

Escuela Superior Politécnica Del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Restauración mecánica de una máquina balanceadora a partir de la
ingeniería inversa

INGE-2405

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingenieros Mecánicos

Presentado por:

José Alejandro Amaya McKee

Juan Sebastián Cevallos Monroy

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas aquellas personas que, de una forma u otra, han sido faros de inspiración y apoyo en este viaje. A mi familia, por su amor incondicional y su fe inquebrantable en mis sueños. A mis profesores y mentores, por su sabiduría y paciencia, y por guiarme con su luz en los momentos de duda. A mis amigos, por estar siempre allí, ofreciendo una palabra de aliento y una sonrisa en los días difíciles. Y, finalmente, a todos los que se atreven a soñar y a trabajar incansablemente para hacer esos sueños realidad.

José Alejandro Amaya McKee

Dedicatoria

El presente trabajo lo dedico a Allan
Camilo, la razón de mi vida y por quien
luchó cada día por ser mejor persona.

Juan Sebastián Cevallos Monroy

Agradecimientos

Agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, han sido parte de este proceso, ofreciendo su ayuda, consejos y motivación. Este logro es reflejo de mi esfuerzo, del apoyo y la fe que cada uno ha depositado en mí.

José Alejandro Amaya McKee

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que me permitieron llegar hasta aquí y lograr culminar esta etapa de mi vida, especialmente a mi familia que siempre me ha apoyado de manera incondicional.

Juan Sebastián Cevallos Monroy

Declaración Expresa

Nosotros José Alejandro Amaya McKee y Juan Sebastián Cevallos Monroy acordamos y reconocemos que:

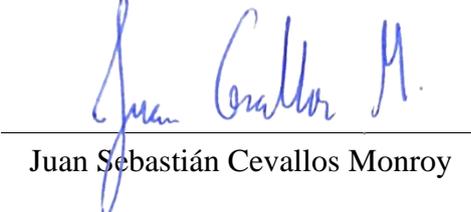
La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 05 de febrero del 2024.



José Alejandro Amaya McKee



Juan Sebastián Cevallos Monroy

Evaluadores

Ph.D Miguel Ángel Quilambaqui Jara

Profesor de Materia

Ph.D Juan Manuel Peralta Jaramillo

Tutor de proyecto

Resumen

El **desbalance** es un fenómeno que ocurre en los rotores debido al uso prolongado, el cual provoca daños en el equipo y los operarios a causa del ruido y las vibraciones. El desbalance se mide por medio de una balanceadora; permite ubicar en un plano la cantidad de masa que debe ser agregada o removida para que el rotor quede equilibrado. Tener una máquina de este tipo es un gran beneficio para la ESPOL y sus estudiantes ya que serán capaces de corroborar de manera práctica y visual la teoría que han aprendido. Por medio del uso de **ingeniería inversa** se determinó que la restauración y compra de mejoras tiene un costo máximo de \$9.700, mientras que la compra de un equipo nuevo supera los \$30.000; por lo que es más rentable la restauración que la compra de una máquina nueva. Lo más significativos que se agregaría para su correcto funcionamiento mecánico son el cambio del motor, poleas y bandas. Además, se agregaron los planos de **ensamblaje** para reconocer la ubicación de las partes.

Palabras clave: desbalance, ingeniería inversa, ensamblaje

Abstract

*Rotor **unbalance** occurs due to prolonged use, this generates noise and vibrations which can affect people and the machines. A balancing machine can measure this unbalance to locate the position of the mass that needs to be added or removed in order to achieve balance. This machine is a benefit for ESPOL and its students because they can corroborate theory with practice. Through the use of **reverse engineering**, it was determined that the mechanical restoration and purchase of the upgrades have a maximum cost of \$9.700, while the cost of a new machine exceeds \$30.000; this means that the restoration is much more profitable than the purchase of a new machine. The most significant things that would be added for its correct mechanical operation are the change of the motor, pulleys and belts. Additionally, **assembly** plans were added to recognize the location of the parts.*

Key words: *Unbalance, reverse engineering, assembly*

Índice General

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice General.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice De Figuras.....	VIII
Índice De Tablas.....	IX
Índice De Planos.....	X
Capítulo 1.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Definición del problema.....	2
1.3. Justificación del proyecto.....	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos.....	3
1.5. Marco Teórico.....	4
1.5.1. Maquina Balanceadora.....	4
1.5.2. Funcionamiento de la maquina Balanceadora.....	6
1.5.3. Rotores.....	7
1.5.4. Ejes.....	8

1.5.5. Funcionamiento de una balanceadora.....	9
1.5.6. Sistemas de Medición.....	9
1.5.7. Ingeniería inversa	10
Capítulo 2.....	13
2. Metodología	14
2.1. Proceso de Diseño	14
2.2. Requerimientos de diseño	15
2.3. Especificaciones de diseño.....	16
2.4. Diseño y selección de componentes mecánicos.....	19
2.5. Análisis de alternativas.....	20
2.6. Selección de las alternativas de diseño	22
2.7. Análisis de la dinámica del sistema.....	23
Capítulo 3.....	27
3. Resultado y Análisis.....	28
3.1. Resultados de las alternativas de diseño	28
3.2. Análisis de fuerzas	29
3.3. Planos de fabricación y ensamble	31
3.4. Plan de montaje	32
3.5. Plan de mantenimiento	33
3.6. Análisis de costos y viabilidad.....	34
Capítulo 4.....	38
4. Conclusiones y Recomendaciones	39

4.1. Conclusiones	39
4.2. Recomendaciones.....	40
Referencias.....	42
Apéndices.....	44
Apéndice A – Cálculos.....	44
Apéndice B – Planos y tablas	45

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
QFD	Quality Function Deployment
DCL	Diagrama de cuerpo libre
CAD	Computer-Aided Design

Simbología

g	gramos
mm	milímetros
rad	radianes
s	segundos
RPM	revoluciones por minuto
N	Newtons
HP	Horse Power – Caballos de fuerza
Hz	Hertz
DC	Direct Current – Corriente Directa
AC	Alternating Current – Corriente Alterna
in	inches-pulgadas
lb	libres-libras

Índice De Figuras

Figura 1. 1 Disco desbalanceado	5
Figura 1. 2 Balanceadora Serie B - Modelo B50	6
Figura 1. 3 Ventilador Roots.....	7
Figura 1. 4 Motor Wankel.....	8
Figura 1. 5 Diagrama vectorial del método de coeficientes de influencia.....	10
Figura 2. 1 Proceso de diseño	15
Figura 2. 2 Desarme inicial de los elementos	16
Figura 2. 3 Limpiezas de las partes.....	17
Figura 2. 4 Prueba del freno.....	17
Figura 2. 5 Pulimiento de los elementos	18
Figura 2. 6 Megado del motor.....	18
Figura 2. 7 Esquema QFD	21
Figura 2. 8 DCL del motor.....	24
Figura 2. 9 DCL de la polea 1	24
Figura 2. 10 DCL de la polea.....	25
Figura 2. 11 DCL del eje.....	26
Figura 3. 1 Esquema del balanceo en el plano XY	30
Figura 3. 2 Esquema del balanceo en el plano YZ	30
Figura 3. 3 Esquema de montaje de la balanceadora	31
Figura 3. 4 Esquema referencial con las mejoras de seguridad	32

Índice De Tablas

Tabla 2. 1 Matriz de decisión.....	21
Tabla 3. 1 Costo de los repuestos para la restauración mecánica	36
Tabla 3. 2 Costo total de restauración mecánica.....	36
Tabla B. 1 Datos eléctricos de motores AC.....	45
Tabla B. 2 Especificaciones del variador de frecuencia	46

Índice De Planos

PLANO 1 Listado de partes

PLANO 2 Dispositivo de transmisión

PLANO 3 Bancada

PLANO 4 Pedestal fijo

PLANO 5 Pedestal móvil

Capítulo 1

1.1. Introducción

El mantenimiento industrial es una rama de la ingeniería de suma importancia por su impacto económico y productivo. Su enfoque técnico-científico surge hace unas pocas décadas cuando debido a la necesidad de adoptar modelos de producción sostenible. La práctica del mantenimiento pasó de ser un momento destinado a las reparaciones, a la elaboración de sistemas de gestión, con el fin de no solo corregir las averías sino para prevenirlas y predecirlas (Fernández, 2005).

El presente proyecto propone analizar la viabilidad de la restauración mecánica de una máquina balanceadora que se encuentra fuera de servicio desde hace 30 años. Se tomará en cuenta el costo de reemplazar las partes faltantes ya sea comprando los repuestos o fabricándolos mediante un proceso de mecanizado. Los valores determinados se van a comparar con el coste de adquirir una máquina nueva y los costos de logística para desechar la máquina anterior.

Puesto que la máquina se encuentra desmantelada, se utilizará el criterio de ingeniería inversa para poder ubicar los elementos existentes e identificar si hay partes faltantes o dañadas. Con respecto a los elementos faltantes, solo se tomará en consideración los elementos que no permitan un correcto funcionamiento mecánico.

1.2. Definición del problema

La Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de ESPOL, cuenta con un Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS) donde existen máquinas que son parte de un taller que da soporte en el mantenimiento de equipos, estudios de materia integradora, trabajos de investigación y vinculación, por lo que es importante que todas ellas se encuentren funcionando correctamente.

Hay máquinas que no son operativas, siendo una de ellas la balanceadora cuya función es importante ya que permite balancear rotores, cardanes, ventiladores y ejes que

son parte de un mantenimiento mecánico. Actualmente el equipo se encuentra con un ensamblaje no completo y fuera de servicio por lo que representa pérdidas tanto de espacio y económicas.

A esto se suma la necesidad urgente de contar con un equipo para actividades académicas y de servicio técnico como formación de la carrera, por lo que hay que establecer costos para comprar una máquina nueva o repotenciar la existente.

1.3. Justificación del proyecto

La falta de equipos operativos es un problema en el aprendizaje de las materias vinculadas a áreas de mantenimiento y otros proyectos de ESPOL que se desarrollan en este centro, por lo que recuperar la balanceadora representa un ahorro económico para ESPOL y ayudará al aprendizaje de los estudiantes ya que permitirá vincular la teoría con la práctica, por ejemplo, a los estudiantes de la materia de Mantenimiento Industrial, ya que podrían recuperar la balanceadora y después estarían listos para realizar los respectivos mantenimientos para que esta siga usándose como material didáctico.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Restaurar una máquina balanceadora horizontal de soporte flexible por medio de la ingeniería inversa para fines educativos y de formación en ESPOL.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Identificar los elementos faltantes para el correcto ensamble de la balanceadora serie B modelo B50.
2. Establecer la viabilidad de la recuperación del equipo en función del coste de maquinación o compra de los elementos faltantes.
3. Elaborar una guía técnica para el ensamblaje de la balanceadora.

1.5. Marco Teórico

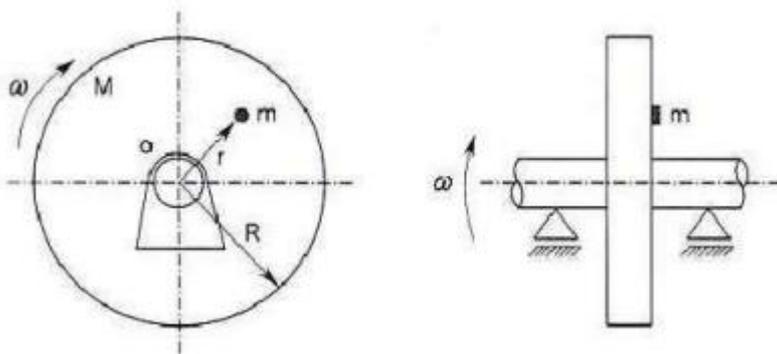
1.5.1. Maquina Balanceadora

Cuando una maquinaria está operando, con el paso del tiempo, esta se deteriora haciendo que aparezcan fuerzas inerciales no deseadas. Estas fuerzas producen vibraciones que resultan peligrosas porque fatigan los elementos produciendo fallas prematuras. Las vibraciones aumentan por la distribución asimétrica de las masas colocadas sobre el rotor.

Cabe resaltar que jamás se puede tener una distribución simétrica. Esto se debe a la porosidad del material o que su centro de gravedad se encuentre desplazado. Adicionalmente, se pueden considerar los errores de ensamble y de maquinado que producen asimetrías milimétricas.

La aglomeración de todos estos fallos se conoce como desbalanceo. El cual si es excesivo causa desgaste en los cojinetes y fallas por fatiga, que puede representar un peligro tanto para la maquinaria como para las personas. Esto sucede porque la fuerza de las vibraciones se transmite a las instalaciones, generando ruido que es perjudicial para las personas (Ercoli & Malfa, 2002).

Para poder verificar el estado de la máquina es necesario cuantificar el desbalanceo. El modelo que se utiliza se puede observar en la figura 1.1. Un disco de masa y radio que gira con respecto a su eje de rotación. A este disco se le agrega una masa pequeña [g] a una distancia [mm] desde el centro. El disco gira a una velocidad angular [rad/s].

Figura 1. 1*Disco desbalanceado*

Nota. Representación de un disco desbalanceado [Ercoli & Malfa, 2002]

La masa genera una fuerza centrífuga que corresponde al siguiente vector:

$$\vec{F} = m\omega^2\vec{r} \quad (1.1)$$

Esto produce un desbalanceo que se representa con el vector:

$$\vec{U} = m\vec{r} \quad (1.2)$$

Al igualar la fuerza de la masa con la fuerza del disco que gira con una excentricidad gracias al nuevo centro de masa. De esta manera se obtiene:

$$m\omega^2 r = M\omega^2 \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{mr}{M} = \frac{U}{M} [mm] \quad (1.3)$$

Con esto queda definido que representa el desbalanceo por unidad de masa o también llamado desbalanceo específico. Este será el parámetro para utilizar y comparar los efectos del desbalance, puesto que este depende de la masa del rotor (Ercoli & Malfa, 2002).

Para solucionar este problema se usa una máquina balanceadora, según la figura 1.2, que mide el desbalance de un rotor e indica la magnitud y distancia a la que se ubica.

Figura 1. 2

Balanceadora Serie B - Modelo B50



Nota. Máquina balanceadora horizontal de soportes flexibles [IRD Balancing México, 2006]

En las máquinas más antiguas se medía el desbalance utilizando una luz estroboscópica. También era necesario que la velocidad de giro sea similar a la velocidad de trabajo con la que opera el rotor. En la actualidad el desbalance se mide por medio de sensores electrónicos conectados a un Software. Aunque siempre es preferible el uso de software libre, es común que estos softwares se desarrollen en la plataforma LabVIEW, ya que permite adquirir datos y procesar las señales de los sensores (González & Lira, 2009).

1.5.2. Funcionamiento de la maquina Balanceadora

El funcionamiento de una balanceadora consiste en ubicar un rotor sobre unos resortes flexibles para hacerlo girar. Estos resortes permiten una cierta oscilación, pero si existe un desbalanceo, las amplitudes de la oscilación cambian. Se procede a medir la magnitud de las oscilaciones, así como su posición angular. Así se puede determinar

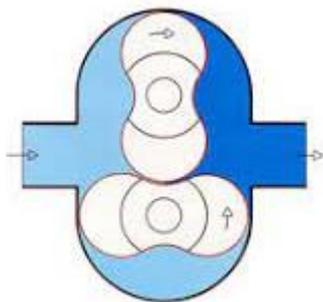
si hay que agregar o remover masa. Si se necesita agregar masa se lo realiza por medio de soldadura y si se necesita quitar masa se realizan perforaciones (Mabie & Ocvirk, 1996).

1.5.3. Rotores

El rotor es un elemento giratorio cuyo movimiento puede ser de rotación o de revolución con respecto a su eje. En motores eléctricos, trabaja en conjunto a un estator, un elemento fijo. Cuando una corriente eléctrica pasa a través del estator, se produce un campo magnético giratorio. Este campo magnético gira al rotor para transformar la energía eléctrica en mecánica con un eje de potencia. También existen otros mecanismos que utilizan rotores. Por ejemplo, están los rotores con lóbulos como en el ventilador Roots que se puede observar en la figura 1.3; y los rotores excéntricos como en el motor Wankel que se observa en la figura 1.4 (Mabie & Ocvirk, 1996).

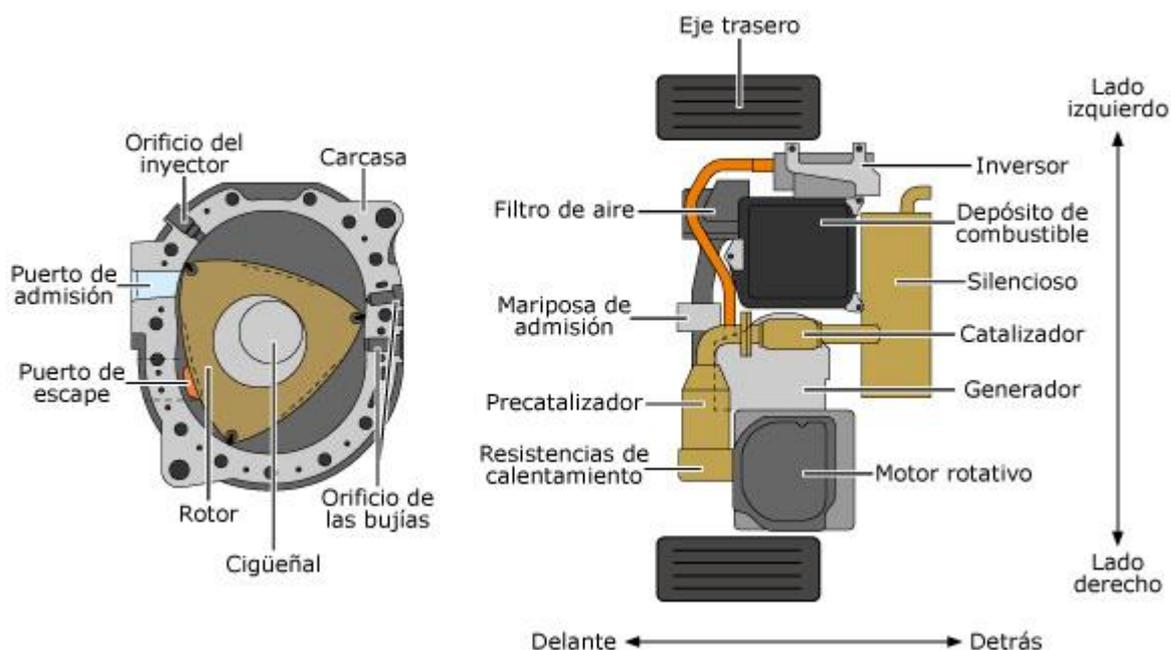
Figura 1.3

Ventilador Roots



Nota. Ejemplo de un rotor de cicloide impulsado por un par de engranes acoplados utilizado en el ventilador Roots¹.

1

Figura 1. 4*Motor Wankel*

Nota. Rotor de tres lóbulos utilizado en motor Wankel [García F., 2019]².

Es importante que la masa del rotor se encuentre lo más balanceada posible. Un rotor desbalanceado produce vibraciones (Shigley, Uicker, Contín, & Castellanos, 1990). Estas vibraciones pueden ser perjudiciales para la máquina.

1.5.4. Ejes

Un eje es un elemento que no gira ni produce torque y sirve para soportar elementos rotatorios como ruedas y poleas (Shigley & Mitchell, 1985). Lo primero que se piensa en un eje es el eje del carro; pero es un árbol de transmisión, ya que además

² <https://www.blogmecanicos.com/2019/05/el-motor-rotativo-como-extensor-de-rango.html>

de soportar elementos giran a la par de estos para transmitir potencia. En ambos casos, al tener que soportar elementos, puede existir un desbalance si es que estos no se encuentran en equilibrio.

1.5.5. Funcionamiento de una balanceadora

El funcionamiento de una balanceadora consiste en ubicar un rotor sobre unos resortes flexibles para hacerlo girar. Estos resortes permiten una cierta oscilación, pero si existe un desbalanceo, las amplitudes de la oscilación cambian. Se procede a medir la magnitud de las oscilaciones, así como su posición angular. Así se puede determinar si hay que agregar o quitar masa. Si se necesita agregar masa se lo realiza por medio de soldadura y si se necesita quitar masa se realizan perforaciones (Mabie & Ocvirk, 1996).

1.5.6. Sistemas de Medición

Para verificar el estado de la máquina es necesario medir las vibraciones. Para esto se puede utilizar un vibrómetro, el cual proporciona los datos de velocidad, aceleración y amplitud de las vibraciones para una precisa caracterización (Universidad de Córdoba, 2018).

El desbalance se puede medir con sensores inductivos de proximidad. Estos registran la posición de la masa que está produciendo el desbalance. Las vibraciones medidas deben ser proporcionales con el grado y la ubicación del desbalance para poder traducir esto a unidades de masa. Un método que se puede utilizar es el de coeficientes de influencia. Este método permite calcular el valor de la masa de balanceo y su ubicación con respecto al eje del rotor para lograr un equilibrio. En la figura 1. 4 se puede observar el diagrama vectorial con el que se determinan las variables a calcular. Finalmente se obtiene una relación entre la masa de balanceo M_b con la masa de prueba M_t en función de los vectores de desbalance del rotor V_u y de

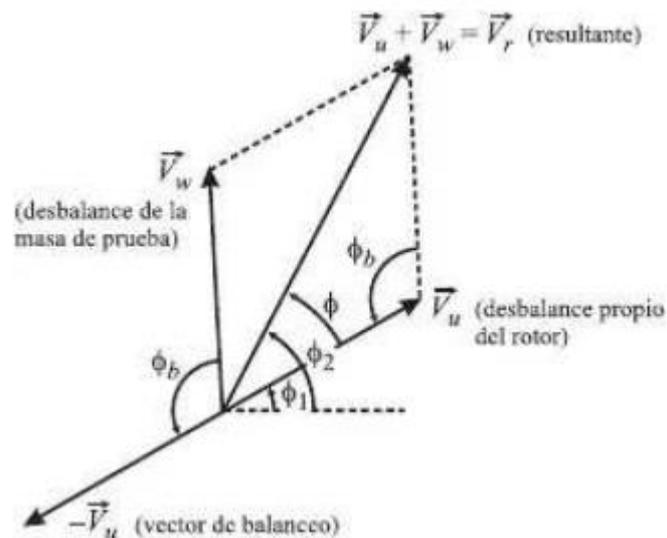
desbalance de la masa V_w . También se determina el ángulo de desfase ϕ_b que se expresa en función de los vectores de desbalance y su resultante V_r por medio de la ley del coseno (González & Lira, 2009). Quedando las siguientes ecuaciones:

$$\frac{M_b}{M_t} = \frac{V_u}{V_w} \quad (1.4)$$

$$\phi_b = \cos^{-1} \left(\frac{V_u^2 + V_w^2 - V_r^2}{2V_u V_w} \right) \quad (1.5)$$

Figura 1.5

Diagrama vectorial del método de coeficientes de influencia



Nota. Se aplica la ley del coseno para calcular ϕ_b [González & Lira, 2009]

1.5.7. Ingeniería inversa

La ingeniería inversa se refiere a un proceso de diseño inverso, en el que se parte de un producto final y se lo descompone para identificar sus componentes y procesos y poder entender mejor este producto. Este proceso se utiliza en ingeniería de software porque es común encontrar programas que no cuentan con ningún tipo de

código fuente ni especificaciones que expliquen su funcionamiento (García R. G., 2017).

El área de mantenimiento también se beneficia de esta técnica. Por ejemplo, una empresa necesita darle mantenimiento a un equipo muy antiguo y que se encuentra fuera de servicio. Lo más probable es que la información necesaria no esté disponible. La solución es desarmar la máquina para poder identificar sus componentes y así entender su funcionamiento (AsorCAD, 2023).

En la metodología de ingeniería inversa, se resalta su utilidad como un añadido al diseño y manufactura de productos y artefactos, especialmente aquellos con superficies libres o complejas. A diferencia de los enfoques convencionales que parten de especificaciones para desarrollar un diseño inicial, la ingeniería inversa adopta un proceso opuesto, comenzando con el producto final.

Este método implica la obtención de datos a través de equipos avanzados para lograr un diseño modificado que se ajuste a nuevas exigencias. La ingeniería inversa destaca por su agilidad, partiendo de una solución existente, y su capacidad para introducir formas y geometrías libres, contribuyendo a la eficiencia de las empresas al reducir el tiempo de diseño, costos y desperdicios.

El proceso de ingeniería inversa comprende dos etapas clave: la digitalización 3D del objeto físico y la reconstrucción de superficies mediante sistemas CAD/CAM/CAE especializados. La captura, representación y reproducción de modelos se logra manipulando información tridimensional en un computador.

Esta metodología se aplica en diversos campos, destacando en el diseño automotriz, aeronáutico y en el desarrollo de elementos de máquinas. No solo permite trabajar con precisión y geometrías complejas, sino que también reduce

significativamente el tiempo de desarrollo, evitando el ensayo y error, resultando en un desarrollo más rápido del producto y una reducción de costos (Betancur, 2011).

Capítulo 2

2. Metodología

2.1. Proceso de Diseño

Se inició la ingeniería inversa con el desmontaje de los elementos de la máquina balanceadora, para bosquejar un modelo 3D en un software CAD que nos muestre la estructura y elementos de la máquina. En este proceso se limpiaron los componentes, incluyendo un proceso de identificación y etiquetamiento de cada elemento mediante marcas para evitar confusiones al montar todo el equipo de nuevo.

Al terminar a etapa de desmontaje se evaluó el estado individual de cada componente, permitiéndonos la toma de decisiones sobre su viabilidad y rendimiento de los elementos. A partir de la inspección del sistema de frenos, verificamos por medio de prueba neumática su funcionamiento correcto e integridad estructural. Por otra parte, se identificó que el motor presenta una avería por desgaste de las bobinas y desbalanceo, por lo que se envió a un taller especializado para una cotización detallada del mantenimiento necesario.

Con referencia a lo anterior, se buscaron alternativas de motores que cumplan con las mismas características para la evaluación costos y acciones a seguir. Luego, este proceso continúa con la etapa de restauración visual mediante un proceso de pintura, para asegurar una protección general a la corrosión y mejorar la estética de la maquinaria.

Finalmente, se procede a la etapa de ensamblaje de los elementos y los componentes del equipo asegurándonos de seguir las especificaciones técnicas para el correcto funcionamiento y operación mecánica

Figura 2. 1*Proceso de diseño***2.2. Requerimientos de diseño**

En primer lugar, se tomó en cuenta el requerimiento de funcionabilidad de la máquina. Para esto se realizaron etapas usando criterios de ingeniería inversa para identificar los elementos que necesitan repararse o reemplazarse. Aquí se consideran el tipo de balanceo que se realizará, que es un balanceo dinámico en dos planos. Con este método, dependiendo del material, se puede remover o agregar material una vez identificado el desbalance. También la capacidad del motor, el rango de movimiento de las poleas y el rango de movimiento de los soportes para ajustarse al largo del rotor.

El siguiente requerimiento es la seguridad, ya que esta máquina va a ser operada principalmente por estudiantes de grado, por lo cual se deben incluir medidas de seguridad para evitar la generación de siniestros. De la mano con la seguridad, está el requerimiento de ergonomía ya que la balanceadora debe permitir su operación de forma sencilla. Esto incluye que las partes móviles puedan ser desplazadas empleando la menor fuerza posible por parte del operario y que los rotores se puedan colocar sin dificultades.

Finalmente está el requerimiento de manufactura de escala. Este trabajo es una primera etapa de un proyecto más grande en el que se considera que una vez restaurada la máquina, a esta se le podrán incorporar sensores para la recolección de datos actuales, por lo que en una siguiente etapa se deberán maquinar los elementos faltantes. En tal sentido, los siguientes trabajos se deberán realizar preferencialmente en los propios talleres de ESPOL, por lo que estos elementos deberán presentar un diseño construccional de fácil desarrollo.

2.3. Especificaciones de diseño

Entre las especificaciones de diseño se considerarán los aspectos para que los requerimientos de ESPOL se realicen de manera óptima. En primer lugar, está el desensamble y diagnóstico del equipo para definir los elementos faltantes o que requieran algún tipo de reparación.

Aquí se debe tomar en cuenta si estos elementos se pueden manufacturar dentro de ESPOL o se tienen que comprar. Para esto se desarmó la máquina para verificar el estado de cada elemento y componente, tal como se observa en las figuras 2.2-2.6.

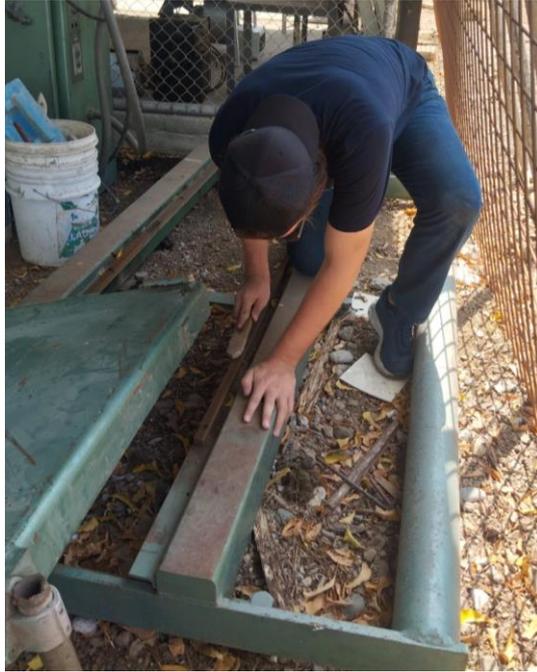
Figura 2. 2

Desarme inicial de los elementos



Figura 2.3

Limpiezas de las partes

**Figura 2.4**

Prueba del freno



Figura 2. 5

Pulimiento de los elementos



Figura 2. 6

Megado del motor



Entre los elementos que deben ser reemplazados se tienen, principalmente rodamientos y pernos debido a la antigüedad de estos. Luego de realizar pruebas eléctricas, se determinó que el motor necesita repararlo, por lo que se envió a un taller para su revisión.

Estos aspectos son los rangos de operación, definidos por el fabricante: máximo 2300 kg de capacidad, operando a una velocidad entre 250 y 6000 RPM. El rotor es sujetado mediante una banda de tensión con ajuste manual y se conecta a un motor de 5 HP. Es importante mencionar, que derivado a la falla del motor se tomaría en consideración el uso de un motor de menor potencia, haciendo que se tenga que reducir la capacidad máxima que puede cargar la balanceadora. Como la máquina se utilizará para fines académicos, la reducción de la carga podría considerarse inclusive como una medida de seguridad para su operación a nivel de laboratorio.

Finalmente, uno de los puntos más importantes es el costo. Para esto se consideró el precio de la reparación del motor, el costo de cambiar los pernos y rodamientos antiguos, la compra de un motor nuevo y el costo de toda una máquina nueva de similares características.

2.4. Diseño y selección de componentes mecánicos

Como parte del diseño, se realizó junto a la inspección visual, el levantamiento digital de los elementos para realizar una guía de ensamble. Se logró determinar que el motor debe ser reparado o reemplazado. El motor actual es un motor DC de 5 hp y 2500 RPM, cuya reparación tiene un coste aproximado de \$900. Un motor AC de 60Hz, 7.5 hp y 3600 RPM puede reemplazarlo. Es una de las configuraciones estándar para motores AC, por lo que hay que elegir uno que mantenga el mismo torque.

Otro elemento a reemplazar son las bandas y las poleas. Se necesitan 2 poleas tensoras y un juego de bandas de 1" de ancho y distintas longitudes para poder colocar rotores de distintos diámetros. Esto tiene un costo aproximado de \$2.000 según indica la página oficial del fabricante (IRD, 2023).

La balanceadora cuenta con un freno neumático de disco, esto quiere decir que se acciona utilizando aire comprimido para cerrar las pinzas y frenar el movimiento del disco unido al eje del motor. Se verificó el freno con un compresor para accionar las pinzas. Se comprobó que las pinzas funcionan de manera correcta, únicamente se deben cambiar mangueras y pastillas de freno.

Además, se pueden reemplazar algunos pernos y rodamientos. En el caso de los pernos, algunos tienen el hilo gastado y otros se han fracturado, tanto antes como durante el proceso de desensamble. Los rodamientos en su mayoría no presentan problemas, pero debido a la antigüedad de estos es recomendable reemplazarlos.

2.5. Análisis de alternativas

Como parte del proceso de ingeniería inversa, se realizó un esquema de casa de calidad, conocido en inglés como Quality Function Deployment (QFD), para poder analizar las diferencias que tiene la balanceadora B50 con otras balanceadoras actuales de capacidades similares.

Además del esquema QFD, se realizó una matriz de decisión, tal como se muestra en la tabla 2.1, para poder comparar los aspectos obtenidos en el esquema anterior. La matriz de decisión permite cuantificar de mejor manera las diferencias que existen entre las balanceadoras.

Figura 2.7

Esquema QFD

FUERTE= ⊙
 MEDIA= ○
 DEBIL= △

		Cómo?						EVALUACIÓN COMPARATIVA 5 = MEJOR 1 = PEOR				
		Qué?	PRIORIDAD	1	2	3	4	5	Balaceadora B50	Balaceadora PHQ-3000H	Balaceadora RM2000	
1	Funcionalidad	Soportar rotores de mayor peso	4	⊙	○				3	5	5	Todos pueden soportar más de la carga requerida
2		Permitir rotores de diámetros más grandes	5	○	⊙				5	3	4	
3	Seguridad	Fijar correctamente el rotor	5			⊙	△		2	4	5	La RM200 tiene la mayor cantidad de accesorios de seguridad para fijar el rotor
4	Ergonomía	Mover los soportes con facilidad	3		△	○	⊙		3	4	5	La RM200 cuenta con accesorios más eficientes para desplazar los soportes
5	Manufacturabilidad	Fabricar sus propios repuestos	2			○		⊙	4	1	2	Solo la B50 tiene mayor flexibilidad para utilizar piezas fabricadas artesanalmente
6. OBJETIVOS				Poder soportar rotores de mayor peso. Superando los 2500 kg	Ser capaces de ubicar rotores de hasta 2 metros de diámetro	Mantener un ambiente seguro ya que la máquina será operada por	Permitir a los operarios mayor comodidad a la hora de ajustar un rotor	Maquinar las piezas que se puedan necesitar	3,4	3,4	4,2	

Tabla 2. 1*Matriz de decisión*

Criterios	Importancia	Puntuación			Breve justificación de la puntuación	Puntuación ponderada		
		B50	RM2000	PHQ-3000H		B50	RM2000	PHQ-3000H
Precio	3	5	1	2	Cuál tiene un costo menor de implementación	15	3	6
Diametro máximo del rotor	1	5	4	3	Cuál permite un diámetro mayor	5	4	3
Carga máxima	1	3	5	5	Cuál soporta más carga	3	5	5
Seguridad	3	2	5	4	Cuál cuenta con mejores aspectos de seguridad	6	15	12
Ergonomía	2	3	5	4	Cuál brinda mayor ergonomía	6	10	8
Manufacturabilidad	1	4	1	2	Cuál permite que se fabriquen los repuestos dentro de ESPOL	4	1	2
Flexibilidad de mejoras	3	5	1	2	Cuál permite que se le añadan mejoras	15	3	6
Puntuación total		27	22	22	Puntuación total ponderada	54	41	42

2.6. Selección de las alternativas de diseño

Luego de analizar el esquema QFD que se observa en la figura 2.7, la balanceadora de la marca española KAISER modelo RM2000 cuenta con mejores especificaciones que la balanceadora B50. Se debe recalcar que la comparación se hace con un modelo actual, por lo que verán notables mejoras con respecto a nuestra balanceadora. Como una tercera opción está la máquina de la marca china JP modelo PHQ-3000H. Esta tiene un precio de \$30.000 sin incluir costos de envío y ensamble. Cuenta con especificaciones bastante buenas, pero que no alcanzan a la RM2000.

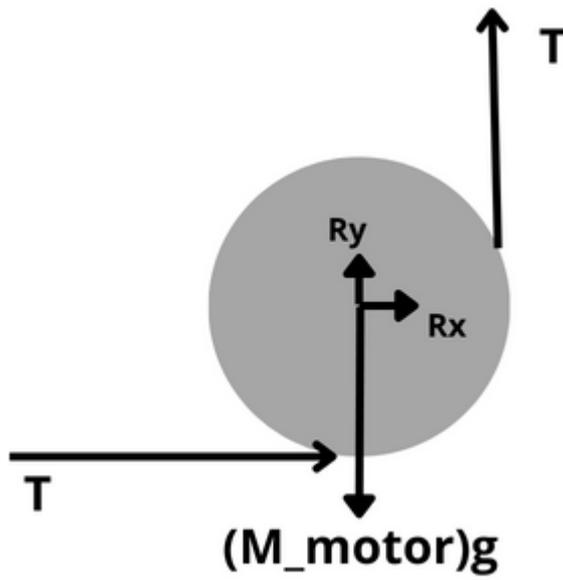
Esta información se la compara con la que se obtiene de la matriz de decisión de la tabla 2.1. Aquí se toma en consideración no solo las prestaciones que tiene cada máquina, sino que también se considera factores como el precio y la flexibilidad para agregar mejoras.

Estos factores son los más importantes, por esa razón tienen una ponderación alta con respecto a los demás. Esto se debe a que el objetivo de ESPOL es agregar mejoras. Entre ellas la seguridad, guardas y soportes adicionales para sostener rotores; y de medición, porque se pueden agregar sensores conectados a softwares de recolección de datos para verificar el desbalance fácilmente con una computadora.

Aunque las balanceadoras nuevas tengan mejores prestaciones, la mayoría de estos criterios se opacan por su alto precio y porque no permiten agregar componentes fácilmente. Aunque permiten balancear rotores más grandes, esta aplicación es útil para aplicaciones más industriales y dado a que la balanceadora se utilizará con fines académicos, es más rentable reemplazar las partes no operativas de la balanceadora B50.

2.7. Análisis de la dinámica del sistema

Para analizar la dinámica del sistema se analizó el motor y los elementos que contiene. Se realiza una sumatoria de momentos para determinar el par torsión de las bandas, para esto se consideran dos escenarios críticos: cuando el motor arranca y cuando el torque es máximo. Con esto se obtuvo que en el arranque el par torsión sobre la banda es de 31,28 N-m y como está sobre una polea con un radio de 7,8 cm se obtiene una tensión de 401,03 N. En cambio, cuando el torque es máximo, el par torsión de la banda es de 44,78 N-m y su respectiva tensión es de 574,10 N. Esto se puede ver reflejado en el DCL (diagrama de cuerpo libre) a continuación en las figuras 2.8-2.11.

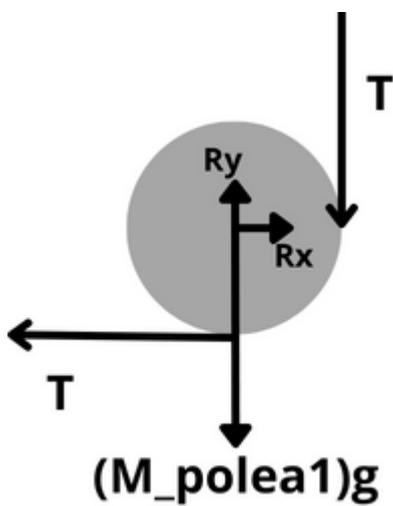
Figura 2. 8*DCL del motor*

$$\Sigma F_x = 0$$

$$R_x + T = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_y + T - m_{motor}g = 0$$

Figura 2. 9*DCL de la polea 1*

$$\Sigma F_x = 0$$

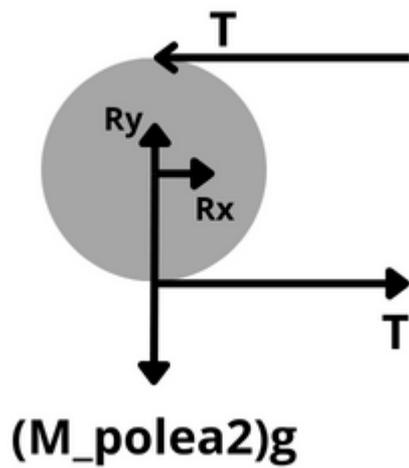
$$R_x - T = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_y - T - m_{polea1}g = 0$$

Figura 2. 10

DCL de la polea

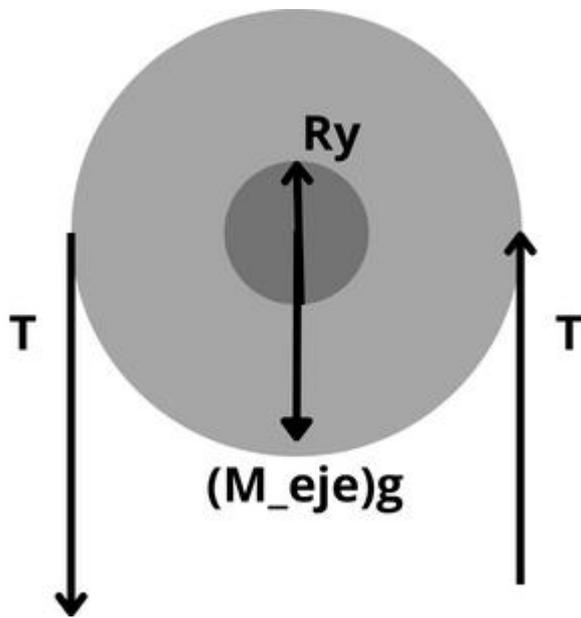


$$\Sigma F_x = 0$$

$$R_x - T + T = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_y - m_{polea2}g = 0$$

Figura 2. 11*DCL del eje*

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_y + T - T - m_{eje}g = 0$$

Capítulo 3

3. Resultado y Análisis

3.1. Resultados de las alternativas de diseño

Una vez revisada la balanceadora, luego de dos meses, se determinó que para que pueda operar mecánicamente se necesitan adquirir al menos un motor, las poleas y el juego de bandas. Se descartó la reparación del motor debido al costo elevado que conlleva. Además, en la actualidad existen motores AC que cuentan con una mayor accesibilidad debido a la alta oferta y costo reducido.

El motor es WEG 7.5 HP 220/440V TRIFÁSICO 3600 RPM. Este utilizará un variador de frecuencia WJ200-055LF: Constant Torque, Sensorless Vector Hitachi 7.5 HP, 5.5kW; dado que según la tabla B.2 es el variador indicado para este motor.

Por parte de poleas y bandas, es preferible adquirir los repuestos que proporciona la marca porque están estandarizados. Las poleas son Idler Pulley for B50 cuyas dimensiones son 102 mm de diámetro x 60 mm de ancho (4 in de diámetro x 2.38 in de ancho), y las bandas son de 1 in de ancho y 0,07 in de espesor. El largo de las bandas es de 135 in, 150 in y 180 in; se necesita una banda para cada largo mencionado. En el caso de las bandas, se necesita que tengan las dimensiones correctas para que el sistema tenga la tensión adecuada y pueda medir correctamente el desbalance, pero se pueden maquinar las poleas en los talleres de ESPOL. Esto se debe a que las poleas son del mismo tamaño y tienen una geometría sencilla debido a que se utiliza una banda plana.

Se descartó las opciones de las balanceadoras nuevas, en primer lugar, debido a que el costo de una máquina nueva de origen chino supera los \$30.000; mientras que la restauración de la balanceadora B50, de origen estadounidense, cuesta como máximo \$9.700, ya que existe la posibilidad de maquinar los repuestos dentro de los talleres de ESPOL reduciendo los costos mencionados en la tabla 3.1.

También está el hecho de que una vez restaurada mecánicamente, se podrá implementar tecnología moderna como sensores compatibles con los softwares actuales de recolección de datos; esta acción sería poco práctica en una balanceadora nueva.

A las razones expuestas se le puede añadir que estudiantes de grado operarán la máquina en su mayoría, siempre acompañados de un profesor encargado del equipo. Por lo que pueden adquirir experiencia inclusive desde el proceso de ensamble de la máquina.

3.2. Análisis de fuerzas

Para el análisis se realiza un balanceo dinámico, para corregir el desbalance de un rotor mediante dos criterios. La sumatoria de fuerzas deben ser cero y la sumatoria de momentos deben ser cero. Con apoyo de la figura 3.1 y 3.2

$$\Sigma F = 0 \quad (3.1)$$

$$-m_a R_a \omega^2 - m_b R_b \omega^2 - m R \omega^2 = 0 \quad (3.2)$$

Luego pasando a sus coordenadas “X” y “Y”

$$Y: -m_a R_{a_y} - m_b R_{b_y} - m R_y = 0 \quad (3.3)$$

$$X: -m_a R_{a_x} - m_b R_{b_x} - m R_x = 0 \quad (3.4)$$

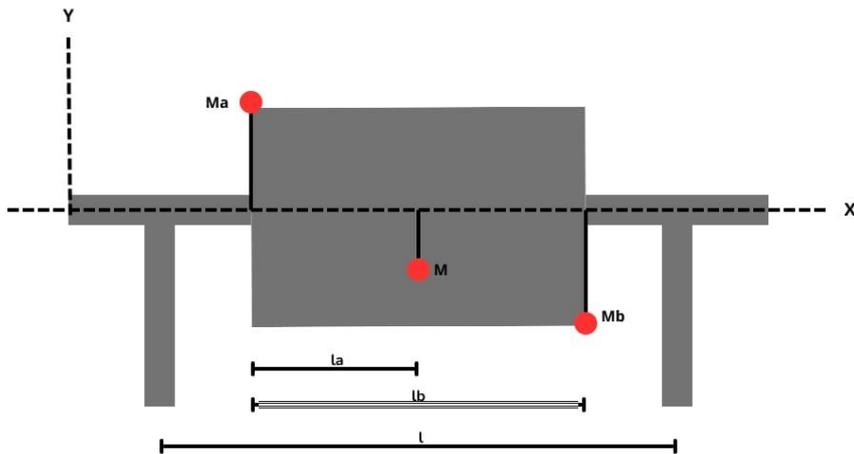
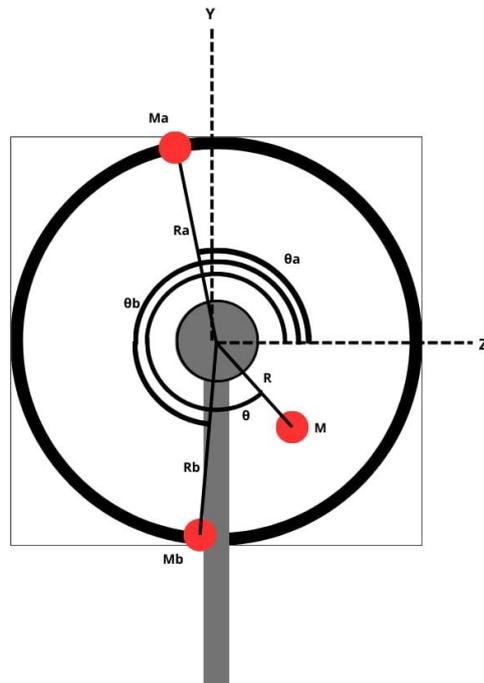
Se usó como pivote el punto donde de la masa a pueda generar momento para eliminar incógnitas en las ecuaciones y poder hallar la solución.

$$\Sigma M = 0 \quad (3.5)$$

$$(m_b R_b \omega^2) l_b - (m R \omega^2) l = 0 \quad (3.6)$$

$$X: m_b R_{b_x} = \frac{(m R_x) l}{l_b} \quad (3.7)$$

$$Y: m_b R_{b_y} = \frac{(m R_y) l}{l_b} \quad (3.8)$$

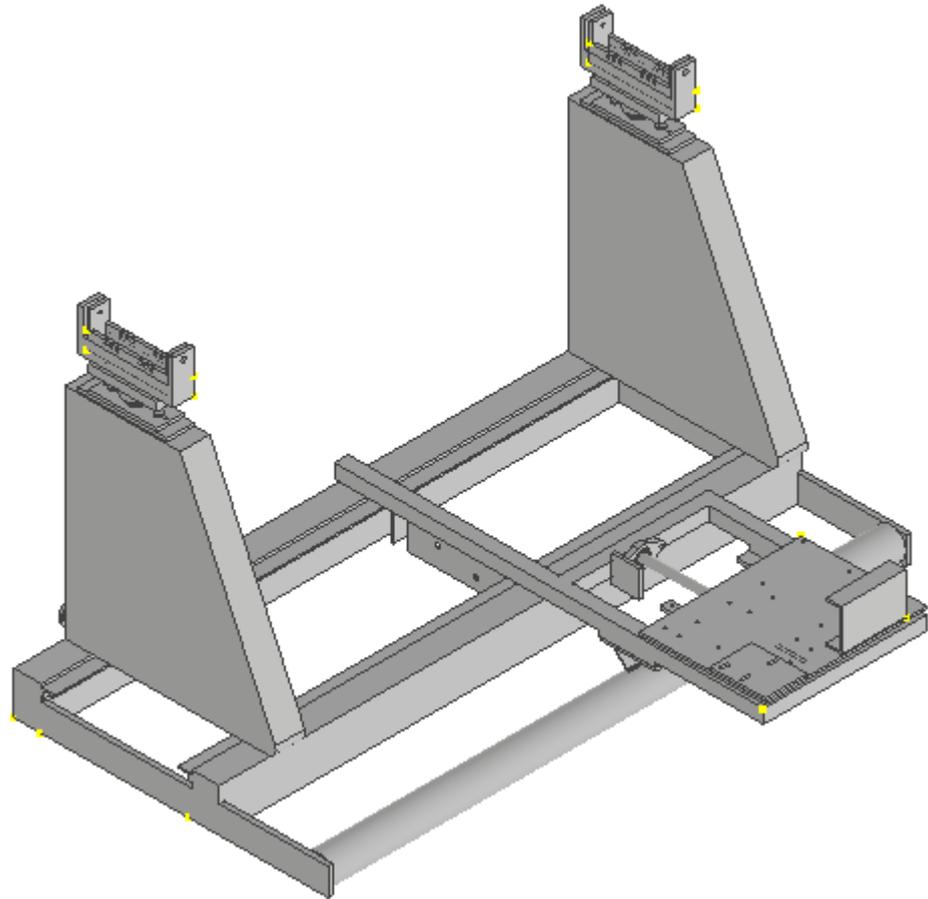
Figura 3.1*Esquema del balanceo en el plano XY***Figura 3.2***Esquema del balanceo en el plano YZ*

3.3. Planos de fabricación y ensamble

Se realizó el levantamiento digital de las piezas para verificar la posición de cada elemento. Esto se puede observar en la figura 3.3.

Figura 3.3

Esquema de montaje de la balaceadora

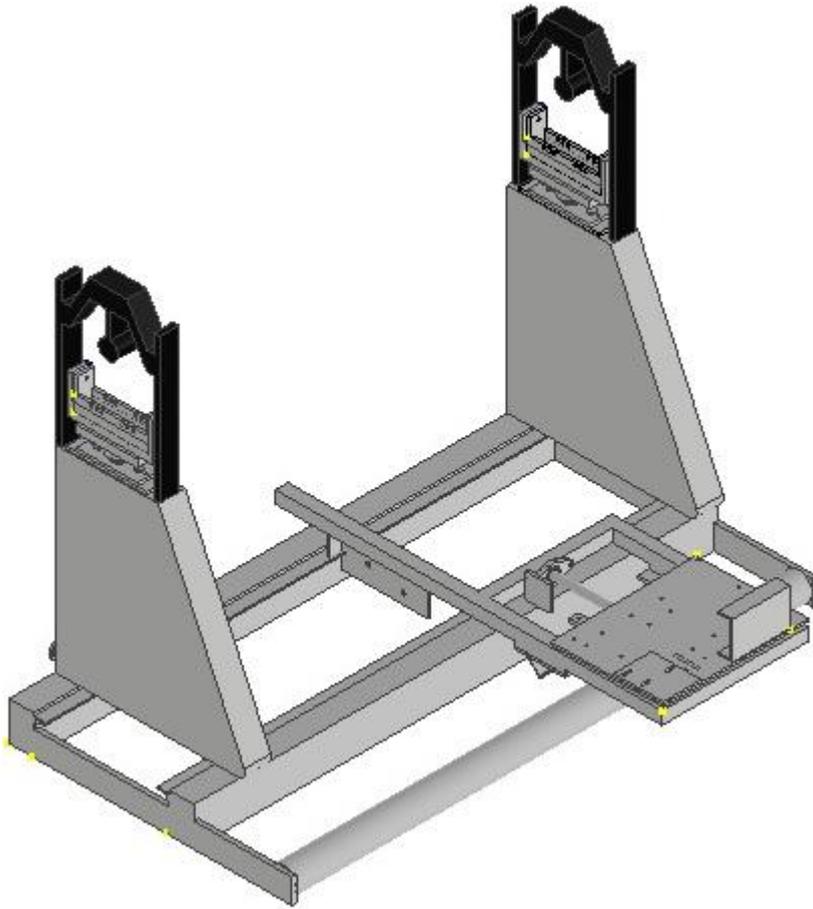


Nota. En el Apéndice B se encuentran todos los planos detallados.

Asimismo, en la figura 3.4 se puede observar cómo quedarían ubicados los Hold Down Kit para mejorar el requerimiento de seguridad. De esta manera el rotor que se coloque no se sujetaría únicamente con la banda plana sino que tendría un seguro extra para evitar que salga de su posición y ayudar a evitar accidentes.

Figura 3.4

Esquema referencial con las mejoras de seguridad

**3.4. Plan de montaje**

Una vez inspeccionada la balanceadora se la volvió a montar para poder realizar el proceso de pintado. El modelo original no cuenta con los elementos adicionales porque el análisis dinámico no lo considera, habrá que realizarlo nuevamente para prevenir fallas prematuras en el equipo.

Con respecto al motor, se calculó que el torque del motor DC con el que contaba la balanceadora es de 126 lb-in. Para escoger un motor AC que se adapte a este torque es necesario calcular la potencia en función de este torque y de las RPM del motor, haciendo este cálculo se obtiene que es necesario un motor de 7.2 HP.

Se escogió un motor de 7.5 HP porque es la siguiente potencia que se puede elegir después de 5 HP. Esto quiere decir que si se agregan elementos de seguridad que requieran de una mayor potencia, el motor seleccionado de 7.5 HP podrá utilizarse sin inconvenientes. Como la balanceadora soporta hasta 2300 kg, y lo utilizarán estudiantes, fácilmente se puede considerar un factor de seguridad de 2.0, esto significa que se puede colocar un rotor de hasta 1150 kg.

Los planos en el Apéndice B pueden utilizarse como una guía técnica referencial para conocer la ubicación de los elementos de la balanceadora. De esta manera cuando se empiece la restauración, los encargados sabrán de qué manera colocar cada elemento. El ensamble se recomienda que lo realicen los estudiantes bajo la responsabilidad de un técnico docente encargado de la balanceadora.

Se estima que esta actividad se realice durante un periodo académico como parte del componente práctico de las materias pertinentes como es el caso de Mantenimiento Industrial. Esto representa un beneficio tanto para ESPOL como para los estudiantes, debido a que disminuyen los costos de operación a la vez que los estudiantes adquieren experiencia práctica.

3.5. Plan de mantenimiento

La balanceadora, destinada para fines académicos, se estima que tendrá un uso constante, por ello su mantenimiento es crucial para asegurar su eficiencia y operatividad. De forma constante se deberá realizar mantenimientos preventivos limpiando el equipo regularmente minimizando la suciedad y polvo, lubricando sus piezas giratorias para evitar algún prematuro desgaste en ellas y cambiando piezas del equipo antes que estas se dañen.

Para prolongar su duración se sugiere que se realice como mantenimiento preventivo el cambio de rodamientos y bandas cada 25.000 y 24.000 horas de trabajo

respectivamente. Se estima que la maquina se use alrededor de 4 horas al día, de lunes a viernes, durante 16 semanas de actividades académicas que equivalen a un semestre (2 semestres al año). Esto proyecta 1280 horas anuales de funcionamiento del equipo.

3.6. Análisis de costos y viabilidad

Para realizar este análisis se tomó en consideración el precio de restaurar la balanceadora de dos maneras, la primera es reparando el motor DC y la segunda es adquiriendo un motor AC. Para poder realizar una correcta comparación se cotizó el precio de ambos motores, obteniendo así que reparar el motor DC tiene un costo de \$929,20 mientras que un motor AC con las características requeridas cuesta \$537,60.

Aunque el motor AC es más económico, hay que añadir un variador de frecuencia, ya que es indispensable para variar su velocidad; de otra manera, se mantendría a una velocidad constante. El precio de un variador de frecuencia apto para el motor seleccionado es de \$622,80. Esto nos da un total de \$1160,40.

Sabiendo esto, todavía se prefiere adquirir el motor AC debido a la alta demanda de motores AC frente a motores DC para trabajos pesados. Además, las balanceadoras modernas también incorporan motores AC con variadores de frecuencia. Por último, el motor DC al revisar se encontró que ya se ha reparado, por lo que su vida útil puede haberse reducido mucho.

Adicional al costo del motor están los demás elementos que hay que reemplazar o que hacen falta. Estos están contemplados en la tabla 3.1 que se puede ver a continuación. Aquí se incluye también el precio del motor con su variador de frecuencia y los elementos adicionales de seguridad. Estos elementos adicionales no son prescindibles para el funcionamiento mecánico; sin embargo, se los incluye ya que estos permitirán a los estudiantes que vayan a utilizar la máquina un manejo más seguro.

Los valores en la tabla 3.1 solamente contemplan el precio máximo que supone comprar los repuestos originales. Estos valores son referenciales dado que existe la opción de comprar repuestos genéricos para las poleas y las bandas, así como también de maquinar los elementos adicionales de seguridad como el Hold Down Kit.

A esto se suma el costo del análisis de viabilidad y el salario de un técnico docente encargado de la balanceadora y de los estudiantes que se dedicarán a ensamblarla. Dentro del análisis se incluye la selección de los repuestos y el diseño de los planos. Para esto se considera el 10% del costo de restauración que se observa en la tabla 3.1.

El salario del técnico docente se lo obtuvo de la página web de la ESPOL, la cual cuenta con una sección de transparencia con los datos actualizados hasta enero 2024 donde se indica que el salario mensual de un técnico docente es de \$901,00 (ESPOL, 2024). Se estima que la duración de esta actividad será de 6 meses, lo cual corresponde a un periodo académico. Con esta información se armó entonces la tabla 3.2 donde se puede ver que el costo total que tendría la restauración es de \$16.076,44.

Tabla 3. 1*Costo de los repuestos para la restauración mecánica*

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio Total
2	Poleas Idler pulley (4"x2.38")	\$ 650,00	\$1.300,00
5	Bandas (1"x0.07")	\$ 250,00	\$1.250,00
1	Motor WEG 7.5 HP 220/440V TRIFÁSICO 3600 RPM	\$ 537,60	\$537,60
1	Variador de frecuencia WJ200-055LF Hitachi 7.5 HP, 5.5kW	\$ 622,80	\$622,80
2	Hold Down Kit	\$ 2.650,00	\$5.300,00
2	Rodamiento de seguridad 3" (5,000 lb Roller Work Support)	\$ 345,00	\$690,00
Total			\$9.700,40

Tabla 3. 2*Costo total de restauración mecánica*

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio Total
1	Restauración mecánica	\$ 9.700,40	\$ 9.700,40
1	Análisis de restauración	\$ 970,04	\$ 970,04
6	Técnico docente encargado (salario mensual)	\$ 901,00	\$ 5.406,00
Total			\$ 16.076,44

A pesar de que la balanceadora china JP modelo PHQ-3000H tiene un costo de \$30.000, esto incluye la garantía de ser un equipo nuevo y que cuenta con software y sensores actualizados para la adquisición de datos. Esto podría compensar el alto precio y los tiempos de espera por la importación; sin embargo, en el estado en que se encuentra la balanceadora B50 puede ser de utilidad para los estudiantes de ESPOL, en particular a los de ingeniería mecánica puesto que como se mencionó previamente pueden poner en práctica la teoría de la materia de Mantenimiento Industrial y ensamblar la balanceadora bajo la supervisión de un docente técnico encargado.

A esto se le suma el hecho de que una vez restaurada, la balanceadora podrá ser utilizada para otras materias como Mecánica de maquinarias, donde hay un capítulo dedicado a balanceo dinámico, en Dibujo para Ingeniería, dado que se puede aprender sobre vistas, proyecciones e inclusive podrían hacer planos de nuevas mejoras, en Taller mecánico se podría aprender a operar la máquina, en Procesos de manufactura se podrían maquinar repuestos y por último en Instrumentación se pueden seleccionar sensores para medir el desbalance. Posteriormente, podrán vincularse otras carreras como Mecatrónica para automatizar la medición del desbalance.

Como se observa, la restauración de la balanceadora B50 vincula una parte considerable de la malla curricular de la carrera de Mecánica. Si bien una balanceadora nueva tiene la garantía de que va a funcionar correctamente, toda la experiencia que aportaría la restauración de esta máquina no se podría adquirir de otra manera, limitando a los estudiantes a mantenerse únicamente con su conocimiento teórico y de ser el caso con simulaciones.

Capítulo 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Para determinar el estado de la balanceadora se utilizó el método de inspección visual a la par del desensamble de las piezas, para evaluar mediante el método Go-No Go, es decir, que si un elemento no cumple su función se lo descarta para su reemplazo. Durante la revisión se realizó una primera etapa de mantenimiento para retirar suciedad e impurezas; se realizó una prueba a los frenos que corroboraron su buen estado. Mediante una prueba de megado se identificó que el primer elemento que necesita la balanceadora para funcionar mecánicamente son un motor. Adicionalmente las poleas deben ser reemplazados debido a que se han deformado y hay una ausencia total de las bandas. Se consideraron también mejoras que pueden ser incluidas conforme avancen las etapas de restauración de la máquina. Aunque la balanceadora sea aproximadamente de los años 60s, es un modelo que aún produce la marca IRD, por lo que existe la posibilidad de adquirir los repuestos originales directamente. Con respecto al motor, se eligió cambiar el existente motor DC por uno AC por su alta oferta y asequibilidad, por lo que para variar su velocidad es necesario incluir un variador de frecuencia.
- Después de un análisis de viabilidad de la recuperación del equipo en relación con los costos de maquinación o la adquisición de elementos faltantes o deteriorados. Se ha determinado que la reparación y reemplazo de los componentes originales conlleva un costo de \$16.000. En contraste, la compra de una nueva balanceadora de origen chino, específicamente el modelo PHQ-3000H de la marca JP, ascendería a \$30.000. Esta evaluación lleva a la conclusión de que la opción más favorable sería proceder con la reparación de la máquina, considerando que se destinará para fines académicos en lugar de industriales.

- Luego de todo el análisis realizado, se identificó que las piezas restantes aún se encuentran operativas. Como la balanceadora no cuenta con un manual de ensamble, se realizó un levantamiento digital de todas las piezas. Con este modelo CAD se realizaron los planos correspondientes que servirán como guía técnica referencial. Esto facilita la optimización de tiempo, recursos y seguridad durante el proceso, puesto que este recurso es indispensable para una correcta instalación, dado que se conocerá exactamente cuáles son las piezas correspondientes a la balanceadora y cuál es su correcta ubicación.

4.2. Recomendaciones

- Para reemplazar los elementos mencionados anteriormente, se están considerando los repuestos originales ofrecidos por el fabricante. Ya que la balanceadora operará en un rango alejado de su capacidad máxima por su uso académico, se pueden usar repuestos genéricos para disminuir los precios enlistados en este documento. Con respecto al motor, se puede utilizar cualquier motor que produzca el torque necesario para girar el eje sea este DC o AC; pero se recomienda que sea uno AC porque las balanceadoras actuales usan este tipo de motores.
- Los valores mencionados están basados en la compra de repuestos nuevos y originales. El mayor gasto es el de las guardas del rotor (hold down kit), que se puede reducir considerablemente si se maquinan directamente en los talleres de FIMCP. Este elemento no afecta la funcionabilidad del sistema, pero si mejora notablemente la seguridad, por lo que su diseño e implementación podría ser fundamental en una siguiente etapa de la restauración completa de la balanceadora.
- Puesto que la balanceadora será utilizada por estudiantes de FIMCP, es recomendable que el proceso de ensamble y montaje de las piezas sea realizado por ellos, bajo la supervisión de un docente técnico encargado, dentro de las clases que son

impartidas en el CDTS, mantenimiento industrial, por ejemplo, para que puedan poner en práctica los conocimientos adquiridos en las clases teóricas.

Referencias

- AsorCAD. (02 de junio de 2023). *QUÉ ES Y PARA QUÉ SIRVE LA INGENIERÍA INVERSA*.
Obtenido de <https://www.asorcad.es/blog/que-es-y-para-que-sirve-la-ingenieria-inversa/#:~:text=La%20ingenier%C3%ADa%20inversa%20permite%20descomponer,son%20necesarias%20para%20su%20reparaci%C3%B3n>.
- Betancur, M. (2011). *INGENIERÍA INVERSA APLICADA: METODOLOGÍA Y APLICACIONES INDUSTRIALES*. Colombia: UNIVERSIDAD EAFIT.
- Ercoli, L., & Malfa, S. L. (2002). *Teoría y práctica de balanceo de Rotores Industriales*. Argentina: Librería y Editorial Alsina.
- ESPOL. (Enero de 2024). *Transparencia 2024*. Obtenido de Remuneraciones ingresos adicionales: <https://www.espol.edu.ec/es/transparencia-2024>
- Fernández, F. J. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Madrid: Fundación Confemetal.
- García, F. (2 de mayo de 2019). *El motor rotativo como extensor de rango*. Obtenido de Blog mecánicos: <https://www.blogmecanicos.com/2019/05/el-motor-rotativo-como-extensor-de-rango.html>
- García, R. G. (2017). *Reversing, Ingeniería Inversa*. España: RA-MA S.A. Editorial y Publicaciones.
- González, N., & Lira, M. (2009). *Desarrollo de Software para Balanceo Estático de Rotores*. Argentina: Universidad Nacional del Sur.
- IRD. (2023). *IRD BALANCING SPARE PARTS*. Obtenido de IRD: <https://shop.irdproducts.com/ird-balancing-spare-parts/>
- IRD Balancing Mexico. (2006). *Serie B - Modelo B50*. Mexico.

Mabie, H. H., & Ocvirk, F. W. (1996). *Mecanismos y dinámica de maquinaria*. España:

Limusa.

Shigley, J. E., & Mitchell, L. D. (1985). *Diseño en ingeniería mecánica*. Colombia: McGraw-

Hill.

Shigley, J. E., Uicker, J. J., Contín, H. C., & Castellanos, J. H. (1990). *Teoría de máquinas y*

mecanismos. España: McGraw-Hill.

Universidad de Córdoba. (2018). *Lab Virtual Riesgos Laborales*. Obtenido de

[http://www.uco.es/RiesgosLaborales/fisicoyquimico/vibraciones/photos/view/1-](http://www.uco.es/RiesgosLaborales/fisicoyquimico/vibraciones/photos/view/1-Vibrometro#:~:text=Un%20vibr%C3%B3metro%20es%20un%20equipo,vibraciones%20en%20m%C3%A1quinas%20e%20instalaciones.)

[Vibrometro#:~:text=Un%20vibr%C3%B3metro%20es%20un%20equipo,vibraciones](http://www.uco.es/RiesgosLaborales/fisicoyquimico/vibraciones/photos/view/1-Vibrometro#:~:text=Un%20vibr%C3%B3metro%20es%20un%20equipo,vibraciones%20en%20m%C3%A1quinas%20e%20instalaciones.)

[%20en%20m%C3%A1quinas%20e%20instalaciones.](http://www.uco.es/RiesgosLaborales/fisicoyquimico/vibraciones/photos/view/1-Vibrometro#:~:text=Un%20vibr%C3%B3metro%20es%20un%20equipo,vibraciones%20en%20m%C3%A1quinas%20e%20instalaciones.)

WEG. (febrero de 2020). *W22-Motor Eléctrico Monofásico-Catálogo Comercial*. Obtenido

de [https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h2b/WEG-w22-motor-electrico-](https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h2b/WEG-w22-motor-electrico-monofasico-50070884-brochure-spanish-web.pdf)

[monofasico-50070884-brochure-spanish-web.pdf](https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h2b/WEG-w22-motor-electrico-monofasico-50070884-brochure-spanish-web.pdf)

Apéndices

Apéndice A – Cálculos

Torque del motor DC 5hp 2500 RPM

$$T = \frac{P * 63000}{RPM} = 126 \text{ lb} * \text{in}$$

Potencia requerida para un motor AC 2 polos y 3600 RPM

$$P = \frac{T * RPM}{63000} = 7.2 \text{ hp}$$

Velocidad tangencial de las poleas de tensión

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1}$$

$$N_2 = 7200 \text{ RPM}$$

$$v_t = 47,84 \frac{m}{s}$$

Sumatoria de momentos

Tensión en arranque

$$\sum M = I\alpha$$

$$T_{motor} - Tr = (I_{motor} + I_{eje} + I_{polea} + I_{disco})\alpha$$

$$31,5 - Tr = (0,0197 + 0,0005375 + 0,0094 + 0,0021) * \left(\frac{368,61}{53}\right)$$

$$Tr = 31,28 \text{ Nm}$$

$$T = \frac{31,28}{0,078}$$

$$T = 401,03 \text{ N}$$

Tensión máxima

$$T_{motor} = 45 \text{ Nm}$$

$$Tr = 44,78 \text{ Nm}$$

$$T = 574,1 \text{ N}$$

Apéndice B – Planos y tablas

Tabla B. 1

Datos eléctricos de motores AC

Potencia HP	Potencia kW	Carcasa	Par nominal Tn (Nm)	Corriente con rotor trabado I _t /I _n		Par de arranque Ta/Tn	Par máximo Tm/Tn	Inercia J (kgm ²)	Tiempo máx. con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	RPM	460 V						Corriente nominal In (A)
				Letra	Ia/I _n				Caliente	Frio				% de la potencia nominal			Factor de potencia			
														Rendimiento			50			
11 polos																				
1	0,75	143/5T	2,02	L	8,2	2,8	3,4	0,0014	22	48	16,5	68,0	3480	75,0	79,0	81,5	0,63	0,74	0,80	1,44
1,5	1,1	143/5T	3,02	L	8,9	3,5	3,8	0,0020	21	46	18,5	68,0	3490	81,5	84,0	84,0	0,70	0,80	0,84	1,96
2	1,5	143/5T	4,04	L	8,9	3,5	3,8	0,0026	17	37	23,5	68,0	3475	82,5	85,5	85,5	0,71	0,80	0,86	2,56
3	2,2	182/4T	5,99	K	8,6	2,5	3,8	0,0080	41	90	40,0	69,0	3515	82,5	86,5	86,5	0,75	0,84	0,88	3,63
5	3,7	182/4T	10,0	J	7,6	2,3	3,5	0,0094	25	55	40,0	69,0	3500	86,5	88,5	88,5	0,76	0,85	0,89	5,90
7,5	5,5	213/5T	15,0	H	7,2	2,1	3,0	0,0197	27	59	63,0	72,0	3520	87,5	89,5	89,5	0,75	0,84	0,88	8,76
10	7,5	213/5T	20,0	H	7,2	2,2	2,9	0,0268	24	53	74,0	72,0	3520	89,5	90,2	90,2	0,79	0,87	0,90	11,6
15	11	254/6T	29,9	G	6,7	2,2	2,7	0,0530	25	55	107	72,0	3530	89,5	91,0	91,0	0,77	0,85	0,88	17,2
20	15	254/6T	39,9	G	6,1	2,0	2,4	0,0647	21	46	122	72,0	3520	91,0	91,7	91,0	0,82	0,87	0,89	23,2
25	18,5	284/6TS	49,7	G	6,3	2,0	2,5	0,1135	17	37	164	72,0	3535	91,0	91,7	91,7	0,82	0,87	0,89	28,5
30	22	284/6TS	59,6	G	6,3	2,0	2,5	0,1419	15	33	178	72,0	3535	91,7	91,7	91,7	0,82	0,87	0,89	33,8
40	30	324/6TS	79,0	G	6,3	2,3	2,4	0,2063	22	48	248	78,0	3555	91,7	92,4	92,4	0,82	0,87	0,89	45,8
50	37	324/6TS	98,9	F	6,2	2,2	2,3	0,2422	23	51	265	78,0	3550	93,0	93,0	93,0	0,83	0,87	0,89	56,1
60	45	364/5TS	118	G	6,6	2,0	2,6	0,4485	14	31	374	79,0	3560	91,7	93,0	93,6	0,81	0,88	0,90	67,0
75	55	364/5TS	148	G	6,7	2,0	2,6	0,5023	10	22	384	79,0	3555	92,4	93,6	93,6	0,83	0,88	0,90	81,9
100	75	404/5TS	198	G	6,5	2,0	2,4	0,5561	14	31	474	79,0	3545	93,0	94,1	94,1	0,85	0,90	0,91	110
125	90	444/5TS	246	G	6,6	2,0	2,5	1,41	29	64	725	81,0	3570	93,6	94,5	95,0	0,82	0,87	0,89	134
150	110	444/5TS	295	G	6,5	1,8	2,4	1,65	22	48	775	81,0	3570	94,1	95,0	95,0	0,83	0,88	0,89	163
200	150	445/7TS	394	G	6,5	2,1	2,3	1,88	14	31	868	81,0	3570	95,0	95,4	95,4	0,86	0,89	0,90	219
250	185	447/9TS	493	F	6,5	2,0	2,2	2,12	18	40	979	81,0	3565	95,4	95,8	95,8	0,87	0,90	0,91	266
300	220	447/9TS	590	G	6,8	2,1	2,4	2,45	14	31	1154	81,0	3570	95,4	95,8	95,8	0,86	0,89	0,90	320
350	260	586/7TS	687	G	6,6	1,6	2,3	5,75	28	62	1642	84,0	3580	95,4	96,2	96,2	0,86	0,90	0,91	373
400	300	586/7TS	785	G	6,8	1,8	2,2	5,15	48	106	1700	84,0	3580	95,8	96,2	96,2	0,88	0,90	0,91	430
450	330	586/7TS	883	F	6,6	2,0	2,3	5,58	34	75	1777	84,0	3580	95,8	96,2	96,2	0,88	0,90	0,91	473
500	370	586/7TS	981	G	6,8	2,2	2,4	6,01	39	86	1853	84,0	3580	95,8	96,2	96,2	0,88	0,90	0,91	530
550	400	588/9TS	1078	G	7,4	2,3	2,7	6,54	33	73	2000	89,0	3585	96,0	96,5	96,5	0,84	0,89	0,90	578
600	440	588/9TS	1176	H	7,4	2,3	2,7	6,54	33	73	2000	89,0	3585	96,0	96,5	96,5	0,84	0,89	0,90	650
650	480	588/9TS	1274	G	7,1	2,0	2,4	7,40	56	123	2102	89,0	3585	96,1	96,6	96,6	0,86	0,90	0,91	685
700	515,2	588/9TS*	1371	G	7,2	2,3	2,5	7,72	34	75	2179	89,0	3585	96,2	96,6	96,6	0,86	0,90	0,91	736

Nota. Tabla de datos técnicos de motores AC obtenido en un catálogo de la marca

WEG [WEG, 2020]³.

³ <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h60/h24/WEG-w22-motor-trifasico-50044029-brochure-spanish-web.pdf>

Tabla B. 2*Especificaciones del variador de frecuencia*

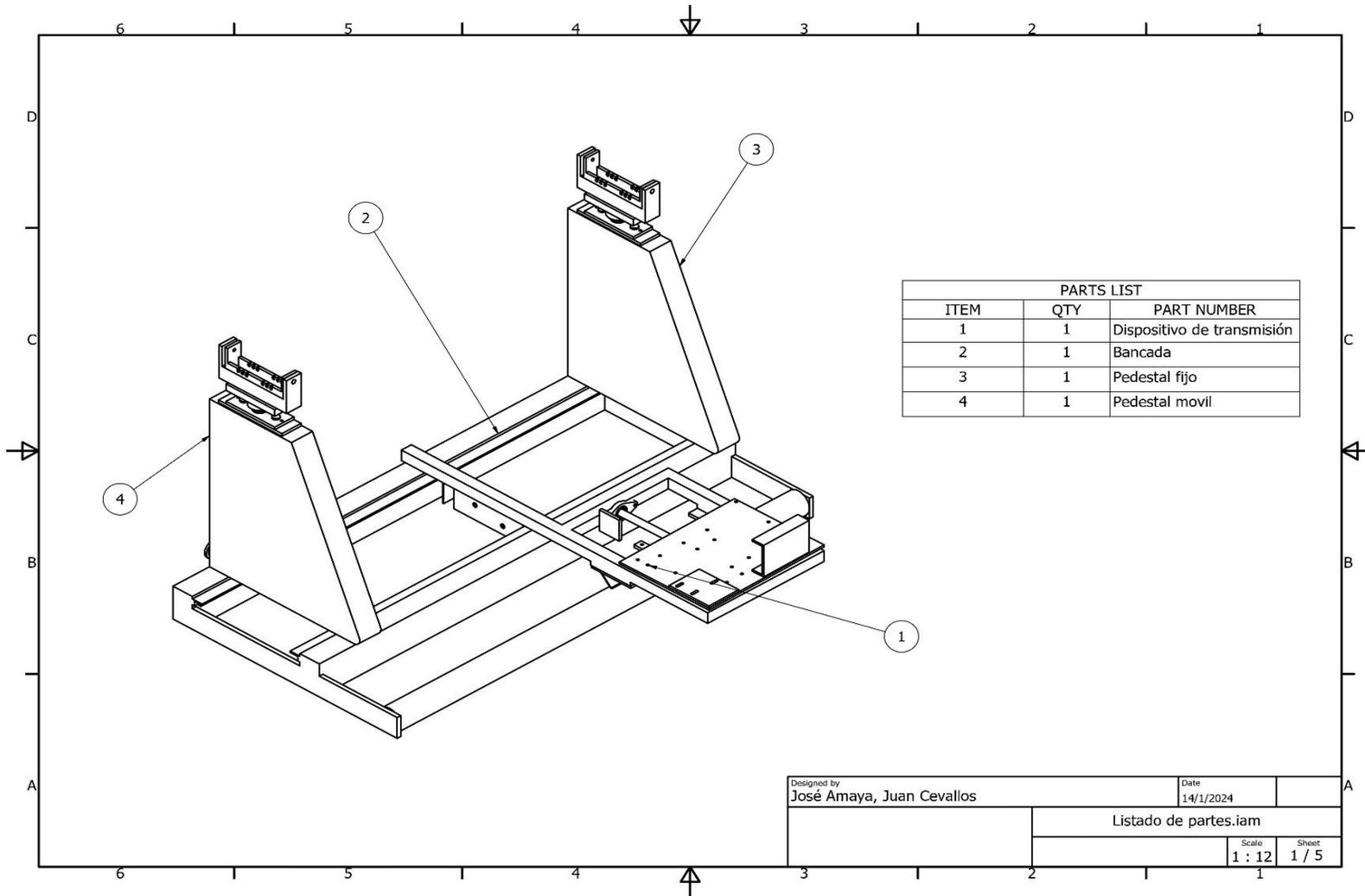
Item			Three-phase 200V class Specifications				
WJ200 inverters, 200V models			037LF	055LF	075LF	110LF	150LF
Applicable motor size	kW	VT	5.5	7.5	11	15	18.5
		CT	3.7	5.5	7.5	11	15
	HP	VT	7.5	10	15	20	25
		CT	5	7.5	10	15	20
Rated capacity (kVA)	200V	VT	6.7	10.3	13.8	19.3	20.7
		CT	6.0	8.6	11.4	16.2	20.7
	240V	VT	8.1	12.4	16.6	23.2	24.9
		CT	7.2	10.3	13.7	19.5	24.9
Rated input voltage			Three-phase: 200V-15% to 240V +10%, 50/60Hz \pm 5%				
Rated output voltage			Three-phase: 200 to 240V (proportional to input voltage)				
Rated output current (A)	VT		19.6	30.0	40.0	56.0	69.0
	CT		17.5	25.0	33.0	47.0	60.0
Starting torque			200% at 0.5Hz				
Braking	Without resistor		20%: \leq 50Hz 20%: \leq 60Hz				
	With resistor		100%	80%			
DC braking			Variable operating frequency, time, and braking force				
Weight	Kg		2.0	3.3	3.4	5.1	7.4
	lb		4.4	7.3	7.5	11.2	16.3

Nota. Catálogo de especificaciones de la marca Hitachi WJ200 series para la selección de un variador de frecuencia [Hitachi,2016]⁴.

⁴ [https://www.regal.dk/Manualer/Hitachi/Inverter/WJ200/WJ200%20Series%20-](https://www.regal.dk/Manualer/Hitachi/Inverter/WJ200/WJ200%20Series%20-%20Basic%20Manual.pdf)

PLANO 1

Listado de partes

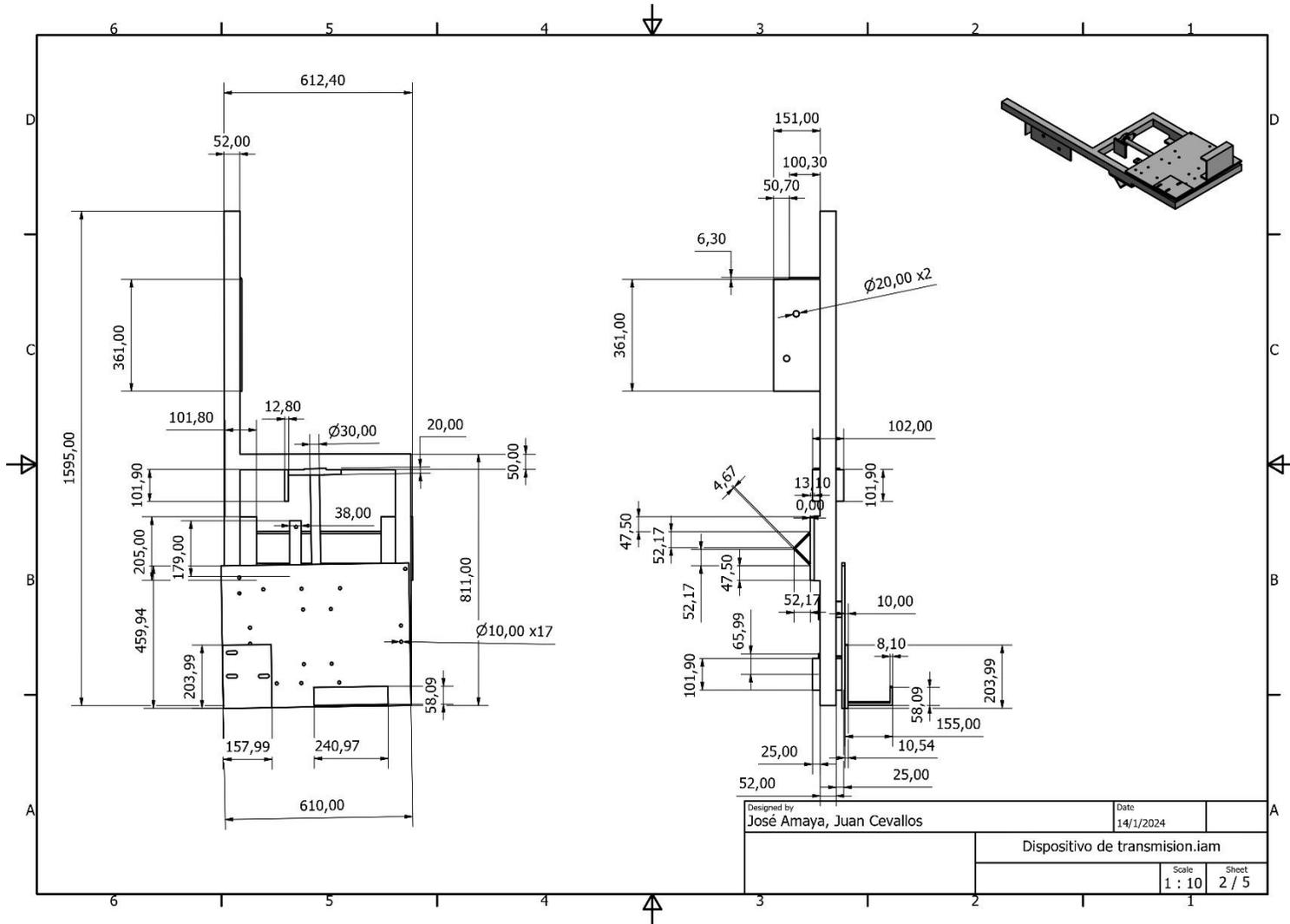


PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Dispositivo de transmisión
2	1	Bancada
3	1	Pedestal fijo
4	1	Pedestal movil

Designed by José Amaya, Juan Cevallos	Date 14/1/2024
Listado de partes.iam	
Scale 1 : 12	Sheet 1 / 5

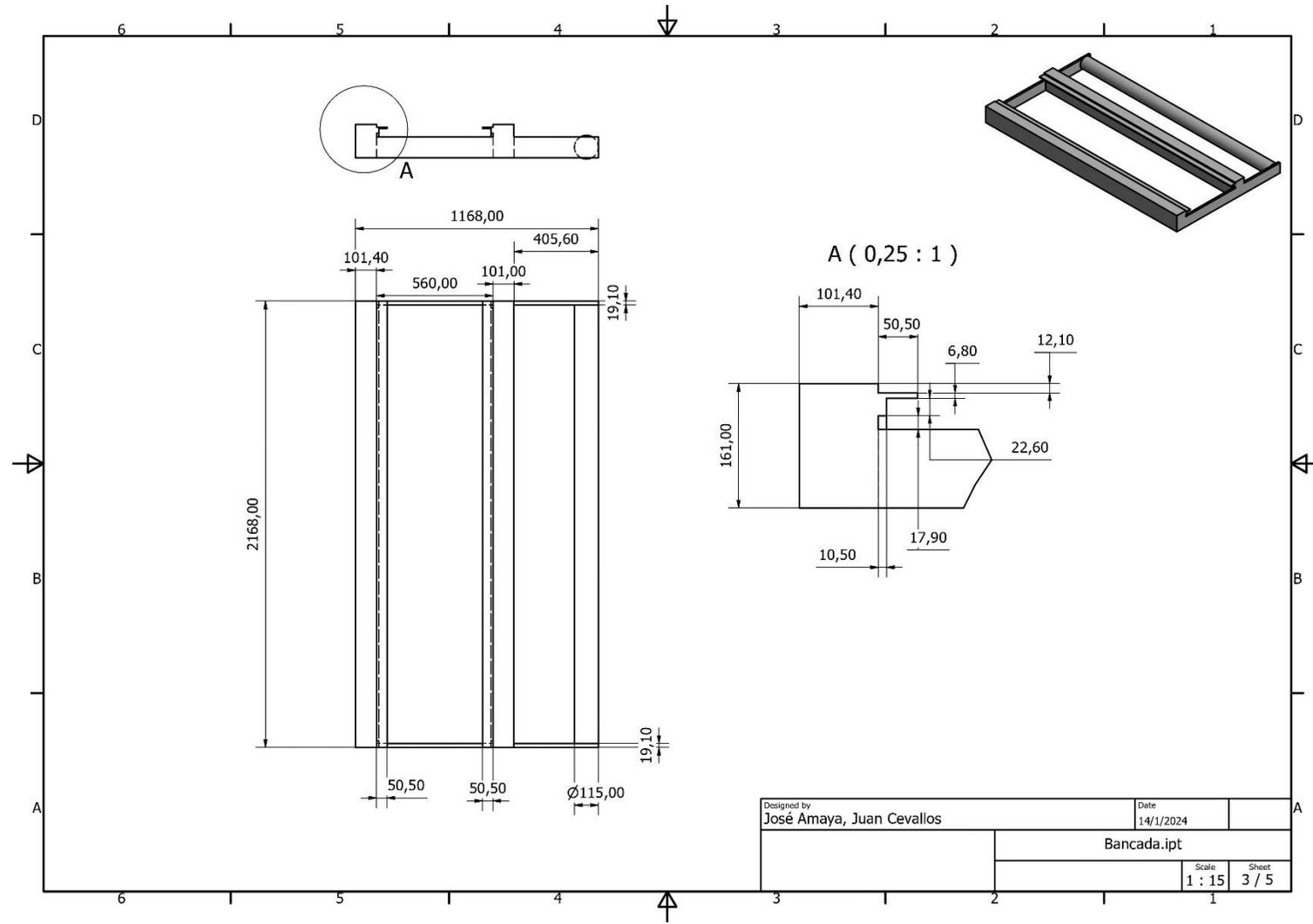
PLANO 2

Dispositivo de transmisión



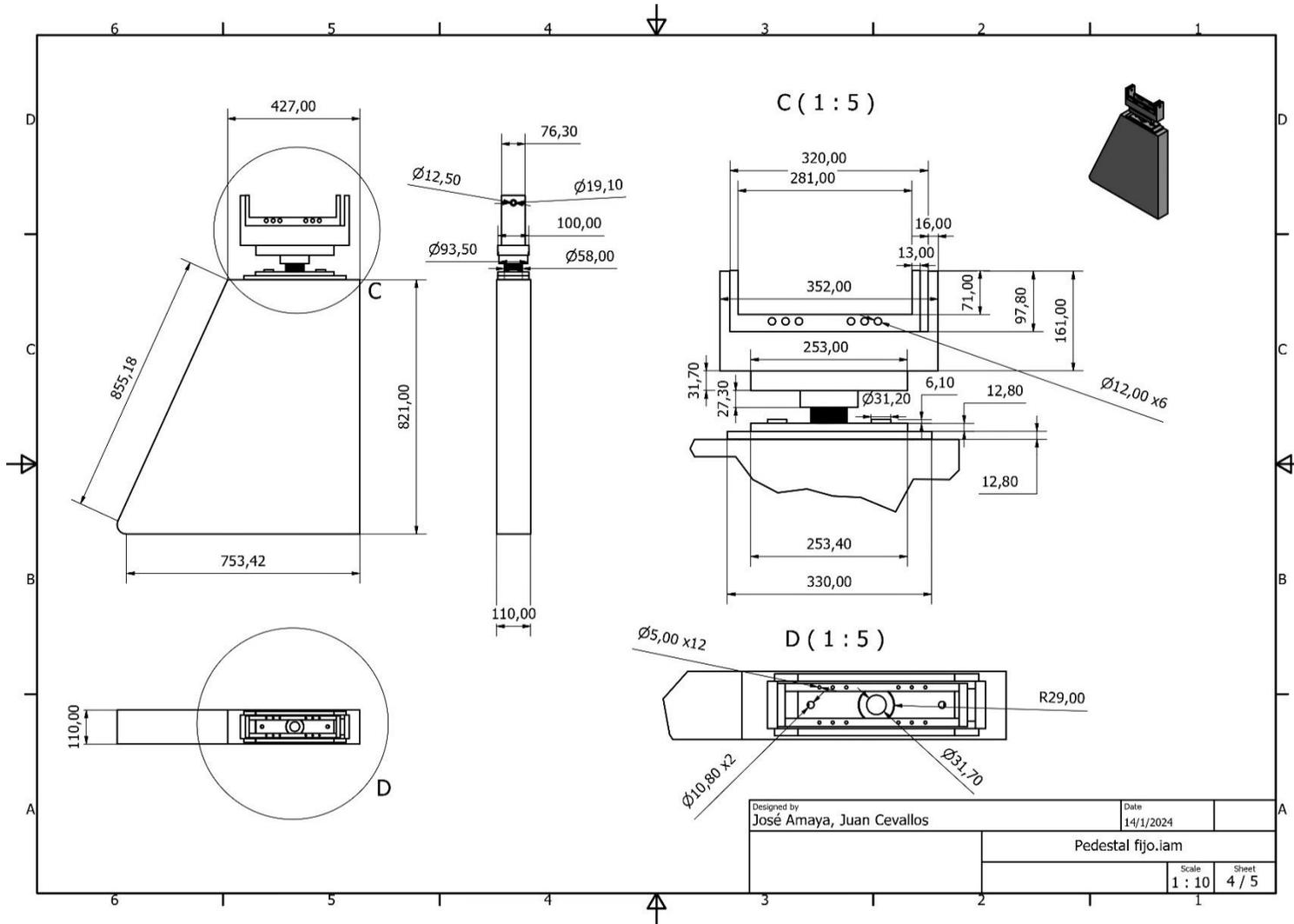
PLANO 3

Bancada



PLANO 4

Pedestal fijo



PLANO 5

Pedestal móvil

