

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de interfaz para simulador de vuelo
didáctico**

Trabajo de graduación presentado por Hector Leonel Gutierrez
Marroquín para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica

Guatemala
2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de interfaz para simulador de vuelo
didáctico**

Trabajo de graduación presentado por Hector Leonel Gutierrez
Marroquín para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica

Guatemala
2024

Vo.Bo. Asesor



Ing. José Antonio Bagur Nájera

Vo.Bo. Terna Examinadora



MBA Gustavo Adolfo Barrera Noriega



Ing. José Antonio Bagur Nájera



Ing. Héctor Francisco Gómez Hernández

Fecha de aprobación de examen de graduación: Guatemala, 05 de diciembre 2024.

Lista de figuras	IX
Lista de cuadros	XII
Resumen	XIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Aprendizaje mediante simuladores de vuelo	3
2.2. Plataformas de simulación de movimiento	3
2.3. Interfaces de simulación y paneles de navegación	4
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Marco teórico	9
5.1. Parámetros de vuelo	9
5.1.1. Ejes y ángulos de orientación	9
5.1.2. Potencia y empuje	10
5.2. Superficies de control	10
5.3. Instrumentos de vuelo	12
5.3.1. Instrumentos basados en la medición de presión	12
5.3.2. Instrumentos basados en propiedades giroscópicas	12
5.3.3. Instrumentos del motor	13
5.3.4. Disposición de la instrumentación	13
5.4. Cessna 172	13
5.4.1. Panel de instrumentos	14
5.5. Interfaces de simulación de vuelo	15
5.6. Interfaces humano-máquina	16

5.6.1. Vaps XT®	16
5.6.2. Gl Studio®	17
5.7. Raspberry Pi®	18
5.7.1. Interfáz gráfica de usuario con Raspberry Pi®	18
5.7.2. Comunicación serial con Arduino	18
5.8. Regulación de simuladores en Guatemala	19
5.8.1. Simulador de vuelo	20
5.8.2. Dispositivo sintético de entrenamiento de vuelo	20
6. Marco metodológico	21
6.1. Metodología de diseño	21
6.2. Definición de requisitos	22
6.3. Generación y selección de ideas	22
6.3.1. Materiales del panel	22
6.3.2. Instrumentación	23
6.3.3. Interacción	24
6.3.4. Lenguaje de programación	24
6.4. Panel de instrumentos	24
6.4.1. Diseño preliminar	24
6.4.2. Cálculos	27
6.5. Electrónica	31
6.6. Interfaz	33
6.6.1. GUI	33
6.6.2. Programas básicos	35
6.6.3. Cálculos de interfaz	37
6.6.4. Mapeo de variables	42
7. Resultados	43
7.1. Sensibilidad táctil	43
7.1.1. Sensibilidad táctil botones	43
7.1.2. Sensibilidad táctil deslizadores	45
7.2. Tiempos de simulación	46
7.2.1. Tiempos de simulación instrumentos mecánicos	46
7.2.2. Tiempos de simulación instrumentos digitales	47
7.3. Diseño final	49
7.4. Verificación de cumplimiento de requisitos	51
7.5. Desglose de costos	52
8. Discusión de resultados	53
8.1. Sensibilidad táctil	53
8.2. Tiempos de simulación	53
8.3. Diseño final, costo de materiales y cumplimiento de requisitos	54
9. Conclusiones	55
10. Recomendaciones	57
11. Bibliografía	59

12. Anexos	61
12.1. Planos de construcción	61
12.2. Protocolo de pruebas	61

Lista de figuras

1. Representación gráfica de los ejes y ángulos	10
2. Representación gráfica de los ángulos de las superficies de control.	11
3. Distribución de instrumentos Cessna 172	14
4. Simulador de Cessna 172.	16
5. Simulador de vuelo VAPS XT hecho por Gulfstream.	17
6. Simulador TRC472.	17
7. Estructura del panel de instrumentos	25
8. Partes principales de la estructura	25
9. Instrumento mecánico A	26
10. Instrumento mecánico B	26
11. Panel completo	27
12. DCL Soporte de electrónica	28
13. Diagrama de momento soporte de electrónica	28
14. Diagrama perno de sujeción de pantalla	29
15. Diagrama perno de sujeción del mango	30
16. Diagrama esquemático del circuito	32
17. Ménu de la interfaz gráfica de usuario	33
18. Ventana de simulación	33
19. Ventana de ajustes	34
20. Diagrama síntesis del programa de lectura con convertidor ADS	35
21. Diagrama síntesis del programa de movimiento para los servos	36
22. Diagrama síntesis del programa general de cálculos	37
23. Ejes considerados para el análisis dinámico	38
24. Modelo CAD del diseño final	49
25. Vista frontal del prototipo físico	50
26. Vista posterior del prototipo físico	50

Lista de cuadros

1. Datos técnicos	14
2. Identificación de códigos	22
3. Requisitos	22
4. Matriz de ponderación para los materiales del panel	23
5. Matriz de ponderación para la simulación de la instrumentación	23
6. Matriz de ponderación para la interacción con la interfaz	24
7. Matriz de ponderación para la interacción con la interfaz	25
8. Cargas del panel de instrumentos	27
9. Propiedades de los elementos del panel	27
10. Factores de seguridad unión de pantalla	30
11. Factores de seguridad unión de mangos	31
12. Componentes electrónicos	32
13. Parámetros ajustables	34
14. Canales analógicos	36
15. Asignación de los servomotores	36
16. Variables utilizadas en el análisis dinámico	39
17. Descripción del mapeo de los instrumentos	42
18. Sensibilidad táctil botón "Simular"	43
19. Sensibilidad táctil botón (Ajustes)	44
20. Sensibilidad táctil botón (Cerrar)	44
21. Sensibilidad táctil deslizador (Altitud)	45
22. Sensibilidad táctil deslizador (Velocidad del viento)	45
23. Sensibilidad táctil deslizador (Dirección del viento)	46
25. Tiempo de respuesta instrumentos mecánicos	46
24. Sensibilidad táctil deslizador (Orientación de la pista)	47
27. Tiempo de respuesta instrumentos digitales (prueba B)	47
26. Tiempo de respuesta instrumentos digitales (prueba A)	48
28. Tiempo de respuesta instrumentos digitales (prueba C)	48
29. Tiempo de respuesta instrumentos digitales (prueba D)	49
30. Características principales del prototipo de panel de instrumentos	49
31. Posicionamiento de los instrumentos	50

32. Verificación de requisitos	51
33. Desglose de costos	52

El problema principal abordado en este proyecto fue la falta de una solución de simulación de vuelo accesible, de bajo costo y adaptable a las necesidades específicas de los usuarios. Las soluciones comerciales existentes a menudo presentan un alto costo y una falta de flexibilidad, lo que limita su accesibilidad y personalización.

El objetivo del proyecto fue desarrollar e implementar una interfaz para calcular y visualizar parámetros de vuelo, incluyendo altitud, ángulos de giro, velocidades y datos de la aeronave, utilizando información de los controladores, como la posición y ángulo de orientación del timón o yugo. Los objetivos específicos incluyeron determinar las relaciones matemáticas entre los controladores y los parámetros de vuelo, diseñar e implementar un circuito integrado con una pantalla y elementos mecánicos, desarrollar un programa de cálculo con tiempos de respuesta menores a 1 segundo, y fabricar un prototipo funcional de panel de instrumentos.

Se construyó un prototipo de panel de instrumentos basado en una Raspberry Pi 4, que integra servomotores y una pantalla táctil, utilizando una estructura de perfil de aluminio y fibropanel, con un costo de materiales de Q1,434.65 y un peso total de 21.5 lb. La interfaz gráfica de usuario, con tiempos de respuesta menores a 1 segundo, permite una interacción táctil y ofrece opciones y ajustes de parámetros de vuelo. El prototipo imita con alta precisión los instrumentos del Cessna 172 y cumple con todos los requisitos planteados, estableciendo una base efectiva para futuros desarrollos en simulación de vuelo.

El uso de simuladores de vuelo ha ganado relevancia en los últimos años como una herramienta crucial para la formación de pilotos, ya que permite recrear entornos de vuelo en un ambiente seguro, sin exponer a los usuarios a riesgos reales. Según Muñoz (2022), el costo de un simulador depende en gran medida del nivel de inmersión que puede ofrecer, lo que lo convierte en una herramienta indispensable para la enseñanza moderna. Durante la pandemia de COVID-19, John Castro analizó en su estudio los beneficios del uso de simuladores en la educación, concluyendo que estos promueven el desarrollo de habilidades y competencias, especialmente en un entorno educativo cambiante como el generado por la pandemia Maldonado (2020).

Por otro lado, los paneles de navegación e interfaces de simulación también han evolucionado significativamente. Proyectos como los de Cifuentes (2018) y Fiñana (2014) han abordado el desarrollo artesanal y digital de paneles de vuelo, mientras que J. J. Martín (2020) ha investigado soluciones tecnológicas mediante el uso de Arduino y componentes impresos en 3D, lo que abre nuevas posibilidades para la personalización y accesibilidad de los simuladores.

La presente investigación se centrará en el desarrollo de una interfaz para simuladores de vuelo con componentes de fácil acceso, bajo costo y sencilla implementación, con el objetivo de crear una plataforma replicable y modificable que cubra las necesidades básicas de simulación, permitiendo adaptaciones específicas según los requerimientos de cada usuario. Esta flexibilidad permitirá que tanto aficionados como instituciones educativas puedan personalizar sus simuladores de acuerdo con sus necesidades técnicas y operativas.

Para el desarrollo de este proyecto, se tomaron en cuenta los siguientes temas clave que sustentan la creación de la interfaz de simulación. Primero, se abordaron los parámetros de vuelo, centrados en los ejes y ángulos de orientación, los cuales son fundamentales para la simulación y control de aeronaves. A continuación, se desarrollaron los conceptos de las superficies de control, incluyendo los elevadores y el timón de dirección, que permiten manipular la actitud del avión al modificar la sustentación y la dirección del mismo. Finalmente, se analizaron los instrumentos de vuelo, los cuales proporcionan información crítica al pilo-

to para el monitoreo del rendimiento de la aeronave. Estos instrumentos se distribuyen de manera estándar en los paneles de control, como el altímetro, variómetro y el indicador de giro.

Además, se incluyó un estudio sobre las interfaces humano-máquina (HMI), enfatizando en el uso de herramientas que permiten un desarrollo ágil de paneles interactivos para simulación. Estas herramientas facilitan el diseño de interfaces más eficientes y adaptables a las necesidades específicas del usuario, optimizando tanto el tiempo de desarrollo como los costos.

2.1. Aprendizaje mediante simuladores de vuelo

Los simuladores de vuelo tienen una gran relevancia como método de aprendizaje y formación de futuros pilotos de avión ya que permite que vuelen de forma segura al relacionar el ambiente con la percepción sensorial previa, es por esto que el costo de un simulador depende del nivel de inmersión que puede ofrecerle al usuario Muñoz (2022).

Durante la pandemia de Covid-19 el estudio realizado por John Castro reunió información de 93 artículos, el mismo centrado en el beneficio del uso de simuladores en el proceso de aprendizaje y llegó a la conclusión que se demuestran importantes beneficios para el uso de simuladores en la educación en general, evidenciadas en el desarrollo de habilidades y competencias más aún cuando la educación sufrió cambios debido a la pandemia de covid-19 Maldonado (2020).

2.2. Plataformas de simulación de movimiento

Las principales plataformas de simulación de movimiento funcionan como base para la utilización de interfases que traducen la información de softwares de simulación de vuelo a movimientos de la plataforma, existen plataformas de 3 y 6 grados de libertad en el mercado.

El artículo de Wei (2022) trata el diseño de un sistema de control para la utilización de una plataforma de movimiento con 6 grados de libertad, abarca el análisis de las variables de vuelo y resuelve problemas encontrados como la rotación continua de la cabina, de modo que logra replicar los movimientos experimentados en un vuelo Wei (2022). Por otra parte, Fernandez (2019) detalla en su tesis de grado de Ingeniería Mecánica el diseño y la simulación de un sistema de control para una plataforma de 3 grados de libertad mediante un análisis cinemático utilizando lazos vectoriales, se analizaron los mecanismos y se desarrollaron los comportamientos aproximados de la cabina real (Fernandez, 2019).

Se han explorado otras alternativas para desarrollar el movimiento como el artículo de Pan (2021) que trata sobre el diseño de una plataforma para simulación de vuelo que reemplaza la plataforma de 6 grados de libertad Stewart con un sistema de 3 engranajes y un sistema de rotación de 180° para alcanzar 4 grados de libertad, esto se planteó como una solución al alto costo que representa el sistema de 6 grados de libertad mencionado Pan (2021).

2.3. Interfaces de simulación y paneles de navegación

Cifuentes (2018) detalla en su tesis de grado de Ingeniería en Aeronavegación el diseño de un panel de vuelo portátil de un metro de largo y 45 centímetros de alto con una estructura de madera que permite posicionar una pantalla sobre ella y en su interior, albergar el ordenador de control y un segundo monitor de instrumentos. El proceso parte de un diseño en 2 dimensiones del panel de navegación hasta llegar al desarrollo de un software para la interacción entre los controles y el panel de navegación Cifuentes (2018).

Fiñana (2014) detalla en su tesis de grado de Ingeniería de software el diseño y construcción de un panel “Overhead” real de un Boeing 737-8000 para ser utilizado en un software de simulación de vuelo comercial, el proyecto se desarrolló por medio de módulos encargados de diferentes aspectos de la simulación, los cuales interactúan entre el software y el simulador físico, sin embargo, requirió de la programación de una red de controladores para el funcionamiento del panel además de la construcción artesanal de cada instrumento del panel Fiñana (2014).

J. J. Martín (2020) detalla en su tesis de grado de Ingeniería informática una alternativa para evitar la implementación artesanal de cada instrumento de medición en un panel de navegación, desarrolla un software que permite que se obtenga cualquier dato de un simulador de vuelo y los entrega a un módulo que trabaja con Arduino para controlar los componentes que replican el instrumento, finalmente utiliza el software para replicar un panel de navegación con 4 instrumentos hechos en impresión 3d. Define como posibles futuras líneas de investigación la implementación de otros sistemas analógicos que funcionen como entradas de información para el simulador J. J. Martín (2020).

La principal función de la interfase es mostrar los parámetros de vuelo resultado de las acciones del usuario, Martín (2019) detalla en su tesis de Ingeniería electrónica industrial y automática la implementación de microcontroladores Atmega como los que usan las placas Arduino para realizar la conexión entre los dispositivos de la cabina y los componentes que replican los instrumentos mediante comunicación I2C A. S. Martín (2019). Otra solución para la comunicación entre los dispositivos de la cabina y los instrumentos es la propuesta por en la que desarrolla un sistema de hardware con para la plataforma de bajo coste raspberry pi el cual se encarga de obtener los datos y enviados a un software de visualización Navarro (2017).

Justificación

La utilización de simuladores de vuelo resulta indispensable para la formación de profesionales en el área de la aeronáutica civil, sin embargo, en Guatemala el uso de simuladores es limitado a escuelas de formación de pilotos, las cuales tienen costos que van desde los Q 4,000 hasta los Q 10,000 brindando un máximo de 5 horas de práctica en los simuladores EVSA (2023) training (2023) SafPilot (2023), tomando en cuenta que las certificaciones básicas para piloto privado requieren de un total de 45 horas de práctica, de las cuales al menos 30 se desarrollan en simulador DGAC (2023), el costo para ser piloto resulta bastante elevado.

Los simuladores de vuelo didácticos son una herramienta que permite a futuros pilotos experimentar situaciones, operar instrumentos y realizar operaciones de vuelo sin poner en peligro la vida o el estado de la aeronave Rico (2018). En países de Suramérica como Bolivia, se utilizan simuladores para la formación de técnicos de mantenimiento aeronáutico o ingenieros aeronáuticos ya que permiten la simulación de fallos hasta la práctica de procedimientos de mantenimiento, además representan un ahorro en los costos de formación ya que reducen el tiempo de prácticas en aviones reales Chuquimia (2023). En general el desarrollo de cualquier aprendizaje se ve potencializado con el uso de simuladores, ya que permite la experimentación con situaciones fuera de lo ordinario y una forma de inmersión más económica que una experiencia real Maldonado (2020). Si se busca que en Guatemala se incursione en nuevas carreras relacionadas con la aeronáutica, se debe comenzar con la utilización de simuladores, los cuales brinden una forma económica de formar profesionales en esta rama de la ingeniería. Por lo tanto, es necesario el desarrollo e implementación de una interfaz para un simulador de vuelo con fines didácticos en Guatemala, con el propósito de mejorar los espacios de aprendizaje ya existentes en el país y desarrollar nuevos campos de estudio relacionados con la aeronáutica.

El proyecto tiene como finalidad desarrollar una interfaz que calcule los parámetros de; altitud, empuje, ángulos de giro, posición de los alerones, velocidad total y velocidad en cada eje, calculados a partir de los siguientes datos de los controladores; posición de los pedales, ángulo de giro de las palancas, giro y posición del timón o yugo, además construir

un prototipo de un panel de instrumentos que muestre los datos calculados. Se debe tomar en cuenta una debida selección de componentes y materiales para que el desarrollo completo del proyecto no supere los Q1,500, considerando que existen paneles de instrumentos de tipo recreativo que rondan los Q2,650.00 logitech (2023), y se busca una alternativa de menor costo.

4.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar una interfaz para calcular y visualizar parámetros de vuelo — incluyendo altitud, empuje, ángulos de giro y velocidades— basados en la información proporcionada por los controladores, tales como posición de los pedales, ángulo de giro de las palancas y orientación y posición del timón o yugo.

4.2. Objetivos específicos

1. Establecer las relaciones matemáticas entre los datos suministrados por los controladores y los parámetros de vuelo a visualizar en la interfaz.
2. Diseñar e implementar un circuito basado en una computadora de placa única (SBC, por sus siglas en inglés) que se integre con una pantalla y elementos mecánicos para la visualización de los parámetros de vuelo.
3. Crear un software que procese y calcule los parámetros de vuelo, incorporando además una interfaz gráfica de usuario optimizada para su presentación a través de una pantalla.
4. Fabricar un prototipo de panel de instrumentos donde se montarán los elementos mecánicos y la pantalla, asegurando que la interfaz gráfica se visualice de forma clara y funcional.

5.1. Parámetros de vuelo

Las variables que intervienen en el estado de un avión en funcionamiento se conocen como parámetros de vuelo, en un avión real provienen de sensores e instrumentos que miden o calculan cada una de ellas en tiempo real, sin embargo, para un simulador se calculan a partir de ecuaciones de movimiento, simulando las fuerzas que actúan en el avión, la interacción con el aire, el rendimiento de los motores y los sistemas mecánicos como alerones. Dependiendo del simulador los parámetros mostrados son diferentes, los más comunes y que se encuentran en la mayor parte de los simuladores son; ángulos de giro, velocidades en distintos ejes, altitud, empuje, condiciones meteorológicas, nivel de combustible, posición de los alerones y posición del timón de dirección Microsoft (2023).

5.1.1. Ejes y ángulos de orientación

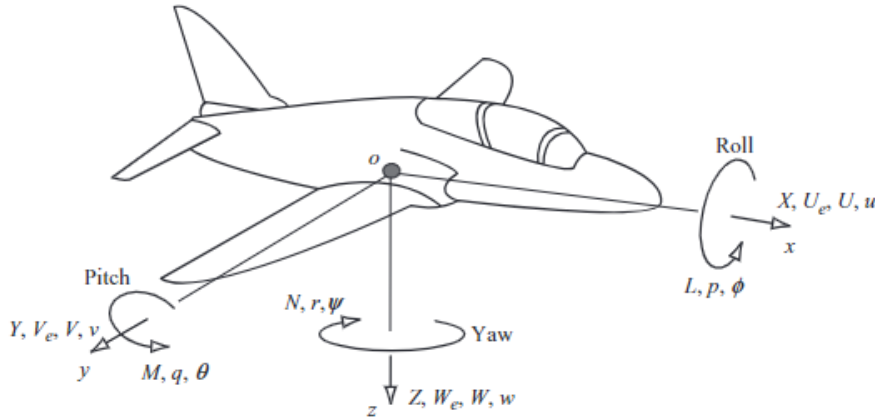
Los ejes principales de un avión se denominan x, y, z, que representan los ejes longitudinal, transversal y vertical respectivamente, estos ejes se encuentran estáticos respecto al avión, pero rotan respecto al marco de referencia que sería la tierra; de esta rotación surgen los 3 ángulos que determinan la orientación del mismo, los cuales son; ángulo de cabeceo (*pitch*), ángulo de alabeo (*roll*) y ángulo de guiñada (*yaw*). Cada ángulo representa el giro de la aeronave respecto a un eje en específico por lo que juntos permiten el posicionamiento angular respecto al marco de referencia que sería la tierra Stevens (2016).

- *Pitch*: Ángulo entre el eje longitudinal del avión y el horizonte. Un ángulo positivo significa que la nariz del avión apunta hacia arriba, mientras que un ángulo negativo significa que la nariz del avión está hacia abajo Stevens (2016).
- *Roll*: ángulo entre un plano de referencia del avión horizontal del avión (generalmente se considera un plano representado por una línea que une ambos motores) y el hori-

zonte. Un ángulo positivo significa que el avión está rotado sobre su derecha, mientras que un ángulo negativo significa que el avión está rotado sobre su izquierda Stevens (2016).

- *Yaw*: Ángulo entre el eje de giro del avión y el horizonte. Un ángulo positivo significa que el avión está girando hacia la derecha, mientras que un ángulo negativo significa que el avión está girando hacia la izquierda Stevens (2016).

Figura 1: Representación gráfica de los ejes y ángulos



Fuente: Cook (2007). *A linear systems approach to aircraft stability and control*

5.1.2. Potencia y empuje

Independientemente del tipo de fuente de potencia ya sea motor de combustión interna o turbina, la potencia que esté entregando afecta directamente la velocidad, ya que acelera el avión mediante el empuje proporcionado y la altitud al generar mayor o menor sustentación según la posición de los alerones. Cabe resaltar que las condiciones meteorológicas y la altitud también repercuten en la potencia, por la variación de las condiciones del aire, además el peso del avión es un factor a considerar ya que un avión pesado necesitará mayor potencia para generar sustentación o para ser acelerado Drela (2014)

Para un motor de turboreactor la relación entre el empuje y el ángulo de la palanca de aceleración se aproxima mediante una función de transferencia de primer orden, donde k_τ es una constante de ganancia y T_τ es la constante de tiempo de retardo que suele ser del orden de 2 a 3 segundos Cook (2007)

$$\frac{\tau(s)}{\epsilon(s)} = \frac{k_\tau}{1 + sT_\tau} \quad (1)$$

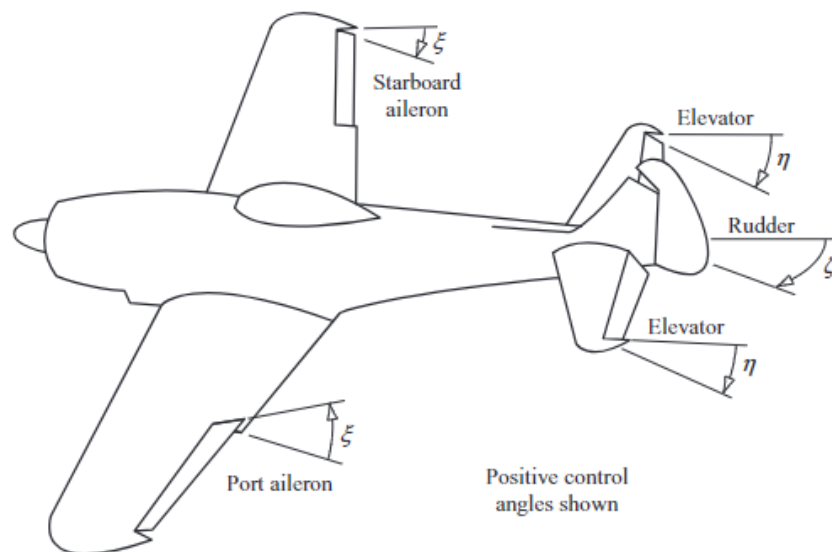
5.2. Superficies de control

Superficie de control es el nombre que se le da a las partes móviles de un avión que permiten controlar la orientación y movimiento, alterando la resistencia aerodinámica a

voluntad.

- Alerones: Superficie ubicada en los extremos de las alas principales, utilizada para controlar el ángulo *roll*, provocando una diferencia de sustentación entre las alas y por lo tanto una rotación Chunsheng y Chunhua (2019). Se controlan por medio del timón de la cabina también conocido como yugo, girar el timón hacia la derecha provoca que el alerón derecho suba mientras que el alerón izquierdo baje y por consecuencia que el avión experimente un roll positivo; el ángulo de inclinación de los alerones es siempre de la misma magnitud, pero opuesto y normalmente se denota con la letra ξ Cook (2007).
- Elevadores: Superficie ubicada en las alas traseras, utilizada para controlar el ángulo *pitch*, provocando un aumento o disminución de la sustentación en la cola haciendo que la nariz se eleve o se incline hacia abajo Chunsheng y Chunhua (2019). Se controlan por medio del timón de la cabina también conocido como yugo, jalar el yugo provoca que los elevadores suban y por consecuencia que el avión experimente un pitch positivo; el ángulo de inclinación de los elevadores es igual para ambos y normalmente se denota con la letra η Cook (2007).
- Timón de dirección: Superficie ubicada en la cola de forma vertical, es utilizada para controlar el ángulo *yaw*, provocando una fuerza lateral por la resistencia del viento haciendo que la nariz gire en la misma dirección que el timón de dirección Chunsheng y Chunhua (2019). Se controlan por medio de los pedales de la cabina, presionar el pedal derecho provoca que el timón de dirección gire en la misma dirección y por consecuencia que el avión experimente un yaw positivo. El ángulo de rotación del timón normalmente se denota con la letra ζ Cook (2007).

Figura 2: Representación gráfica de los ángulos de las superficies de control.



Fuente: Cook (2007). *A linear systems approach to aircraft stability and control*.

5.3. Instrumentos de vuelo

Los instrumentos de vuelo son dispositivos mecánicos y electrónicos que se encargan de mostrar los parámetros de vuelo para que sean interpretados por el piloto durante operaciones desarrolladas en tierra y durante el vuelo. Los instrumentos básicos de vuelo se suelen dividir en 3 categorías: instrumentos basados en la medición de presión, instrumentos basados en propiedades giroscópicas e instrumentos del motor Sobral (2023).

5.3.1. Instrumentos basados en la medición de presión

Los instrumentos de esta categoría basan su funcionamiento en la medición de la presión en tiempo real y de la medición del cambio de presión para mostrar los parámetros de altitud, velocidad vertical y velocidad horizontal, en el caso de los simuladores de vuelo almacenan la información de la evolución de los 3 parámetros que se van modificando en tiempo real a partir de las acciones llevadas a cabo dentro de la cabina Sobral (2023).

- Velocímetro o anemómetro: Este indica la velocidad relativa del avión en millas por hora, en nudos o en ambas unidades, la lectura de este instrumento es muy sencilla: una aguja marca directamente la velocidad relativa del avión en la escala del dial. Cuenta con 4 marcas de colores que permiten al piloto saber si la velocidad es la apropiada para una maniobra en específico y dependen de las propiedades de cada avión, las 4 marcas son las siguientes Sobral (2023).
 - Arco blanco: Rango de operación segura para los flaps.
 - Arco verde: Rango de operación normal.
 - Arco amarillo: Rango de precaución estructural.
 - Línea roja: Velocidad de nunca exceder.
- Altímetro: Este indica la altitud a la que está viajando el avión, generalmente está graduado de 0 a 9 en el dial en el sentido de las agujas del reloj con divisiones intermedias, la lectura se realiza mediante 2 agujas, donde la menor indica miles de pies y la mayor indica centenas de pies Sobral (2023).
- Variómetro o indicador de velocidad vertical: Este indica la velocidad del avión de forma vertical o la velocidad de ascenso y descenso, tiene una aguja que gira sobre un dial que se encuentra graduado desde la parte media izquierda de forma ascendente en ambas direcciones, las marcas por encima de cero indican un ascenso y las marcas por debajo indican un descenso Sobral (2023).

5.3.2. Instrumentos basados en propiedades giroscópicas

Los instrumentos de esta categoría basan su funcionamiento en la rotación giroscópica del avión para dar una referencia de los ángulos yaw, pitch y roll, en el caso de lo simuladores de vuelo son más sencillos de simular puesto que tienen relación directa con los controladores de la cabina Sobral (2023).

- Horizonte artificial o indicador de giro: Este instrumento muestra una representación gráfica de los ángulos de pitch y roll, está conformado por un dial que presenta una escala de grados y una representación de las alas que permanece estática, además de un horizonte que gira en 2 ángulos para representar la posición del horizonte respecto al avión Sobral (2023).
- Indicador de viraje: Este instrumento indica el ángulo de yaw además de la velocidad de rotación, está conformado por un perfil del avión en miniatura que rota sobre el dial que posee una escala dividida en 2 o 4 minutos, mediante el grado de rotación permite saber a que velocidad está girando y el tiempo aproximado que le tomará dar una vuelta completa Sobral (2023).

5.3.3. Instrumentos del motor

Los instrumentos del motor brindan información sobre el funcionamiento y variables del mismo, sin embargo, dependen del tipo de motor y la cantidad de motores que incorpora el avión, los instrumentos que la mayor parte de los paneles incorporan son los siguientes Cifuentes (2018).

- Tacómetro
- Medidor de combustible
- Temperatura de aceite
- Presión de aceite
- Presión de combustible

5.3.4. Disposición de la instrumentación

Los instrumentos se suelen distribuir en 3 secciones dentro del panel, la sección izquierda que generalmente es la más grande incorpora toda la instrumentación relacionada al avión y generalmente se utiliza la disposición T para distribuir los instrumentos, la sección del medio a las comunicaciones, donde se incorporan distintos radios y la sección de la derecha donde se incorpora la instrumentación relacionada con los motores Cifuentes (2018) La disposición en T para instrumentos de vuelo es una disposición estándar que se utiliza en la mayoría de las aeronaves. En esta disposición, los cuatro instrumentos principales de vuelo se colocan en forma de T, con el horizonte artificial en el centro, el indicador de velocidad a la izquierda, el indicador de altitud a la derecha y el indicador de viraje debajo Camponogara et al. (2019)

5.4. Cessna 172

El Cessna es usado en simuladores debido a su popularidad, sencillez y versatilidad. Es el avión más vendido de la historia, por lo que es familiar para muchos pilotos. Además,

es relativamente sencillo de pilotar y se puede usar para una variedad de tareas. Esto lo convierte en una buena opción para el entrenamiento de pilotos privados, entrenamiento de instrumentos y entrenamiento de emergencias Cameron (2016).

Cuadro 1: Datos técnicos

Dato	Valor
Envergadura	36 ft
Longitud	8.91 ft
Altura	27.16 ft
Potencia máxima	160 hp
Velocidad de despegue	220 km/h
Peso	2300 lb

Fuente: Cameron, 2016

5.4.1. Panel de instrumentos

El panel de instrumentos del Cessna 172 proporciona al piloto información esencial para volar el avión, como la velocidad, la altitud, la dirección y el estado del motor. Los instrumentos básicos del panel incluyen un velocímetro, un altímetro, un indicador de giro, un horizonte artificial, un indicador de dirección magnética, un indicador de velocidad vertical, un indicador de combustible, un indicador de temperatura del motor y un indicador de presión del aceite. Otros instrumentos opcionales pueden incluir un GPS, una radio, un transponder, un compensador automático de altitud y un compensador automático de rumbo. A continuación se da a detalle la instrumentación incluida en el panel y su distribución Cameron (2016).

Figura 3: Distribución de instrumentos Cessna 172



Fuente: Cameron (2016). *Development and Implementation of Cost-effective Flight Simulator Technologies*

1. Nivel de combustible
2. Temperatura de aceite
3. Indicador de flujo de combustible
4. Presión de aceite
5. Indicador de viraje
6. Indicador de dirección
7. Tacómetro del motor
8. Indicador de curso
9. Indicador de rodadura
10. Reloj
11. Anemómetro
12. Horizonte artificial
13. Altímetro
14. ILS
15. Variómetro
16. Radios

5.5. Interfaces de simulación de vuelo

Existen diferentes enfoques para la construcción de simuladores de vuelo en lo que respecta a la interfaz, dependiendo del grado de inmersión y de profesionalidad que se necesite. El primer enfoque es el de todo en pantalla, este se basa en que todo el escenario y los instrumentos de vuelo se encuentran simulados en el monitor y se puede interactuar con ellos mediante el cursor del mouse Zeitoun (2014). Un ejemplo se puede ver en la Figura 3.

El segundo enfoque es en el cual se utilizan distintas pantallas colocadas en un panel, donde se realiza la simulación de los diferentes instrumentos, una de las herramientas más utilizadas para modelar los diferentes elementos de la interfaz es VAPS XT, con esta herramienta, se puede crear una arquitectura de pantalla orientada a objetos que se puede ejecutar en distintos sistemas y puede emular pantallas de vuelo de aviones reales Zeitoun (2014). Un ejemplo se puede ver en la Figura 4.

El tercer enfoque implica utilizar una cabina de hardware equipada con instrumentos que han sido modelados a partir de dispositivos reales, creando así una experiencia auténtica similar a la de un avión real. Estos instrumentos pueden conectarse a una computadora mediante USB, lo que resulta en la experiencia de simulación más inmersiva y de mayor calidad, adecuada para usuarios profesionales (Zeitoun, 2014). Un ejemplo se puede ver en la Figura 5.

Figura 4: Simulador de Cessna 172.



Fuente: Zeitpun (2014). *A distributed system interface for a flight simulator.*

5.6. Interfaces humano-máquina

Existen dos enfoques para crear sistemas de simulación HMI (Interfaces humano – máquina); uno es el desarrollo manual y el otro involucra el uso de herramientas comerciales como VAPS XT® o GL Studio®. El desarrollo manual de simulaciones utilizando lenguajes como C/C++ implica un proceso largo y poco eficiente. Por esta razón, se emplean ampliamente herramientas especializadas para diseñar interfaces hombre-máquina en lugar de depender de los métodos tradicionales. Estas herramientas transforman la forma en que se desarrollan las interfaces HMI, permitiendo a los usuarios diseñarlas en un entorno visual y tienen la capacidad de generar código, lo que puede acelerar el proceso de desarrollo y reducir los costos asociados Jian y Wang (2013).

5.6.1. Vaps XT®

VAPS fue una herramienta de modelado HMI basada en C++ altamente adaptable desarrollada por Engenuity Technologies en Canadá. VAPS XT representa una herramienta de *software* avanzada y completa que permite un desarrollo ágil de interfaces gráficas interactivas, ofreciendo un gran nivel de control y flexibilidad en la creación de HMI dinámicos, interactivos y en tiempo real. Gracias a su arquitectura orientada a objetos abierta, así como su capacidad lógica integrada, VAPS XT es de gran utilidad para diseñar diversos tipos de paneles de control y gráficos de visualización de cabina. La característica de generación automática de código C++ a partir de los modelos creados por los usuarios simplifica el proceso de desarrollo, además las aplicaciones desarrolladas con VAPS XT se pueden integrar sin dificultad en prácticamente cualquier sistema con un alto rendimiento (Jian, 2014). Presagis la empresa desarrolladora actual ofrece distintas versiones de la API de forma gratuita bajo

Figura 5: Simulador de vuelo VAPS XT hecho por Gulfstream.



Fuente: Zeitoun (2014). *A distributed system interface for a flight simulator.*

Figura 6: Simulador TRC472.



Fuente: Zeitoun (2014). *A distributed system interface for a flight simulator.*

condiciones de uso particular y excluyendo cualquier uso comercial, tanto para Windows como para Linux, las cuales deben instalarse y pueden ejecutarse desde Visual Studio 2013 o 2015 Presagis (2023).

5.6.2. GL Studio®

GL Studio es una potente colección de herramientas que permite a los desarrolladores la creación de gráficos altamente detallados y controles interactivos dentro de sus aplicaciones de software. Esto impulsa la mejora en el nivel de realismo y sofisticación de sus proyectos de desarrollo. Los programadores tienen la capacidad de emplear GL Studio para construir interfaces gráficas, ya sean en 2D o 3D, de última generación y reutilizables. Estas interfaces pueden ser utilizadas en la operación, mantenimiento o reproducción de incluso los sistemas más complejos, como las pantallas de cabina de aeronaves militares o civiles, los paneles de control de vehículos automotores, las pantallas médicas y los equipos de comunicaciones MathWorks (2023).

Cada uno de los paquetes de GL Studio incorpora un editor de interfaz de usuario

(HMI) fácil de usar que permite crear o importar elementos visuales y comportamientos que controlan la aplicación. Este editor brinda una serie de funciones esenciales para generar rápidamente geometría en 2D o 3D, eliminando así la necesidad de tener que programar manualmente. Entre las funciones para la creación de geometría se incluyen herramientas básicas para dibujar, agrupar, organizar y aplicar texturas. Además, el editor cuenta con la capacidad de importar contenido 3D desde formatos de archivo ampliamente aceptados en la industria. La geometría se puede transformar de manera eficiente en elementos como perillas, botones de presión, interruptores y odómetros utilizando herramientas de conversión de geometría MathWorks (2023).

5.7. Raspberry Pi®

Los distintos modelos de raspberry pi son dispositivos de cómputo de propósito general, se pueden utilizar para aplicaciones de sistemas integrados y para aplicaciones integradas conectadas a internet. La disponibilidad de un software de código abierto también permite interactuar con dispositivos como cámaras USB, teclados y adaptadores Wi-Fi sin tener que buscar alternativas patentadas (Molloy, 2016). Raspbian el sistema operativo basado en Linux® que utiliza raspberry pi viene con el entorno de escritorio gráfico Lightweight X11 Desktop Environment (LXDE) instalado. Este es un entorno de escritorio reducido para el sistema que utiliza Openbox, un administrador de ventanas que maneja la apariencia de ventanas y menús, el cual se ejecuta sobre LXDE Richardson (2012).

5.7.1. Interfáz gráfica de usuario con Raspberry Pi®

Hay muchas formas diferentes de implementar aplicaciones GUI en raspberry pi. Por ejemplo, Java tiene soporte integral integrado para el desarrollo de GUI con distintas bibliotecas como Windowing Toolkit (AWT), y Python tiene bibliotecas como pyGTK, wxPython y Tkinter. Para desarrollar aplicaciones GUI en C/C++ existen dos opciones: GIMP Toolkit (GTK+) y el marco de desarrollo multiplataforma Qt. GTK+ es un conjunto de herramientas multiplataforma para crear aplicaciones GUI. Es más conocido por su uso en el escritorio Linux® GNOME y GNU. La aplicación que se ejecuta en el en la placa usando VNC aunque también funciona perfectamente si la aplicación se ejecuta directamente en placa. Por otra parte, Qt es un poderoso marco de desarrollo multiplataforma que utiliza C++ estándar. Proporciona bibliotecas de código C++ para aplicaciones GUI, acceso a bases de datos, gestión de subprocesos, redes y más. Es importante destacar que el código desarrollado bajo este marco se puede ejecutar bajo Windows, Linux, Mac OS X, Android, iOS y en plataformas integradas, como el raspberry pi Molloy (2016).

5.7.2. Comunicación serial con Arduino

La comunicación en serie entre Raspberry Pi y Arduino permite combinar las ventajas de ambos dispositivos. La Raspberry Pi tiene una gran potencia de cálculo y conectividad inalámbrica, mientras que el Arduino tiene una gran variedad de entradas y salidas digitales y analógicas. Un ejemplo de uso de este sistema es la automatización del hogar. La Raspberry

Pi podría servir como interfaz de usuario y controlador central, mientras que el Arduino podría controlar los dispositivos físicos, como luces, interruptores y sensores. En resumen, la comunicación en serie entre Raspberry Pi y Arduino es una herramienta versátil que puede utilizarse en una amplia gama de proyectos Molloy (2016). La comunicación entre Raspberry Pi y Arduino ofrece una serie de beneficios, entre los que se incluyen:

- Combinar las fortalezas de dos dispositivos: La Raspberry Pi tiene una gran potencia de cálculo y conectividad inalámbrica, mientras que el Arduino tiene una gran variedad de entradas y salidas digitales y analógicas. La comunicación entre estos dos dispositivos permite combinar estas fortalezas para crear sistemas más complejos y potentes.
- Simplificar el desarrollo de proyectos: La comunicación entre Raspberry Pi y Arduino puede simplificar el desarrollo de proyectos al permitir que los desarrolladores se centren en la lógica de su aplicación.
- Reducir el costo de los proyectos: La comunicación entre Raspberry Pi y Arduino puede reducir el costo de los proyectos al permitir que los desarrolladores utilicen dos dispositivos en lugar de uno.

Para conectar Raspberry Pi y Arduino utilizando el puerto serial, se necesita un cable USB que conecte los dos dispositivos. Una vez conectados, se debe instalar la biblioteca pyserial en la Raspberry Pi. Esta biblioteca proporciona las funciones necesarias para enviar y recibir datos a través del puerto serial. Para programar la Raspberry Pi, se crea un script de Python que envíe datos al Arduino. El script debe abrir el puerto serial, enviar el mensaje deseado y cerrar el puerto serial. Para programar el Arduino, se crea un sketch de Arduino que reciba datos de la Raspberry Pi. El sketch debe inicializar el puerto serial, leer el mensaje recibido y realizar la acción deseada. Un ejemplo de aplicación es controlar un LED utilizando la comunicación en serie. La Raspberry Pi envía un mensaje al Arduino para encender o apagar el LED Molloy (2016). El Arduino recibe el mensaje y enciende o apaga el LED según las instrucciones. Los pasos a seguir para realizar la comunicación son los siguientes:

1. Conecte el cable USB al puerto USB de la Raspberry Pi.
2. Conecte el otro extremo del cable USB al puerto USB del Arduino.
3. Instale la biblioteca pyserial en la Raspberry Pi.
4. Cree un script de Python que envíe datos al Arduino.
5. Cree un sketch de Arduino que reciba datos de la Raspberry Pi.

5.8. Regulación de simuladores en Guatemala

Los dispositivos de instrucción que se utilizarán en programas de formación reconocidos deben ser sometidos a la aprobación de la autoridad competente antes de su primer uso. Esta aprobación es necesaria para garantizar que los dispositivos de instrucción sean adecuados para su propósito y que cumplan con los estándares de calidad establecidos. La Dirección

General de Aeronáutica Civil de Guatemala define 2 clasificaciones para los simuladores de vuelo y brinda especificaciones de funcionamiento y requerimientos mínimos para ambas. Se define como dispositivo sintético de entrenaamiento de vuelo a cualquier réplica de aeronave en una cubierta abierta o cabina cerrada que incluya equipo mecánico, electrónico y programas para los sistemas instalados que simulen operaciones en tierra y en vuelo. Por otro lado, se define como simulador de vuelo a cualquier réplica de tamaño real de un específico tipo de aeronave, modelo y serie DGAC (2023).

5.8.1. Simulador de vuelo

Se define como simulador de vuelo a cualquier réplica de tamaño real de un específico tipo de aeronave, modelo y serie. Se puede clasificar como simulador si cumple los siguientes requisitos DGAC (2023).

- Incluir el equipo mecánico, electrónico y programas para representar la aeronave y simular las operaciones realizadas en tierra y durante el vuelo.
- Poseer un sistema de *force feedback* en la cabina, que posea movimientos mínimos equivalentes al de un sistema de 3 grados de libertad.
- Usar un sistema visual que provea un campo de visión mínimo de 45 grados y vertical de 30 grados de forma simultánea.

5.8.2. Dispositivo sintético de entrenamiento de vuelo

Se define como una réplica de aeronave en una cubierta abierta o cabina cerrada que incluya equipo mecánico, electrónico y programas para los sistemas instalados que simulen operaciones en tierra y en vuelo. Representa un dispositivo de simulación más simple que un simulador y se puede clasificar en esta categoría según los siguientes criterios DGAC (2023).

- Ser una réplica de igual tamaño de instrumentos, equipo de panel y controles de una aeronave o serie de aeronaves.
- Puede o no contar con sistema de simulación visual y sistema de movimiento o de fuerza en la cabina.

6.1. Metodología de diseño

En esta sección se describe el proceso de diseño e implementación de una interfaz para un simulador de vuelo didáctico. El proceso se dividió en cuatro fases; la generación y selección de ideas, el diseño de un panel de instrumentos para desplegar la interfaz, el diseño de la electrónica de lectura de datos y representación de parámetros y por último la programación de la interfaz.

1. Generación y selección de ideas: Luego de un proceso de generación de ideas, se utilizaron matrices de ponderación para valorar los aspectos entre 1 y 5 y el peso o la importancia de cada uno entre 0 y 1, tomando en cuenta que se buscaba una alternativa de menor costo que las existentes en mercado, el aspecto de los costos se valoró como el de mayor peso en todas las matrices.
2. Panel de instrumentos: Tomando en cuenta las selecciones realizadas se diseñó un panel de instrumentos basado en el Cessna 172 por ser un avión ampliamente utilizado en la formación de nuevos pilotos, el diseño del panel incluye la estructura que soporta las cargas, una cubierta que simula la forma del panel y los instrumentos mecánicos para la simulación de ciertos parámetros.
3. Electrónica: Se diseñó la electrónica necesaria para recolectar los datos de los sensores instalados en los mandos del avión, así como para la simulación de los instrumentos mecánicos y desplegar la interfaz.
4. Interfaz: Se programó una interfaz que fuera capaz de interpretar los datos recolectados por los sensores, calculara los parámetros de vuelo y desplegara los mismos en el panel diseñado.

6.2. Definición de requisitos

Cuadro 2: Identificación de códigos

ID	Significado
PN	Panel de instrumentos
SE	Sistema eléctrico
IT	Interfaz
CT	Costos

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3: Requisitos

Código	Descripción
IT01	El tiempo de respuesta de la interfaz ante las acciones del usuario debe ser menor a 1 segundo.
IT02	La interfaz debe contar con un menú principal y una pestaña de ajustes para modificar los parámetros de vuelo iniciales.
IT03	La interfaz debe ser capaz de simular maniobras en tierra, despegue y vuelo continuo.
IT04	La interfaz debe verificar la conexión con los sensores y mostrar una alerta en caso exista una desconexión.
IT05	Todas las letras y números mostrados deben ser mayores a 5 mm de altura.
IT06	El estilo visual debe ser el mismo a través de las distintas pantallas de navegación de la interfaz.
SE01	La interfaz en su totalidad debe ser encendida con un solo interruptor de tipo llave.
SE02	El panel en su totalidad debe poder ser alimentado por un solo tomacorrientes de 110V.
SE03	Ningún cable o componente electrónico a excepción de pantallas debe ser visible para el usuario.
SE04	El panel debe poseer una compuerta de acceso a la electrónica en la parte posterior que permita la realización de mejoras e instalación de más componentes.
PN01	El panel de instrumentos debe estar fabricado con un factor de seguridad mínimo de 1.5
PN02	El panel de instrumentos no debe tener bordes filosos ni elementos que puedan provocar lesiones
PN03	El prototipo de panel de instrumentos debe tener un peso menor a 30 libras
PN04	La ubicación de al menos el 90 % de los componentes debe ser la misma que en el panel del cessna 172.
PN04	El costo total del prototipo debe ser menor a Q1,500.00

Fuente: Elaboración propia

6.3. Generación y selección de ideas

6.3.1. Materiales del panel

Se considerará la utilización de perfiles de acero o de aluminio para la estructura del panel y lámina galvanizada o MDF para la cubierta, por lo que se trabajó con 4 diferentes

opciones y se valoró principalmente el costo, pero también la facilidad de ensamblaje, la complejidad de reparación en caso fuera necesaria y la vida útil de los materiales. Con base en la matriz se seleccionó una combinación de perfiles de aluminio para la estructura y MDF para la cubierta.

Cuadro 4: Matriz de ponderación para los materiales del panel

Criterio	Factor de peso	Estructura de acero y cubierta de lámina	Estructura de acero y cubierta de MDf	Estructura de aluminio y cubierta de lámina	Estructura de aluminio y cubierta de MDf
Costo	0.4	3	4	3	5
Complejidad de construcción	0.2	3	4	3	4
Vida útil	0.1	5	5	4	4
Complejidad de reparación	0.1	3	4	3	4
Peso	0.2	2	2	3	5
	Total	3	3.9	3.1	4.6

Fuente: Elaboración propia

6.3.2. Instrumentación

Se consideró 2 posibles formas de simular los instrumentos del panel, la primera mediante la interfaz gráfica utilizando pantallas para mostrar los instrumentos programados y la segunda mediante instrumentos mecánicos físicos y la utilización de servomotores para replicar los movimientos de los instrumentos reales. También se consideró utilizar una combinación de ambas propuestas para aprovechar las ventajas de ambas, para lo cual se valoraron nuevos aspectos como la complejidad de programación, la rapidez de respuesta y la capacidad de simulación. Con base en los resultados de la matriz se seleccionó una combinación de ambos métodos como mejor opción para la simulación de instrumentación.

Cuadro 5: Matriz de ponderación para la simulación de la instrumentación

Criterio	Factor de peso	2 pantallas	Instrumentos mecánicos	Combinación
Costo	0.2	2	5	4
Complejidad de instalación	0.1	2	4	4
Complejidad de programación	0.2	2	4	4
Rapidez de respuesta	0.1	4	1	3
Vida útil	0.1	5	3	4
	Total	2.7	3.6	3.8

Fuente: Elaboración propia

6.3.3. Interacción

Se consideraron 3 formas de interactuar con la interfaz gráfica para controlar los detalles de la simulación, la primera mediante un control directo utilizando una pantalla táctil, la segunda un control por botones instalado en el panel de instrumentos y la tercera otro control por botones inalámbrico que se comunicara por infrarrojo. Con base a los resultados de la matriz se seleccionó una interacción por medio de una pantalla táctil.

Cuadro 6: Matriz de ponderación para la interacción con la interfaz

Criterio	Factor de peso	Pantalla táctil	Botones en panel	Control inalámbrico
Costo	0.3	4	5	4
Complejidad de instalación	0.15	4	1	3
Complejidad de programación	0.2	3	4	3
Rapidez de respuesta	0.15	5	3	2
Vida útil	0.1	5	3	4
Complejidad de reparación	0.1	1	4	4
	Total	3.75	3.6	3.35

Fuente: Elaboración propia

6.3.4. Lenguaje de programación

Tomando en cuenta las herramientas para la simulación de instrumentos de vuelo como VASP TX o las librerías del mismo propósito como allegro se consideraron tres opciones para la programación de la interfaz, la primera utilizar lenguaje C++ por sí solo, la segunda utilizar una herramienta como la mencionada VASP TX que funciona a base de C++ o utilizar Python mediante la librería allegro, se valoraron criterios como la curva de aprendizaje tomando en cuenta que Python es un lenguaje más fácil de usar que C++ y además un criterio de la complejidad para realizar la interconexión de sensores y pantalla. Con base en los resultados de la matriz se seleccionó Python como lenguaje de programación.

6.4. Panel de instrumentos

6.4.1. Diseño preliminar

El panel de instrumentos está basado en el panel de un Cessna 172, con algunas modificaciones realizadas para la implementación de la interfaz y limitado a desplegar los parámetros de vuelo plantados dentro de los objetivos.

La estructura del panel está formado por perfiles angulares (1x1)in y 1/8 in de espesor de

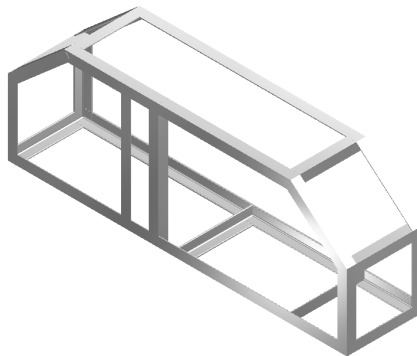
Cuadro 7: Matriz de ponderación para la interacción con la interfaz

Criterio	Factor de peso	Lenguaje C++	Lenguaje C++ mediante herramienta especializada	Lenguaje Python
Complejidad de programación	0.35	2	3	4
Complejidad para interconexión	0.35	3	3	3
Factor de aprendizaje	0.3	2	2	4
	Total	2.35	2.7	3.65

Fuente: Elaboración propia

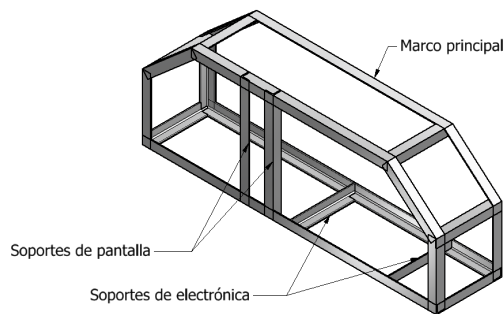
aluminio 6061 unidos mediante pernos. La misma está conformada por el marco principal, dos soportes para la pantalla táctil y 2 soportes para la electrónica.

Figura 7: Estructura del panel de instrumentos



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

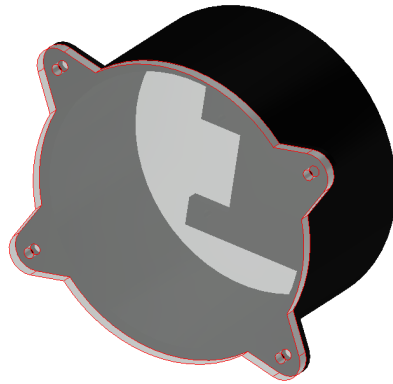
Figura 8: Partes principales de la estructura



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

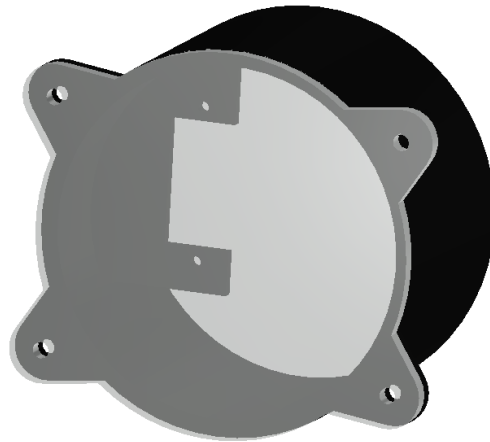
Se diseñaron 2 tipos de instrumento mecánico tomando en cuenta los 2 tipos de instrumentos que presenta la distribución del cessa 172, ambos fueron diseñados para albergar un servomotor de 180° SG90, así mismo cada instrumento está diseñado para ser sujetado al panel frontal del panel mediante 4 pernos.

Figura 9: Instrumento mecánico A



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

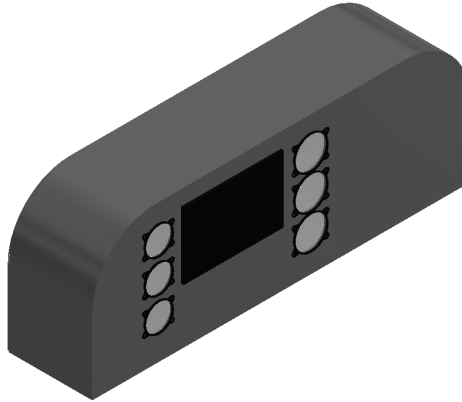
Figura 10: Instrumento mecánico B



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

Se diseñó también cubiertas para las distintas partes del panel con el objetivo de replicar la forma y disposición del Cessna 172. El panel con las cubiertas y los instrumentos instalados se puede observar en la siguiente figura.

Figura 11: Panel completo



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

6.4.2. Cálculos

El panel no está sometido a cargas significativas ya que son solamente las cargas de los componentes internos, además se considera la carga del panel completo para el diseño del anclaje a la base, las cargas mencionadas se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro 8: Cargas del panel de instrumentos

Explicación de la carga	Carga (N)
Instrumento A	3
Instrumento B	4
Ppantalla	10
Electrónica	10
Panel completo	71.2

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que las cargas son bastante bajas por lo que se realizó el análisis de las partes con cargas más significativas por considerarse como las posibles secciones críticas. Se realizó el análisis de los soportes de electrónica, el soporte de pantalla y además el anclaje del panel a la estructura del simulador. Se calculó el factor de seguridad en las secciones de interés considerando las propiedades del aluminio listadas en siguiente cuadro, en el caso de las uniones pernadas teniendo en cuenta que las resistencias de ambos materiales son menores que la del acero de los tornillos se calculó únicamente el factor de seguridad para el aplastamiento del elemento y el cortante del borde.

Cuadro 9: Propiedades de los elementos del panel

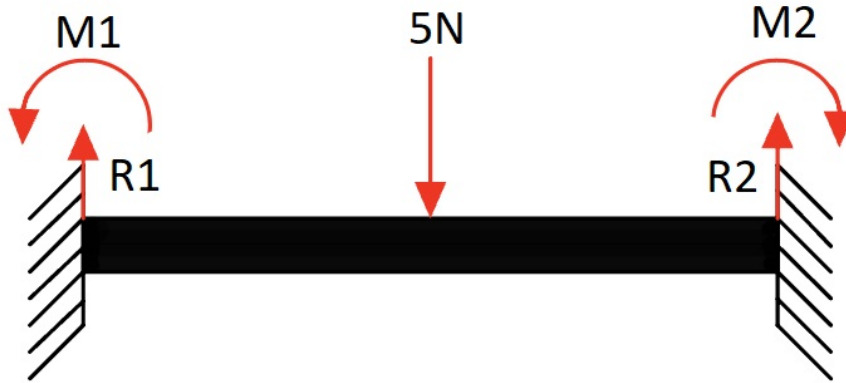
Material	Resistencia a la fluencia (MPa)
Aluminio 6061	48.3

Fuente: Elaboración propia

Soporte de electrónica

Se consideraron los 2 perfiles de aluminio como 2 vigas empotradas sometidas a una carga puntual central equivalente a la mitad del peso de la electrónica como se observa en el diagrama de cuerpo libre.

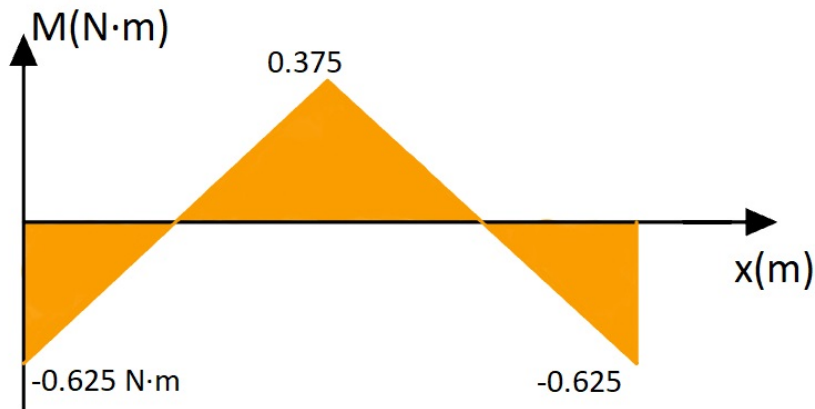
Figura 12: DCL Soporte de electrónica



Fuente: Elaboración propia

La sección crítica se encuentra en los empotramientos donde se producen los momentos máximos como se observa en el diagrama de momento del soporte.

Figura 13: Diagrama de momento soporte de electrónica



Fuente: Elaboración propia

El esfuerzo normal máximo sobre la viga se calculó considerando el esfuerzo por flexión en la sección del momento máximo y la inercia de una sección rectangular por las características del perfil.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = 9.5MPa \quad (2)$$

Utilizando esfuerzo cortante máximo como teoría de falla por ser un material dúctil bajo carga estática se calculó el factor de seguridad para los soportes de la electrónica.

$$n = \frac{S_y}{\sigma_1 - \sigma_3} = 5.1 \quad (3)$$

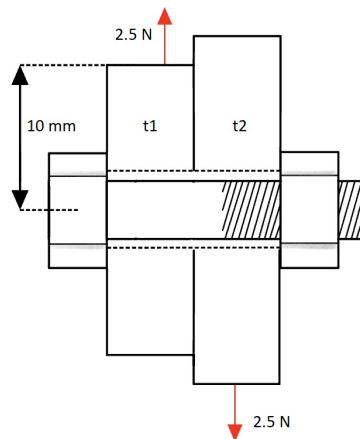
Selección de pernos

Como se puede observar en el detalle de las cargas del panel, estas son bastante bajas por lo que se decidió utilizar tornillería de bajo costo y fácil acceso y dado que tener tornillos más grandes o más resistentes no mejora la unión, debido a que los factores de seguridad mínimos aparecerán en el aluminio por tener una resistencia menor; se utilizaron tornillos M5x20 grado 4.6 para las uniones de los perfiles así como para el anclaje del mismo, mientras que se utilizaron tornillos m3x20 grado 4.6 para el anclaje de los instrumentos y de la pantalla

Unión pernada de la pantalla

Se consideró que los 4 pernos que soportan la pantalla a la estructura soportan una cuarta parte de la fuerza cortante total que sería equivalente al peso de la pantalla. La fuerza cortante se produce entre el perfil de aluminio de la estructura y el aluminio del marco de la pantalla. En la Figura 13 se observa un diagrama del tornillo en cortante.

Figura 14: Diagrama perno de sujeción de pantalla



Fuente: Elaboración propia

Donde

- t1: Espesor del marco de aluminio de la pantalla (2 mm)
- t2: Espesor del perfil de aluminio (3.175 mm)

Considerando los espesores, el tamaño del agujero y la distancia desde el agujero al borde se calcularon los modos de falla más críticos.

Aplastamiento del elemento:

$$\sigma = \frac{F}{dt_2} = \frac{2.5N}{0.005m(0.002m)} = 0.25MPa \quad (4)$$

$$n_d = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{48.3MPa}{0.25MPa} = 193.2 \quad (5)$$

Cortante del borde:

$$\sigma = \frac{F}{t_2a} = \frac{2.5N}{0.01m(0.002m)} = 0.125MPa \quad (6)$$

$$n_d = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{48.3MPa}{0.5MPa} = 386.4 \quad (7)$$

Cuadro 10: Factores de seguridad unión de pantalla

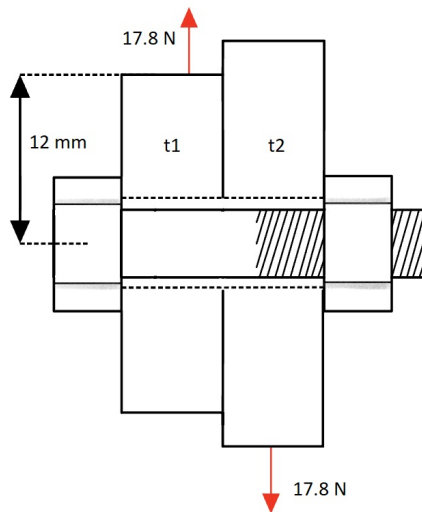
Modo de falla	Factor de seguridad calculado
Aplastamiento de los elemntos	193.2
Cortante del borde	386.4

Fuente: Material Property Data, 2023

Unión pernada del anclaje

Se consideró que los 4 pernos que soportan la pantalla a la estructura soportan una cuarta parte de la fuerza cortante total que sería equivalente al peso total del panel. La fuerza cortante se produce entre el perfil de aluminio de la estructura y el perfil de acero. En la siguiente figura se observa un diagrama de un tornillo en cortante.

Figura 15: Diagrama perno de sujeción del mango



Fuente: Elaboración propia

Donde

- t1: Espesor del perfil de aluminio (3.175 mm)
- t2: Espesor del perfil de aluminio (3.175 mm)

Considerando los espesores el tamaño del agujero y la distancia desde el agujero al borde se calcularon los modos de falla más críticos.

Aplastamiento del elemento:

$$\sigma = \frac{F}{dt_2} = \frac{24.3N}{0.005m(0.003175m)} = 1.62MPa \quad (8)$$

$$n_d = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{48.3MPa}{1.62MPa} = 29.8 \quad (9)$$

Cortante del borde:

$$\sigma = \frac{F}{t_2a} = \frac{24.3N}{0.012m(0.003175m)} = 0.68MPa \quad (10)$$

$$n_d = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{48.3MPa}{0.68MPa} = 71.03 \quad (11)$$

Cuadro 11: Factores de seguridad unión de mangos

Modo de falla	Factor de seguridad calculado
Aplastamiento de los elemntos	29.8
Cortante del borde	71.03

Fuente: Elaboración propia

6.5. Electrónica

La interfaz realiza la recolección de datos de los módulos de pedales, yugo y palancas por medio de sensores y a su vez utiliza servomotores para mostrar datos en el panel, se presenta un listado de los componentes electrónicos que controla y la clasificación de cada uno. Considerando que existe un total de 6 entradas analógicas se utilizaron convertidores ADS1115 para convertir las lecturas analógicas de los sensores y potenciómetros a señales digitales dada la limitación de raspberry pi para recibir directamente señales analógicas.

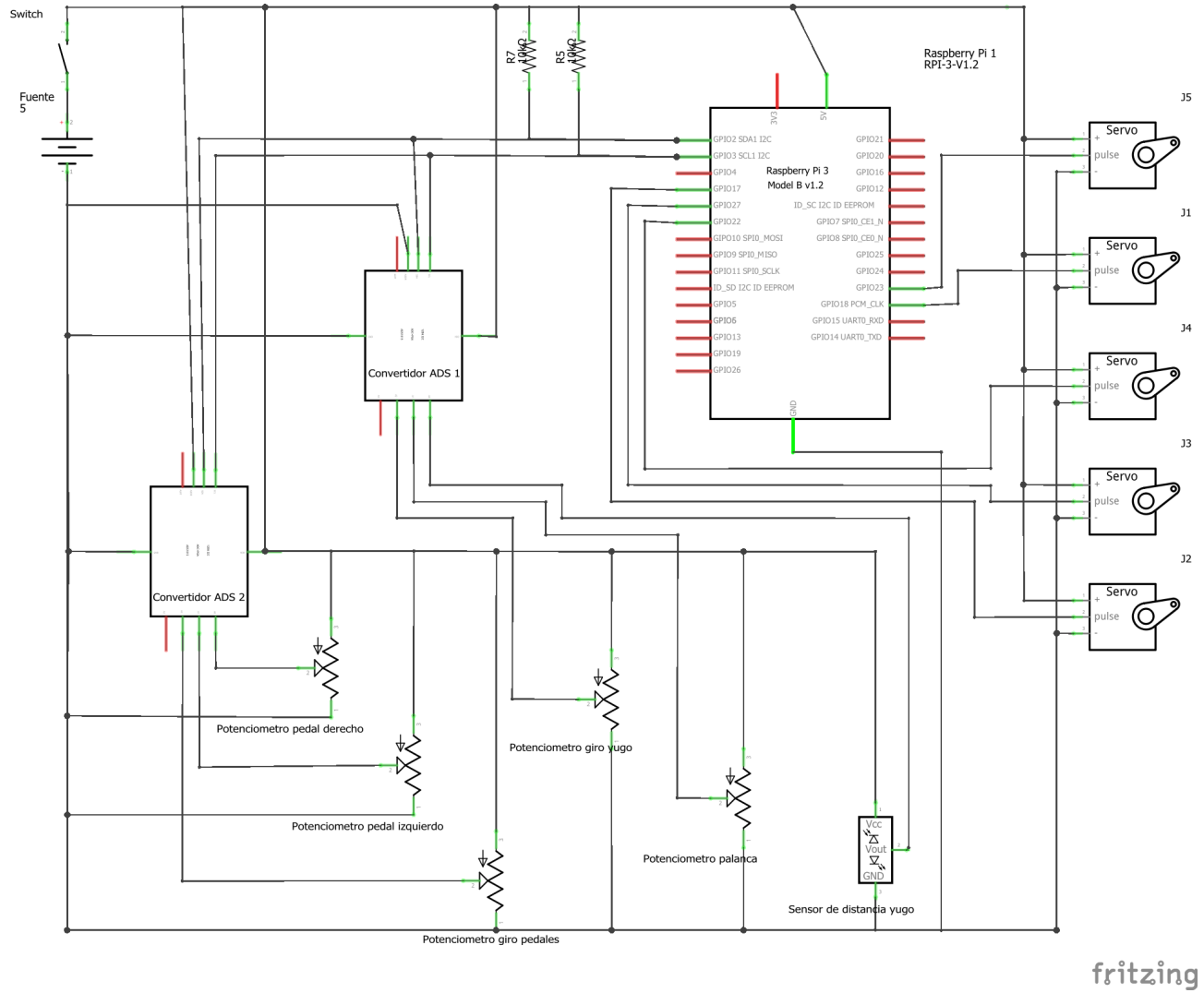
A continuación se observa el diagrama esquemático de la conexión de todos los componentes con RPi, considerando una fuente de alimentación de 5V y 3A para suplir la corriente demandada por los mismos. Cabe resaltar que dada la ausencia de entradas analógicas en la placa se utiizaron 2 módulos ADS1115 conectados mediante comunicación I2C utilizando direcciones diferentes.

Cuadro 12: Componentes electrónicos

Cantidad	Componente	Clasificación
5	Potenciometro	Entrada analógica
1	Sensor de distancia Sharp	Entrada analógica
5	Servomotores	Salida digital PWM

Fuente: Elaboración propia

Figura 16: Diagrama esquemático del circuito



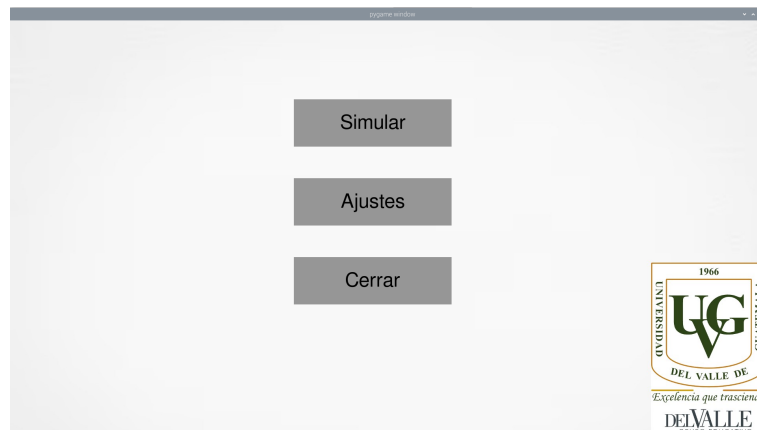
Esquemático reimpresso por cortesía de Fritzing

6.6. Interfaz

6.6.1. GUI

Para desarrollar la interfaz gráfica de usuario se utilizaron las librerías pygame y pygame widgets que tienen un enfoque de entretenimiento y desarrollo de videojuegos, sin embargo brindan herramientas avanzadas pero fáciles de usar para el desarrollo de ventanas, animaciones, botones y deslizadores; la facilidad de uso de estas librerías permite una curva de aprendizaje rápida por lo que permite que el proyecto sea replicable. La interfaz consta de un menú con 3 opciones, 2 de estas dirigen a la ventana de simulación y a la ventana de ajustes, la última opción solamente cierra la interfaz. A continuación se muestra una imagen del menú que se despliega al encender el simulador.

Figura 17: Menú de la interfaz gráfica de usuario



Fuente: Elaboración propia

La ventana de simulación despliega los 6 instrumentos principales en la pantalla e inicia el programa de simulación, el cual acciona los servomotores que simulan otros 5 instrumentos.

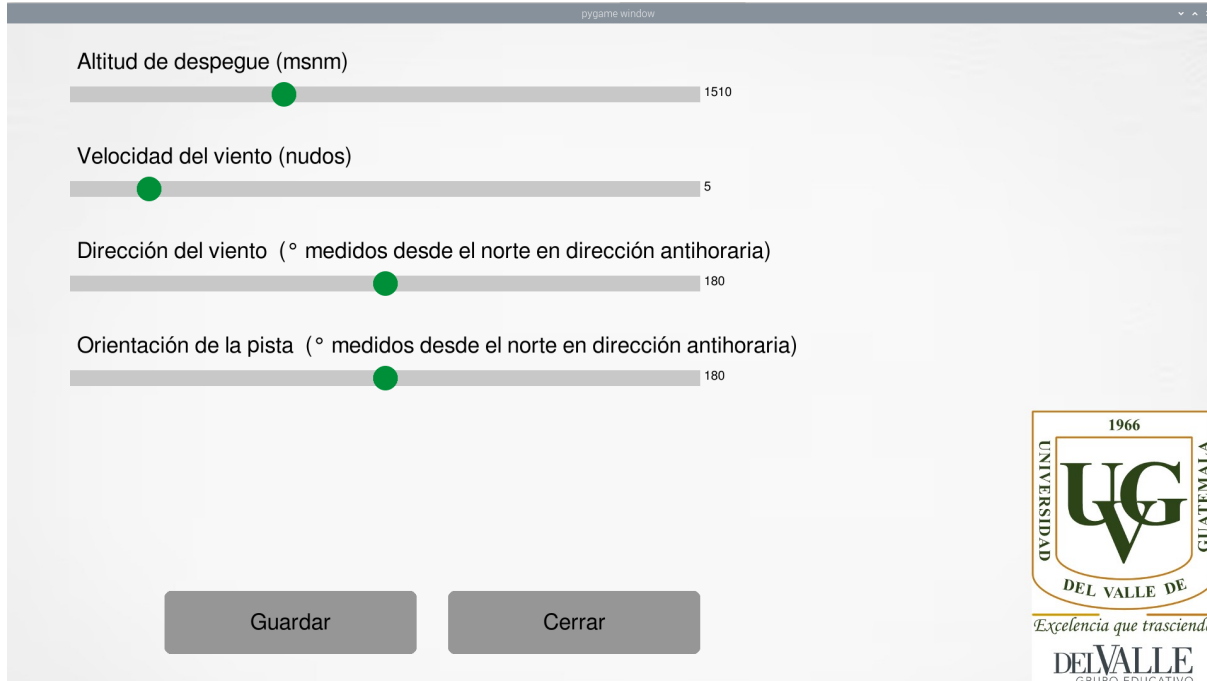
Figura 18: Ventana de simulación



Fuente: Elaboración propia

La ventana de ajustes permite cambiar ciertos parámetros que determinan las condiciones iniciales de la simulación. A continuación se puede observar una imagen de la ventana de ajustes y un cuadro con los parámetros listados.

Figura 19: Ventana de ajustes



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 13: Parámetros ajustables

Parámetro	Variables que determina
Altitud de despegue	Determina la altitud inicial de la simulación que depende de la altitud a la que se encuentra el aeropuerto de despegue
Velocidad del viento	Determina la magnitud de la velocidad propia del viento
Dirección del viento	Determina la dirección en la que se dirige el flujo, junto con la dirección de la pista determina las componentes de la velocidad relativa a la aeronave.
Orientación de la pista	Determina la orientación inicial de la aeronave, junto con la dirección del viento determina las componentes de la velocidad relativa a la aeronave.

Fuente: Elaboración propia

6.6.2. Programas básicos

Conversión analógica - digital

Como se mencionó anteriormente la falta de puertos analógicos llevó a la necesidad de utilizar un convertidor analógico a digital para poder tomar las lecturas de los 5 potenciómetros y el sensor de distancia Sharp. Para realizar de forma sencilla la lectura de los datos la librería adafruit ads11x15 permite leer la señal de voltaje de forma sencilla por lo que sólo es necesario un proceso de mapeo para convertirlo en posición o ángulo, proceso que se discutirá más adelante. El siguiente diagrama muestra una síntesis del programa básico para leer un canal y guardar la información de en una variable.

Figura 20: Diagrama síntesis del programa de lectura con convertidor ADS

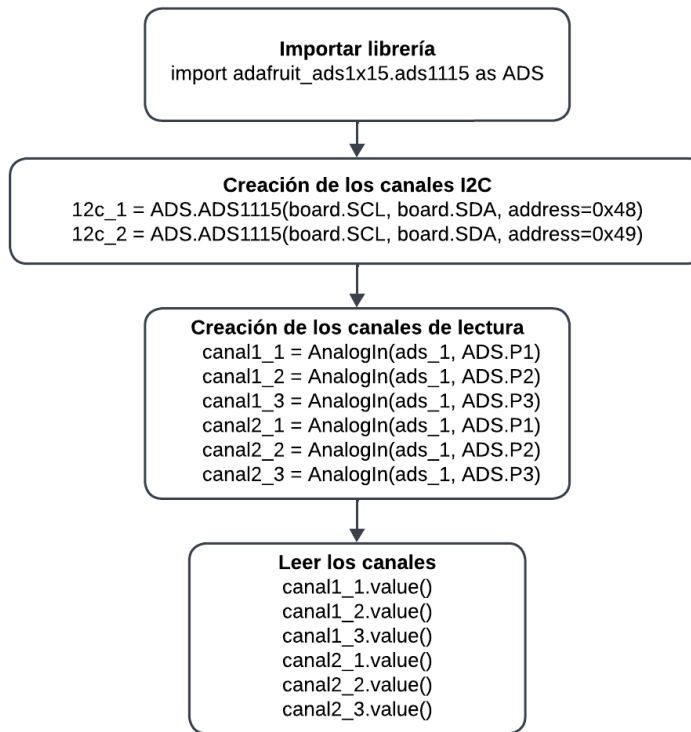


Diagrama reimpresso por cortesía de LucidChart Inc.

Se tiene un total de 6 canales para las 6 señales analógicas que se deben leer, la señal que se toma en cada uno de ellos se setalla en el siguiente cuadro.

Control de servomotores

Para el control de los servomotores Raspberry Pi cuenta con la ventaja de poder configurar cualquier pin GPIO cómo una salida PWM por lo que utilizando la librería RPi.GPIO se puede regular el ancho del pulso entre 3 y 12 milisegundos lo que equivale a 0° y 180° respectivamente. El siguiente diagrama muestra una síntesis del programa básico para configurar el pin de señal y regular el ángulo del servomotor.

Cuadro 14: Canales analógicos

Canal	Señal
canal1-1	Rotación de los pedales
canal1-2	Presión del pedal derecho
canal1-3	Presión del pedal izquierda
canal2-1	Rotación del yugo
canal2-2	Rotación de la palanca
canal2-3	Desplazamiento del yugo

Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Diagrama síntesis del programa de movimiento para los servos

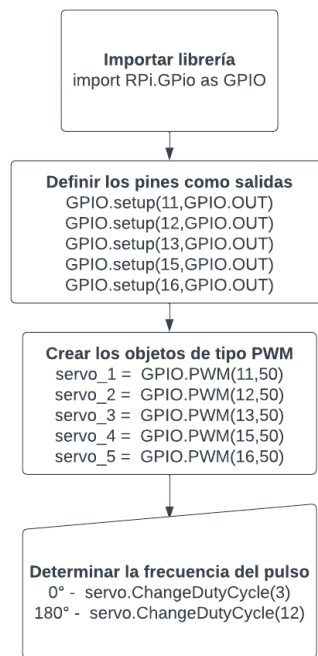


Diagrama reimpresso por cortesía de LucidChart Inc.

Cada uno de los 5 servomotores controla un instrumento mecánico, el instrumento asignado a cada uno de los objetos se encuentra detallado en el siguiente cuadro.

Cuadro 15: Asignación de los servomotores

Canal	Señal
Servo-1	Flujo de combustible
Servo-2	Nivel de combustible
Servo-2	VOR 1
Servo-2	VOR 2
Servo-2	Tocómetro

Fuente: Elaboración propia

6.6.3. Cálculos de interfaz

La interfaz calcula las diferentes variables de vuelo partiendo de un análisis dinámico del movimiento y rotación del avión en sus diferentes ejes. Para esto se basa la segunda ley de newton, desarrolla sumatorias de fuerzas y momentos que mediante métodos numéricos integra para obtener desplazamientos, velocidades y rotaciones, cada fase de los cálculos será explicada a profundidad posteriormente. El siguiente diagrama ejemplifica el desarrollo general, como se puede observar el cálculo se divide en 2 tipos de simulación, la simulación en tierra y la simulación en aire que se inicializa al momento que la sustentación es mayor al peso de la aeronave; esto lo que permite es reducir la cantidad de cálculo a realizar mientras el avión se encuentra en tierra donde tiene menos grados de libertad.

Figura 22: Diagrama síntesis del programa general de cálculos

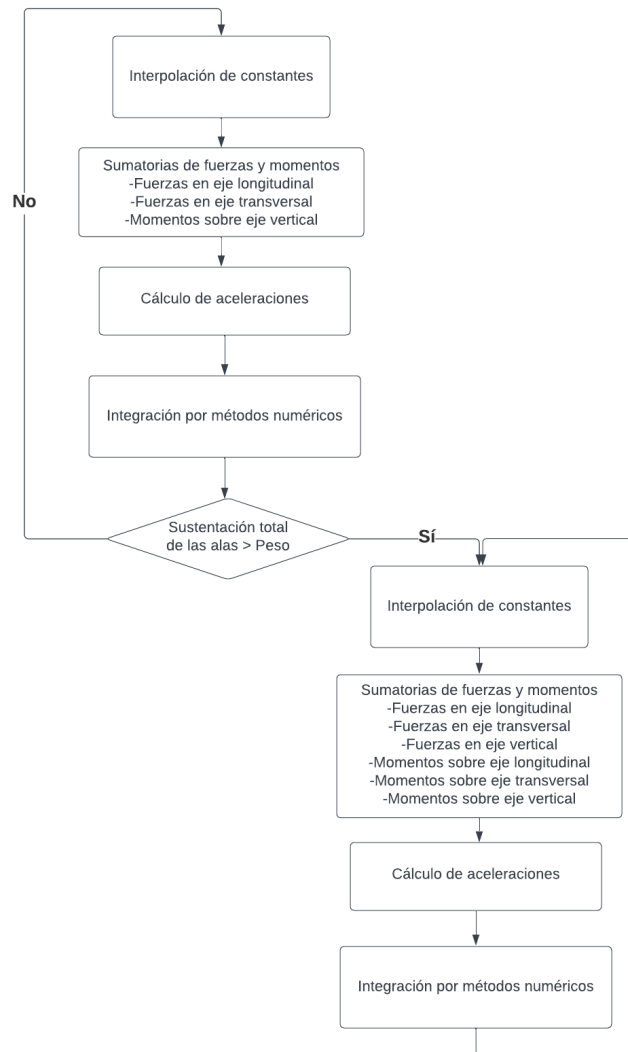


Diagrama reimpresso por cortesía de LucidChart Inc.

Cabe resaltar que los cálculos se desarrollan en cada iteración con el objetivo de actualizar los instrumentos de forma continua y cumplir con el objetivo del tiempo de respuesta menor a 1 segundo.

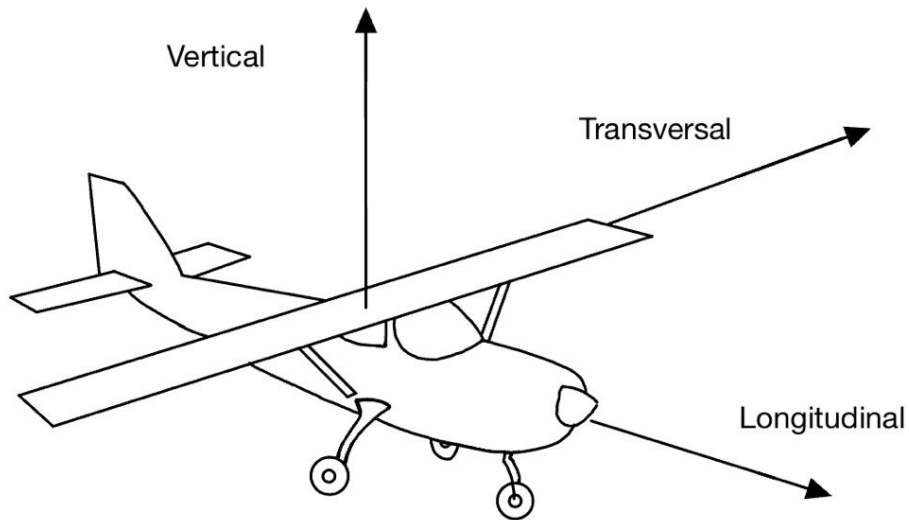
Interpolación de constantes

Para poder desarrollar las sumatorias de fuerzas y momentos es necesario conocer las fuerzas de sustentación, arrastre y empuje sin embargo estas fuerzas están en constante cambio según la posición de las superficies de control y de la potencia del motor, para ello se utiliza el método de polinomios interpolantes de lagrange para obtener las constantes de sustentación y de arrastre para cada superficie de control, esto se realiza utilizando una serie de datos extraídos del diagrama polar de los perfiles alares del cessna 172.

Sumatorias de fuerzas y momentos

Ya conociendo las fuerzas implicadas se desarrollan las ecuaciones dinámicas, considerando el peso del avión, la ubicación del centro de gravedad y el centroide de las superficies de control que se toma como el punto de acción de las fuerzas de arrastre y sustentación. La siguiente imagen muestra una referencia de los ejes utilizados.

Figura 23: Ejes considerados para el análisis dinámico



Fuente: Elaboración propia

A continuación se desarrollan las ecuaciones utilizadas y el siguiente cuadro especifica el significado de las variables utilizadas.

Sumatoria de fuerzas en eje longitudinal.

Cuadro 16: Variables utilizadas en el análisis dinámico

Variable	Significado
T	Fuerza de empuje
D_x	Fuerza arrastre en el eje x
D_y	Fuerza arrastre en el eje y
D_t	Fuerza arrastre de la aleta timón
L	Fuerza de sustentación
φ	Densidad a la altura actual
φ_o	Densidad a la altura de referencia
v_x	Velocidad relativa del viento en el eje x
v_y	Velocidad relativa del viento en el eje y
S	Superficie de referencia alas principales
S_t	Superficie de referencia aleta timón
C_d	Constante de arrastre
$C_{L(i)}$	Constante de sustentación ala derecha
$C_{L(i)}$	Constante de sustentación ala izquierda
r_d	Distancia en el eje longitudinal desde el centroide del ala derecha al centro de gravedad
r_i	Distancia en el eje longitudinal desde el centroide del ala izquierda al centro de gravedad
r_f	Distancia en el eje trasnversal desde el centroide de las alas al centro de gravedad
r_t	Distancia en el eje transversal desde el centroide de la aleta timón al centro de gravedad

Fuente: Elaboración propia

$$\sum F_x = ma_x \quad (12)$$

$$T - D_x = ma_x \quad (13)$$

$$T_o \left(\frac{\varphi}{\varphi_o} \right) - 1/2\varphi v_x^2 S C_d = ma_x \quad (14)$$

Sumatoria de fuerzas en eje transversal.

$$\sum F_y = ma_y \quad (15)$$

$$T - D_y = ma_y \quad (16)$$

$$-1/2\varphi v_y^2 S C_D = ma_y \quad (17)$$

Sumatoria de fuerzas en eje vertical.

$$\sum F_z = ma_z \quad (18)$$

$$L_d + L_i - W = ma_z \quad (19)$$

$$1/2\varphi v^2 SC_{L(d)} + 1/2\varphi v^2 SC_{L(i)} - W = ma_z \quad (20)$$

Sumatoria de momentos actuando sobre el eje longitudinal.

$$\sum M_{x,c} = I\alpha_x \quad (21)$$

$$L_d r_d - L_i r_i = I\alpha_x \quad (22)$$

$$1/2\varphi v^2 SC_{L(d)} r_d - 1/2\varphi v^2 SC_{L(i)} r_i = I_x \alpha_x \quad (23)$$

Sumatoria de momentos actuando sobre eje transversal.

$$\sum M_{y,c} = I\alpha_y \quad (24)$$

$$(L_d + L_i) r_f = I\alpha_y \quad (25)$$

$$(1/2\varphi v^2 SC_{L(d)} + 1/2\varphi v^2 SC_{L(i)}) r_f = I_y \alpha_y \quad (26)$$

Sumatoria de momentos actuando sobre eje vertical.

$$\sum M_{z,c} = I\alpha_z \quad (27)$$

$$D_{(t)} = I\alpha_z \quad (28)$$

$$1/2\varphi v_x^2 S_t C_{D(t)} = I_z \alpha_z \quad (29)$$

Cálculo de aceleraciones

Las ecuaciones dinámicas tienen el objetivo de calcular y almacenar la aceleración lineal y angular en los distintos ejes en cada iteración y almacenarlos en un arreglo. El desarrollo de las ecuaciones para obtener dichas aceleraciones se muestra a continuación.

Aceleración en el eje longitudinal.

$$a_x = \frac{T_o \left(\frac{\varphi}{\varphi_o} \right) - 1/2\varphi v_x^2 SC_d}{m} \quad (30)$$

Aceleración en el eje transversal.

$$a_y = \frac{-1/2\varphi v_y^2 SC_D}{m} \quad (31)$$

Aceleración en el eje vertical.

$$a_z = \frac{1/2\varphi v^2 SC_{L(d)} + 1/2\varphi v^2 SC_{L(i)} - W}{m} \quad (32)$$

Aceleración angular en el eje longitudinal.

$$\alpha_x = \frac{1/2\varphi v^2 SC_{L(d)} r_d - 1/2\varphi v^2 SC_{L(i)} r_i}{I_x} \quad (33)$$

Aceleración angular en el eje transversal.

$$\alpha_y = \frac{(1/2\varphi v^2 SC_{L(d)} + 1/2\varphi v^2 SC_{L(i)}) r_f}{I_y} \quad (34)$$

Aceleración angular en el eje vertical.

$$\alpha_z = \frac{1/2\varphi v_x^2 S_t C_{D(t)}}{I_z} \quad (35)$$

Integración por métodos numéricos

Como se mencionó anteriormente los cálculos completos se repiten en cada iteración por lo que se tiene una serie de aceleraciones acumuladas en un arreglo, esta serie de datos representa la función de aceleración respecto al tiempo desde el inicio de la simulación hasta el tiempo actual, para obtener velocidad o desplazamiento es necesario realizar un proceso de doble integración, sin embargo como se tiene una serie de datos se utiliza el método de integración numérica según la regla de Simpson 3/8, de esta forma se calcula la velocidad en el momento actual. Para poder realizar la segunda integración se necesita un arreglo de

datos con la velocidad por lo que al momento de obtener la velocidad se guarda en un arreglo distinto para repetir el proceso y obtener el desplazamiento lineal y angular en cada eje.

6.6.4. Mapeo de variables

La fase final de la interfaz comprende la conversión de las variables calculadas a variables que puedan utilizarse en la interfaz para representar visualmente en los instrumentos desplegados. Para esto se considera la escala visual de cada instrumento mecánico y gráfico, en el siguiente cuadro se listan los instrumentos, las variables que determinan cada uno y la escala visual de los mismos.

Cuadro 17: Descripción del mapeo de los instrumentos

Instrumento	Variables	Visualización
Anemómetro	Velocidad relativa del viento en el eje longitudinal	Ángulo medido desde la vertical de 0° a 340° / 0 a 200 kilómetros por hora
Indicador de actitud	Ángulo <i>roll</i> y ángulo <i>pitch</i>	Ángulo medido desde la vertical de -45° a 45° y posición vertical / ángulo de -20° a 20°
Altímetro	Altitud	3 agujas con ángulo medido desde la vertical de 0° a 360° / 0 a 1000 pies / 0 a 10000 pies / 0 a 100000 pies
Indicador de velocidad vertical	Velocidad en el eje vertical	Ángulo medido desde la horizontal de -160° a 160° / -3000 a 3000 pies por minuto
Indicador de dirección	Ángulo <i>yaw</i>	Ángulo medido desde la vertical de 0° a 360°
Indicador de giro	Ángulo <i>roll</i>	Ángulo medido desde la horizontal de -45° a 45°
Flujo de combustible	Potencia aplicada	Ángulo medido desde la vertical de -70° a -5° / 0 a 19 galones por hora
Nivel de combustible	Tiempo de simulación	Ángulo medido desde la vertical de -70° a -5° / 0 a 26 galones
Tacómetro	Potencia aplicada	Ángulo medido desde la vertical de -160° a 90° / 0 a 30000 rpm

Fuente: Elaboración propia

7.1. Sensibilidad táctil

7.1.1. Sensibilidad táctil botones

Cuadro 18: Sensibilidad táctil botón "Simular"

No. Prueba	Cantidad de interacciones	Valor de referencia
1	2	1
2	1	1
3	2	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	1
8	2	1
9	2	1
10	1	1
Promedio	1.4	1

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 19: Sensibilidad táctil botón (Ajustes)

No. Prueba	Cantidad de interacciones	Valor de referencia
1	2	1
2	1	1
3	2	1
4	1	1
5	1	1
6	2	1
7	1	1
8	2	1
9	1	1
10	2	1
Promedio	1.5	1

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 20: Sensibilidad táctil botón (Cerrar)

No. Prueba	Cantidad de interacciones	Valor de referencia
1	1	1
2	1	1
3	2	1
4	1	1
5	1	1
6	2	1
7	1	1
8	2	1
9	1	1
10	1	1
Promedio	1.3	1

Fuente: Elaboración propia

7.1.2. Sensibilidad táctil deslizadores

Cuadro 21: Sensibilidad táctil deslizador (Altitud)

No. Prueba	Cantidad de interacciones	Valor de referencia
1	2	2
2	3	2
3	1	2
4	1	2
5	2	2
6	3	2
7	3	2
8	2	2
9	1	2
10	2	2
Promedio	2	2

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 22: Sensibilidad táctil deslizador (Velocidad del viento)

No. Prueba	Cantidad de interacciones	Valor de referencia
1	2	2
2	1	2
3	2	2
4	3	2
5	2	2
6	2	2
7	1	2
8	3	2
9	1	2
10	3	2
Promedio	2.1	2

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 23: Sensibilidad táctil deslizador (Dirección del viento)

No. Prueba	Cantidad de interacciones	Valor de referencia
1	2	2
2	1	2
3	3	2
4	3	2
5	2	2
6	3	2
7	2	2
8	1	2
9	1	2
10	3	2
Promedio	2.1	2

Fuente: Elaboración propia

7.2. Tiempos de simulación

7.2.1. Tiempos de simulación instrumentos mecánicos

Cuadro 25: Tiempo de respuesta instrumentos mecánicos

No. Prueba	Tiempo de respuesta (s)
1	0.832
2	0.887
3	0.912
4	0.845
5	0.960
6	0.825
7	0.978
8	0.809
9	0.890
10	0.853
Promedio	0.8791

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 24: Sensibilidad táctil deslizador (Orientación de la pista)

No. Prueba	Cantidad de interacciones	Valor de referencia
1	1	2
2	2	2
3	3	2
4	1	2
5	1	2
6	2	2
7	4	2
8	3	2
9	2	2
10	1	2
Promedio	2	2

Fuente: Elaboración propia

7.2.2. Tiempos de simulación instrumentos digitales

Cuadro 27: Tiempo de respuesta instrumentos digitales (prueba B)

No. Prueba	Tiempo de respuesta (s)
1	0.876
2	0.934
3	0.719
4	0.801
5	0.945
6	0.768
7	0.712
8	0.874
9	0.973
10	0.793
Promedio	0.8595

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 26: Tiempo de respuesta instrumentos digitales (prueba A)

No. Prueba	Tiempo de respuesta (s)
1	0.745
2	0.831
3	0.963
4	0.812
5	0.710
6	0.901
7	0.733
8	0.955
9	0.774
10	0.866
Promedio	0.7595

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 28: Tiempo de respuesta instrumentos digitales (prueba C)

No. Prueba	Tiempo de respuesta (s)
1	0.754
2	0.821
3	0.888
4	0.732
5	0.910
6	0.762
7	0.947
8	0.799
9	0.685
10	0.875
Promedio	0.7479

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 29: Tiempo de respuesta instrumentos digitales (prueba D)

No. Prueba	Tiempo de respuesta (s)
1	0.723
2	0.812
3	0.943
4	0.769
5	0.875
6	0.794
7	0.911
8	0.738
9	0.982
10	0.855
Promedio	0.8602

Fuente: Elaboración propia

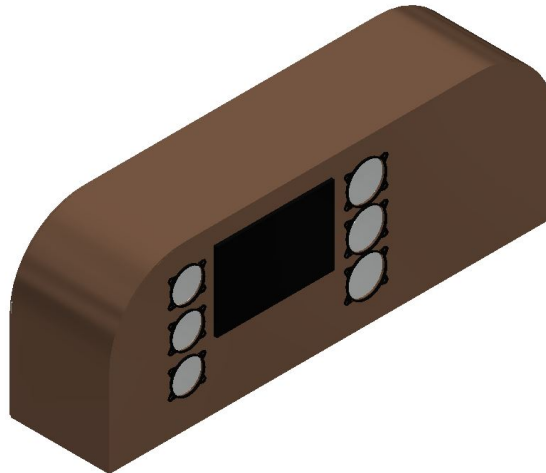
7.3. Diseño final

Cuadro 30: Características principales del prototipo de panel de instrumentos

Propiedad	Valor
Altura	33 cm
Ancho	90 cm
Profundidad	20 cm
Peso	21.5 lb

Fuente: Elaboración propia

Figura 24: Modelo CAD del diseño final



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 31: Posicionamiento de los instrumentos

Instrumento	Posición correcta
Anemómetro	Sí
Horizonte artificial	Sí
Altímetro	Sí
Coodinador de giro	Sí
Indicador de dirección	Sí
Indicador de velocidad vertical	Sí
Reloj	Sí
Indicador de flujo de cmbustible	Sí
Indicador de nivel de combustible	Sí
Indicador de nivel de combustible	Sí
Indicador de nivel de combustible	Sí
Indicador de revoluciones del motor	No
Porcentaje de instrumentos que cumplen	91.6%

Fuente: Elaboración propia

Figura 25: Vista frontal del prototipo físico



Fuente: Elaboración propia

Figura 26: Vista posterior del prototipo físico



Fuente: Elaboración propia

7.4. Verificación de cumplimiento de requisitos

Cuadro 32: Verificación de requisitos

Código	Descripción	Cumple
IT01	El tiempo de respuesta de la interfaz ante las acciones del usuario debe ser menor a 1 segundo.	Sí
IT02	La interfaz debe contar con un menú principal y una pestaña de ajustes para modificar los parámetros de vuelo iniciales.	Sí
IT03	La interfaz debe ser capaz de simular maniobras en tierra, despegue y vuelo continuo.	Sí
IT04	La interfaz debe verificar la conexión con los sensores y mostrar una alerta en caso exista una desconexión.	Pendiente
IT05	Todas las letras y números mostrados deben ser mayores a 5 mm de altura.	Sí
IT06	El estilo visual debe ser el mismo a través de las distintas pantallas de navegación de la interfaz.	Sí
SE01	La interfaz en su totalidad debe ser encendida con un solo interruptor de tipo llave.	Sí
SE02	El panel en su totalidad debe poder ser alimentado por un solo tomacorrientes de 110V.	Sí
SE03	Ningún cable o componente electrónico a excepción de pantallas debe ser visible para el usuario.	Sí
SE04	El panel debe poseer una compuerta de acceso a la electrónica en la parte posterior que permita la realización de mejoras e instalación de más componentes.	Sí
PN01	El panel de instrumentos debe estar fabricado con un factor de seguridad mínimo de 1.5	Sí
PN02	El panel de instrumentos no debe tener bordes filosos ni elementos que puedan provocar lesiones	Sí
PN03	El prototipo de panel de instrumentos debe tener un peso menor a 30 libras	Sí
PN04	La ubicación de al menos el 90 % de los componentes debe ser la misma que en el panel del cessna 172.	Sí
PN04	El costo total del prototipo debe ser menor a Q1,500.00	Sí

Fuente: Elaboración propia

7.5. Desglose de costos

Cuadro 33: Desglose de costos

Producto	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Pantalla táctil	Pantalla táctil de 10.1 pulgadas Honyond	1	Q579.00	Q579.00
Raspberry Pi	RPi 4 modelo B de 4 gb	1	Q328.00	Q328.00
Servo Motor	Servo sg 90 180°	5	Q26.00	Q130.00
Switch	Switch tipo llave	1	Q7.00	Q7.00
Perfil angular	Aluminio 6061 1"x1/16"	1	Q75.65	Q75.65
Tornillos	Hex M5x20 grado 4.6	25	Q0.65	Q16.25
Tuercas	Hex M5	25	Q0.35	Q8.75
Cable	Metro calibre 22	10	Q3.50	Q35.00
ADS1115	Covertidor analógico a digital	2	Q75.00	Q150.00
Potenciómetros	Potenciómetro 10 K-ohms	5	Q6.00	Q30.00
Sensor de distancia	Sensor Sharp GP2Y0A21YK0F	1	Q75.00	Q75.00
			Total	Q1434.65

Fuente: Elaboración propia

8.1. Sensibilidad táctil

Los resultados para la sensibilidad táctil en los distintos objetos de interacción fueron en su mayoría positivos, apegándose a los valores de referencia proporcionados por los autores de la librería. Para los botones, los promedios se alejan un poco de los valores de referencia, sin embargo, nunca excedieron 2 interacciones, por lo que los resultados son aceptables. En el caso de los deslizadores, el promedio de interacciones se mantuvo cercano a los límites en las 4 pruebas realizadas, cabe resaltar que existen valores que se salen de los límites, siendo el más crítico para el deslizador "orientación de la pista" que llegó a necesitar 4 interacciones antes de reaccionar, pero en general el desempeño de todos se mantuvo en los valores de referencia no superando un promedio de 2.1 interacciones.

En general, los botones tuvieron resultados menos satisfactorios a simple vista pero con muy poca variación, fueron más consistentes, por otro lado los deslizadores aunque obtuvieron mejores promedios existe mucha variación en los datos y un rango de interacciones más amplio. Los resultados cumplen los requerimientos, sin embargo, en la práctica resultan menos prácticos los deslizadores dado que el resultado es muy variable.

8.2. Tiempos de simulación

Los tiempos de simulación para las distintas pruebas fueron satisfactorios; la totalidad de las pruebas mantuvieron un promedio menor a 1 segundo, sin obtener datos atípicos. En ninguna de las iteraciones se registró un tiempo mayor, por lo que, en general, el requisito se cumple. Sin embargo, cabe resaltar que las pruebas A y C arrojaron promedios menores, alrededor de los 0.75 segundos, mientras que las demás pruebas presentaron resultados simi-

lares, alrededor de los 0.86 segundos. Esto se debe a los instrumentos involucrados en cada prueba y se explica fácilmente por la variación en la carga de cálculos, que es menor en las pruebas A y C. También es importante mencionar que en la prueba con los instrumentos mecánicos, el tiempo es más alto debido al tiempo necesario para cambiar el ciclo de trabajo, lo que consume alrededor de 0.23 segundos.

8.3. Diseño final, costo de materiales y cumplimiento de requisitos

El diseño final consta de una combinación de una pantalla y componentes mecánicos. Esta combinación permite enfocar la mayor parte de los recursos en los instrumentos que muestran una mayor cantidad de información y que están en constante variación, mientras que los instrumentos con información menos crítica y menos fluctuante se simulan de forma mecánica. De esta manera, se logra una buena distribución de los recursos económicos y computacionales, alcanzando los objetivos propuestos. El diseño presenta otra gran ventaja respecto a otras opciones en el mercado: la capacidad de ser mejorado. Como se menciona en el capítulo de resultados, el panel está diseñado y construido para que se puedan implementar mejoras de manera sencilla. En conjunto, la compuerta de mantenimiento y el puerto USB externo permiten agregar más componentes y editar la programación conectando un teclado. El panel en su totalidad funciona como una plataforma base para alcanzar objetivos más ambiciosos en el futuro.

El diseño final, previamente explicado, logra cumplir el requisito más importante para la interfaz, el requisito IT01, gracias al buen aprovechamiento de los recursos computacionales, como se discutió a detalle en la sección anterior. El cumplimiento de este requisito estuvo limitado por el segundo requisito más importante, el PN04, que fue crítico para la selección de componentes y materiales, representando un reto al intentar equilibrar los recursos para cumplir ambos requisitos simultáneamente. Como se detalla en el capítulo de resultados, se cumplió el requisito, incluso con una diferencia positiva.

Por otra parte, el peso del prototipo es de 21.5 lb, considerablemente menos que el máximo establecido en el requisito PN03, lo cual facilita su traslado y manipulación. De igual forma, el requisito PN04 sobre la ubicación de los instrumentos se cumplió en un 91.6%, con los instrumentos ubicados en la misma posición que en el Cessna 172. Todo lo mencionado en este apartado, sumado al cumplimiento de la totalidad de los requisitos que se puede evidenciar en el apartado de resultados, confirma las buenas decisiones de diseño en la selección de componentes, materiales y el enfoque dado al panel de instrumentos.

1. Se diseñó y construyó un prototipo de panel de instrumentos basado en un computadora de placa única raspberry pi 4, enfocado en la interconexión de componentes mecánicos (servomotores) y digitales (pantalla táctil) para la simulación de los instrumentos del panel.
2. Se diseñó y construyó un prototipo de panel de instrumentos construido a base de una estructura de perfil de aluminio con cubiertas de fibropanel de densidad media.
3. Se diseñó un prototipo de panel de instrumentos a un costo de materiales exacto de Q1,434.65.
4. Se diseñó y construyó un prototipo de panel de instrumentos que logra imitar con precisión las posiciones y movimientos del panel de un cessna 172 en más de un 90
5. Se diseñó, programó e implementó una interfaz gráfica de usuario que permite interactuar con el panel de forma táctil, cuenta con un menú de opciones y una pestaña de ajustes que permite la modificación de ciertos parámetros iniciales de vuelo.
6. Se construyó un prototipo de panel de instrumentos con un peso exacto de 21.5 lb.
7. Se diseñó e implmentó una interfaz para un simulador de vuelo didáctico que funciona como plataforma base para la implementación de mejoras y desarrollo de fases más ambiciosas.
8. panel de conexiones
9. Se diseñó e implementó una interfaz que logra tiempos de respuesta menores a 1 segundo durante simulación de maniobras en tierra, despegue y vuelo continuo.
10. Se planteó un total de 16 requisitos, los cuales fueron cumplidos en su totalidad.

CAPÍTULO 10

Recomendaciones

1. Se recomienda la adaptación de sensores de efecto hall para reducir los tiempos de respuesta de la interfaz en caso de aumentar el volumen e cálculos.
2. Se recomienda la implementación de la fase de aterrizaje dentro de la simulación para completar las maniobras básicas de aprendizaje.
3. Se recomienda extender la cantidad de parámetros editables dentro de la pestaña de ajustes para permitir la edición de los parámetros de la aeronave.
4. Se recomienda instalar un panel de comunicaciones para completar los módulos principales del panel de instrumentos.
5. Se recomienda un sistema de filtrado de señales para mejorar la fluidez de la interfaz y eliminar los movimientos erráticos.
6. Se recomienda diseñar un sistema de anclaje para instalar el simulador de forma segura y aliminar cualquier posible movimiento.
7. Se recomienda el análisis y diseño de un asiento que cumpla con normas de ergonomía y seguridad.

- Cameron, B. (2016). Development and Implementation of Cost-effective Flight Simulator Technologies. *International Conference on Control, Dynamic Systems, and Robotics*.
- Camponogara, A., Oliveira, T. R., & Machado, W. A., Renato Finamore. (2019). Measurement and Characterization of Power Lines of Aircraft Flight Test Instrumentation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*.
- Chunsheng, L., & Chunhua, L. (2019). Flight Dynamics Modeling y Dynamic Stability Analysis of Tilt-Rotor Aircraft. *International Journal of Space Engineering*.
- Chuquimia, O. M. (2023). *Uso de simuladores de vuelo para la formación de técnicos de mantenimiento aeronáutico en Bolivia* (inf. téc.). Technological innovations.
- Cifuentes, D. R. (2018). *Diseño de un panel de simulación de vuelo portátil*.
- Cook, M. V. (2007). *A linear systems approach to aircraft stability and control* (3.^a ed.). Butterworth-Heinemann.
- DGAC. (2023). *Escuelas de instrucción aeronáutica* (inf. téc.). Dirección General de Aeronautica Civil.
- Drela, M. (2014). *Flight Vehicle Aerodynamics*. The MIT Press.
- EVSA. (2023). *Cursos Teóricos Para Piloto Aviador* (inf. téc.). EVSA S.A.
- Fernandez, C. J. (2019). *Diseño y simulación de un sistema de control de una plataforma de movimiento para simuladores de vuelo* (inf. téc.). Universidad Autónoma de Occidente. Cali.
- Fiñana, R. S. (2014). *Diseño de una interfaz de simulación de vuelo* (inf. téc.). Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Jian, L., & Wang, Y. R. (2013). Cockpit Display System Simulation of General Aviation Aircraft Based on VAPS XT. *Trans Tech Publications, Ltd*.
- logitech. (2023). *Logitech simulation gear* (inf. téc.). Logitech Inc.
- Maldonado, J. J. C. (2020). *La simulación como aporte para la enseñanza* (inf. téc.). Editorial SENA.
- Martín, A. S. (2019). *Desarrollo de simulador de vuelo basado en rpi* (inf. téc.). Universidad de la Laguna. San Cristóbal de la Laguna.
- Martín, J. J. (2020). *Interfaz usando Arduino para la simulación mecánica de instrumentos analógicos en un simulador de vuelo* (inf. téc.). Universidad de Málaga. Málaga.

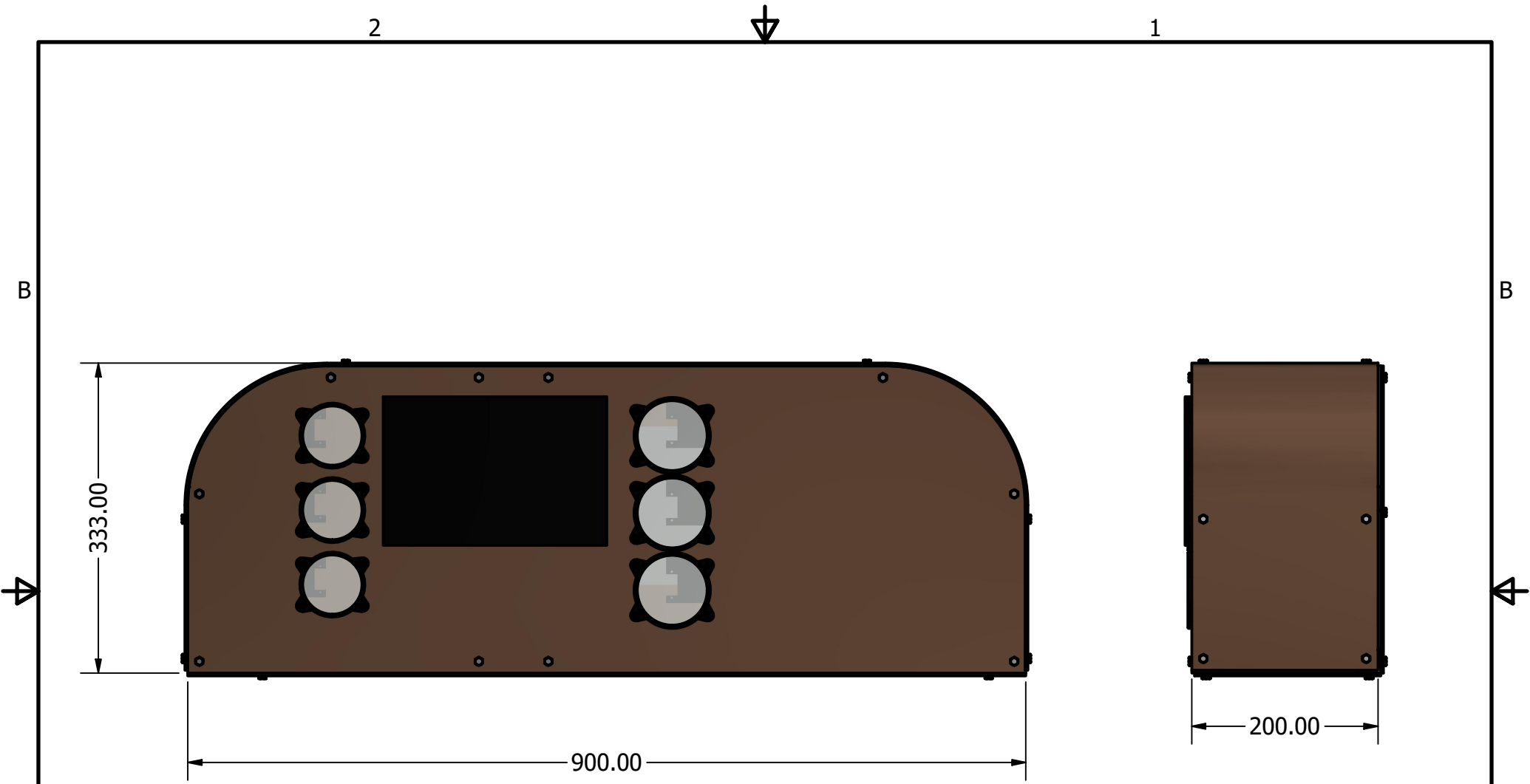
- MathWorks. (2023). *GL Studio* (inf. téc.). Matlab documentation.
- Microsoft. (2023). *Microsoft Flight Simulator Documentation* (inf. téc.). Microsoft inc.
- Molloy, D. (2016). *Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux*. Wiley.
- Muñoz, J. C. (2022). *Aprendizaje a través de simuladores de vuelo en aviones navales* (inf. téc.). Revista de Ciencias del Mar y Acuicultura. Manta.
- Pan, C.-T. (2021). *Development of Multi-Axis Crank Linkage Motion System for* (inf. téc.). MDPI. Taiwan.
- Presagis. (2023). *Open flight API 22.0 instalation guide* (inf. téc.). Presagis Ic.
- Richardson, S., Matt y Wallace. (2012). *Getting Started with Raspberry Pi*. Maker Media, Inc.
- Rico, L. C. V. (2018). *Simuladores de vuelo, una revisión* (inf. téc.). Editorial Dialnet.
- SafPilot. (2023). *Instrucción aeronáutica* (inf. téc.). SafPilot Inc.
- Sobral, E. G. (2023). *Introducción al estudio de áreas genéricas de la aviación*. Aerotraining.
- Stevens, B. L. (2016). *Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems*. Hoboken.
- training, A. (2023). *Cursos de pilotaje de avión* (inf. téc.). Aero training S.A.
- Wei, M.-Y. (2022). *Design and Implementation of a New Training Flight Simulator System* (inf. téc.). MDPI. Taiwan.
- Zeitoun, O. (2014). *A distributed system interface for a flight simulator*.

12.1. Planos de construcción

A continuación se detallan los planos de construcción del prototipo de panel instrumentos.

12.2. Protocolo de pruebas

A continuación se encuentra el protocolo de pruebas utilizado y llenado durante las pruebas realizadas para el proyecto.



TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ±
	.XX ±
	.XXX ±
ANGULAR	±

DIBUJADO POR	FECHA
Hector Gutierrez	05/07/2024

DISEÑADO POR	FECHA
Hector Gutierrez	15/05/2024

REVISADO POR	FECHA
Rony Herrarte	23/09/2024

APROBADO POR	FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

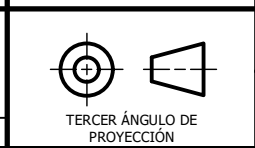
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 gut20540@uvg.edu.gt

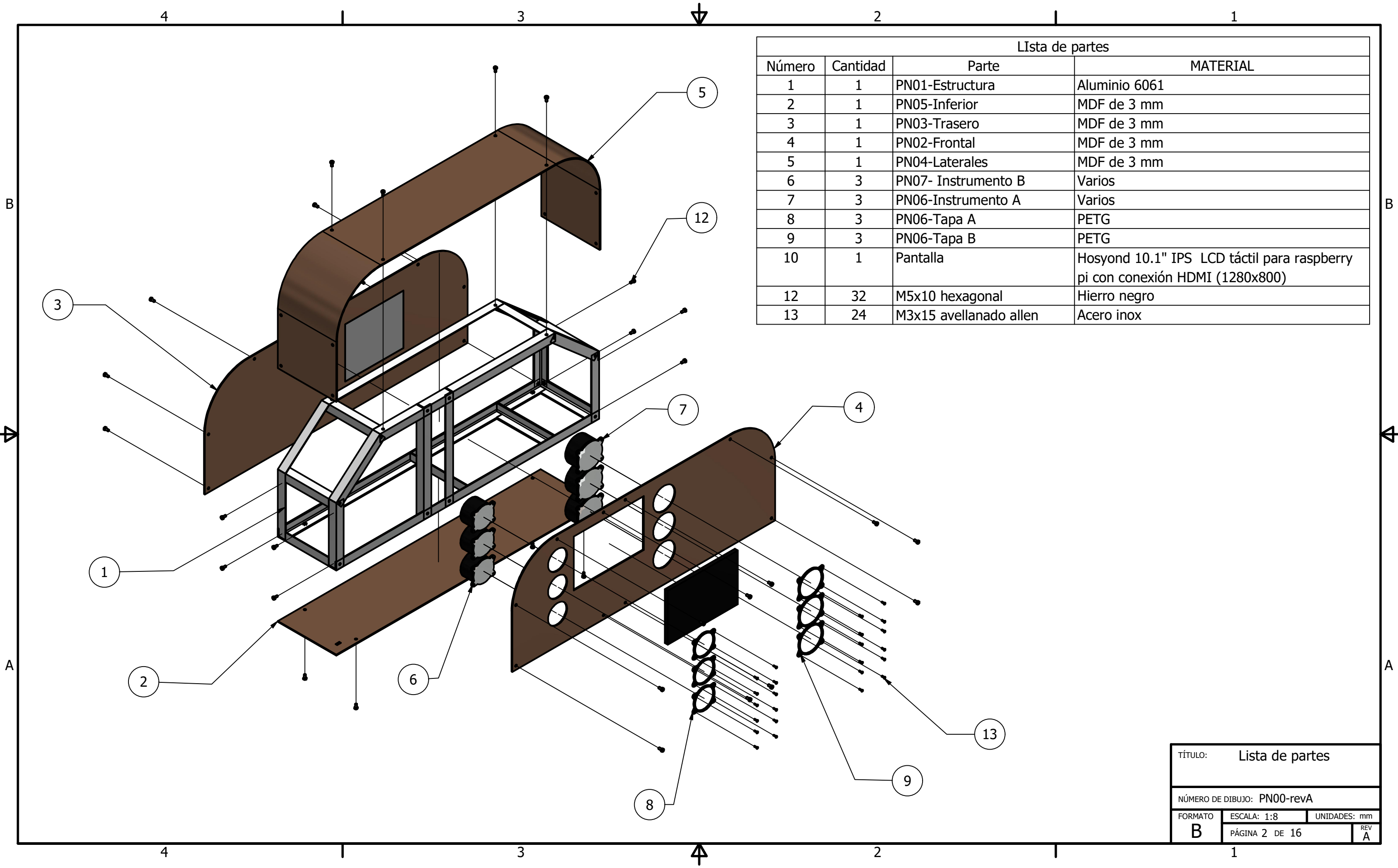
TÍTULO: Panel de instrumentos

NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA

FORMATO	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 1 DE 16	REV A

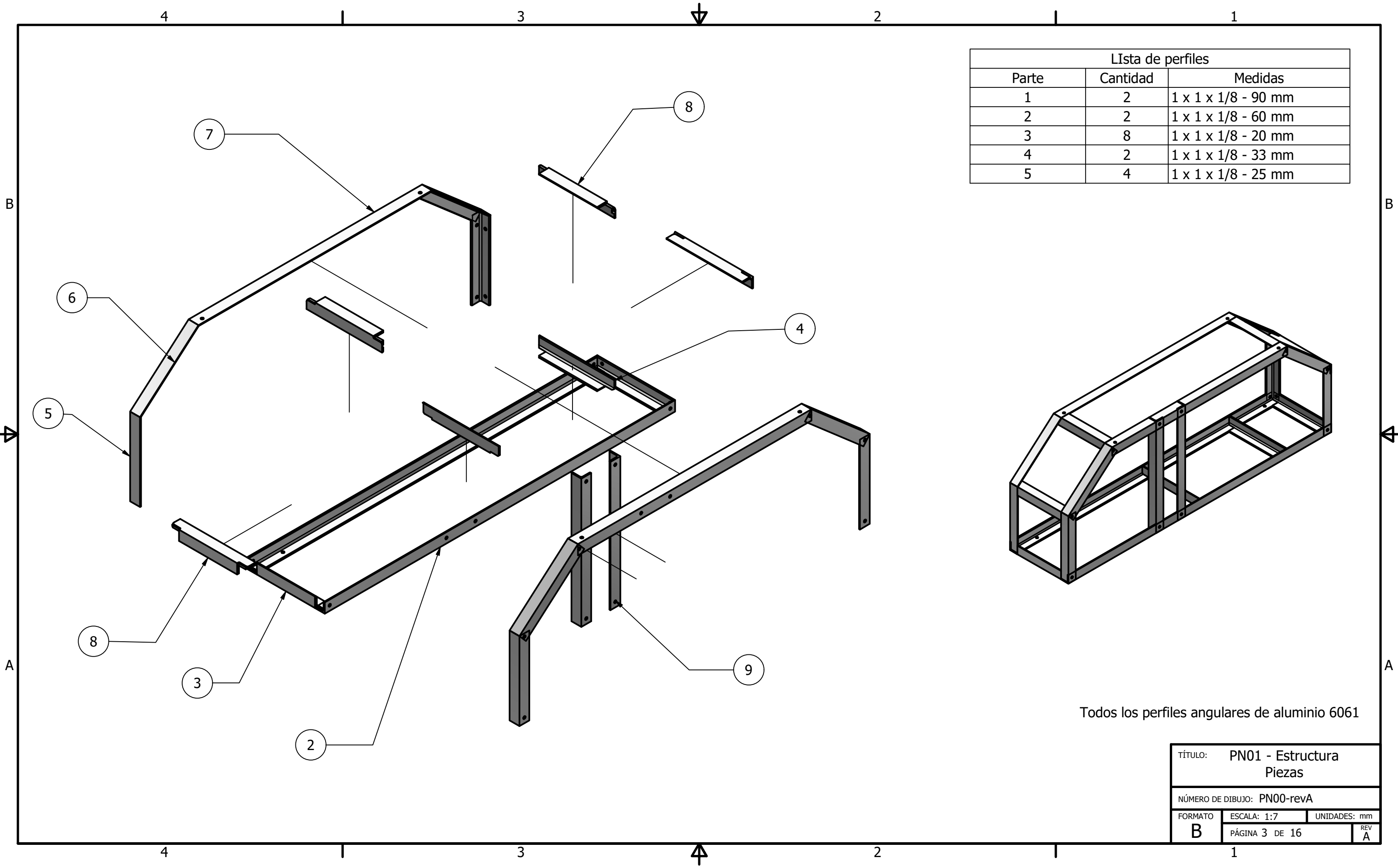
MATERIAL
TRATAMIENTO
MASA: N/A



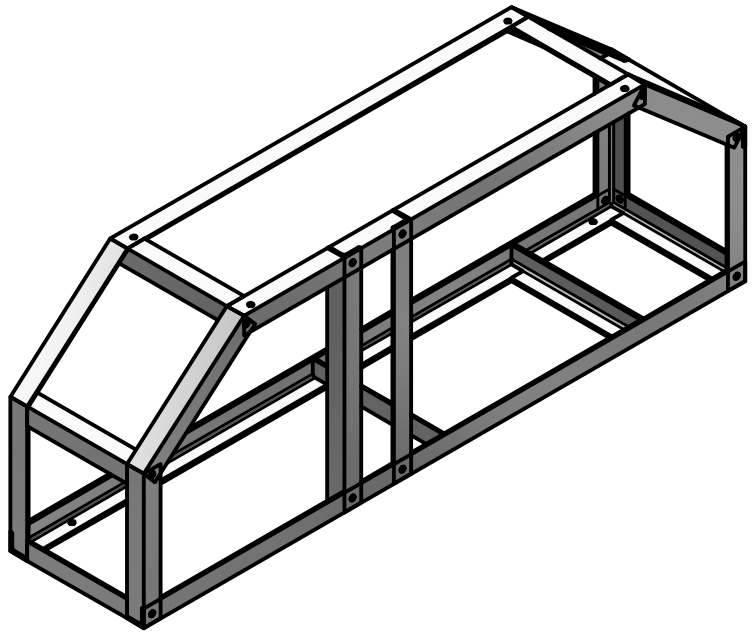


Lista de partes			
Número	Cantidad	Parte	MATERIAL
1	1	PN01-Estructura	Aluminio 6061
2	1	PN05-Inferior	MDF de 3 mm
3	1	PN03-Trasero	MDF de 3 mm
4	1	PN02-Frontal	MDF de 3 mm
5	1	PN04-Laterales	MDF de 3 mm
6	3	PN07- Instrumento B	Varios
7	3	PN06-Instrumento A	Varios
8	3	PN06-Tapa A	PETG
9	3	PN06-Tapa B	PETG
10	1	Pantalla	Hosyond 10.1" IPS LCD táctil para raspberry pi con conexión HDMI (1280x800)
12	32	M5x10 hexagonal	Hierro negro
13	24	M3x15 avellanado allen	Acero inox

TÍTULO: Lista de partes		
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA		
FORMATO	ESCALA: 1:8	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 2 DE 16	REV A

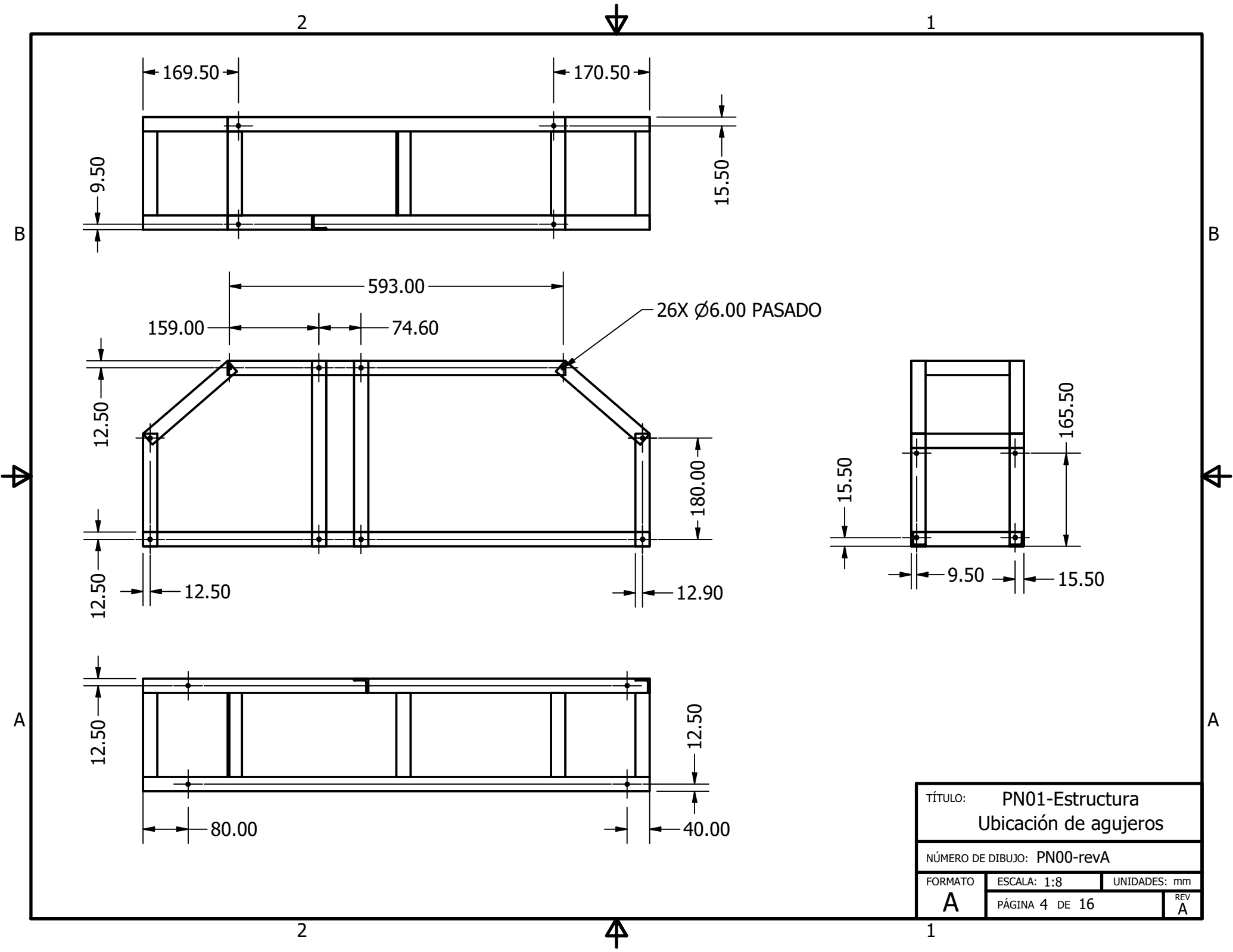


Lista de perfiles		
Parte	Cantidad	Medidas
1	2	1 x 1 x 1/8 - 90 mm
2	2	1 x 1 x 1/8 - 60 mm
3	8	1 x 1 x 1/8 - 20 mm
4	2	1 x 1 x 1/8 - 33 mm
5	4	1 x 1 x 1/8 - 25 mm



Todos los perfiles angulares de aluminio 6061

TÍTULO: PN01 - Estructura Piezas		
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA		
FORMATO	ESCALA: 1:7	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 3 DE 16	REV A



2

1

169.50

170.50

9.50

15.50

B

B

159.00

74.60

26X Ø6.00 PASADO

593.00

12.50

180.00

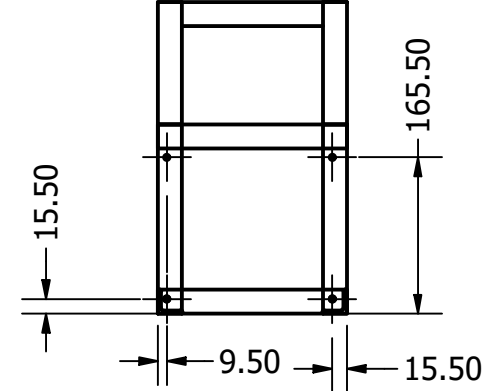
A

A

12.50

12.50

12.90



12.50

12.50

A

A

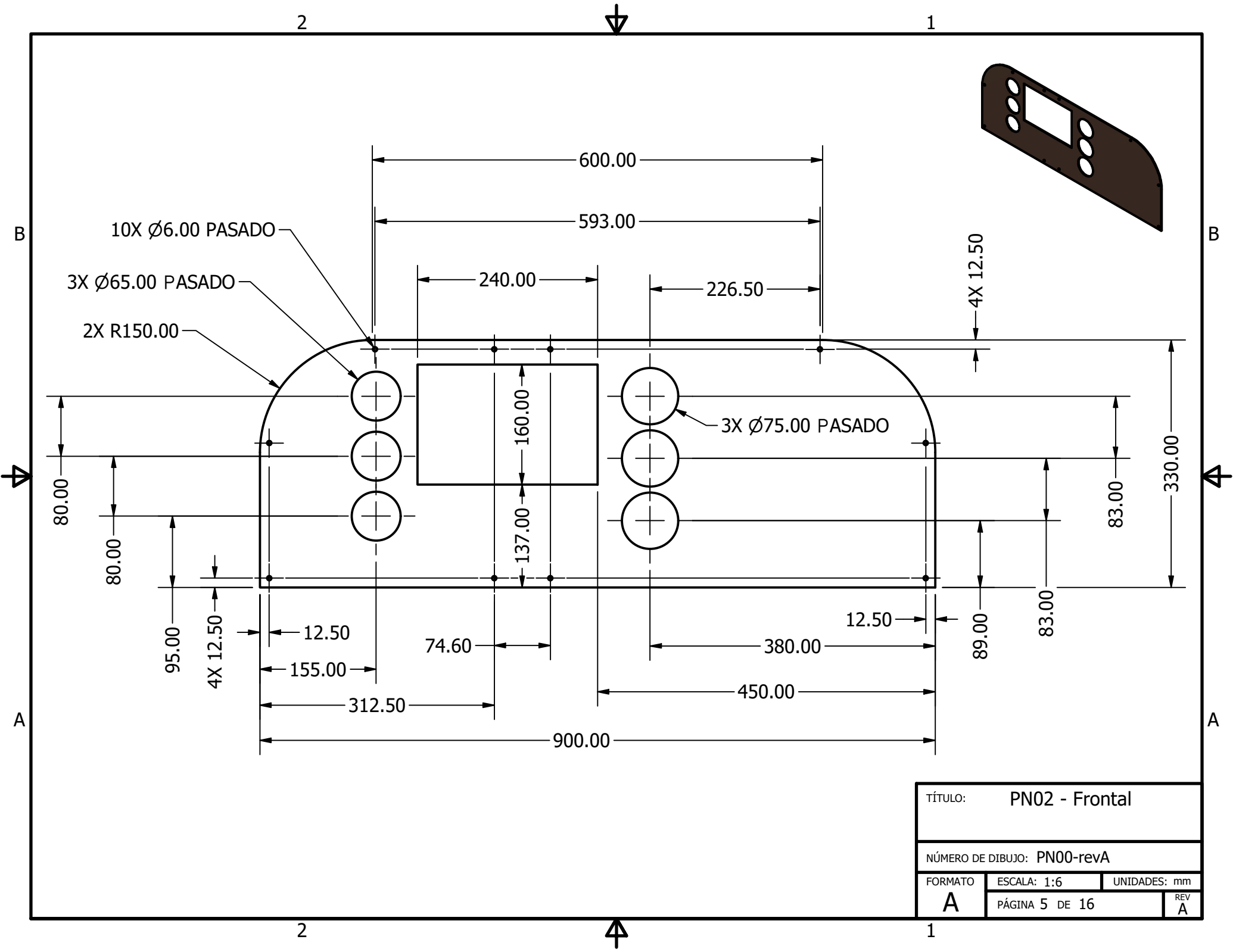
80.00

40.00

2

1

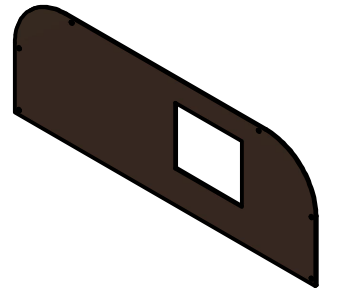
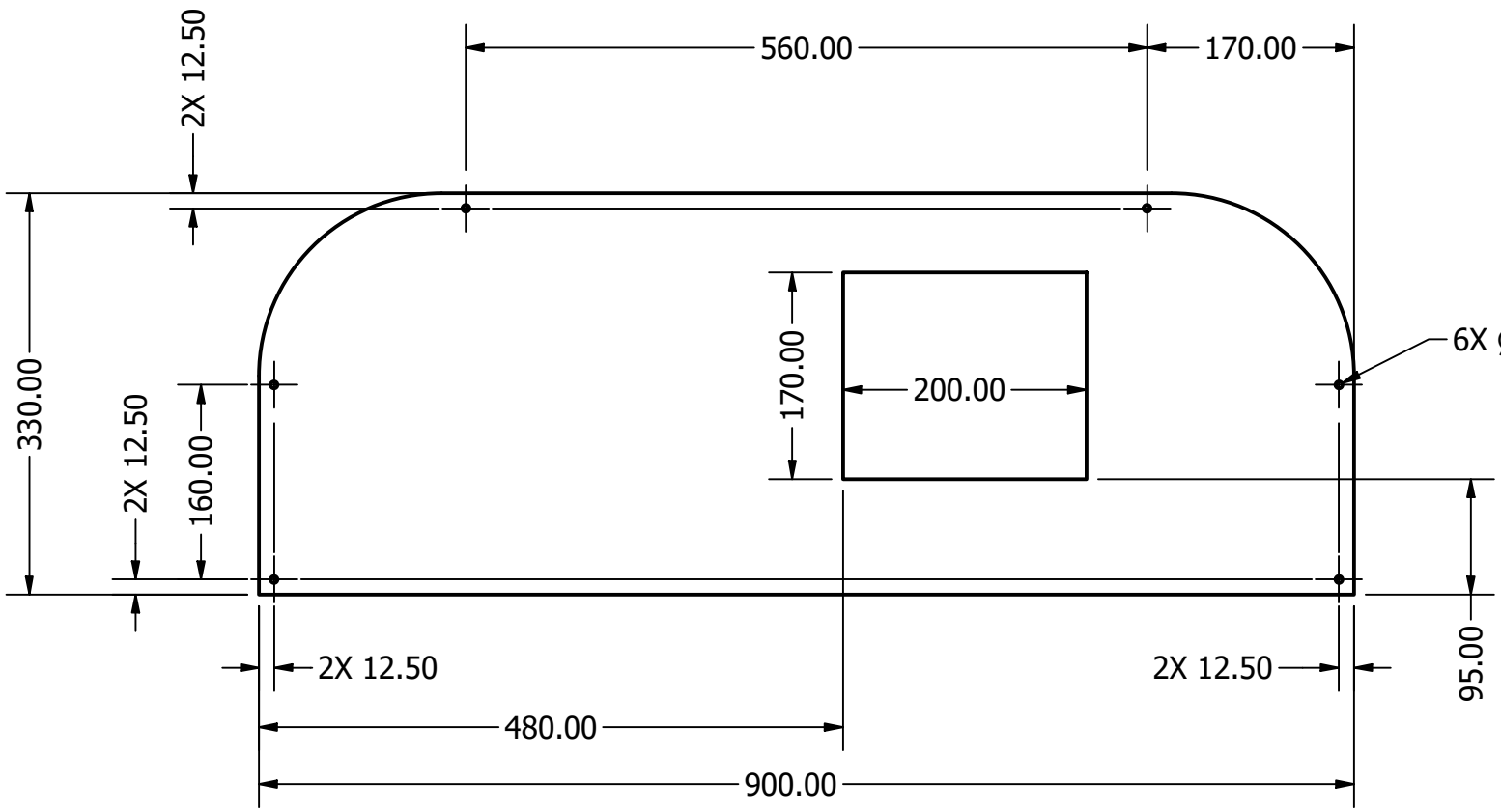
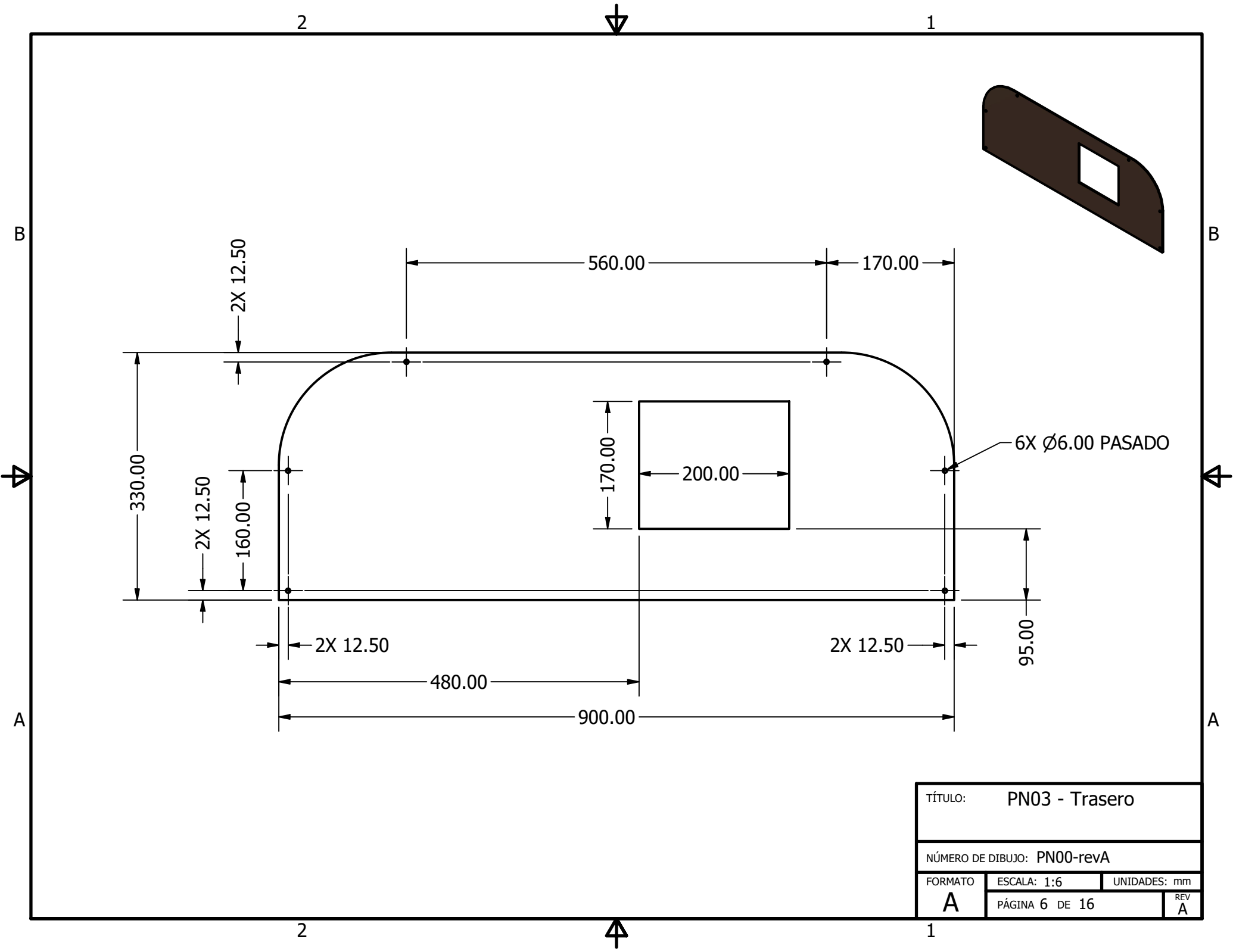
TÍTULO: PN01-Estructura			
Ubicación de agujeros			
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA			
FORMATO	ESCALA: 1:8	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 4 DE 16	REV A	



TÍTULO: PN02 - Frontal

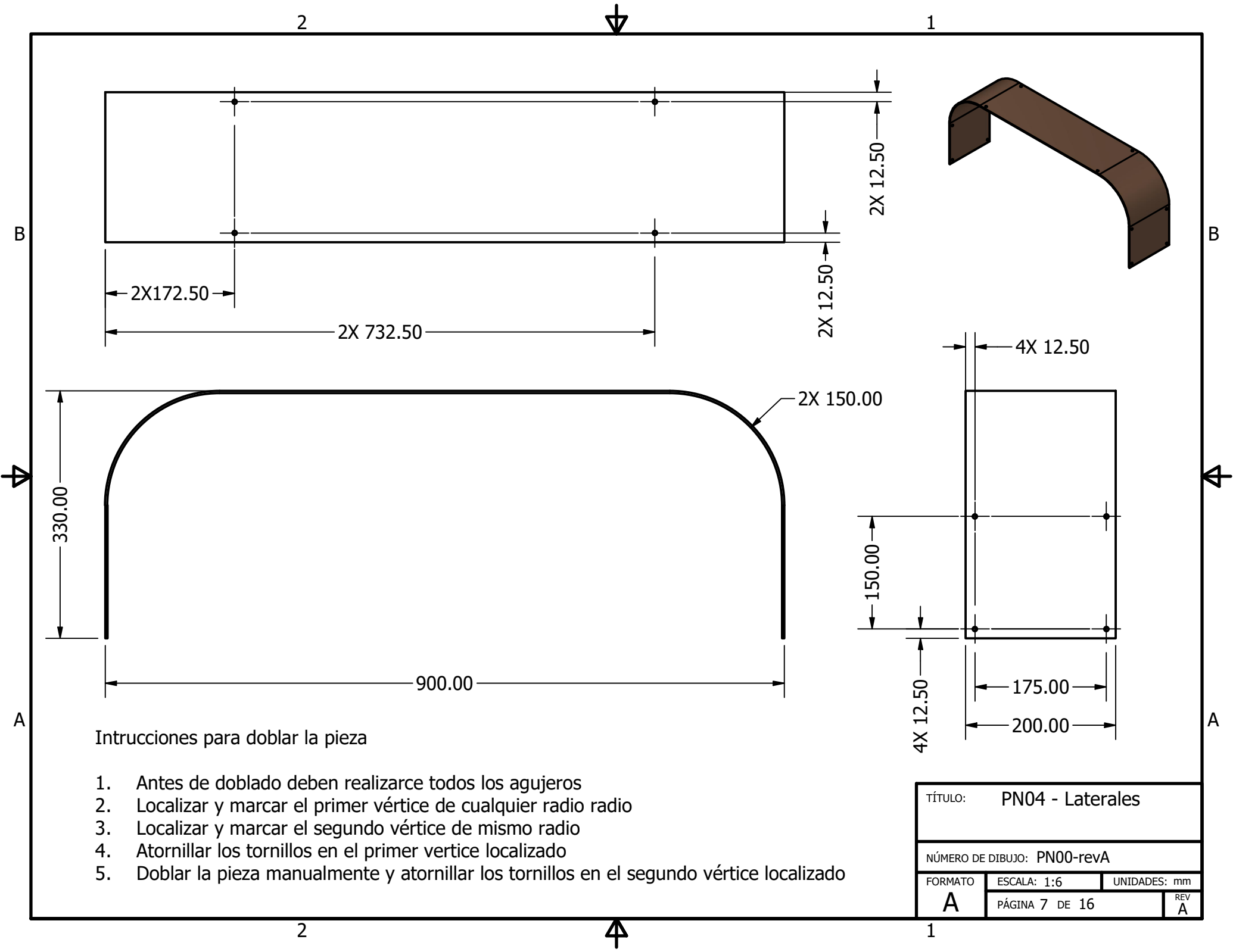
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA

FORMATO	ESCALA: 1:6	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 5 DE 16	REV A



6X Ø6.00 PASADO

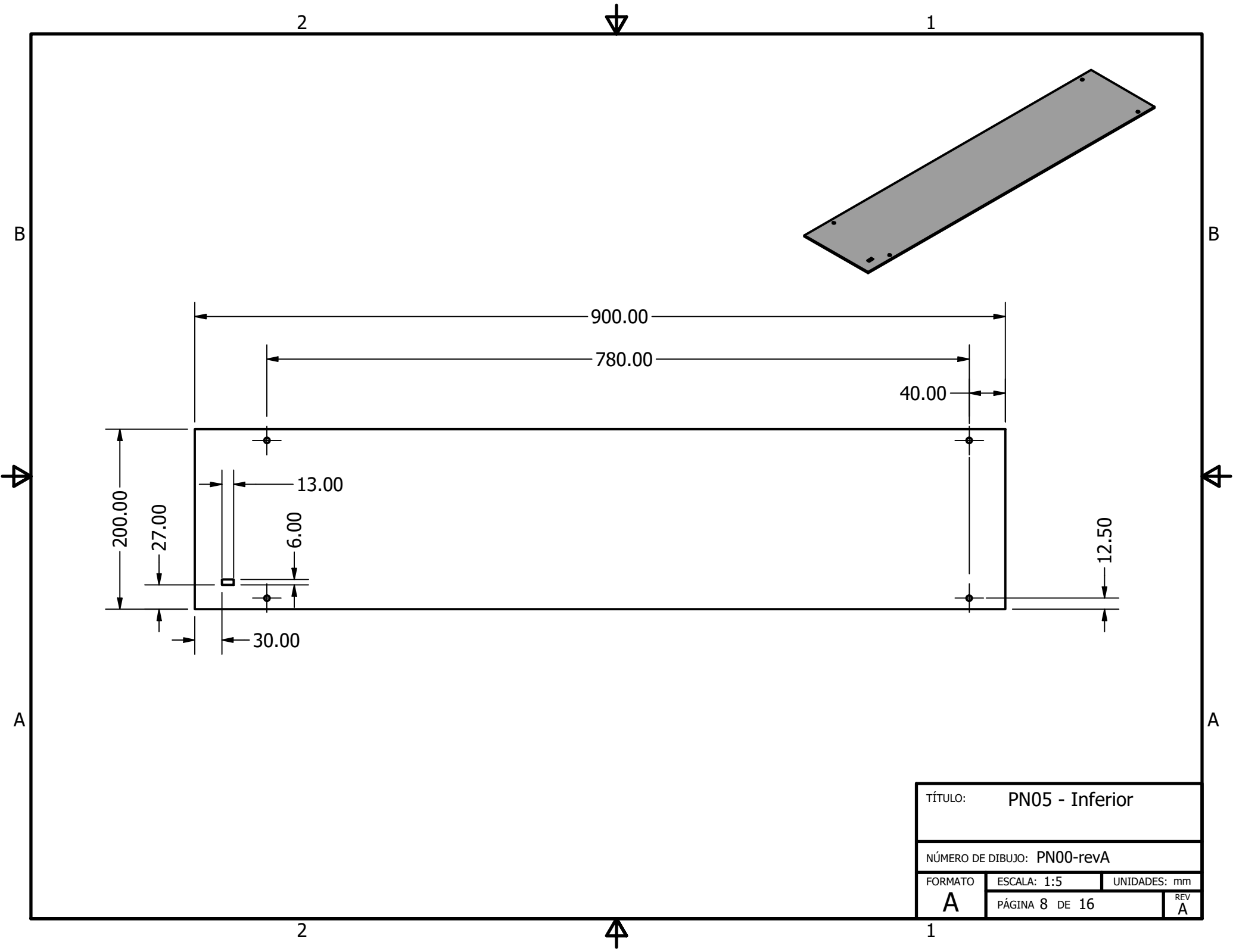
TÍTULO:		PN03 - Trasero	
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA			
FORMATO	ESCALA: 1:6	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 6 DE 16		REV A



Intrucciones para doblar la pieza

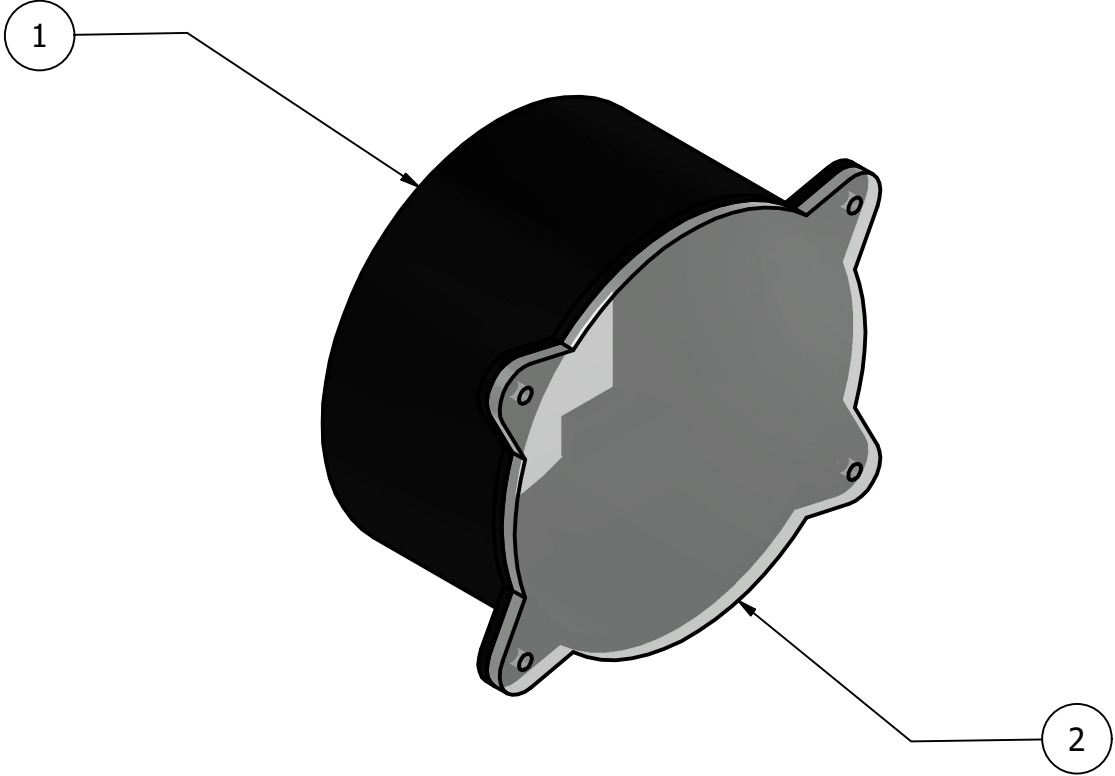
1. Antes de doblado deben realizarse todos los agujeros
2. Localizar y marcar el primer vértice de cualquier radio radio
3. Localizar y marcar el segundo vértice de mismo radio
4. Atornillar los tornillos en el primer vertice localizado
5. Doblar la pieza manualmente y atornillar los tornillos en el segundo vértice localizado

TÍTULO: PN04 - Laterales		
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA		
FORMATO	ESCALA: 1:6	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 7 DE 16	REV A



TÍTULO:		PN05 - Inferior	
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA			
FORMATO	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm	REV
A	PÁGINA 8 DE 16		A

Lista de partes		
Parte	Cantidad	Descripción
1	1	PN06 - Carcasa
2	1	PN06 - Pantalla



TÍTULO: PN06 - Instrumento A		
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA		
FORMATO	ESCALA: 4:5	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 9 DE 16	REV A

2

1

B

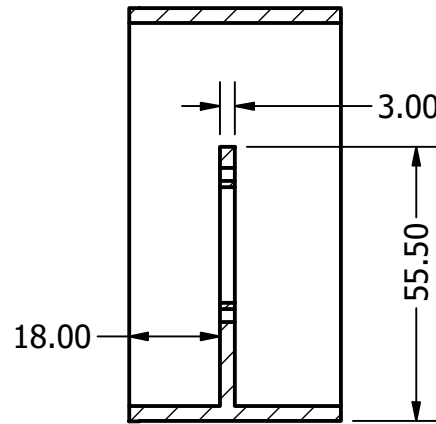
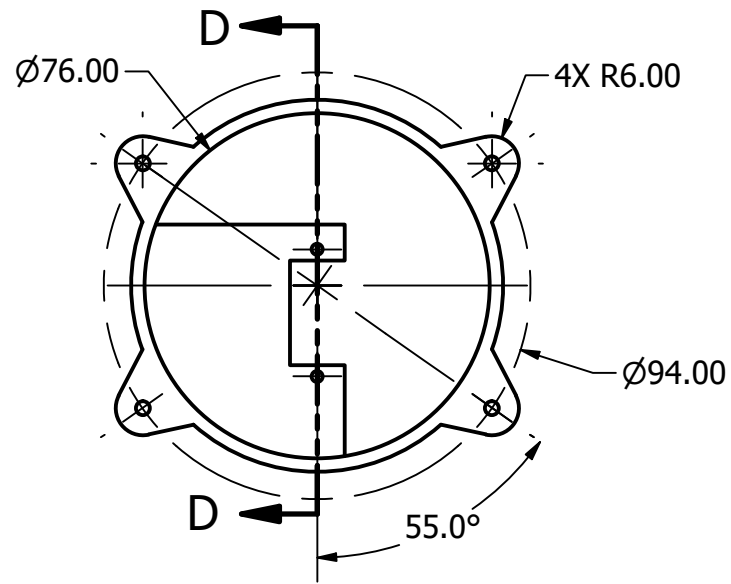
B

A

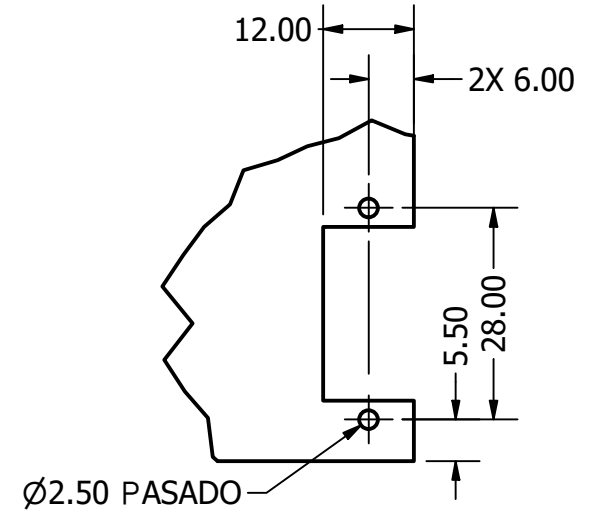
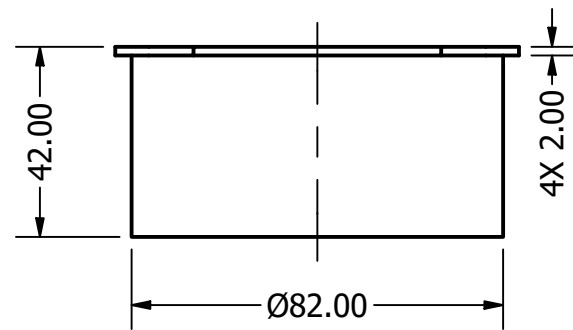
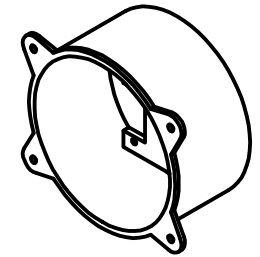
A

2

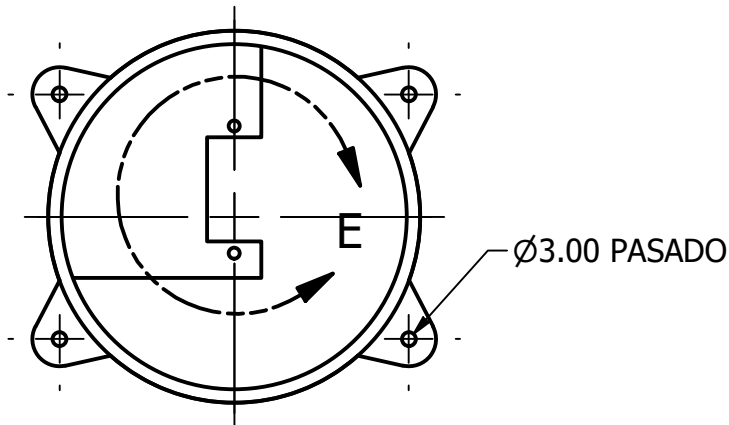
1



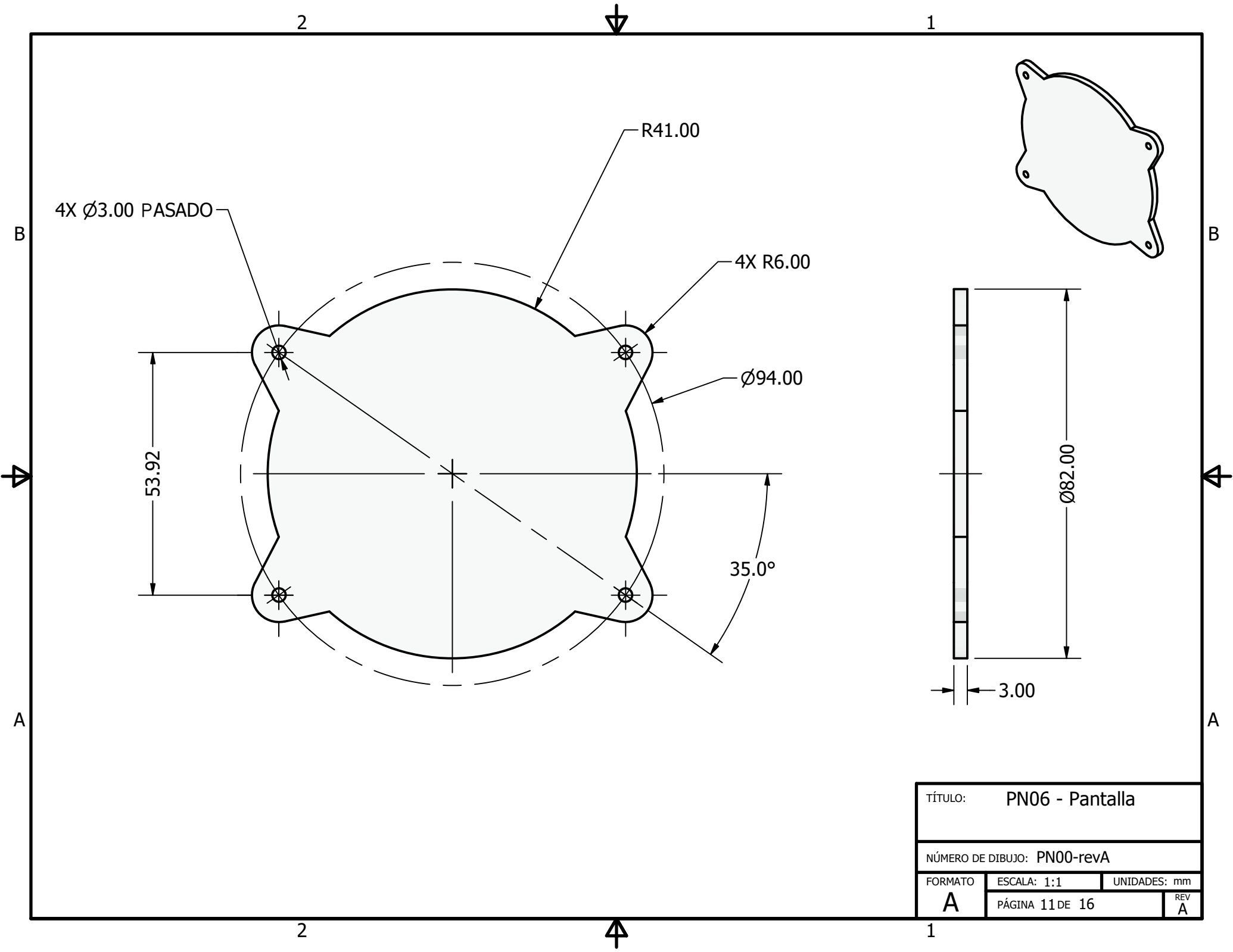
SECCIÓN D-D
ESCALA 2:3



DETALLE E
ESCALA 1:1



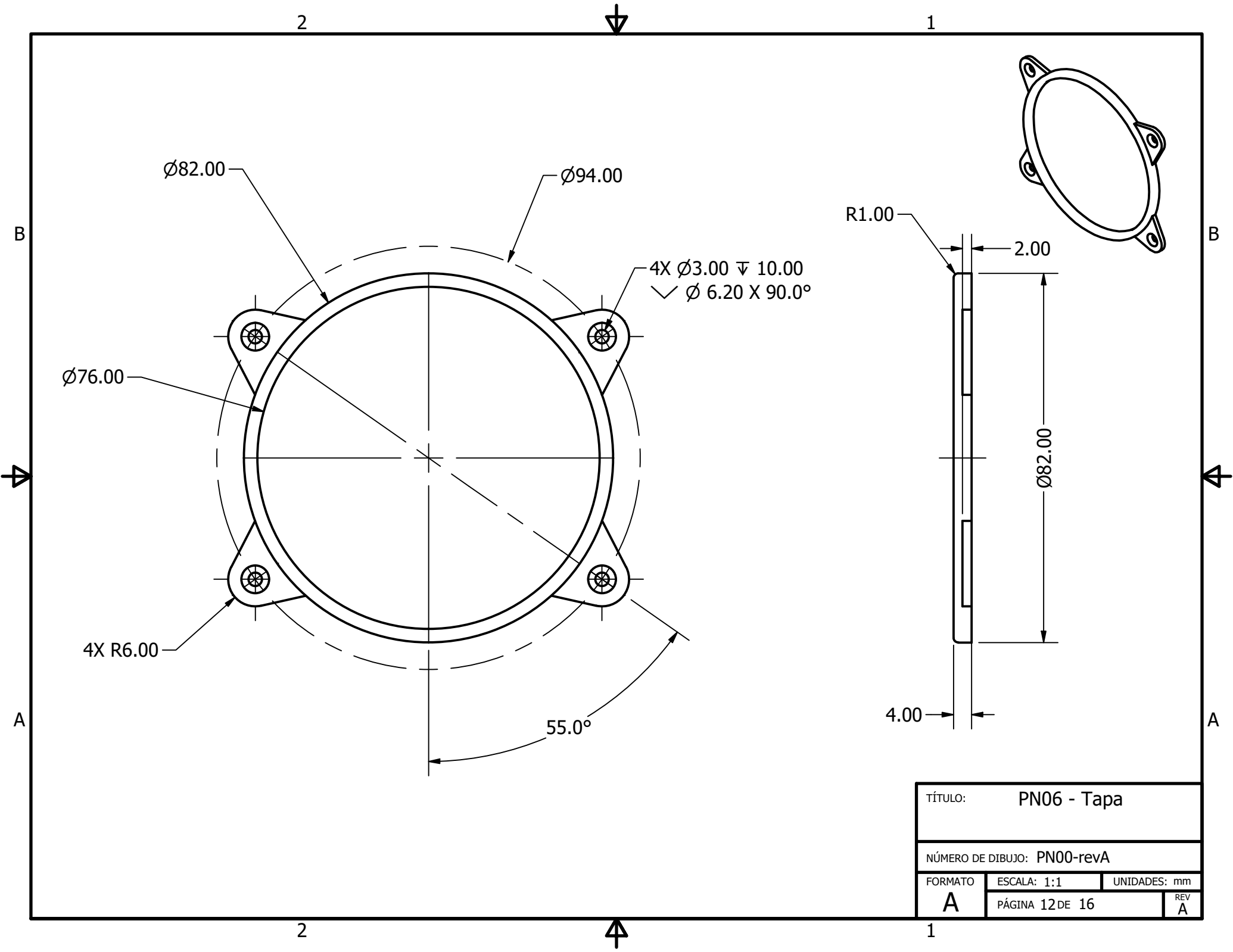
TÍTULO: PN06 - Carcasa		
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA		
FORMATO	ESCALA: 3:5	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 10 DE 16	REV A



TÍTULO: PN06 - Pantalla

NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA

FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 11 DE 16	REV A



2

1

Ø82.00

Ø94.00

4X Ø3.00 ∇ 10.00
 ✓ Ø 6.20 X 90.0°

Ø76.00

4X R6.00

55.0°

R1.00

2.00

Ø82.00

4.00

TÍTULO: PN06 - Tapa

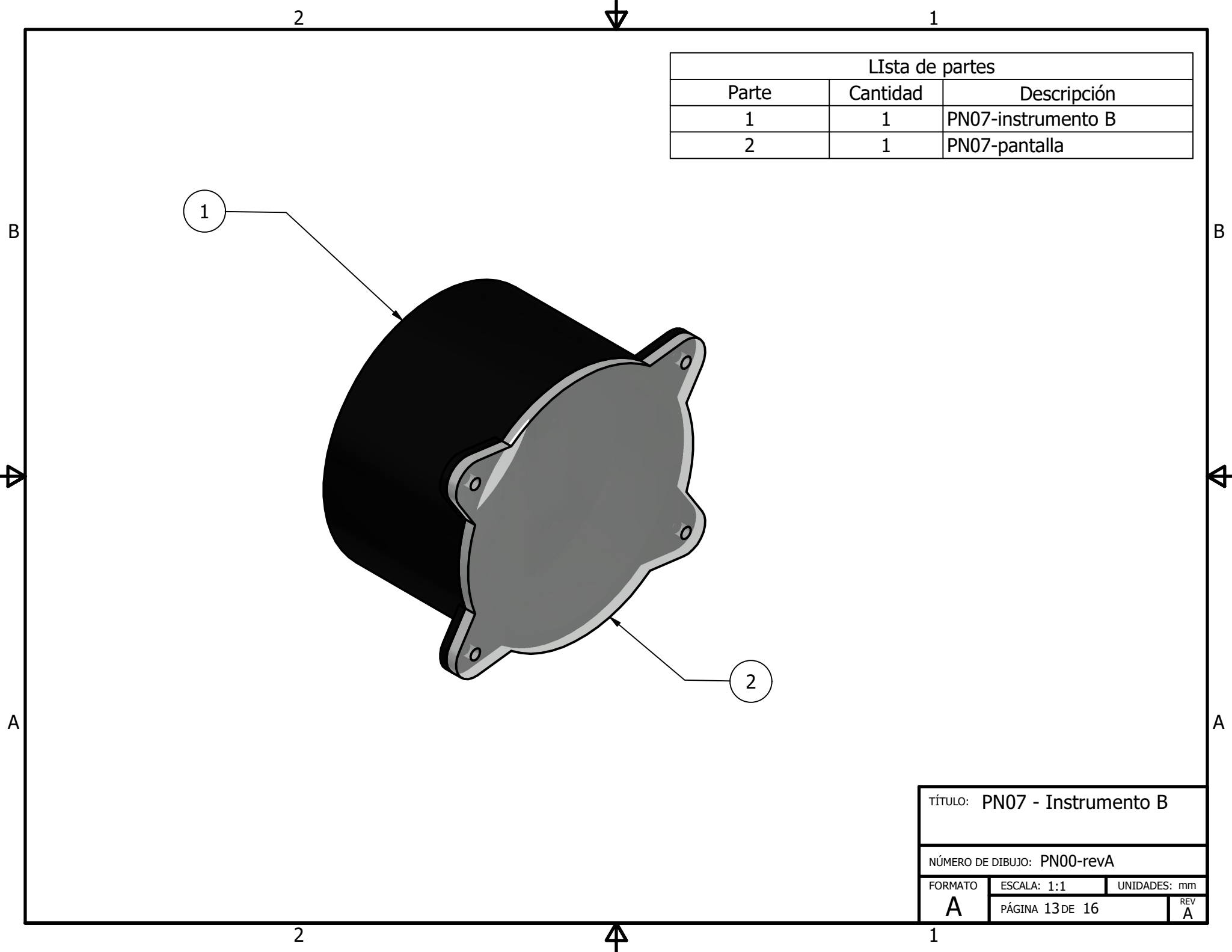
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA

FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 12 DE 16	REV A

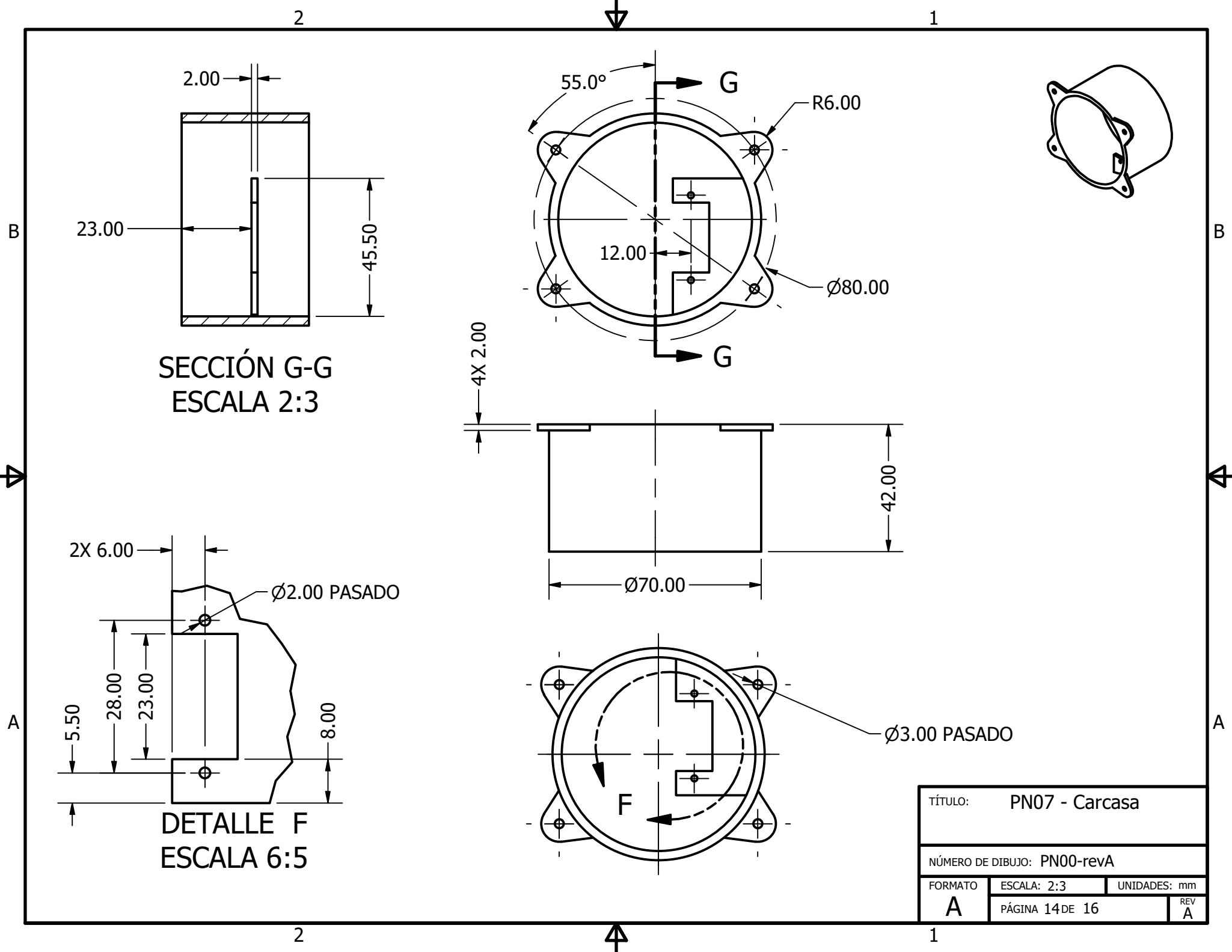
2

1

Lista de partes		
Parte	Cantidad	Descripción
1	1	PN07-instrumento B
2	1	PN07-pantalla



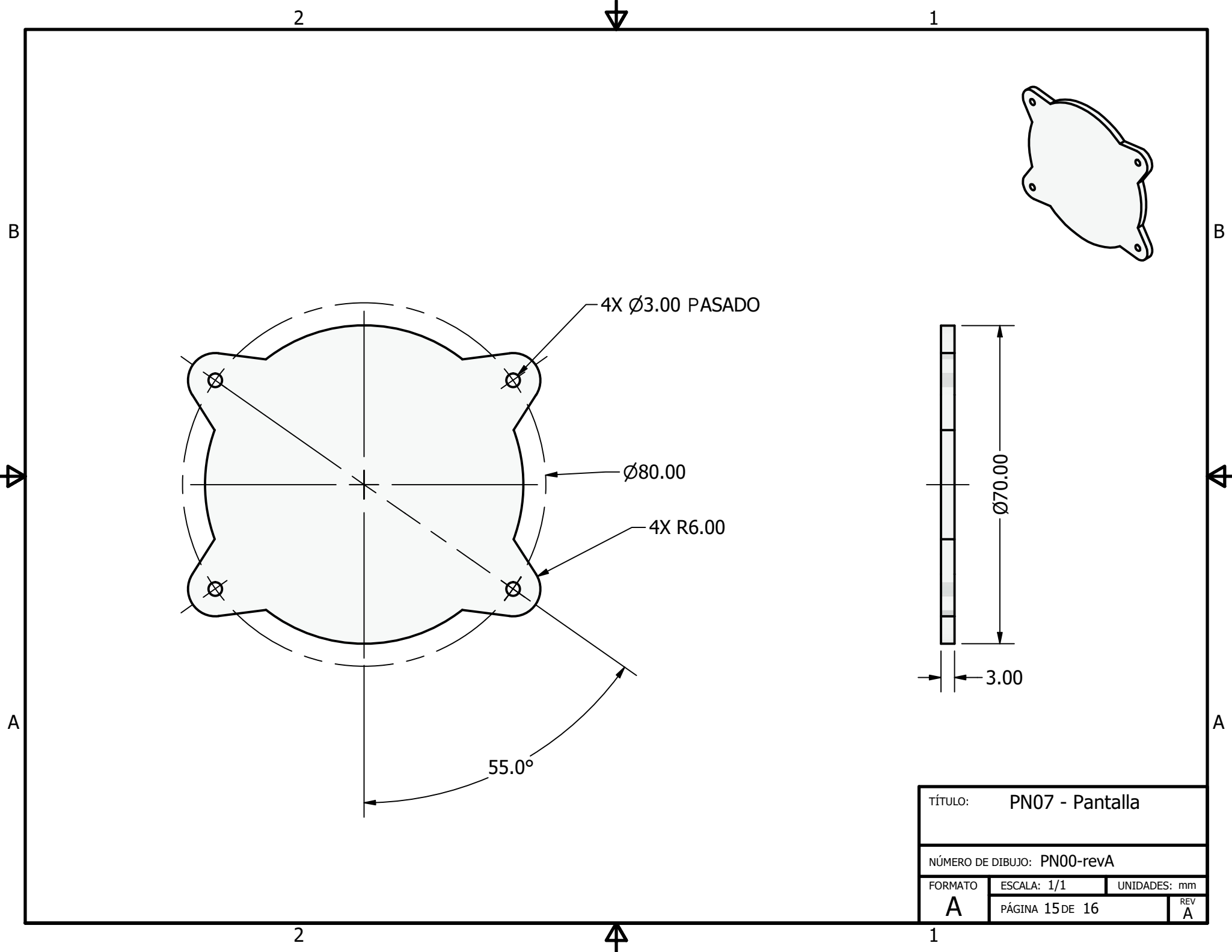
TÍTULO: PN07 - Instrumento B		
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 13 DE 16	REV A

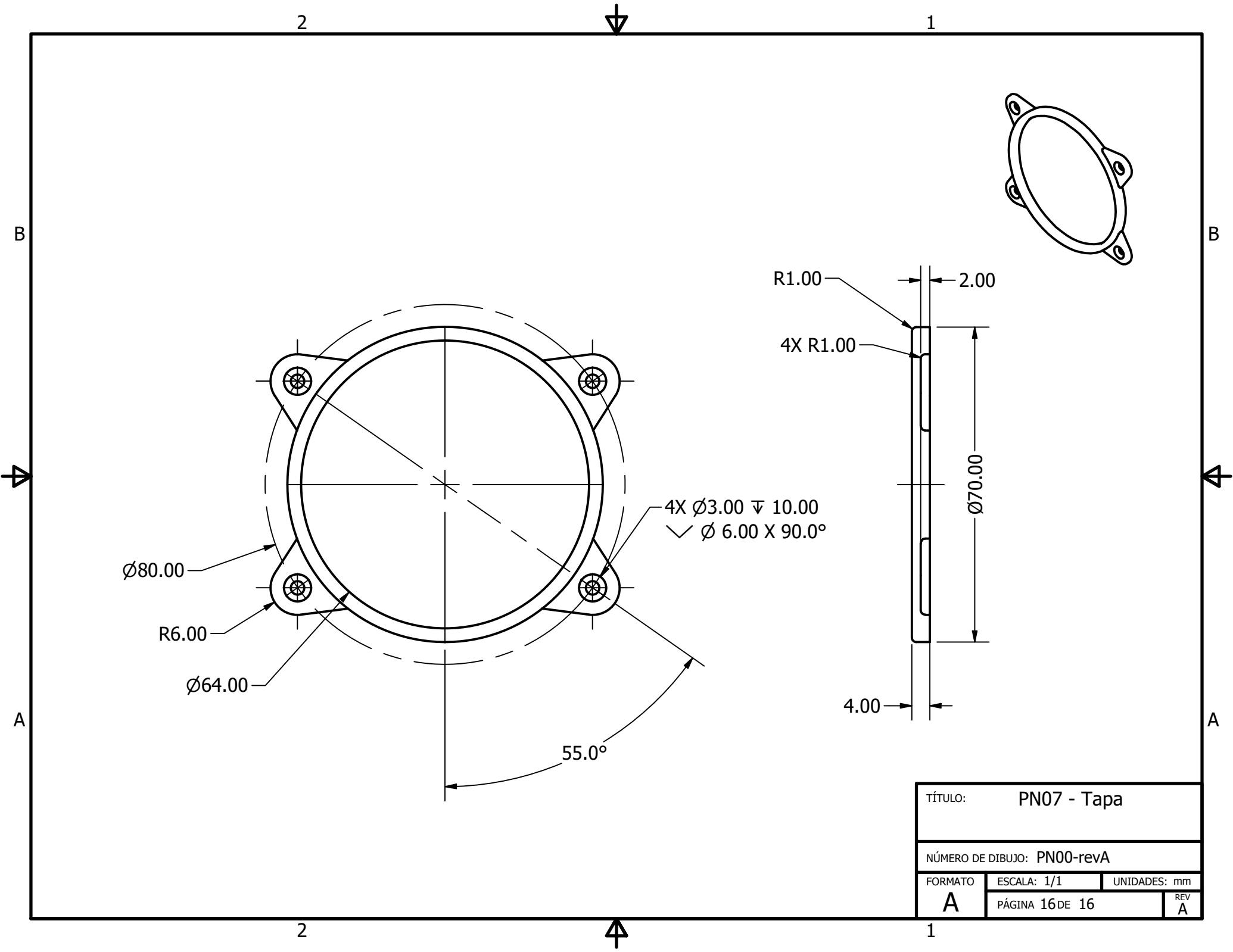


SECCIÓN G-G
ESCALA 2:3

DETALLE F
ESCALA 6:5

TÍTULO: PN07 - Carcasa		
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA		
FORMATO	ESCALA: 2:3	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 14 DE 16	REV A





2

1

B

B

Ø80.00

R6.00

Ø64.00

55.0°

4X Ø3.00 ∇ 10.00
 ✓ Ø 6.00 X 90.0°

R1.00

2.00

4X R1.00

Ø70.00

4.00

A

A

2

1

TÍTULO: PN07 - Tapa			
NÚMERO DE DIBUJO: PN00-revA			
FORMATO	ESCALA: 1/1	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 16 DE 16	REV A	

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Protocolo de pruebas

Diseño e implementación de interfaz para simulador de vuelo
didáctico

Elaborado por:
Hector Leonel Gutiérrez Marroquín
20540

Departamento de Ingeniería Mecánica

Guatemala, junio de 2024

1. Introducción

Las pruebas tienen el objetivo de comprobar el funcionamiento de la interfaz, más concretamente los tiempos de respuesta en las distintas ventanas del menú y la ventana de simulación, los tiempos según requerimientos deben ser menores a 1 segundo, basado en los resultados de las pruebas se decidirá si los cálculos deben ser optimizados para obtener resultados y poder mostrarlos en el tiempo requerido. El prototipo de interfaz que se probará consta de un panel de instrumentos y una serie de sensores instalados en otros 3 módulos de los cuales recolecta información en conjunto los 4 módulos forman parte de un simulador de vuelo didáctico

2. Especificaciones técnicas

- Dimensiones del módulo:
 - Altura: 33 cm.
 - Ancho: 90 cm.
 - Profundidad: 20 cm.
- Dimensiones del simulador completo:
 - Altura: 113cm
 - Ancho: 90 cm.
 - Profundidad: 90 cm.
- Fuente de energía: 110 V

3. Procedimiento de pruebas y mediciones

Verificaciones técnicas:

- Revisar el estado del cable de conexión, se debe verificar que el cable no tenga ningún daño en el revestimiento y que la espiga no esté rota ni doblada.
- Revisar el estado de los módulos, se debe verificar que ningún módulo esté fuera de posición que ningún tornillo esté flojo y que ninguna parte de alguno esté rota.
- Verificar el movimiento de los módulos, estos se deben mover en el rango de movimiento determinado sin sobrepasar el movimiento normal ni tener bloqueos.
- Revisar el estado del panel de instrumentos, se debe verificar que ninguna pantalla de los instrumentos mecánicos o la pantalla táctil esté rota o fracturada.

Procedimiento de operación

1. Colocar el simulador sobre una superficie seca y espera de ser posible.
2. Conectar la espiga a una fuente de voltaje común de 110V.
3. Encender el interruptor de emergencia.
4. Colocar una silla a la distancia de modo que las manos alcancen el timón a medio estirar.
5. Encender el interruptor de llave.
6. Interactuar con la interfaz.

Mediciones

Aclaración: las pruebas deben ser realizadas por un mínimo de 2 personas, una que opere el simulador y otra que realice las mediciones, de lo contrario los datos podrían presentar fuentes de error humanas.

- Sensibilidad táctil:
 1. En el menú principal de la interfaz seleccionar ajustes.
 2. Interactuar con a uno de los deslizadores, presionar y deslizar a un nuevo valor aleatorio y dejar de presionar.
 3. Contar el número de veces que se necesitó presionar para que el deslizador respondiera correctamente.
 4. Repetir el procedimiento con cada deslizador un total de 10 veces.

- Tiempo de respuesta instrumentos mecánicos:
 1. En el menú principal de la interfaz seleccionar simulación.
 2. Verificar que el instrumento de flujo de combustible y el instrumento de rpm marquen 0.
 3. Colocar la palanca en potencia máxima con una sola maniobra, al mismo tiempo se debe iniciar el cronómetro en el momento que la palanca llegue a su posición final.
 4. Al momento que se detecte el aumento en rpm y flujo de combustible se debe detener el cronómetro.
 5. Reducir la potencia a 0 y esperar a que los instrumentos regresen a posición 0.
 6. Repetir el procedimiento un total de 10 veces.

- Tiempo de respuesta instrumentos digitales:
 1. En el menú principal de la interfaz seleccionar simulación.
 2. Verificar que los 6 instrumentos marquen las condiciones iniciales.
 3. Realizar la prueba A:
 - a. Colocar la palanca en potencia máxima con una sola maniobra, al mismo tiempo se debe iniciar el cronómetro en el momento que la palanca llegue a su posición final.
 - b. Al momento que se detecte el aumento en el velocímetro se debe detener el cronómetro.
 - c. Reducir a un punto intermedio y esperar que la velocidad se estabilice.
 4. Realizar la prueba B:
 - a. Accionar completamente el freno de pedal derecho, al mismo tiempo se debe iniciar el cronómetro en el momento que se acciona el pedal.
 - b. Al momento que se detecte un giro en el indicador de giro se debe detener el cronómetro.
 - c. Repetir el proceso para cada pedal 10 veces.
 5. Realizar la prueba C:

- a. Jalar del timón hasta la posición máxima, al mismo tiempo se debe iniciar el cronómetro en el momento que se acciona el timón por completo.
 - b. Al momento que se detecte movimiento en el indicador de actitud se debe detener el cronómetro.
 - c. Reducir la potencia para regresar a nivel del suelo y repetir el proceso de igual forma, pero considerando el movimiento del altímetro y el indicador de velocidad vertical.
6. Realizar la prueba D:
- a. Realizar las maniobras necesarias para ganar altura y estabilizar la velocidad vertical.
 - b. Rotar el timón hasta el máximo en una dirección, al mismo tiempo se debe iniciar el cronómetro en el momento que se acciona el timón por completo.
 - c. Al momento que se detectó giro en el indicador de actitud se debe detener el cronómetro.
 - d. Repetir el proceso, pero considerando el movimiento del coordinador de giro.
7. Terminadas las pruebas regresar el menú principal y apagar el simulador.

4. Equipo de medición

Equipo de medición				
No.	Descripción	Especificaciones	Certificado/Estándar	Observaciones
1	Cronómetro digital	Precisión en centésimas de segundos	ISO 3159	Ver procedimiento de medición
2	Contador de repeticiones	Respuesta en centésimas de segundos	ISO 3159	Ver procedimiento de medición

5. Identificación de peligros

Identificación de peligros				
No.	Tipo	Descripción	Control(es)	Instrumento/equipo
1	De seguridad	Un daño en el aislamiento del cable de poder o un daño en la electrónica puede causar corto circuito.	Administrativo	Procedimiento definido y <i>check list</i>
2	Físico	Las fuerzas de empuje y jalado en palancas y timón pueden volcar la estructura del simulador.	Eliminación	Se añadieron estructuras de soporte
3	Físico	Las fuerzas de empuje en timón y palanca pueden desplazar la estructura del simulador.	Eliminación	Se añadió material antideslizante
			Administrativo	Procedimiento definido y <i>check list</i>

6. Equipo de protección personal (EPP) y equipo de mitigación

Dado el enfoque del proyecto no se utilizará equipo de protección personal, sin embargo se proporcionan ciertos requisitos de vestimenta para evitar posibles riesgos.

Equipo de protección personal (EPP) y de mitigación		
Cant.	Descripción	Verificado
1	Calzado cerrado, de preferencia tenis o zapatos con buenas propiedades antideslizantes.	
1	Pantalón largo de preferencia de lona.	
1	Playera o camisa de manga larga, ninguna prenda de manga larga ni holgada	

7. Documentación requerida previo a iniciar una prueba

La documentación listada en esta sección debe estar disponible en formato impreso en todo momento durante la realización de toda prueba y las verificaciones y firmas requeridas se deberán llenar a mano previo al inicio de dichas pruebas.

Es importante hacer notar que esta documentación tiene validez solo durante el día en que se llena, por lo que si la prueba toma más de un día entonces la misma deberá volver a llenarse ya que implica el reconocimiento y compromiso de cumplimiento de los procedimientos de seguridad que dicha documentación contiene. Esto deberá ser realizado por todas las personas que participen en las pruebas sin excepción; y a la vez implica que ninguna persona que no firme los compromisos podrá participar de dichas pruebas.

Esta documentación incluye:

1. Compromiso de conocimiento y cumplimiento del protocolo de seguridad. Se llena un documento con formato de lista para todos los participantes. (Anexo 1)
2. Reconocimiento de estado y disponibilidad para poder realizar la prueba. Se llena una copia por cada participante. (Anexo 2)
3. Verificación de EPP. Se llena una copia por cada participante. (Anexo 3)
4. Verificación de equipo de mitigación necesario. Se llena una copia por parte del estudiante a cargo y la misma debe contar con el visto bueno de todos los participantes. (Anexo 4)
5. Procedimiento de pruebas y mediciones de la sección 3 del presente protocolo. Si al momento de la prueba se debiera realizar algún cambio en el procedimiento, entonces esto deberá ser comunicado a todos los participantes quienes deberán firmar con su visto bueno el reverso de la copia impresa donde se anotará a mano el cambio efectuado.
6. Protocolo de emergencia presentando todos los números telefónicos de emergencia. Se llena una copia con formato de lista para todos los participantes. (Anexo 5)
7. Observaciones y comentarios de las pruebas. (Anexo 6)

8. Protocolo e información para casos de emergencia

El mismo se detalla en el anexo 5 y tiene por finalidad que todos los participantes de las pruebas a realizar tengan claridad de la manera en que deben actuar ante la ocurrencia de un incidente.

9. Resultados y observaciones

El anexo 6 será utilizado para registrar los resultados de las pruebas, así como para anotar cualquier observación o comentario sobre los mismos por parte de los participantes.

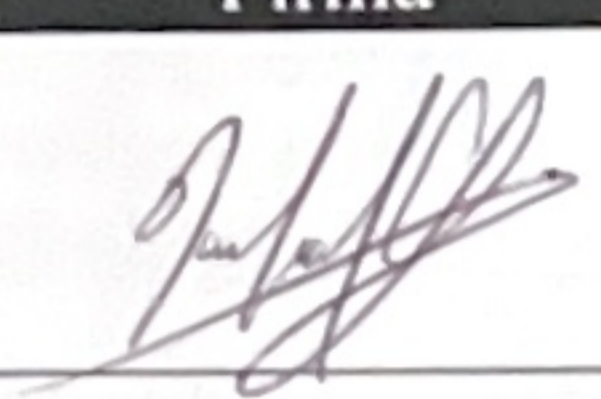
ANEXO 1

CONOCIMIENTO Y CUMPLIMIENTO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS

Instrucciones:

El presente documento deberá ser llenado por todas las personas que participarán de las pruebas del prototipo elaborado en el trabajo de graduación o proyecto "Nombre del trabajo/proyecto" y su firma implica su conformidad con el siguiente enunciado:

"Como firmante del presente documento declaro que he tenido a la vista el protocolo de pruebas del trabajo arriba nombrado; que soy consciente de los peligros identificados y plenamente detallados en el protocolo en cuestión, asociados a las pruebas a realizarse en la fecha indicada en este documento y que conozco los procedimientos y acciones a tomar para mitigar dichos peligros. Así mismo declaro tener conocimiento del procedimiento de pruebas y medición, y del protocolo de emergencia en caso de incidentes, anexo 5, y que los mismos se encuentra en formato impreso en el lugar de las pruebas. Declaro también que la información proporcionada por mi parte en los anexos 2 y 3 son verídicos y que he tomado el tiempo de verificar la información contenida en el anexo 4 por lo que he firmado los mismos. Habiendo declarado lo anterior, asumo la responsabilidad de mis actos y cualquier consecuencia o implicación que se desprenda de ellos."

Listado de personas		
Carné	Nombre	Firma
20540	Hector Leonel Gutierrez Marroquin	

Guatemala, 20 de Julio de 2024

ANEXO 2

DECLARACIÓN DE ESTADO Y DISPONIBILIDAD

Instrucciones:


Evalúe su estado y disponibilidad para participar de las pruebas teniendo conciencia de que su indisponibilidad en uno solo de las condiciones evaluadas inhabilitará en su participación ya que las mismas influyen en su seguridad personal y la de los demás participantes.

Marque con una X la casilla correspondiente sin salirse del espacio.

No.	Condición evaluada	SI	NO
1	He ingerido bebidas alcohólicas o sustancias alucinógenas que alteran mi estado de percepción durante las últimas 72 hrs.		X
2	Me siento agotado física o mentalmente por lo que mi concentración o habilidades físicas pueden verse comprometidas.		X
3	Tengo un problema personal/laboral que altera mi estado de ánimo.		X
4	Me siento incómodo con, o indispuesto hacia alguno de los otros participantes de las pruebas por cualquier circunstancia.		X
5	Mi estado de ánimo y mi disposición son positivos por lo que considero que mi participación será de aporte para las pruebas.	X	
6	Puedo proporcionar el nombre y número telefónico de una persona a la que contactar en caso de emergencia por cualquier incidente que se presente durante las pruebas.	X	

Declaro que las respuestas a los aspectos evaluados en la tabla anterior son verdaderas por lo que me declaro habilitado para participar en las pruebas de la presente fecha. (habilitado/inhabilitado)

Fecha: 20/07/2024

Nombre: Hector Leonel Gutierrez Firma: 

Contacto para caso de emergencia:

Nombre: Erika Marroquín

Número(s) telefónico(s): 5690 8492

Correo electrónico: erikadeg@gmail.com

ANEXO 3


VERIFICACIÓN DE EPP

Instrucciones:

Marque con una X la casilla de verificación para cada uno de los equipos listados. La necesidad del uso de este equipo fue determinada durante el proceso de identificación de peligros por lo que es de carácter obligatorio. No se permite el uso de equipo que no cumpla con las especificaciones declaradas en el listado.

Equipo de protección personal (EPP)		
Cant.	Descripción	Verificado
1	Calzado cerrado, de preferencia tenis o zapatos con buenas propiedades antideslizantes.	X
1	Pantalón largo de preferencia de lona.	X
1	Playera o camisa de manga corta, ninguna prenda de manga larga ni holgada	X

Fecha: 20/07/2024

Nombre: Aector Leonel Gutierrez Firma: 

ANEXO 5

PROTOCOLO DE EMERGENCIA

1. Acciones a tomar ante un accidente que provoque daño físico a cualquiera de los participantes:

- i. Conservar la calma en todo momento.
- ii. Apague la máquina si la misma aún se encuentra encendida.
- iii. Asegure que las necesidades físicas y emocionales de la persona son atendidas.
- iv. No intente brindar primeros auxilios para los que no cuenta con formación previa.
- v. Coordine con los demás participantes de las pruebas la atención médica necesaria para la persona accidentada contactando a las instituciones correspondientes.
- vi. Si las pruebas se están realizando dentro de las instalaciones de la universidad comuníquese a los números y personas indicadas en la siguiente sección.
- vii. Informe al contacto proporcionado para casos de emergencia.
- viii. Informe al asesor del trabajo de graduación o proyecto una vez la situación se encuentre controlada.

2. Contactos importantes a tener en cuenta en caso de emergencia.

- i. Bomberos voluntarios: 122
- ii. Bomberos municipales (ciudad capital): 123
- iii. Bomberos municipales departamentales: 1554

Si las pruebas se están realizando dentro de las instalaciones de la universidad tome en cuenta los siguientes contactos:

- i. Alerta Médica: 1711
- ii. Clínica Médica UVG: extensión 21312, edificio F, oficina F119-F120 (debajo de la plaza Paiz Riera)
- iii. Jefe de seguridad UVG, Lic. Nelson Aldana: 59781736, Sótano 1 CIT, oficina 8S1, según lo amerite el accidente.
- iv. Secretaría General: 2369-8333, oficina F-205, según lo amerite el accidente.

ANEXO 6

RESULTADOS Y OBSERVACIONES

Sensibilidad táctil

Deslizador	Número de prueba	Número de interacciones
Altitud	1	2
	2	3
	3	1
	4	1
	5	2
	6	3
	7	3
	8	2
	9	1
	10	2
Velocidad del viento	1	2
	2	1
	3	2
	4	3
	5	2
	6	2
	7	1
	8	3
	9	1
	10	3
Dirección del viento	1	2
	2	1
	3	3
	4	3
	5	2
	6	3
	7	2
	8	1
	9	1
	10	3
Orientación de la pista	1	1
	2	2
	3	3
	4	1
	5	1
	6	2
	7	4
	8	3
	9	2
	10	1

Tiempo de respuesta instrumentos mecánicos

Prueba	Tiempo de respuesta
1	0.832
2	0.887
3	0.912
4	0.845
5	0.960
6	0.825
7	0.978
8	0.809
9	0.890
10	0.853

Tiempo de respuesta instrumentos digitales

Tipo de respuesta	Número de prueba	Tiempo de respuesta
A	1	0.745
	2	0.831
	3	0.963
	4	0.812
	5	0.710
	6	0.901
	7	0.733
	8	0.955
	9	0.774
	10	0.866
B	1	0.876
	2	0.934
	3	0.719
	4	0.801
	5	0.945
	6	0.768
	7	0.712
	8	0.874
	9	0.973
	10	0.793
C	1	0.754
	2	0.821
	3	0.888
	4	0.732
	5	0.910
	6	0.762
	7	0.947
	8	0.799
	9	0.685
	10	0.875

D	1	0.723
	2	0.812
	3	0.943
	4	0.769
	5	0.875
	6	0.974
	7	0.911
	8	0.738
	9	0.982
	10	0.855