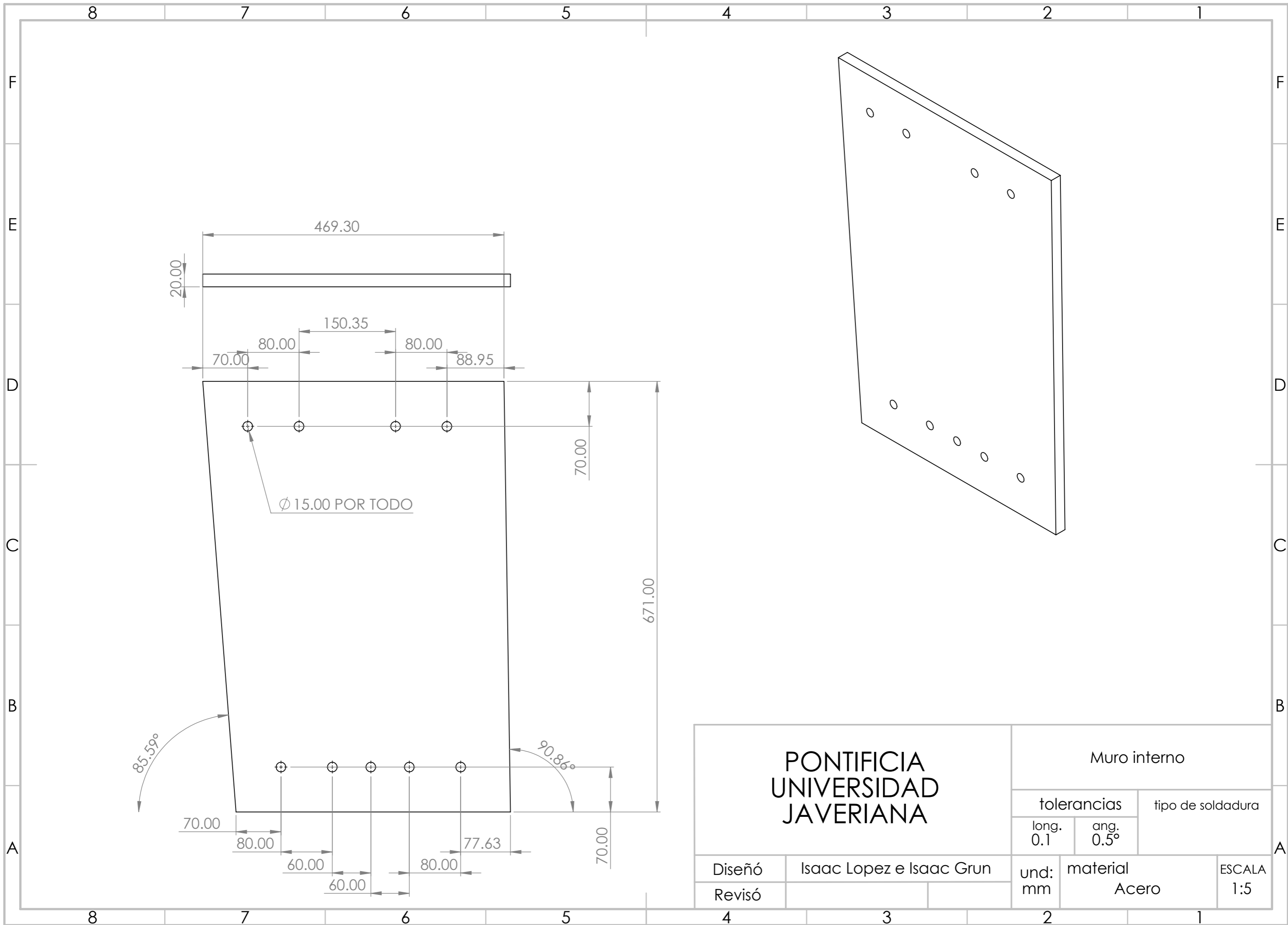


**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA**

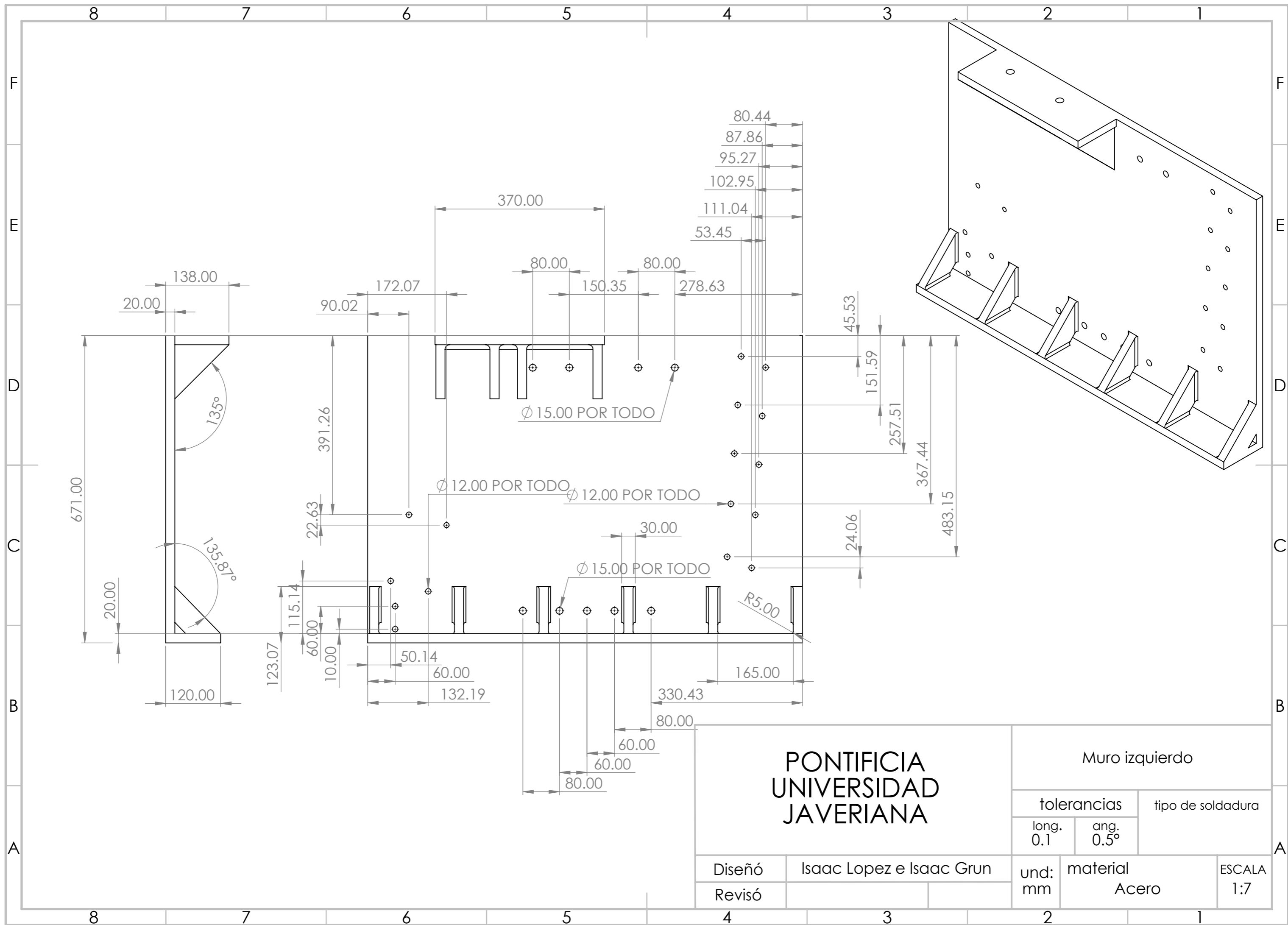
Muro derecho			
tolerancias		tipo de soldadura	
long. 0.1	ang. 0.5°		

Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun
Revisó	

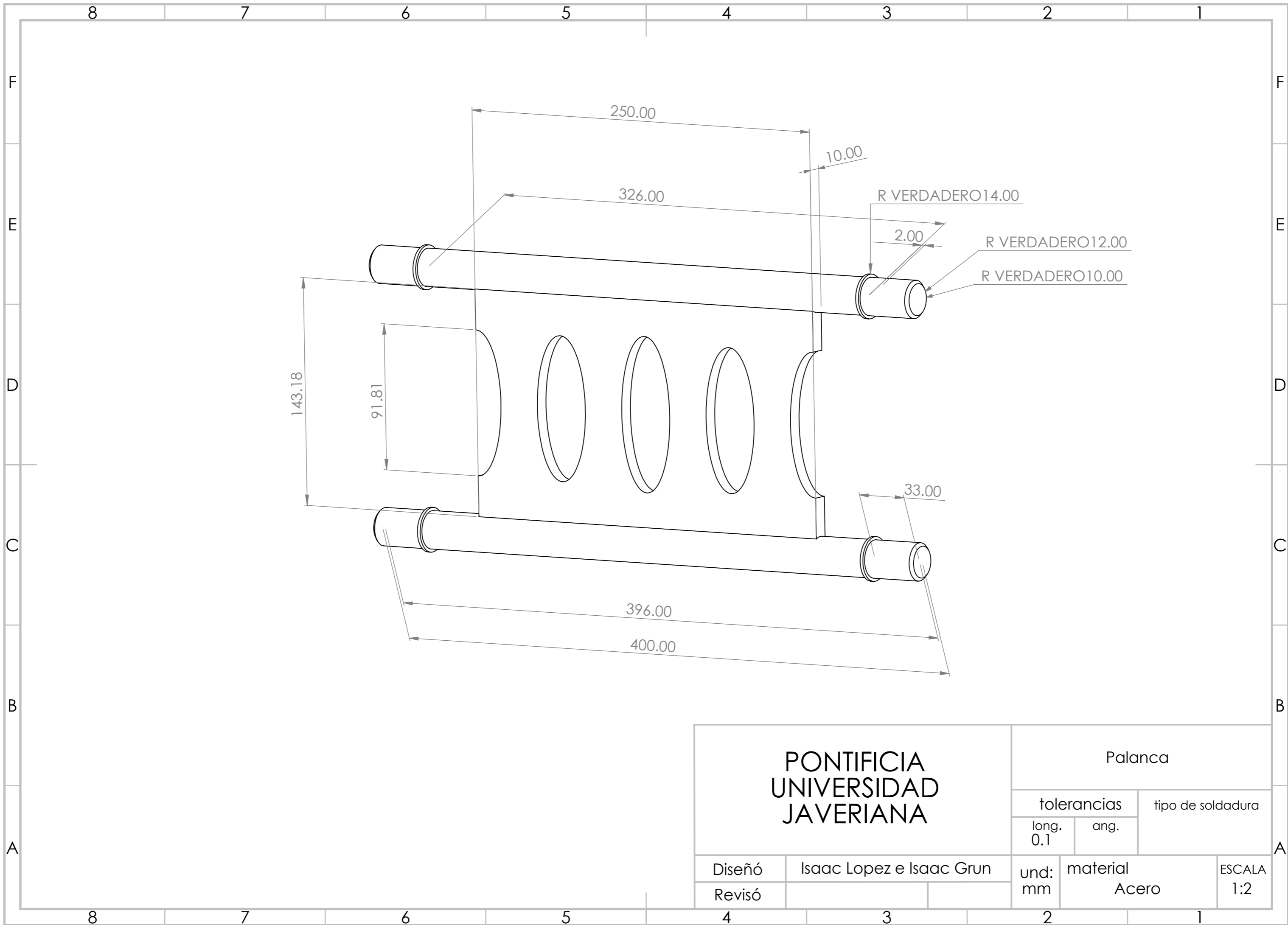
und:	material	ESCALA
mm	Acero	1:7



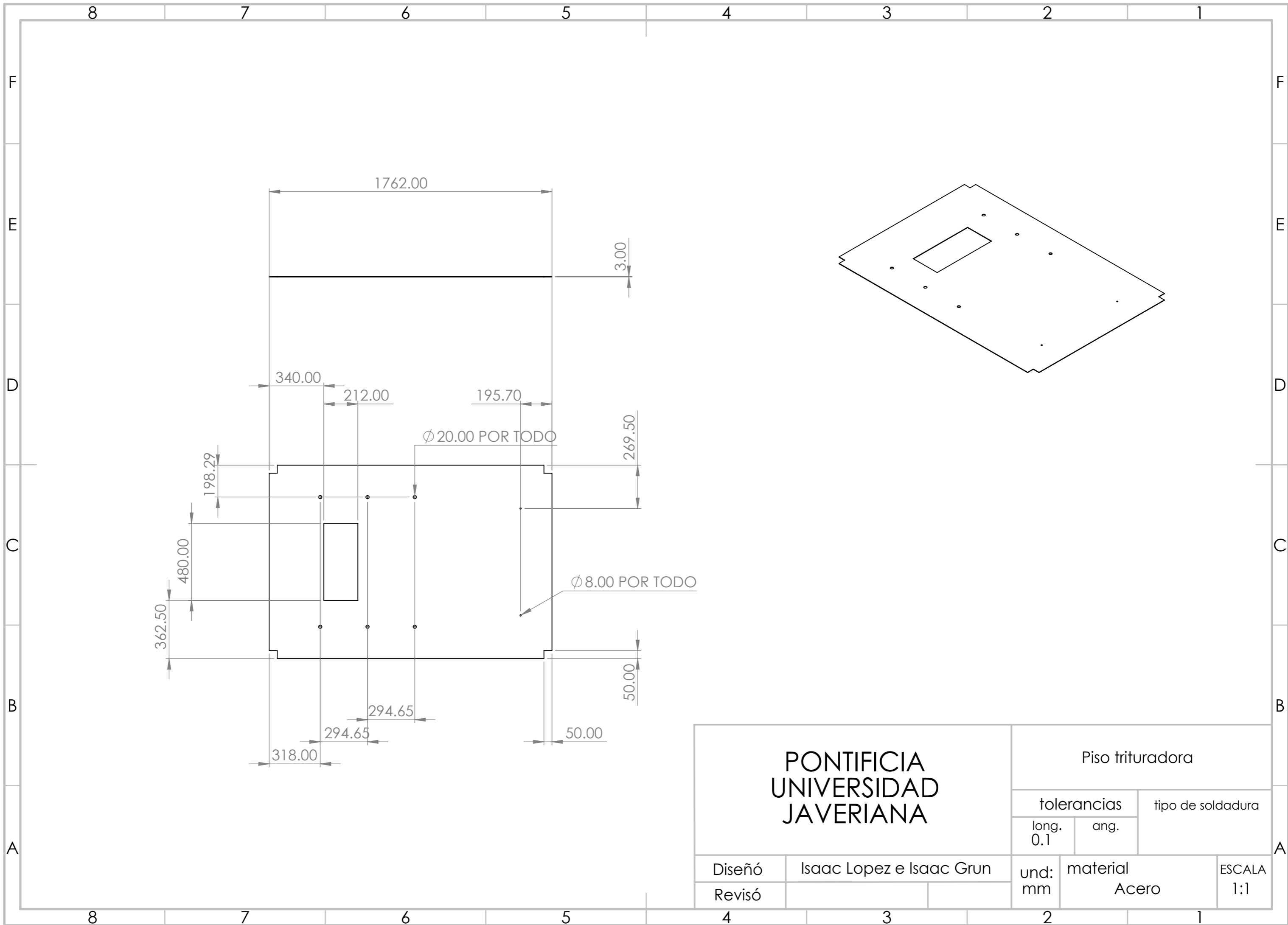
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Muro interno		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1	ang. 0.5°	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und: mm	material Acero	ESCALA 1:5
Revisó				



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Muro izquierdo		
		tolerancias		tipo de soldadura
long. 0.1	ang. 0.5°			
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und: mm	material Acero	ESCALA 1:7
Revisó				



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Palanca		
		tolerancias	tipo de soldadura	
	long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und:	material	ESCALA
Revisó		mm	Acero	1:2



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Piso trituradora

tolerancias

tipo de soldadura

long.
0.1

ang.

Diseño

Isaac Lopez e Isaac Grun

und:

material

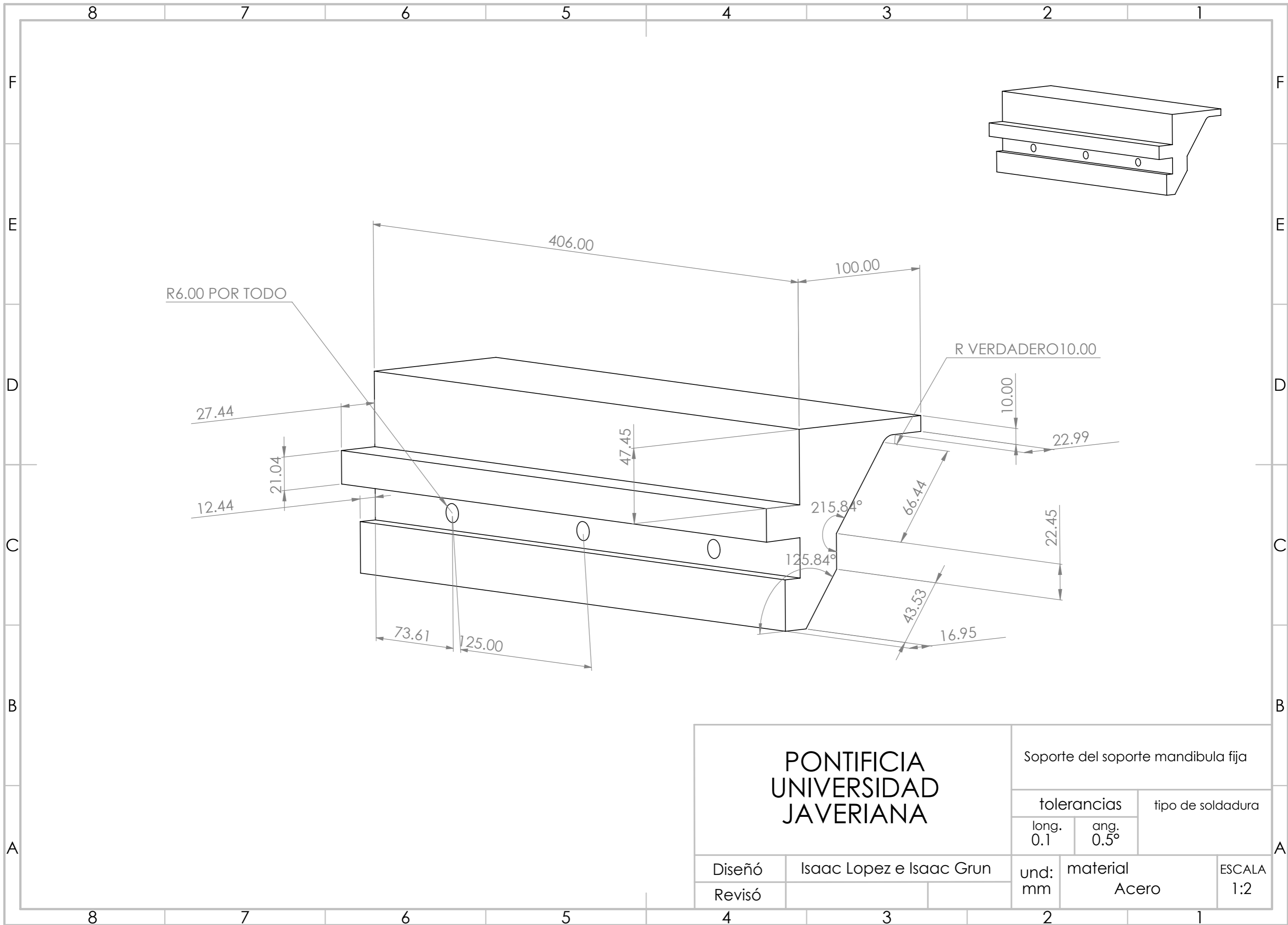
ESCALA

Revisó

mm

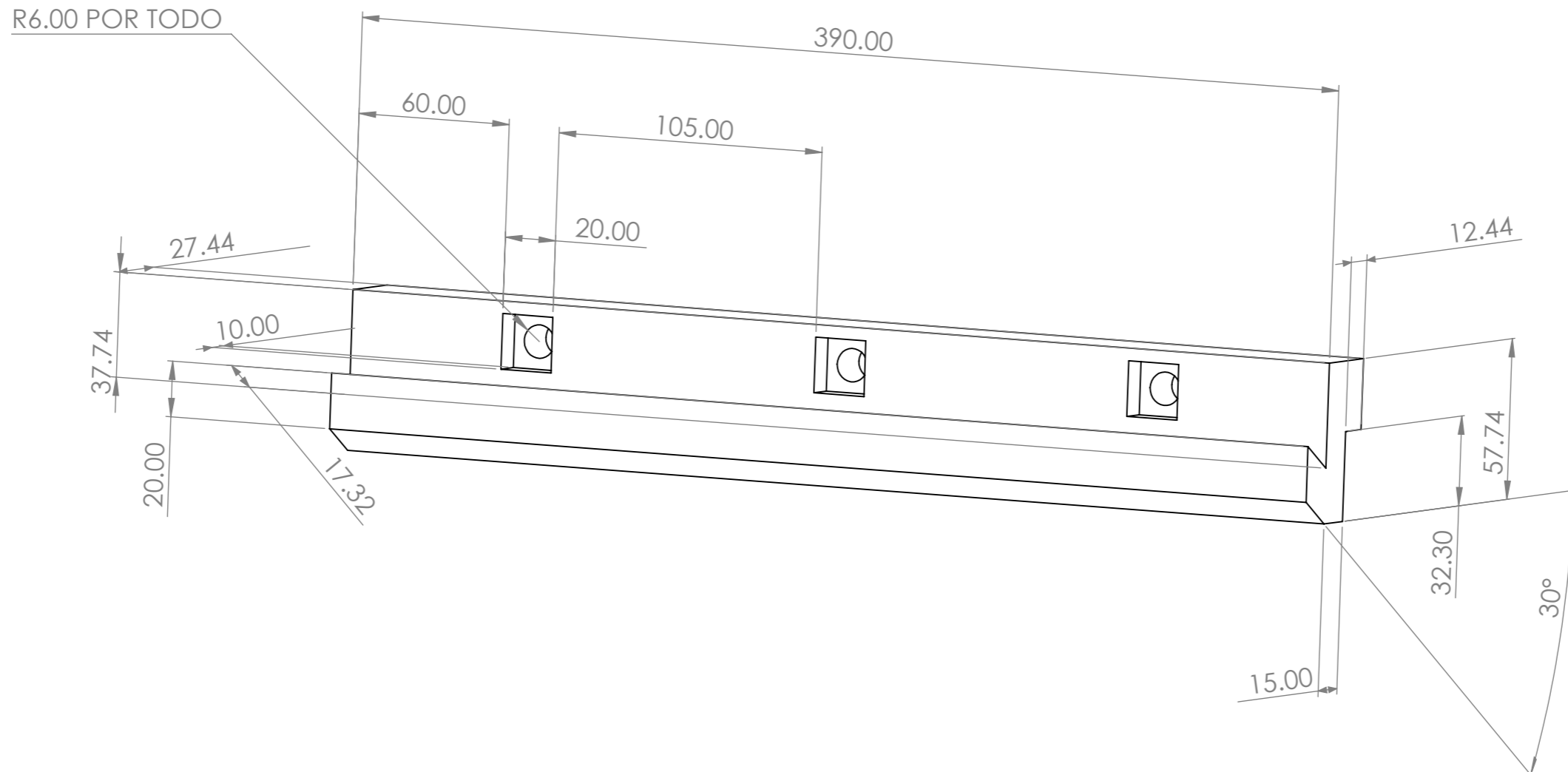
Acero

1:1



<p align="center">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Soporte del soporte mandibula fija		
		tolerancias		tipo de soldadura
long. 0.1	ang. 0.5°			
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und:	material Acero
Revisó			mm	
			ESCALA 1:2	

R6.00 POR TODO



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Soporto mandibula

tolerancias

tipo de soldadura

long.
0.1

ang.
0.5°

Diseño

Isaac Lopez e Isaac Grun

und:

material

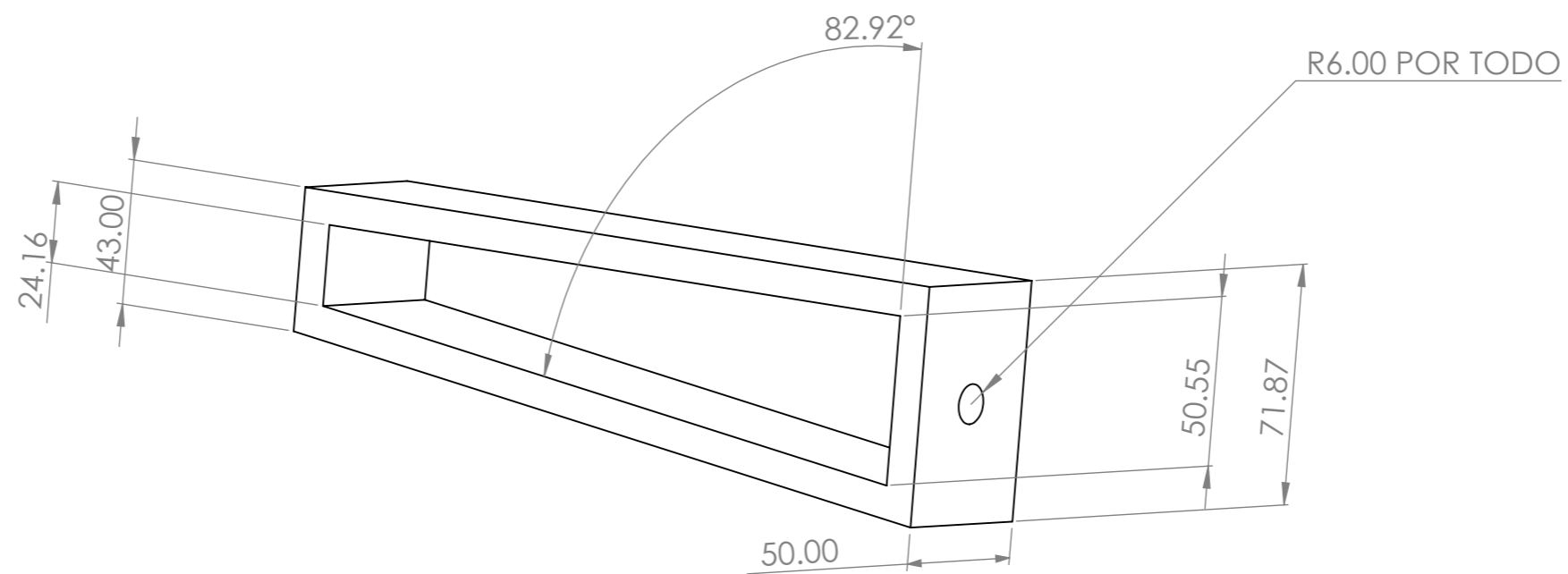
ESCALA

Revisó

mm

Acero

1:2



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Soporte oblicuo de palanca pequeño

tolerancias

tipo de soldadura

long.
0.1

ang.
0.5°

Diseño

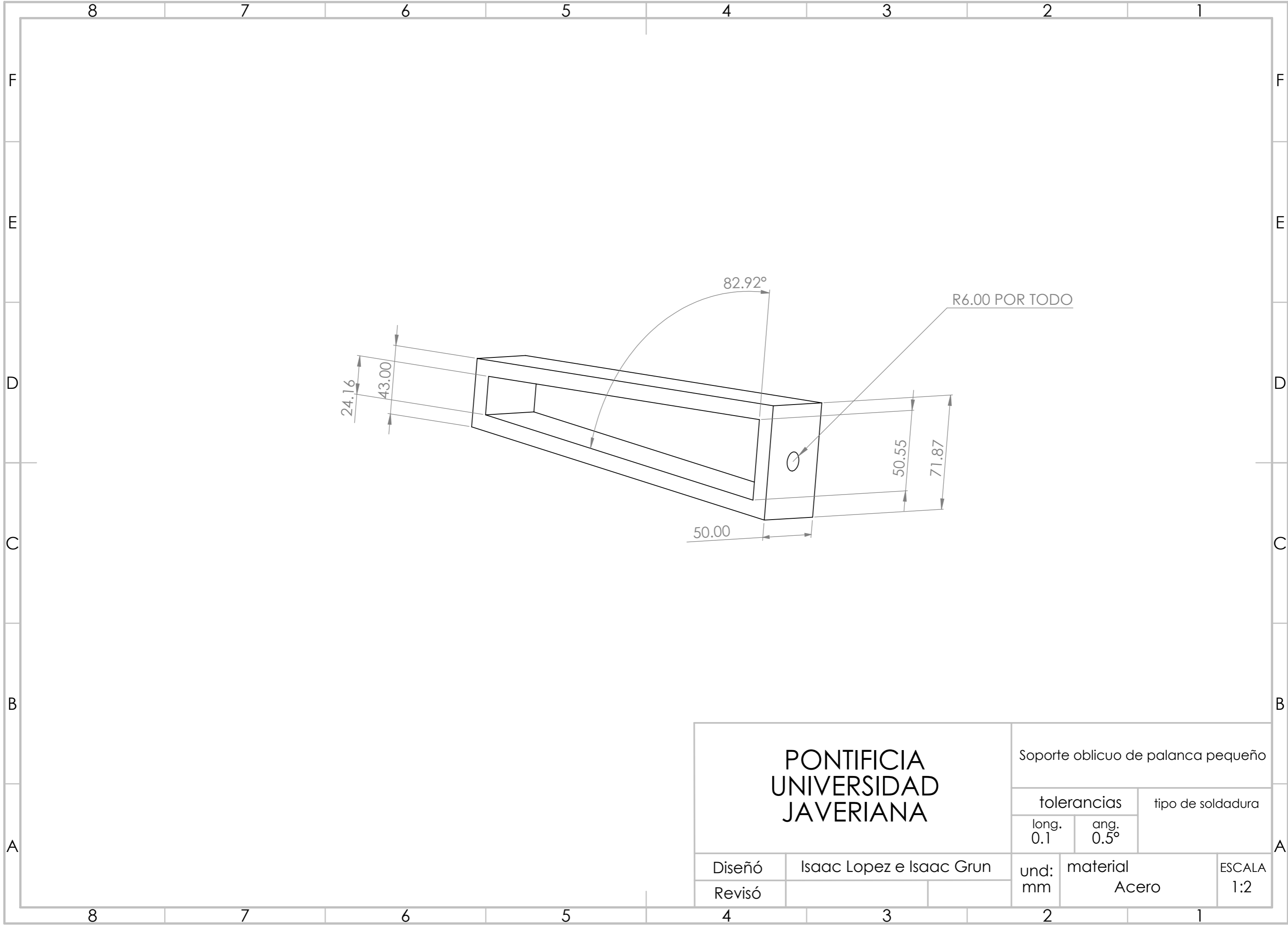
Isaac Lopez e Isaac Grun

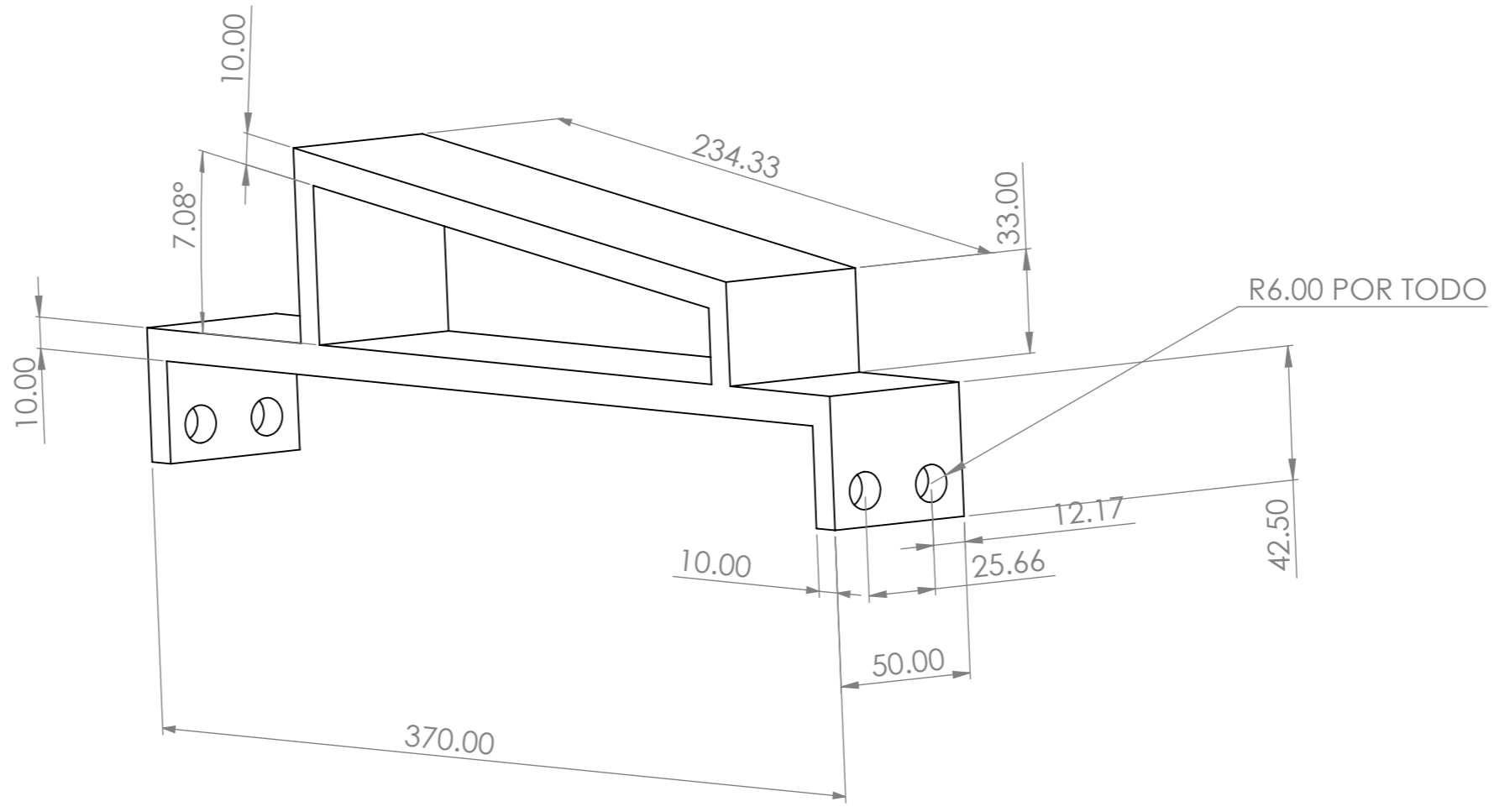
und:
mm

material
Acero

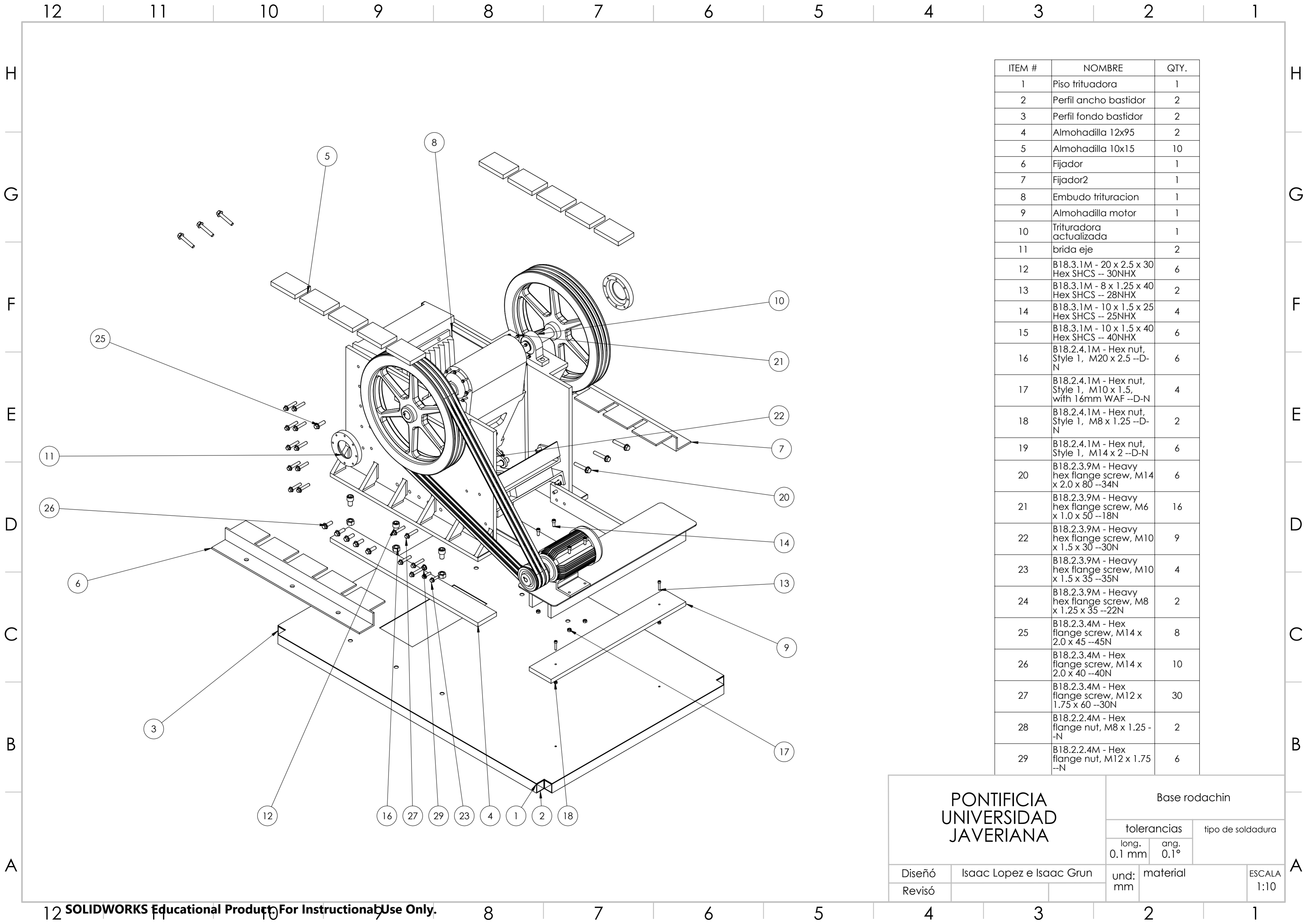
ESCALA
1:2

Revisó



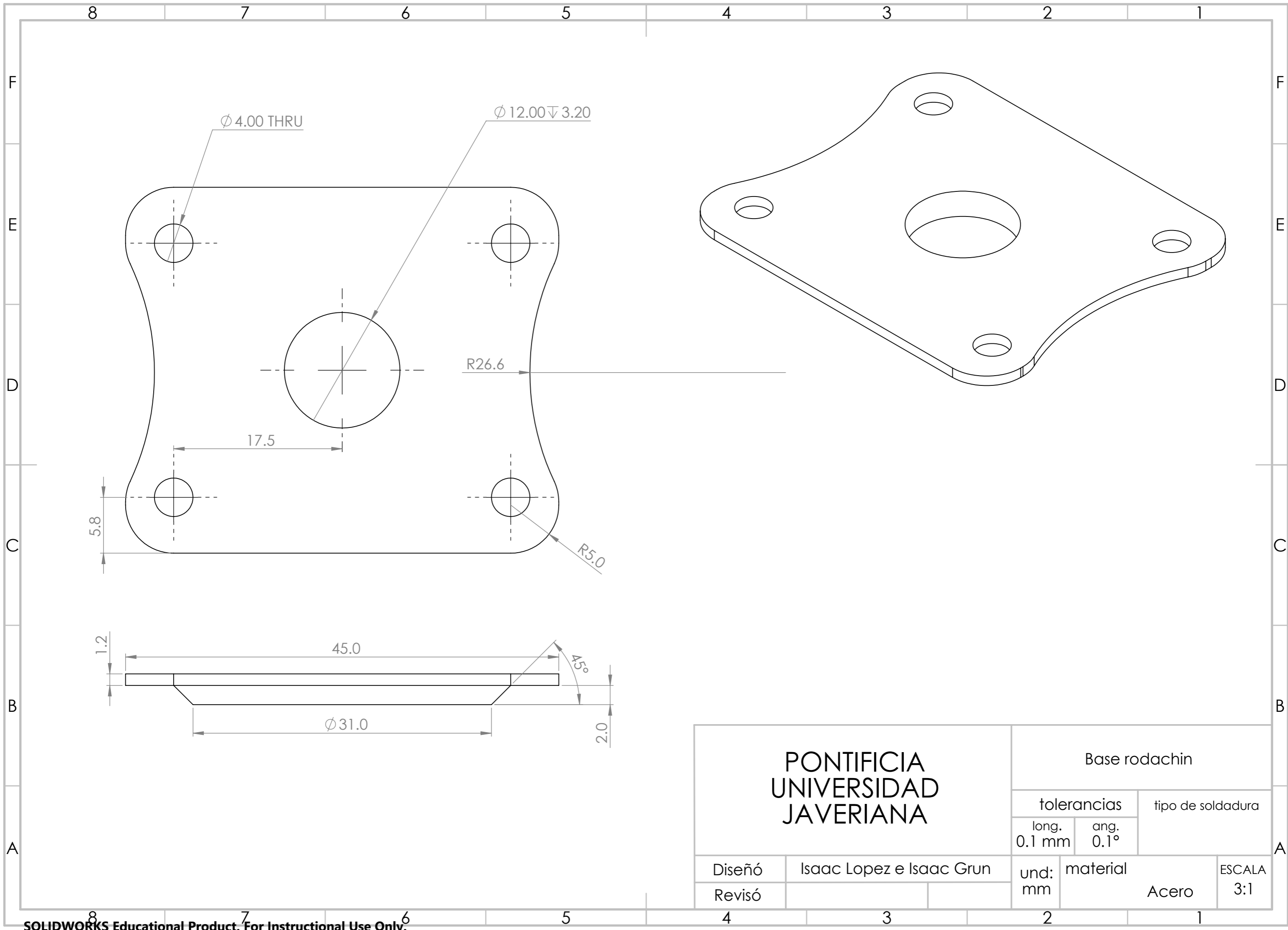


<p align="center">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Soporte oblicuo de palanca		
		tolerancias		tipo de soldadura
Diseño		long. 0.1	ang. 0.5°	
Revisó		und: mm	material Acero	
Isaac Lopez e Isaac Grun				

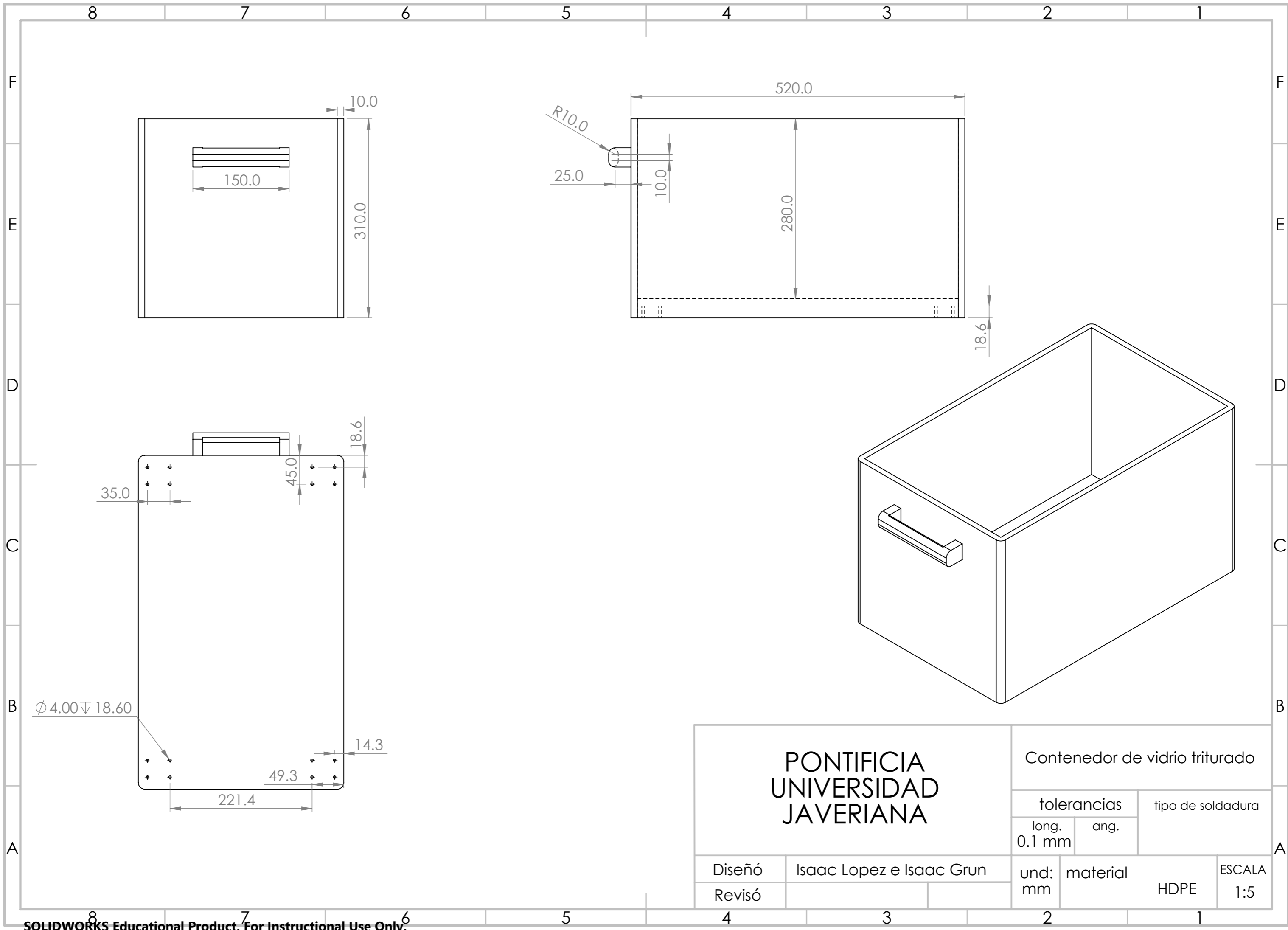


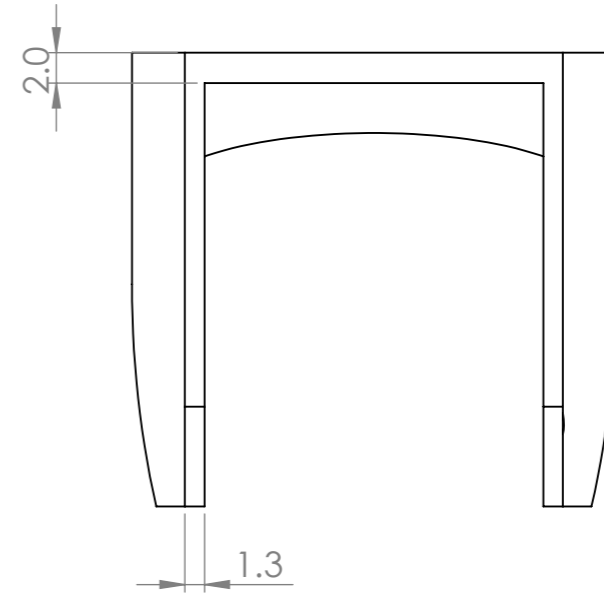
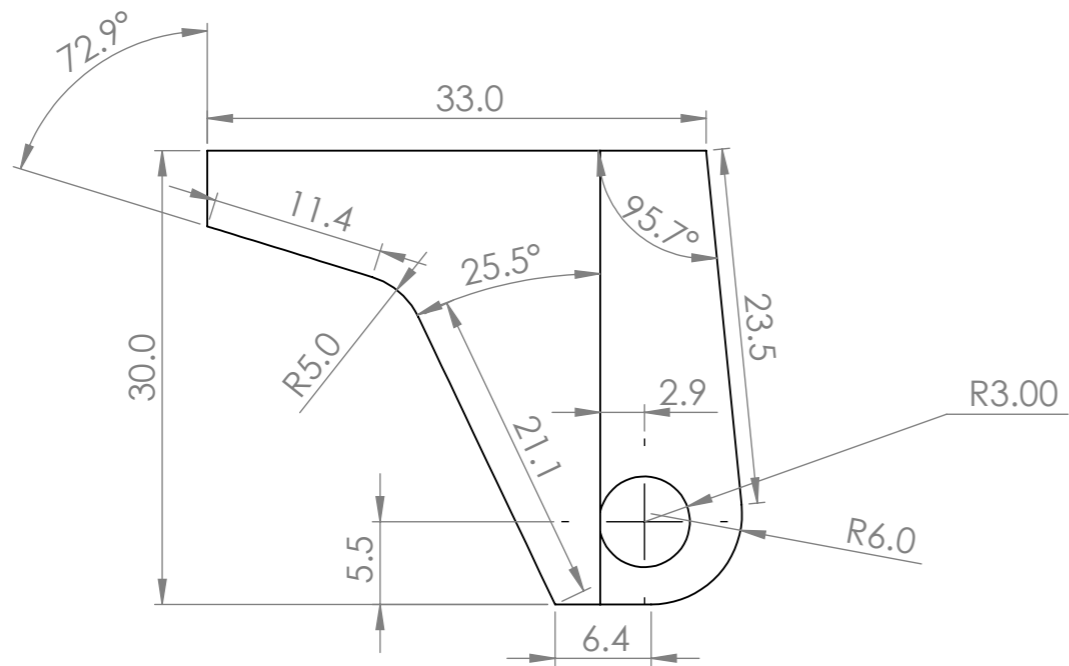
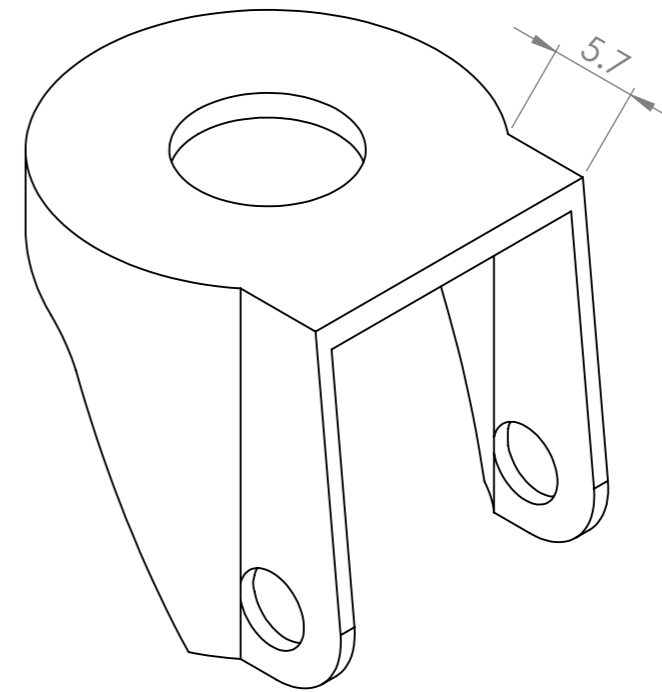
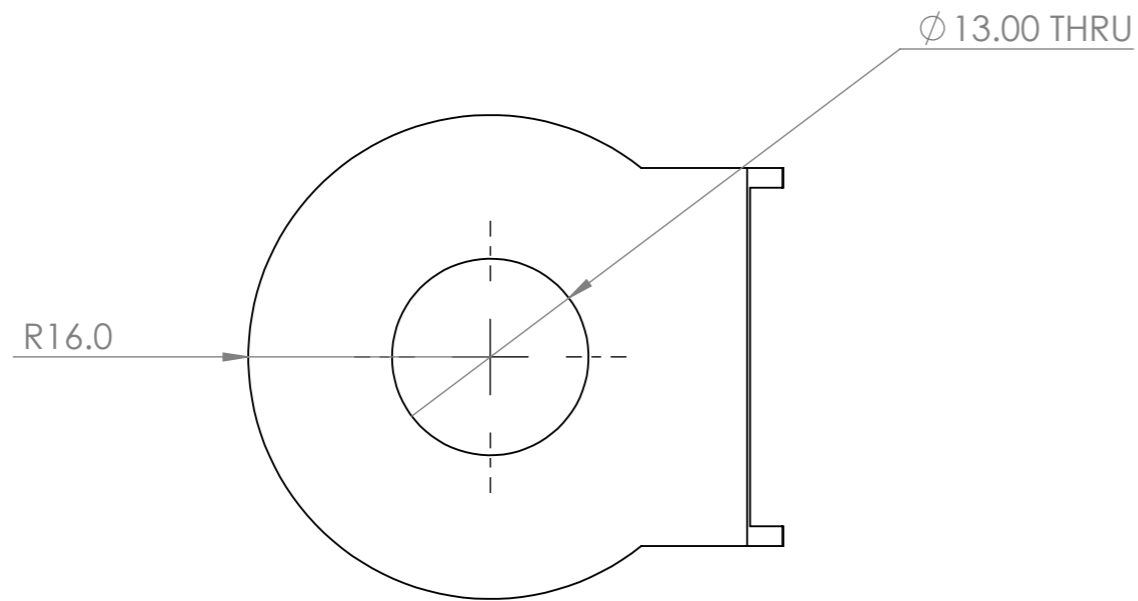
ITEM #	NOMBRE	QTY.
1	Piso trituradora	1
2	Perfil ancho bastidor	2
3	Perfil fondo bastidor	2
4	Almohadilla 12x95	2
5	Almohadilla 10x15	10
6	Fijador	1
7	Fijador2	1
8	Embudo trituracion	1
9	Almohadilla motor	1
10	Trituradora actualizada	1
11	brida eje	2
12	B18.3.1M - 20 x 2.5 x 30 Hex SHCS -- 30NHX	6
13	B18.3.1M - 8 x 1.25 x 40 Hex SHCS -- 28NHX	2
14	B18.3.1M - 10 x 1.5 x 25 Hex SHCS -- 25NHX	4
15	B18.3.1M - 10 x 1.5 x 40 Hex SHCS -- 40NHX	6
16	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M20 x 2.5 --D-N	6
17	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M10 x 1.5, with 16mm WAF --D-N	4
18	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M8 x 1.25 --D-N	2
19	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M14 x 2 --D-N	6
20	B18.2.3.9M - Heavy hex flange screw, M14 x 2.0 x 80 --34N	6
21	B18.2.3.9M - Heavy hex flange screw, M6 x 1.0 x 50 --18N	16
22	B18.2.3.9M - Heavy hex flange screw, M10 x 1.5 x 30 --30N	9
23	B18.2.3.9M - Heavy hex flange screw, M10 x 1.5 x 35 --35N	4
24	B18.2.3.9M - Heavy hex flange screw, M8 x 1.25 x 35 --22N	2
25	B18.2.3.4M - Hex flange screw, M14 x 2.0 x 45 --45N	8
26	B18.2.3.4M - Hex flange screw, M14 x 2.0 x 40 --40N	10
27	B18.2.3.4M - Hex flange screw, M12 x 1.75 x 60 --30N	30
28	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M8 x 1.25 --N	2
29	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M12 x 1.75 --N	6

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Base rodachin		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1 mm	ang. 0.1°	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und: mm	material	ESCALA 1:10
Revisó				



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Base rodachin			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1 mm	ang. 0.1°		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 3:1
Revisó					





PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Cuerpo rodachin

tolerancias

tipo de soldadura

long.
0.1 mm

ang.
0.1°

Diseño

Isaac Lopez e Isaac Grun

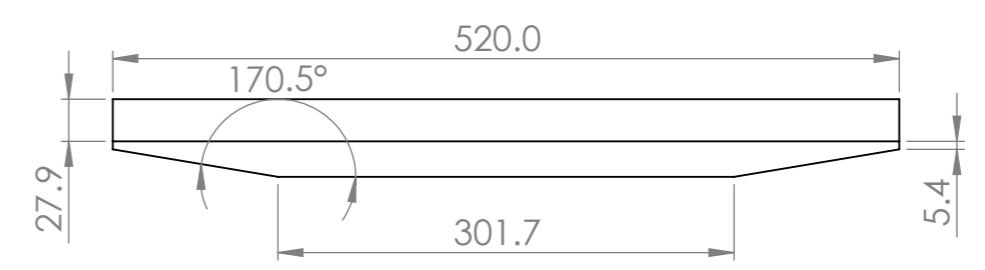
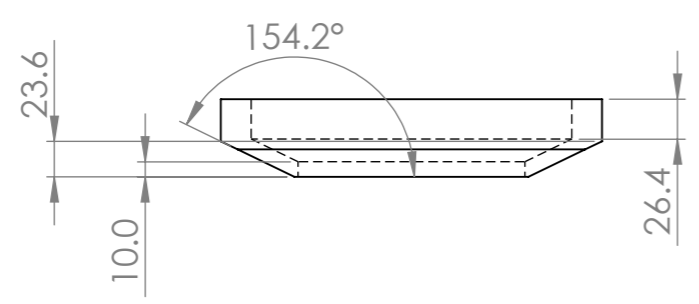
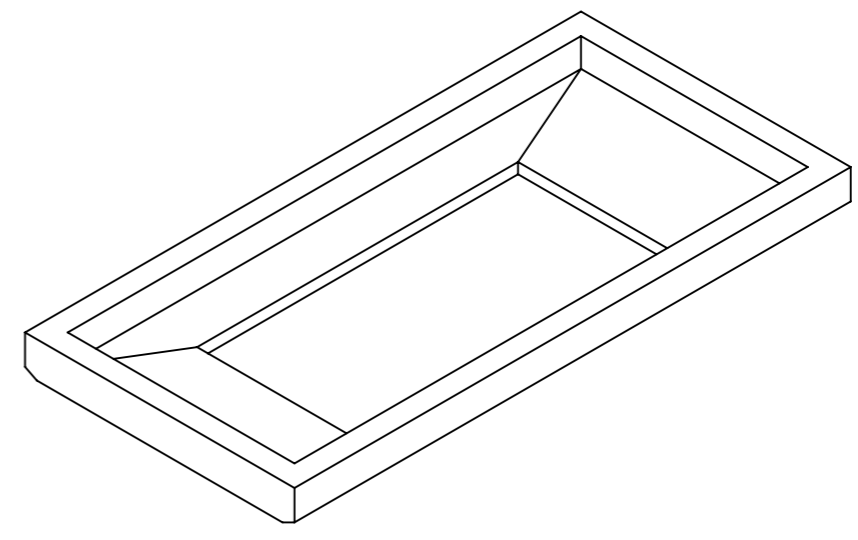
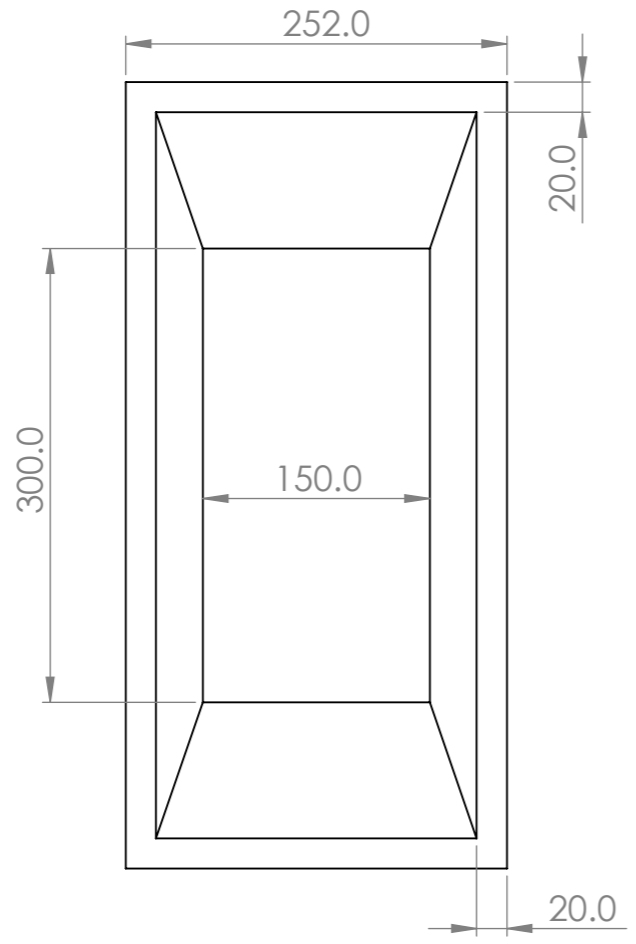
und:
mm

material

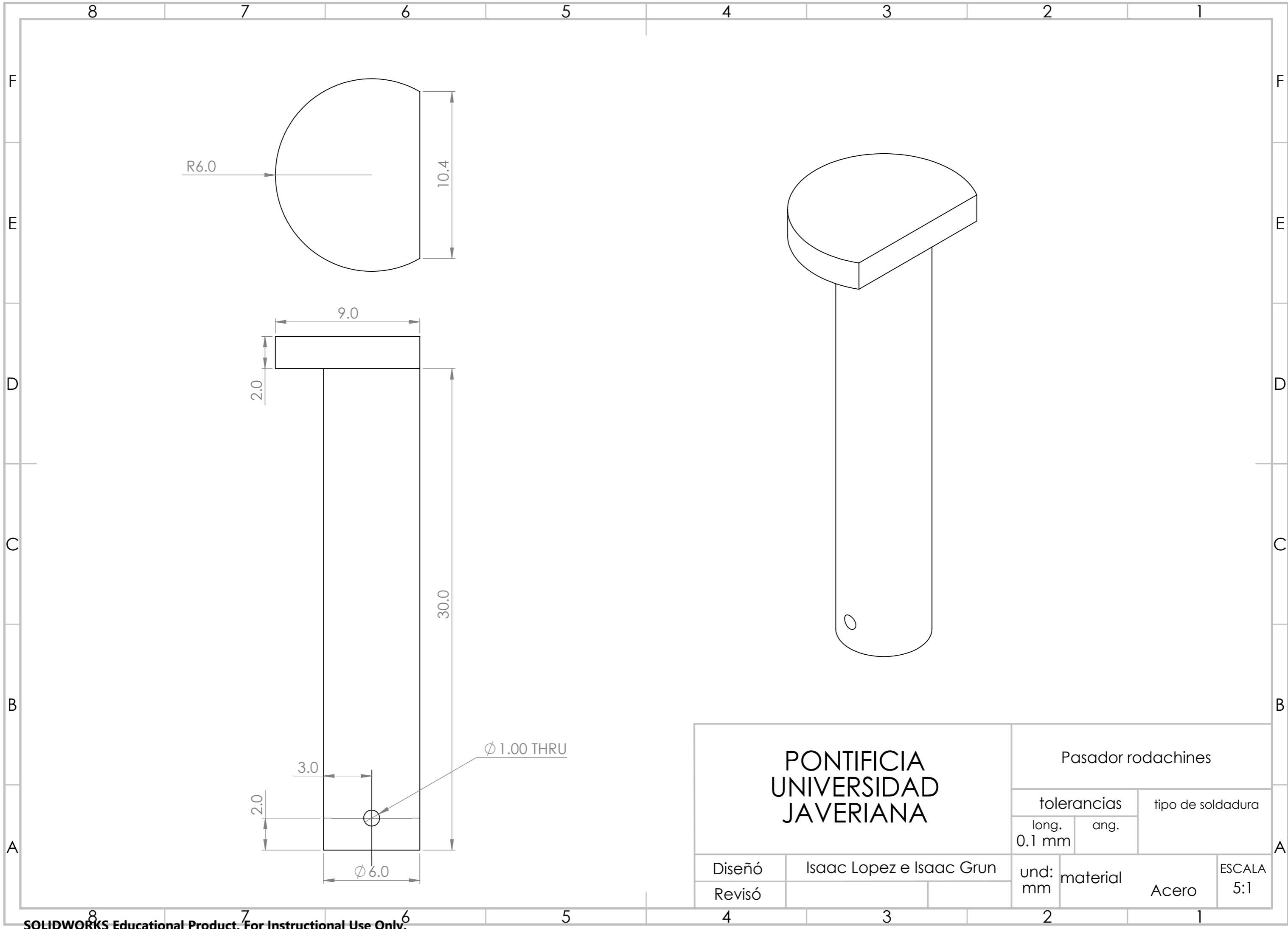
Acero

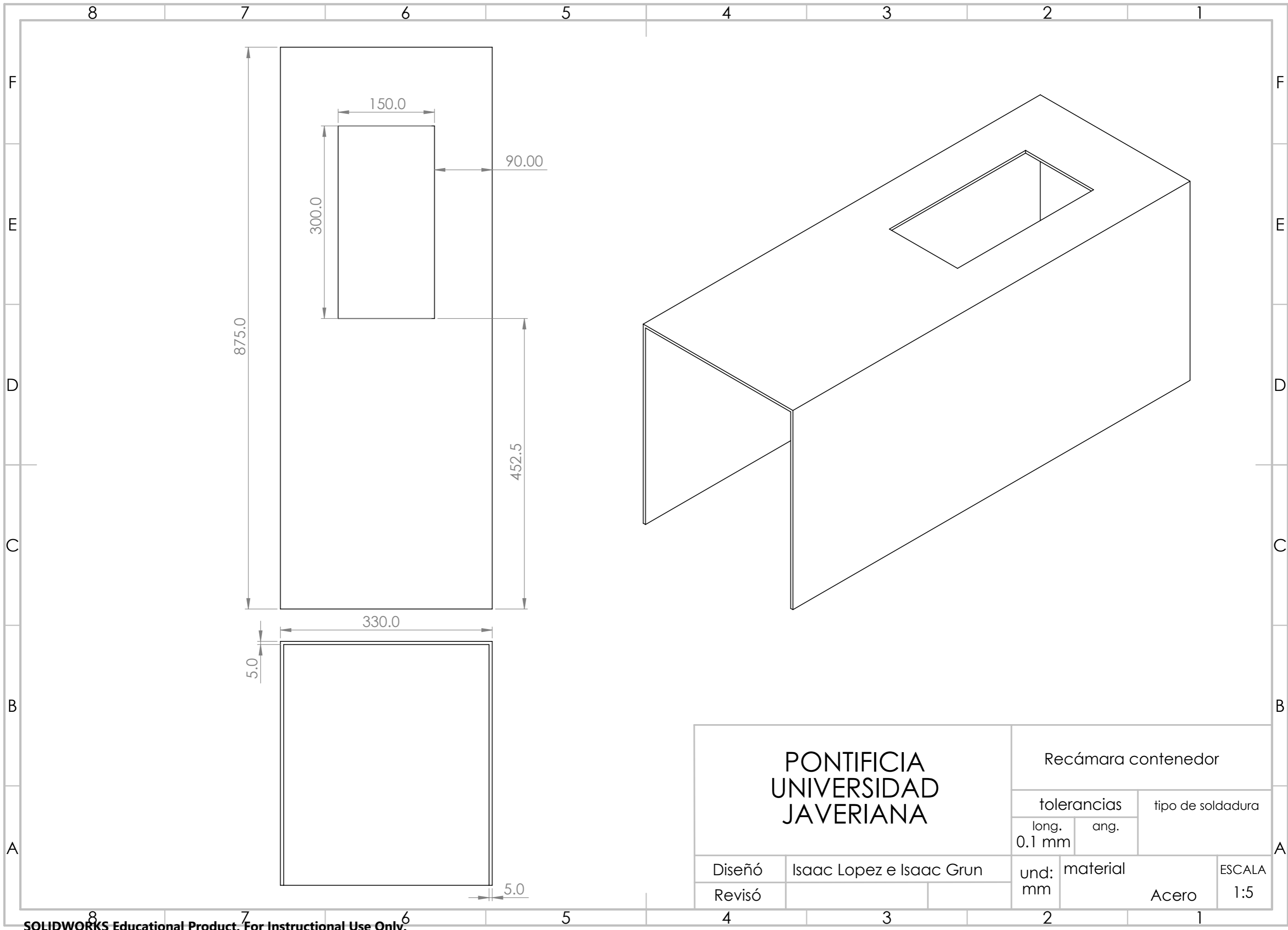
ESCALA

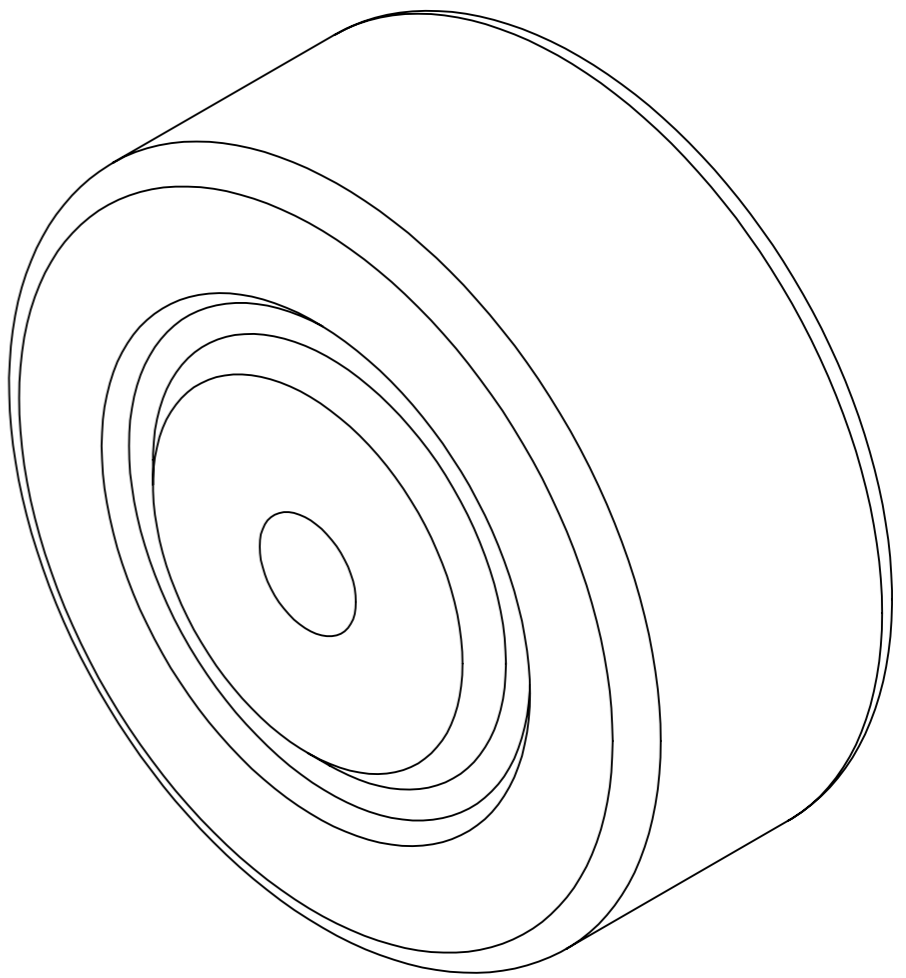
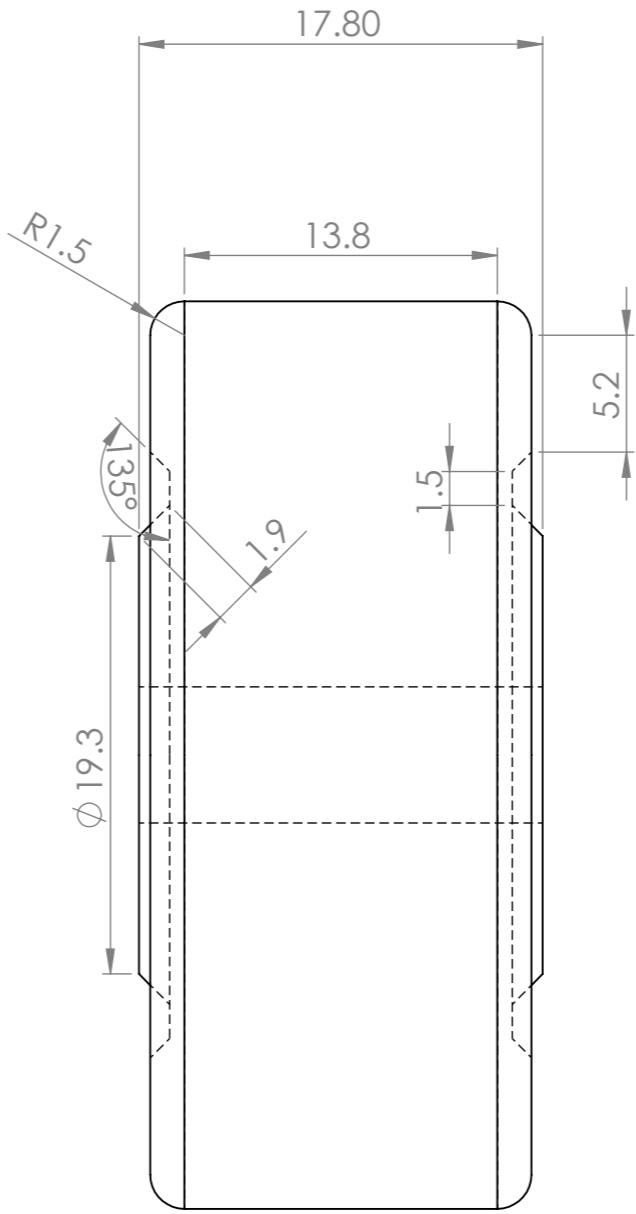
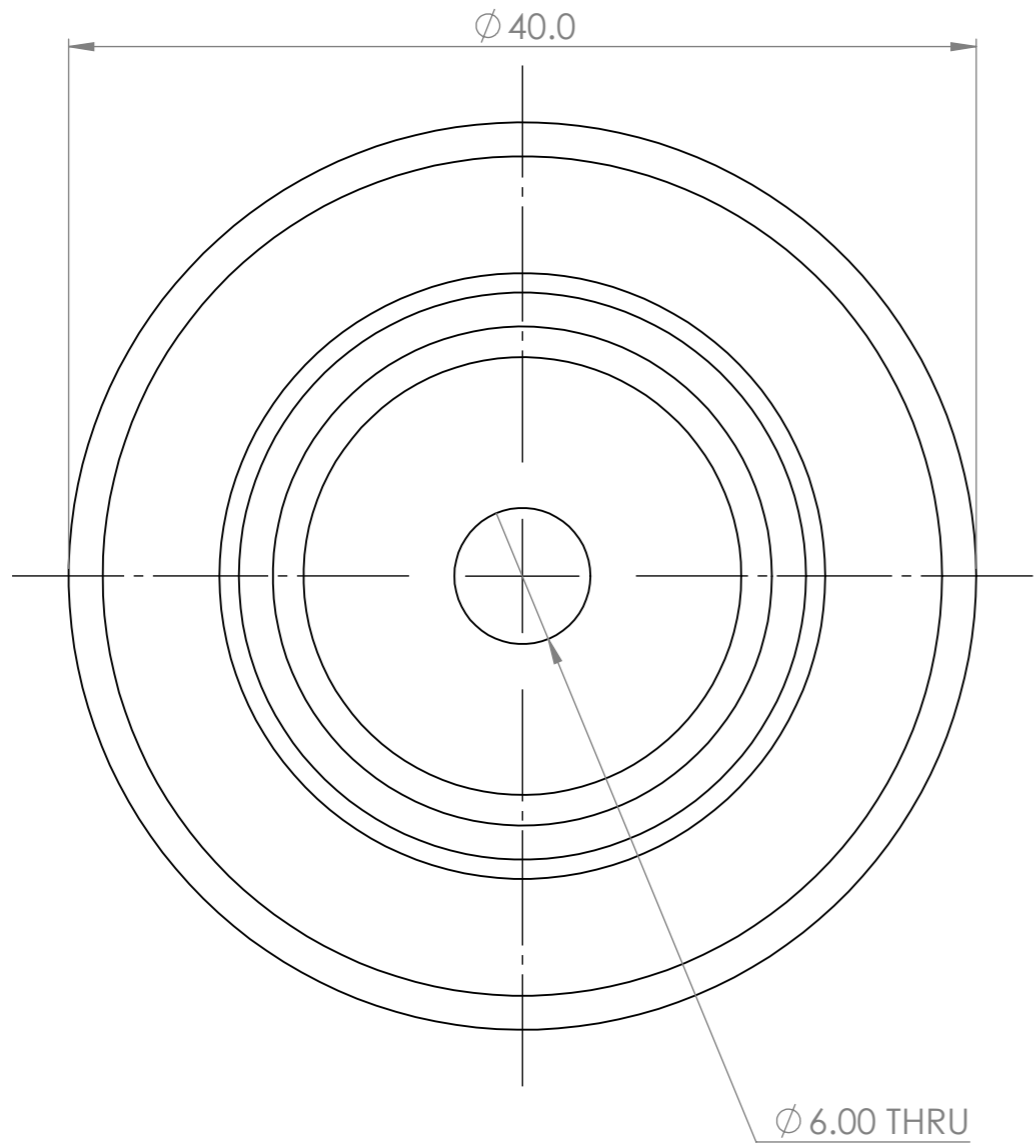
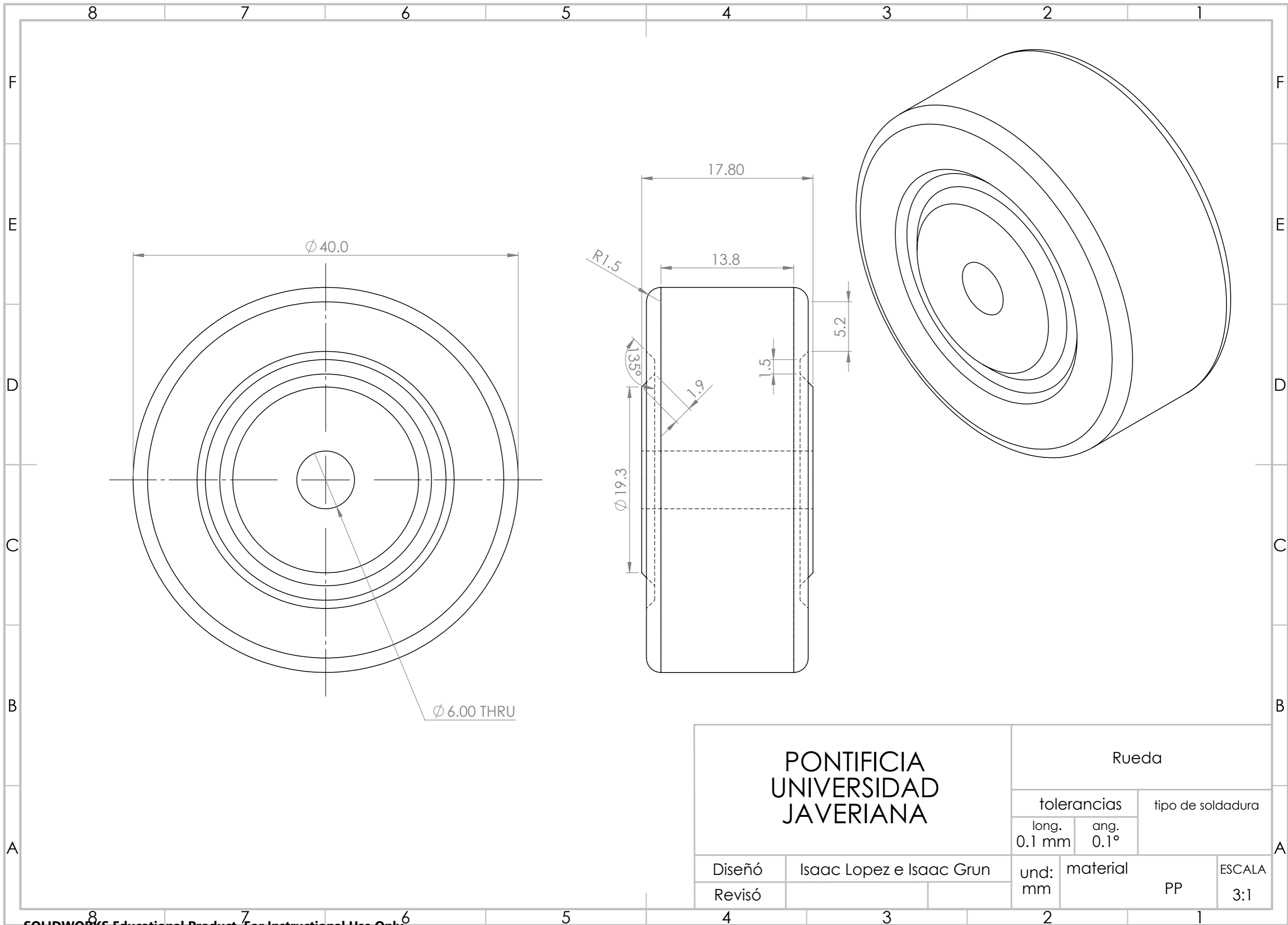
2:1



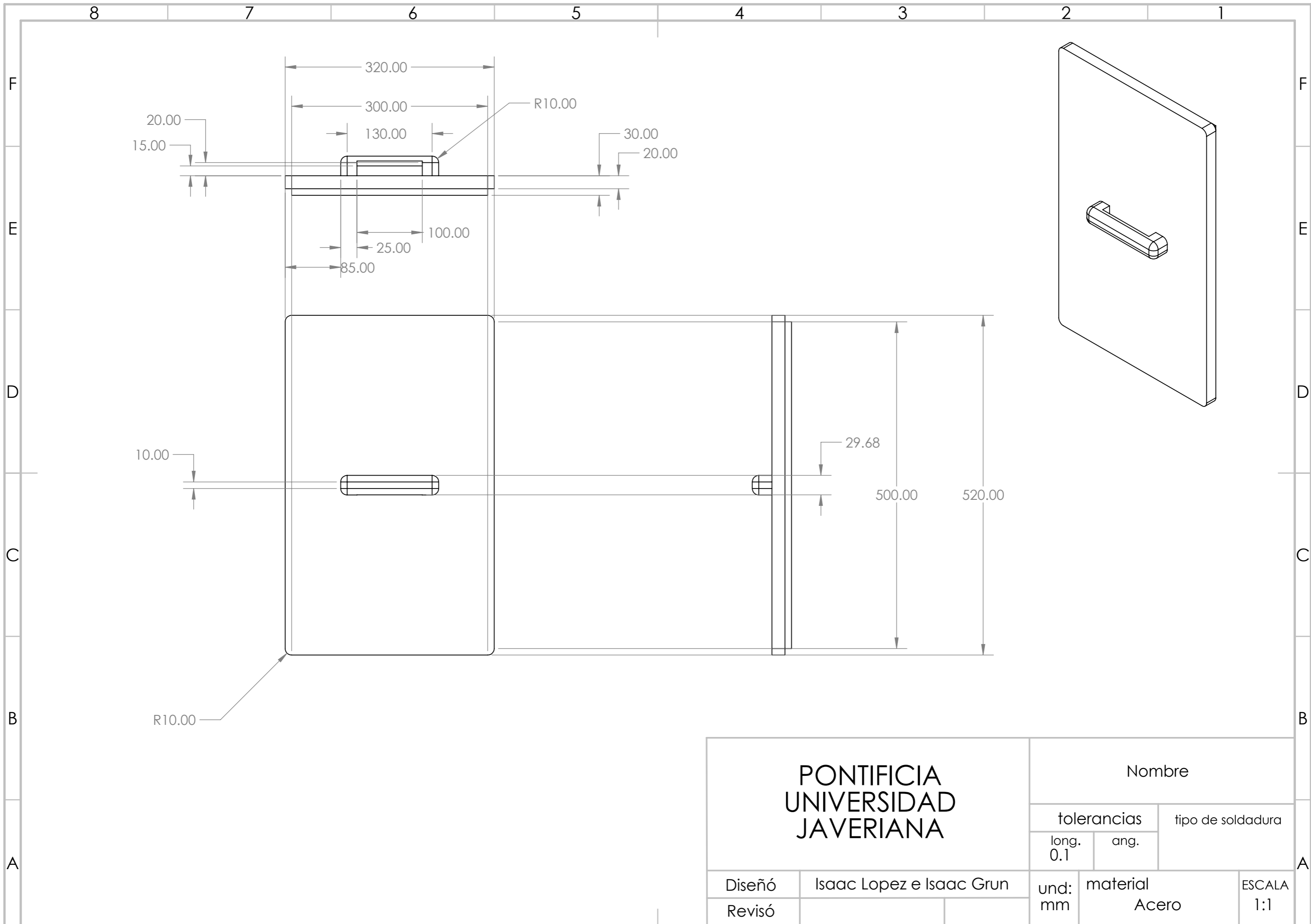
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Embudo contenedor		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1 mm	ang. 0.1°	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material
Revisó				Acero
				ESCALA 1:5







PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Rueda		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1 mm	ang. 0.1°	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material
Revisó				PP
				ESCALA 3:1



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Nombre			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:1
Revisó					

8 7 6 5 4 3 2 1

F F

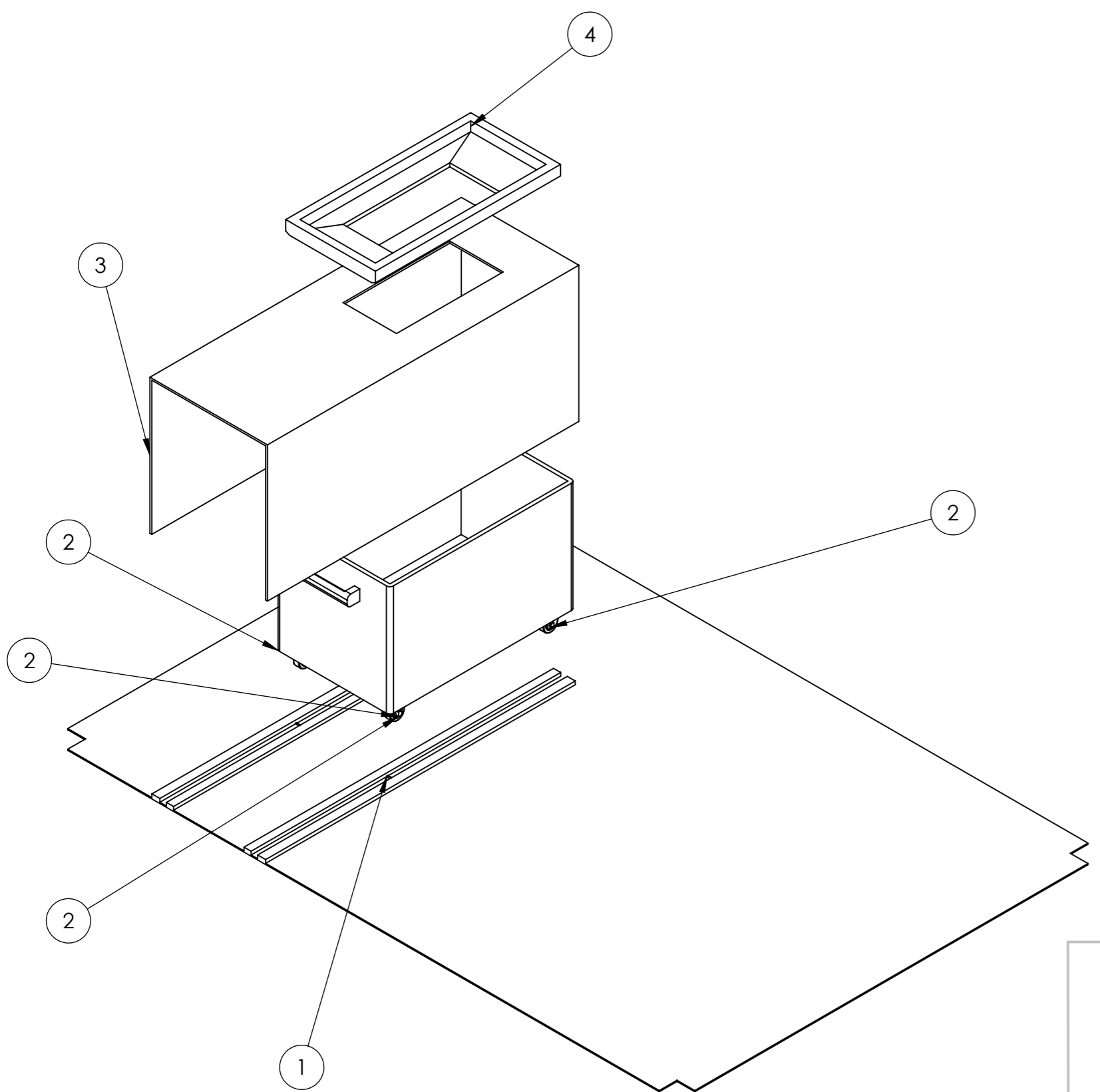
E E

D D

C C

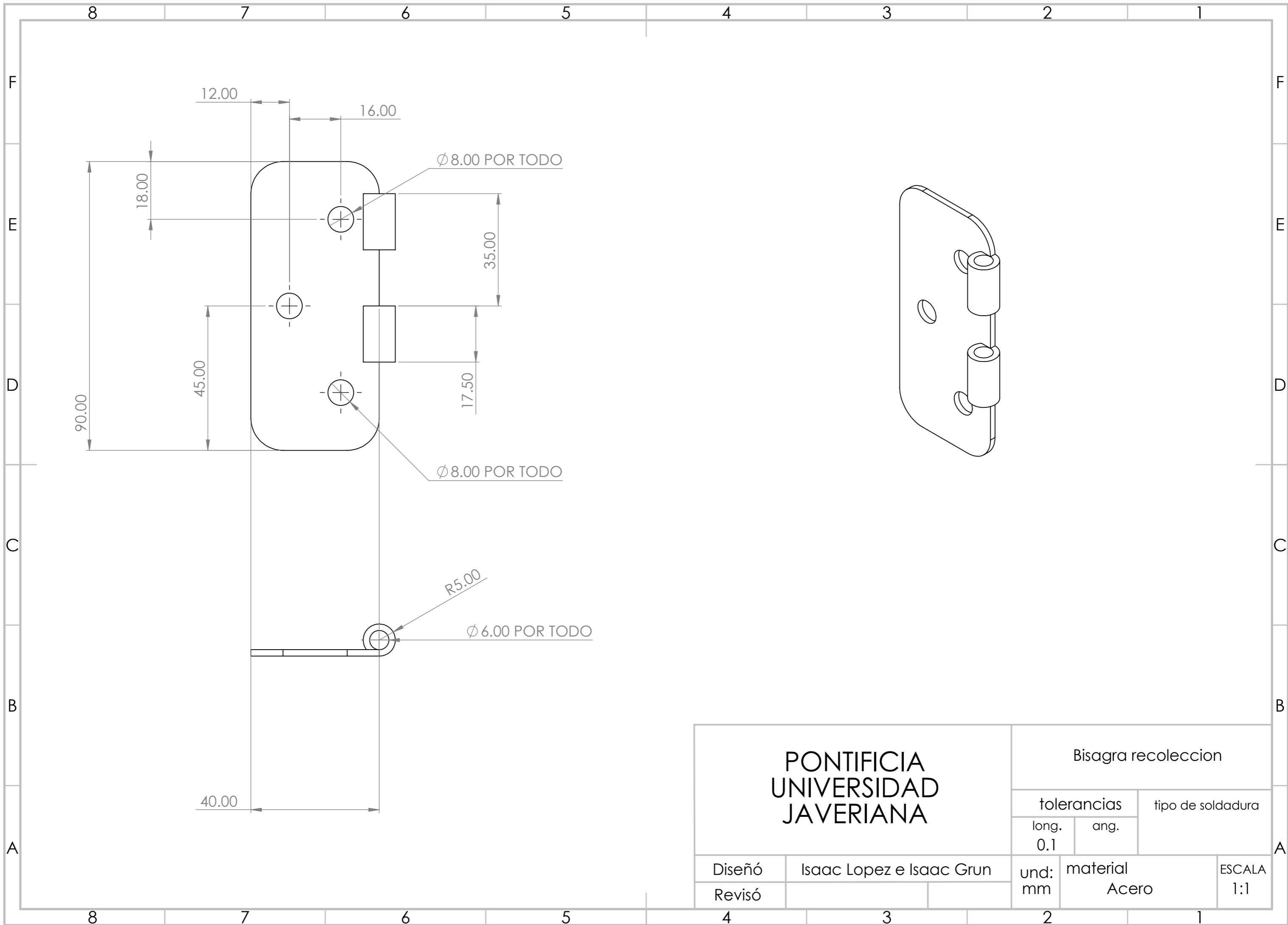
B B

A A

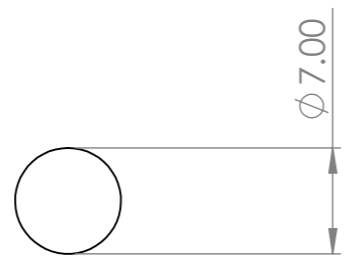


ITEM #	NOMBRE	QTY.
1	Piso	1
2	Deposito vidrio triturado	1
3	Recamara	1
4	Embudo almacenamiento	1

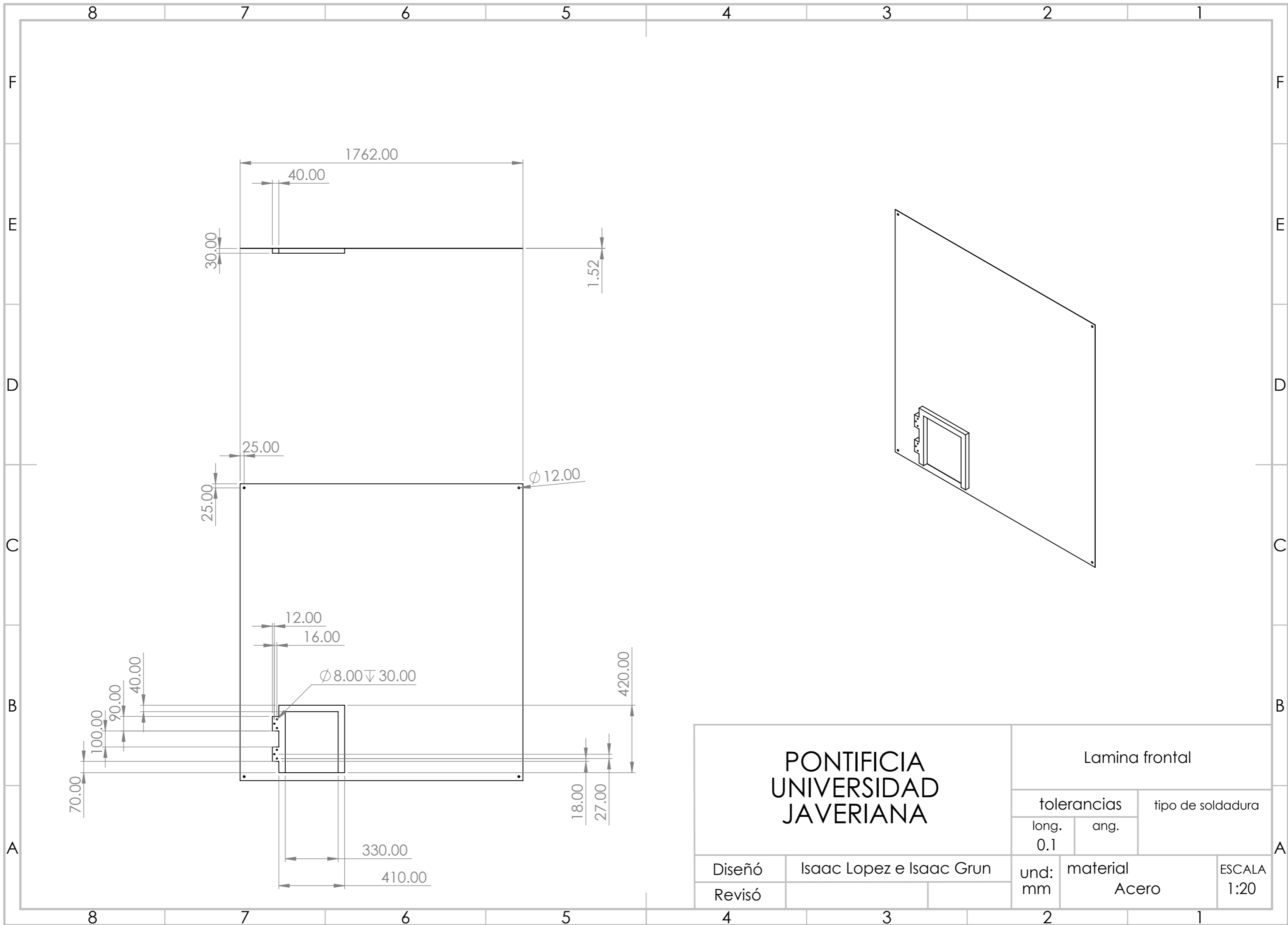
<p>PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Almacenamiento			
		tolerancias		tipo de soldadura	
	long. 0.1 mm	ang. 0.1°			
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material	ESCALA 3:1
Revisó					



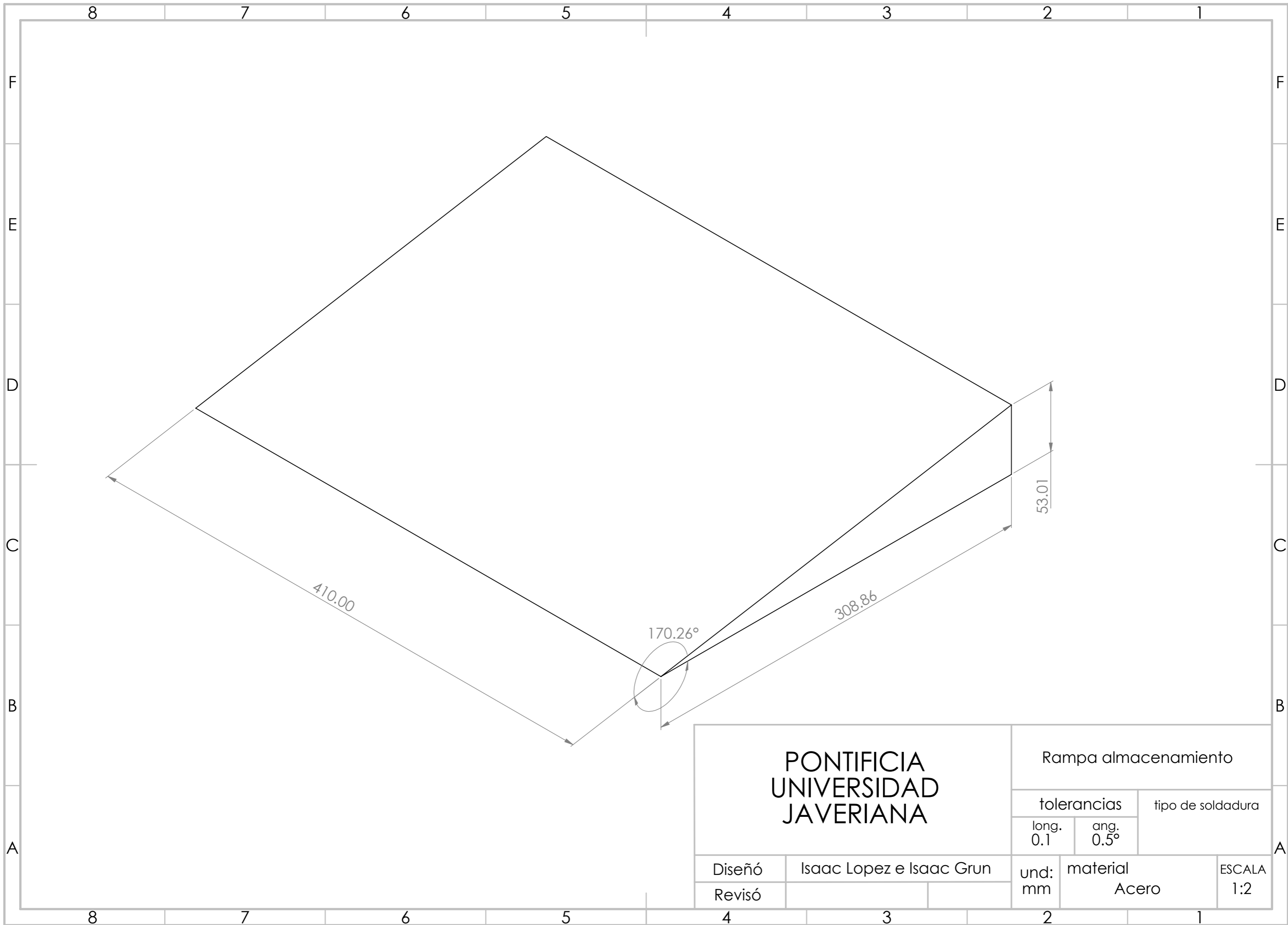
<p style="text-align: center;">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Bisagra recoleccion						
		<table border="1"> <tr> <td colspan="2">tolerancias</td> <td rowspan="2">tipo de soldadura</td> </tr> <tr> <td>long. 0.1</td> <td>ang.</td> </tr> </table>		tolerancias		tipo de soldadura	long. 0.1	ang.
tolerancias		tipo de soldadura						
long. 0.1	ang.							
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und:	material Acero	ESCALA 1:1			
Revisó			mm					



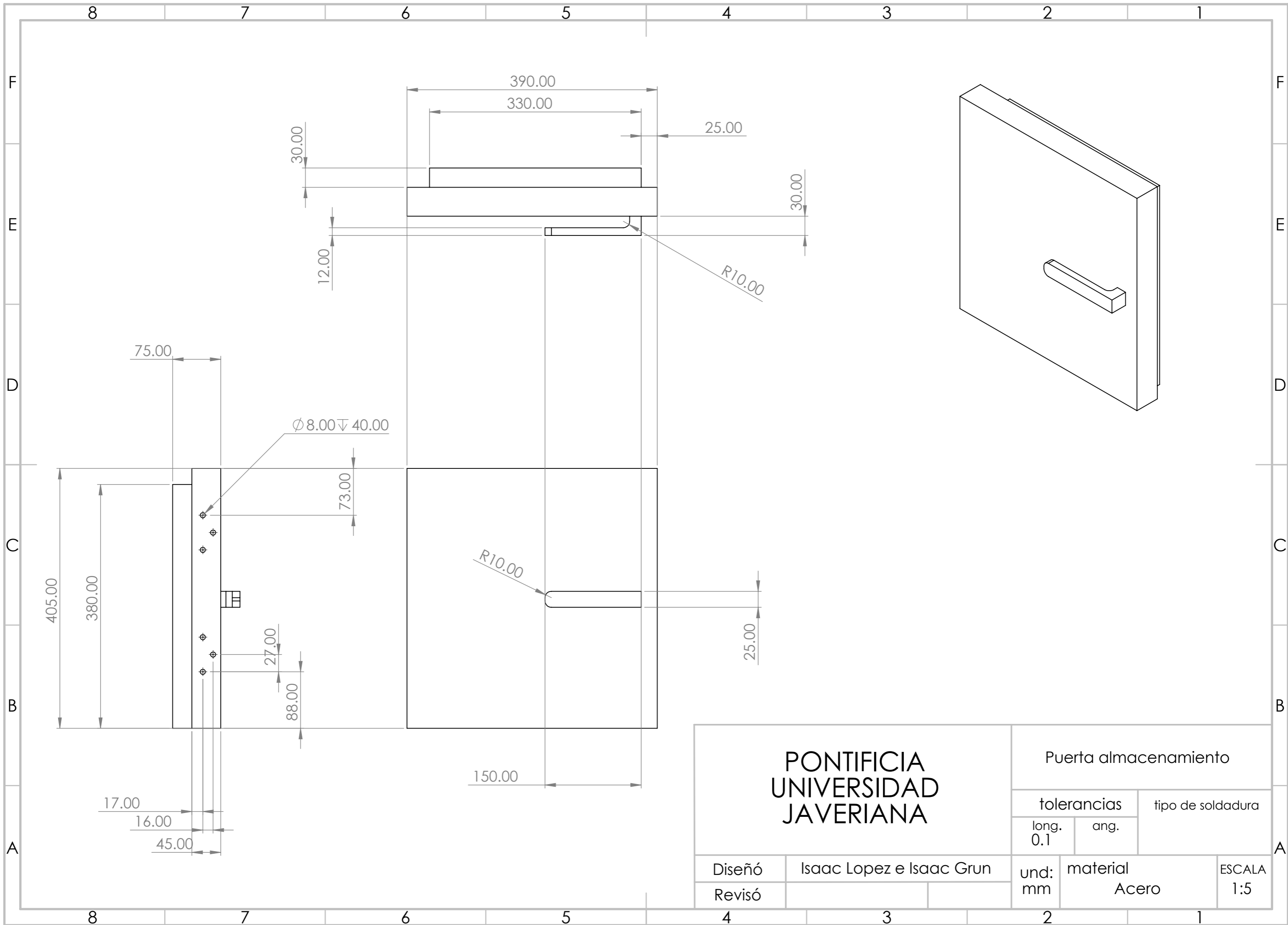
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Pasador bisagra puerta		
		tolerancias	tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und:	material
Revisó			mm	Acero
				ESCALA 2:1



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Lamina frontal		
		tolerancias		tipo de soldadura
Diseño		long.	ang.	
Revisó		0.1		
Isaac Lopez e Isaac Grun		und:	material	ESCALA 1:20
		mm	Acero	



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Rampa almacenamiento			
		tolerancias		tipo de soldadura	
long. 0.1	ang. 0.5°				
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:2
Revisó					



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Puerta almacenamiento		
		tolerancias		tipo de soldadura
Diseño		long. 0.1	ang.	
Revisó		material Acero		
Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm		

8 7 6 5 4 3 2 1

F F

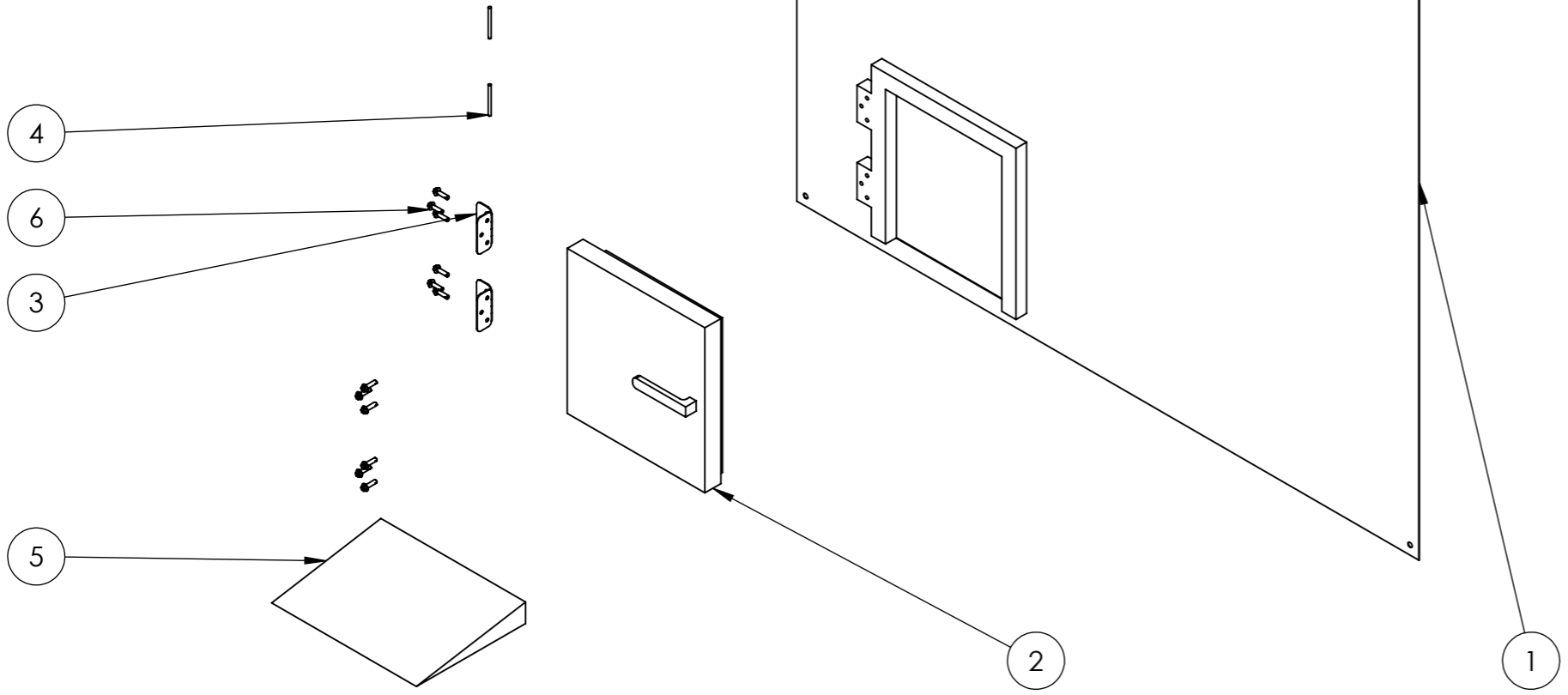
E E

D D

C C

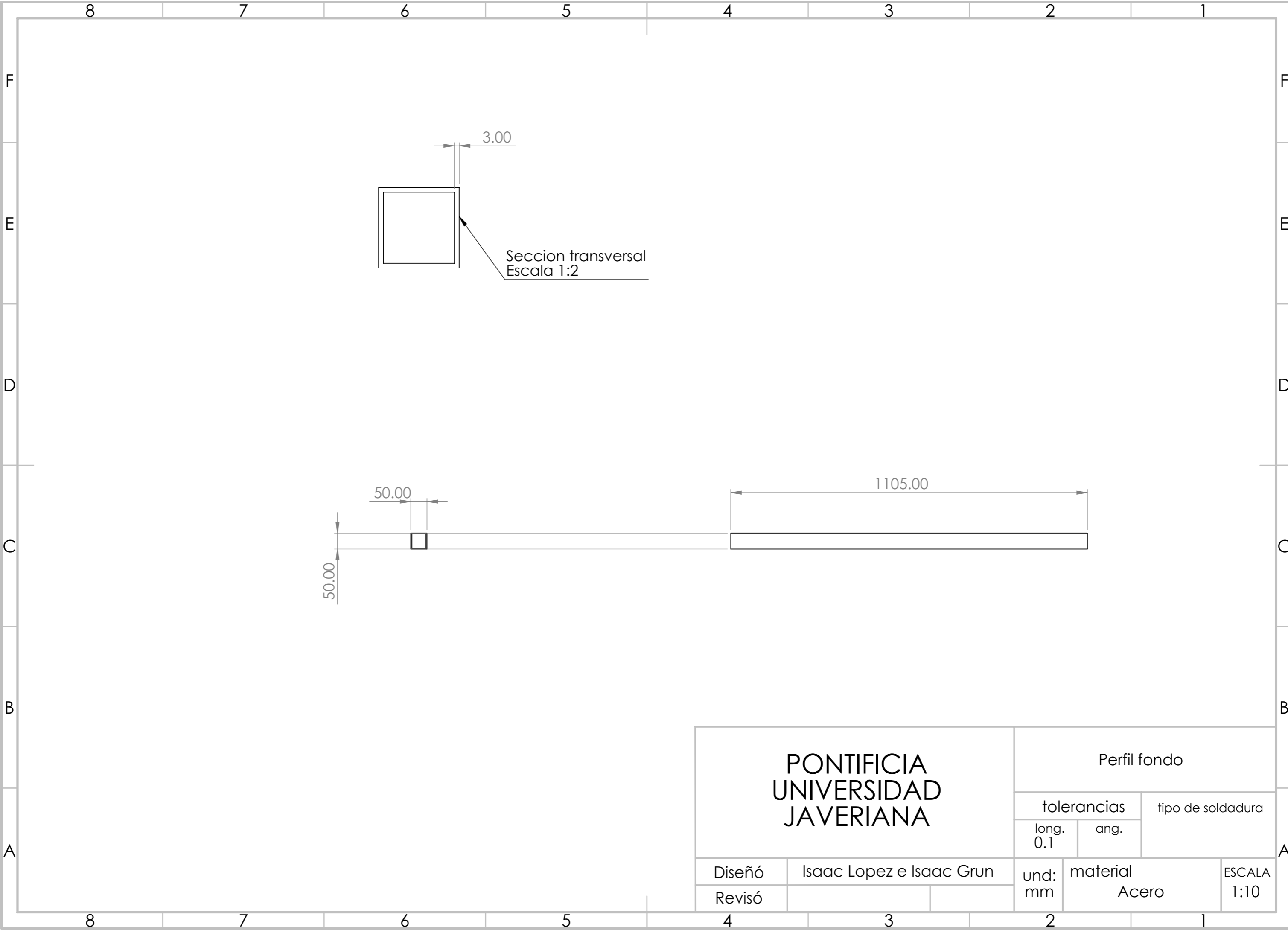
B B

A A

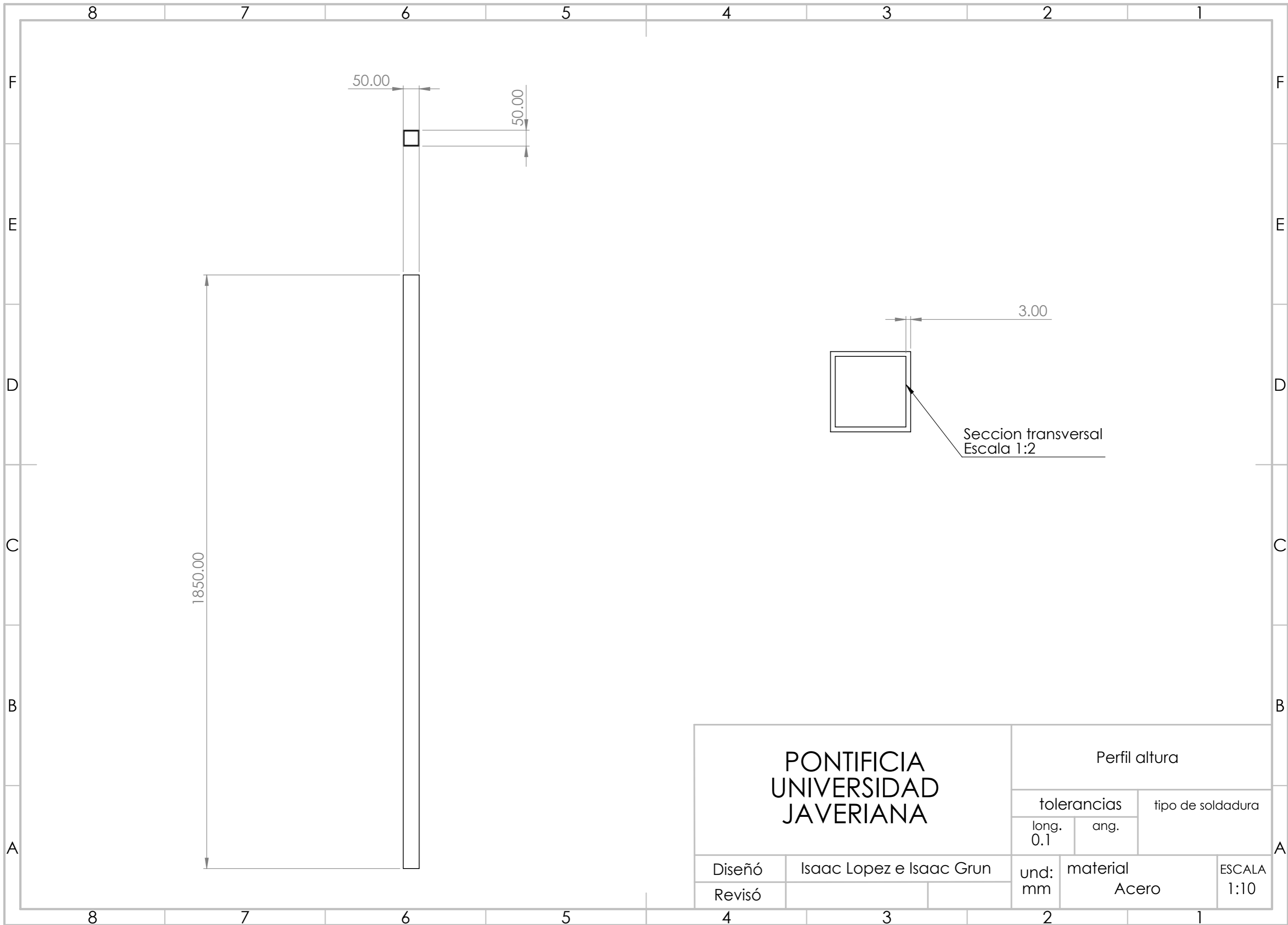


ITEM #	NOMBRE	QTY.
1	Lamina frontal	1
2	Puerta almacenamiento	1
3	Bisagra	4
4	Pasador bisagra	2
5	Rampa	1
6	HEXFHTS 8x30x27.5-Indented head-D-N	12

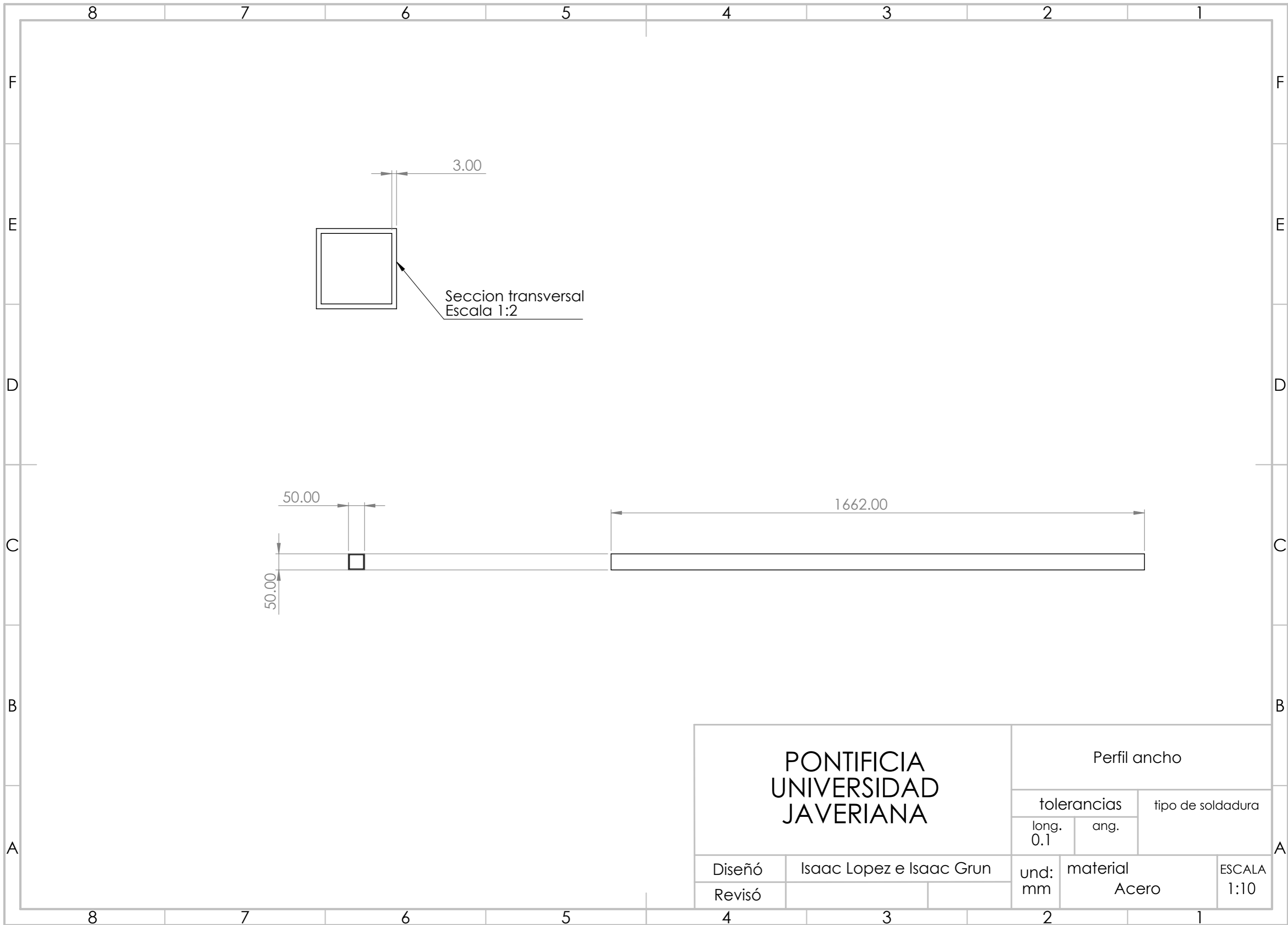
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Puerta maquina (Lamina frontal)		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1	ang.	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material
Revisó				ESCALA 1:13



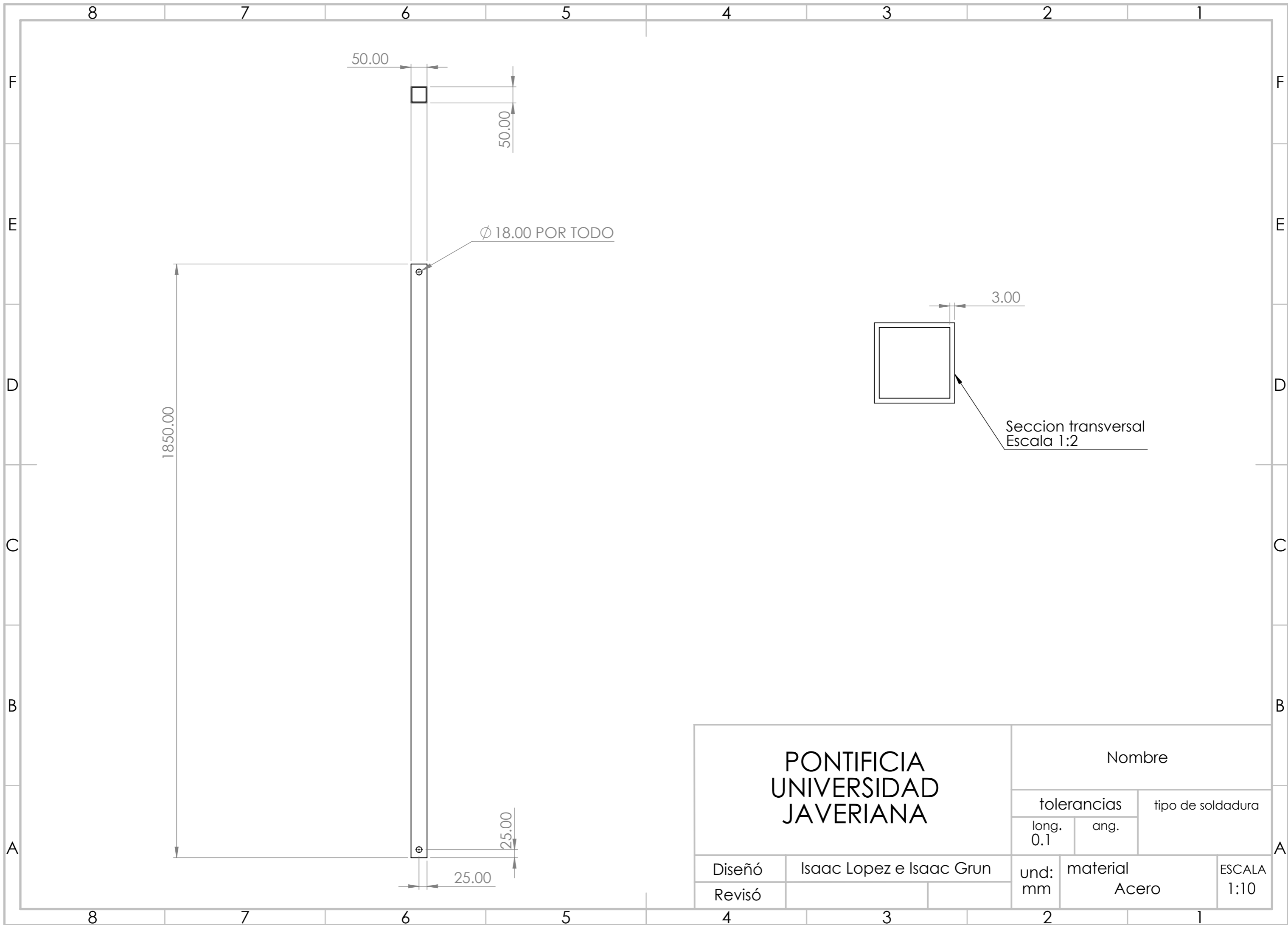
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Perfil fondo			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:10
Revisó					



<p align="center">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Perfil altura		
		tolerancias		tipo de soldadura
		long. 0.1	ang.	
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun	und:	material	ESCALA
Revisó		mm	Acero	1:10



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Perfil ancho			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:10
Revisó					



1850.00

50.00

50.00

Ø 18.00 POR TODO

3.00

Seccion transversal
Escala 1:2

25.00

25.00

PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
JAVERIANA

Nombre

tolerancias

tipo de soldadura

long.
0.1

ang.

Diseño

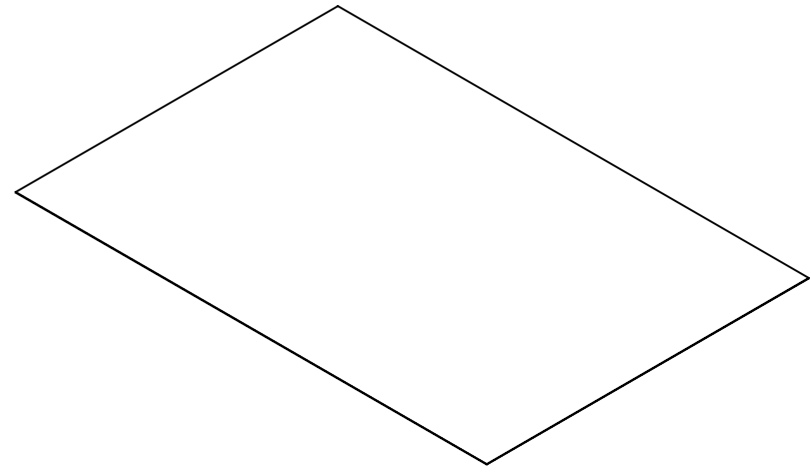
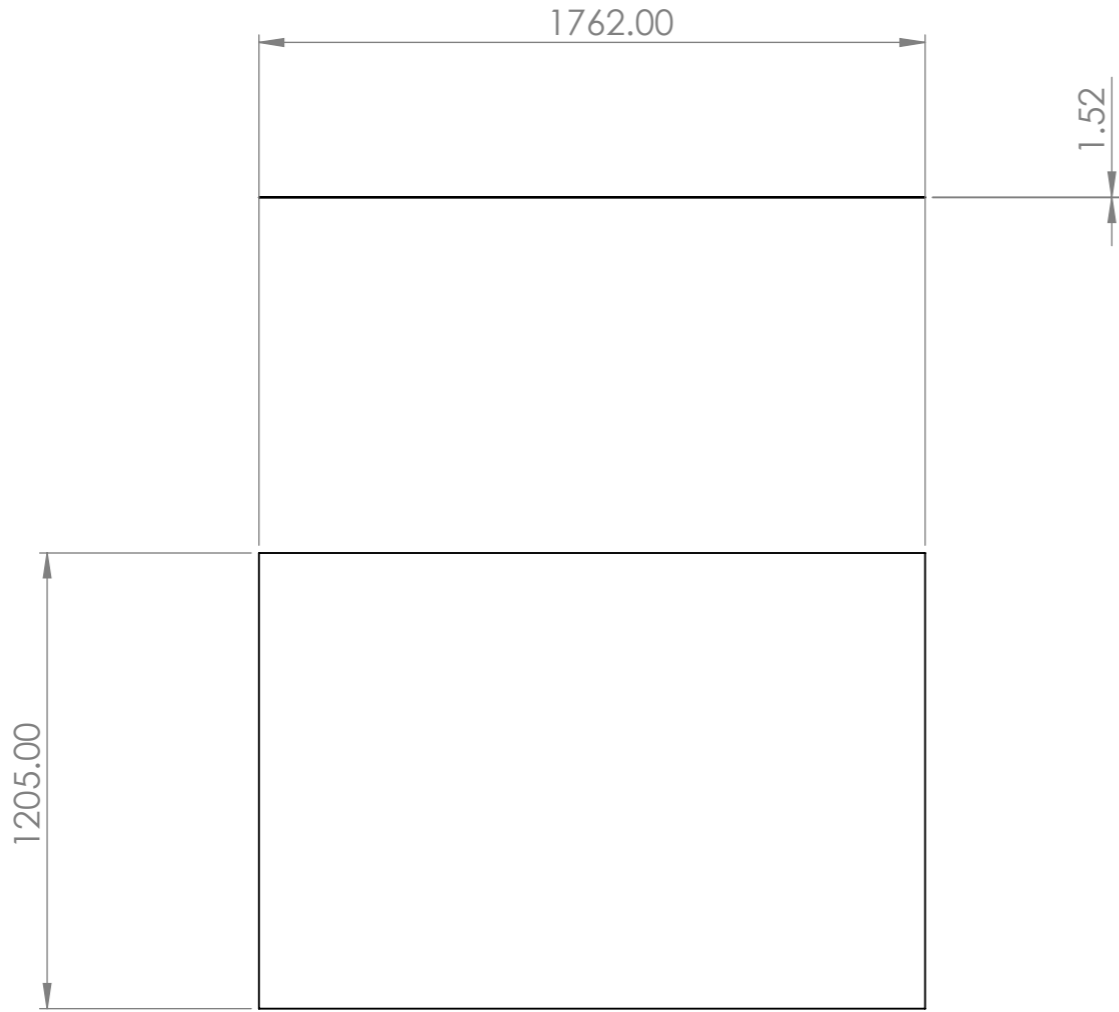
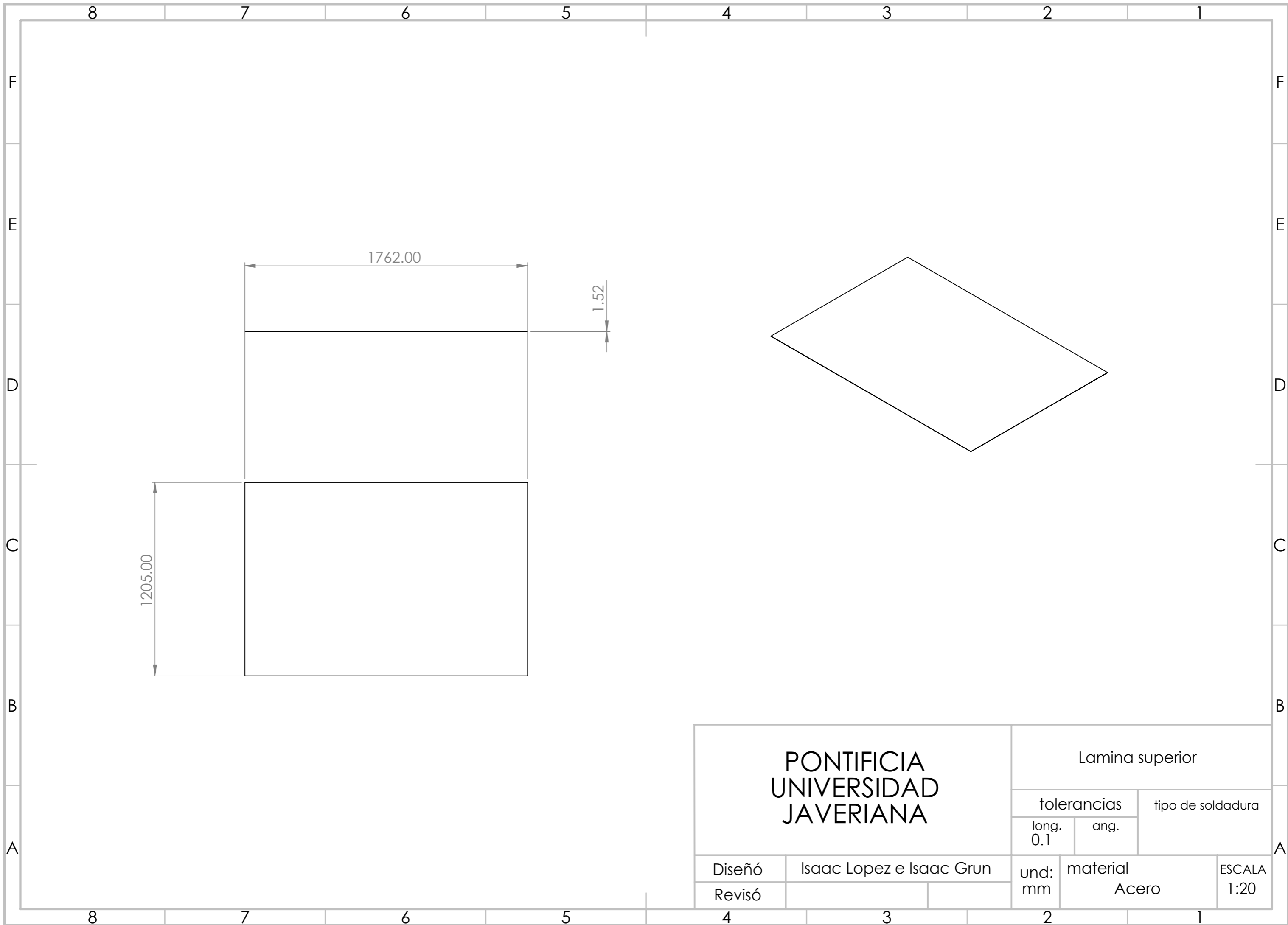
Isaac Lopez e Isaac Grun

und:
mm

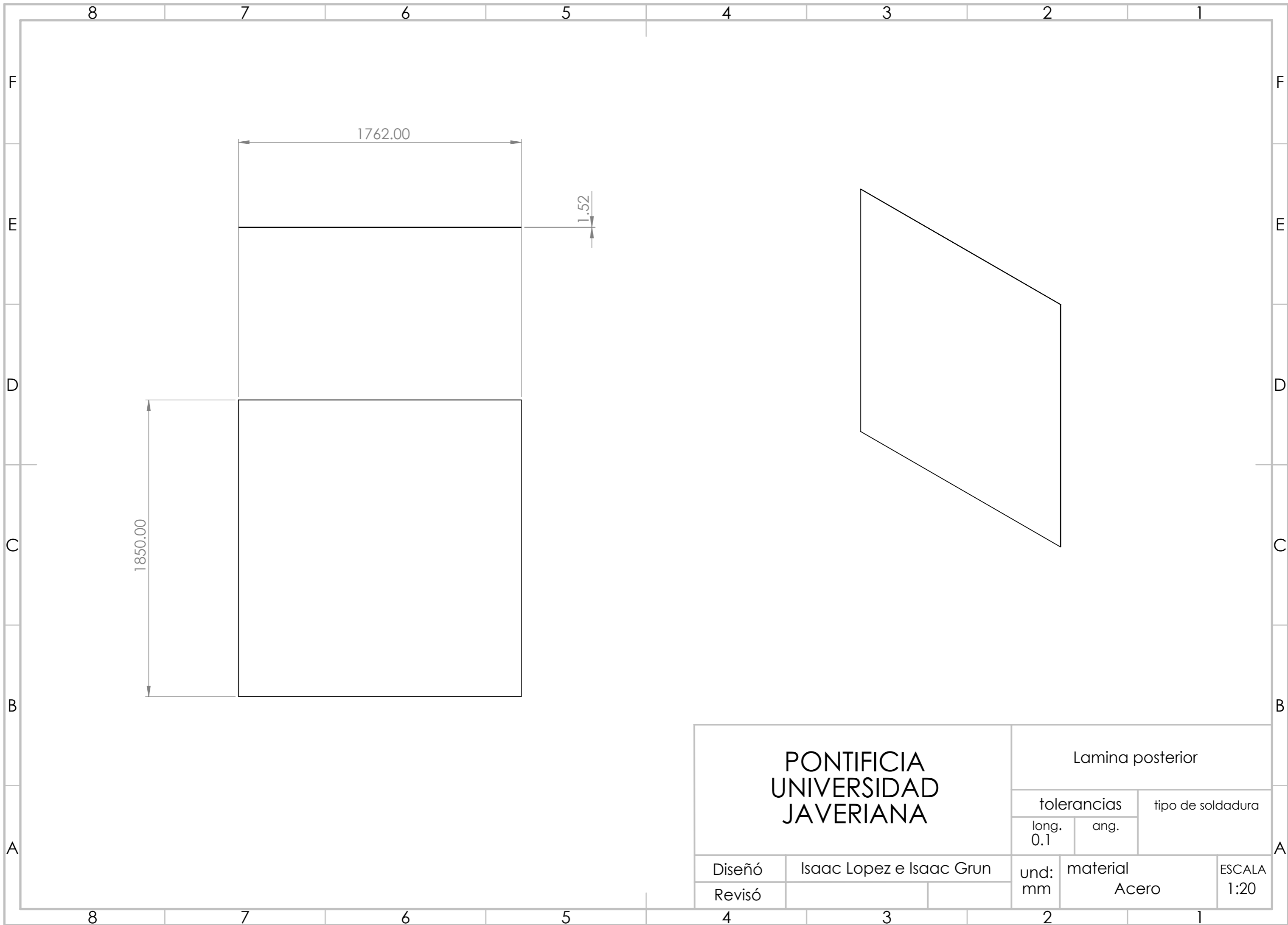
material
Acero

ESCALA
1:10

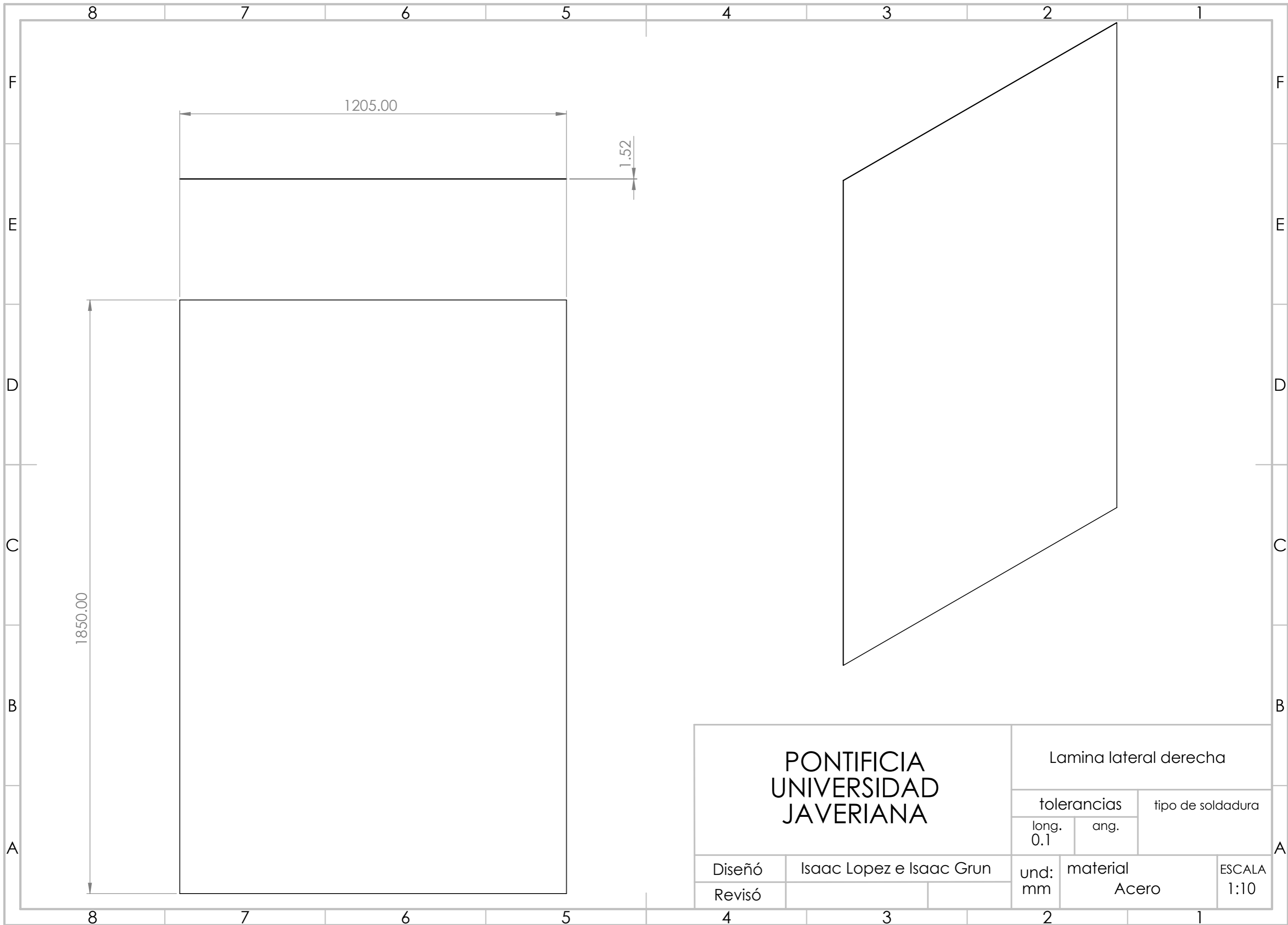
Revisó



<p style="text-align: center;">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Lamina superior			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:20
Revisó					



<p align="center">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Lamina posterior			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:20
Revisó					

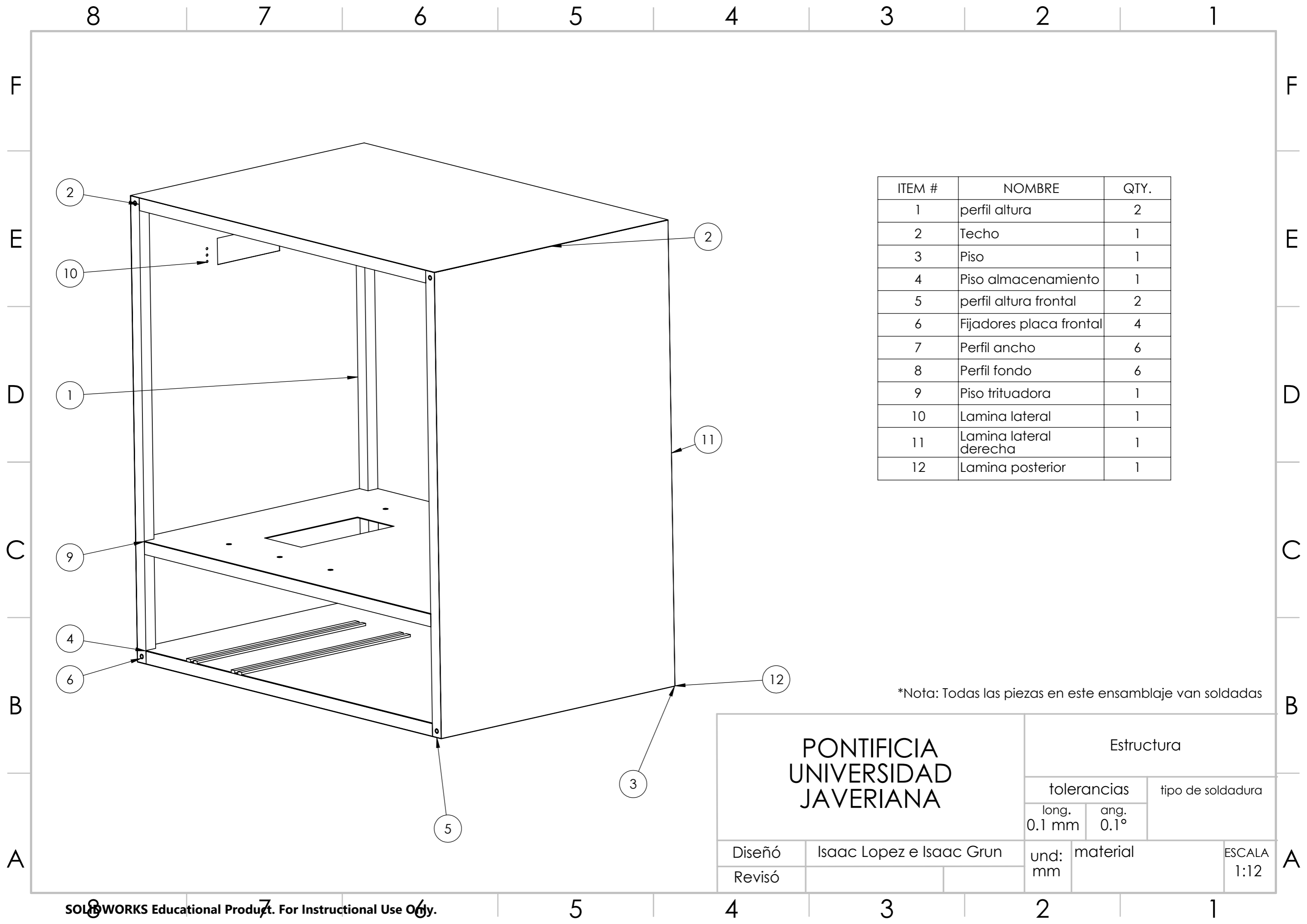


1850.00

1205.00

1.52

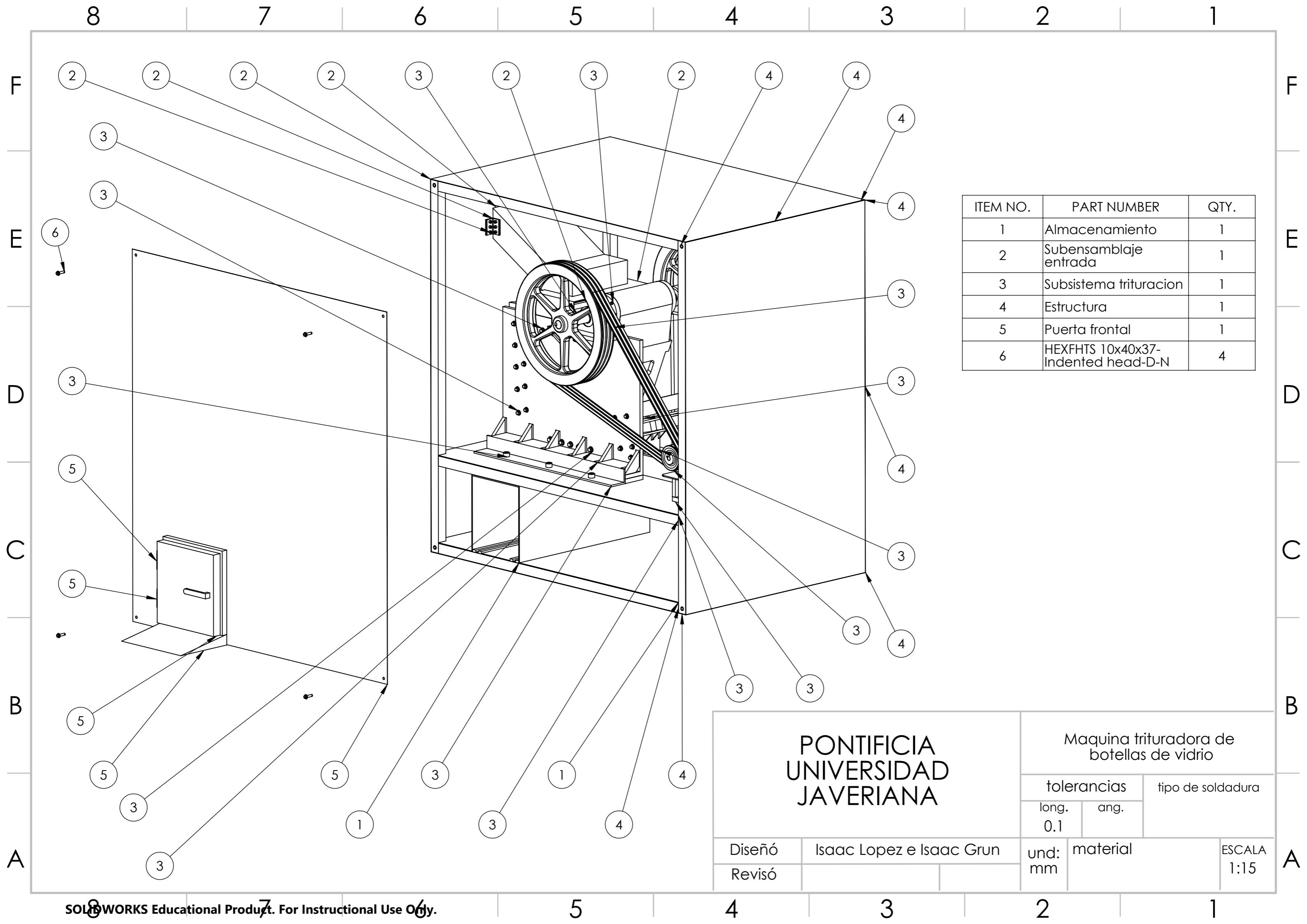
<p align="center">PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA</p>		Lamina lateral derecha			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1	ang.		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material Acero	ESCALA 1:10
Revisó					



ITEM #	NOMBRE	QTY.
1	perfil altura	2
2	Techo	1
3	Piso	1
4	Piso almacenamiento	1
5	perfil altura frontal	2
6	Fijadores placa frontal	4
7	Perfil ancho	6
8	Perfil fondo	6
9	Piso trituadora	1
10	Lamina lateral	1
11	Lamina lateral derecha	1
12	Lamina posterior	1

*Nota: Todas las piezas en este ensamblaje van soldadas

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Estructura			
		tolerancias		tipo de soldadura	
		long. 0.1 mm	ang. 0.1°		
Diseño	Isaac Lopez e Isaac Grun		und: mm	material	ESCALA 1:12
Revisó					



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Almacenamiento	1
2	Subensamblaje entrada	1
3	Subsistema trituracion	1
4	Estructura	1
5	Puerta frontal	1
6	HEXFHTS 10x40x37-Indented head-D-N	4

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		Maquina trituradora de botellas de vidrio		
		tolerancias		tipo de soldadura
long. 0.1	ang.	und: material		
ESCALA 1:15	mm	Diseño Isaac Lopez e Isaac Grun		
Revisó	Revisó			