

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Acondicionamiento de una máquina balanceadora para prácticas académicas en
laboratorio del CDTS

INGE-2794

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Francisco Eduardo Palacios Ramírez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto, con todo mi corazón, a mis padres y a mi hermana, quienes han sido mi mayor apoyo a lo largo de este camino hacia mi formación profesional. Su constante respaldo y confianza han sido fundamentales para alcanzar este logro. Espero seguir contando con su apoyo en cada paso que dé en mi vida.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a todos los profesores que, con su guía y dedicación, me acompañaron a lo largo de mi formación académica. Su invaluable conocimiento y compromiso han sido fundamentales para mi desarrollo profesional, inspirándome a alcanzar mi máximo potencial como futuro ingeniero.

Declaración Expresa

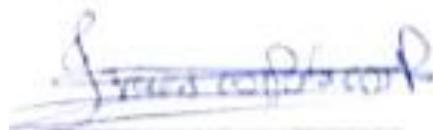
Yo/Nosotros Francisco Eduardo Palacios Ramírez acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:

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 mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es 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, 11 de Octubre del 2024.



Autor 1

Evaluadores

Doc. Emérita Alexandra Delgado Plaza

Profesor de Materia

Ing. Ernesto Rolando Martínez

Lozano

Tutor de proyecto

Resumen

El presente proyecto se centra en el acondicionamiento y puesta en marcha de una máquina balanceadora desmantelada perteneciente a la Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL). El objetivo principal es restaurar su funcionalidad para que sea utilizada como herramienta didáctica en prácticas de balanceo dinámico y estático, contribuyendo a la formación técnica de los estudiantes. La hipótesis planteada considera que el reacondicionamiento del equipo es una solución técnica y económicamente viable frente a la adquisición de una máquina nueva. Este proyecto está justificado por su alineación con el ODS 4, al promover una educación técnica de calidad y sostenible.

Para el desarrollo del proyecto, se utilizó una metodología que incluyó inspección visual, desensamble de componentes, diseño de piezas faltantes mediante software CAD y mecanización en los talleres de ESPOL. Se aplicaron normas de seguridad y mantenimiento, además de técnicas de limpieza, lubricación y pintado. Asimismo, se reemplazó el motor original por uno de capacidad misma potencia, pero capacidades diferente y se ajustó el sistema de transmisión.

Entre los resultados obtenidos destacan la restauración funcional del equipo, la elaboración de planos técnicos y la implementación de un sistema de mantenimiento preventivo. Estas acciones garantizaron la operatividad del equipo en un entorno académico.

En conclusión, el proyecto demuestra que el reacondicionamiento es una solución eficiente y sostenible para mejorar las prácticas educativas en ESPOL.

Palabras clave: Acondicionamiento, balanceadora, educación técnica, sostenibilidad.

Abstract

This project focuses on the restoration and commissioning of an inoperative balancer belonging to the Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL). The main objective is to restore its functionality so that it can be used as a teaching tool in dynamic and static balancing practices, contributing to the technical training of students. The hypothesis posited considers that the reconditioning of the equipment is a technically and economically viable solution compared to the acquisition of a new machine. This project is justified by its alignment with SDG 4, promoting quality and sustainable technical education.

For the development of the project, a methodology was used that included visual inspection, disassembly of components, design of missing parts using CAD software, and machining in ESPOL's workshops. Safety and maintenance standards were applied, along with cleaning, lubrication, and painting techniques. Additionally, the original motor was replaced with one of the same power capacity but different specifications, and the transmission system was adjusted.

Among the results obtained are the functional restoration of the equipment, the development of technical drawings, and the implementation of a preventive maintenance system. These actions ensured the operability of the equipment in an academic environment.

In conclusion, the project demonstrates that reconditioning is an efficient and sustainable solution to enhance educational practices at ESPOL.

Keywords: Conditioning, balancer, technical education, sustainability.

INDICE GENERAL

Resumen	
Abstract	
INDICE GENERAL.....	
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	
INDICE DE TABLAS	
INDICE DE PLANOS	
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del Problema	3
1.3 Justificación del Problema	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Marco teórico	6
1.5.1 Balanceo industrial	6
1.5.2 Aspectos más importantes del balanceo	6
1.5.3 Balanceadora de sistemas rotativos.....	7
1.5.4 Funcionamiento de una Balanceadora	7
1.5.4 Partes Principales de una Balanceadora.....	8
1.5.5 Especificaciones Reales de la Máquina Balanceadora	8
1.5.6 Principios de Vibración en Sistemas Rotativos	9
1.5.7 Importancia del Análisis de Vibraciones	10
1.5.8 Métodos de Control y Reducción de Vibración en Sistemas Rotativos	10
1.5.9 Tipos de Vibraciones y Sus Causas	11
1.5.9.1 Vibración Debida al Desbalance	11
1.5.9.2 Vibración por Desalineación	11

1.5.9.3 Vibración Debido a Desgaste o Juego en Componentes:.....	11
1.5.9.4 Vibración por Resonancia.....	12
1.5.10 Proceso de Balanceo y Verificación.....	12
1.5.11 Normas y Estándares de Balanceo (ISO 1940).....	12
1.5.12 Clases de Balanceo y Categorías de Calidad.....	13
1.5.13 Proceso de Restauración y Puesta en Marcha de Maquinaria Inactiva..	13
1.5.13.1 Inspección Física y Documentación del Estado Actual:.....	13
1.5.13.2 Diagnóstico de Componentes y Revisión de Sistemas:.....	13
1.5.13.3 Limpieza y Lubricación:.....	14
1.5.13.4 Reemplazo de Componentes Críticos:.....	14
1.5.13.5 Calibración de los Sistemas y Ajustes de Parámetros:.....	14
1.5.13.6 Pruebas Operativas y Validación de la Función:.....	14
.....	15
CAPITULO 2.....	15
2.1 Proceso de acondicionamiento de maquina balanceadora.....	16
2.2 Análisis preliminar del equipo.....	23
2.3 Requerimientos de diseño.....	24
2.4 Justificación de alternativas de diseño.....	30
CAPITULO #3.....	34
3.1. Resultado y Análisis.....	35
3.1.1 R resultados obtenidos tras el mantenimiento superficial de las piezas del equipo	35
3.1.2 Resultados de las alternativas para el acondicionamiento.....	37
3.1.3 Resultados del sistema de soporte de ejes en movimiento.....	38
3.1.4 Resultados del sistema eléctrico y motor del equipo.....	39
3.2. Planos de fabricación y ensamble.....	39
3.3. Análisis de los costos realizados al acondicionamiento.....	41

Capítulo 4.....	43
4.1 Conclusiones y recomendaciones	44
4.1.1 Conclusiones.....	44
4.1.2 Recomendaciones.....	44
Referencias.....	46

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Balancedora para sistemas rotativos	7
Ilustración 2	Esquema de fuerzas en el balanceo de un sistema rotativo.....	9
Ilustración 3	Diagrama de flujo para el proceso de acondicionamiento de la maquina balancedora.....	16
Ilustración 4	Estado inicial del equipo al momento de iniciar el acondicionamiento.....	23
Ilustración 5	Desarme parcial del equipo en el estado inicial del acondicionamiento.....	24
Ilustración 6	Fundición de material base para la construcción de polea de transmisión	37
Ilustración 7	Estado actual de la maquina balancedora	38
Ilustración 8	Diagrama de vista explosionada extraída de los planos del equipo.	40
Ilustración 9	Configuración y calibración del variador de frecuencia del equipo.....	47
Ilustración 10	Procedimiento de puesta en marcha del equipo	47
Ilustración 11	Especificaciones mecánicas del equipo y capacidades practicas.....	48
Ilustración 12	Registro y plan de actividades echas en el equipo.....	48
Ilustración 13	Esquema de mantenimiento predictivo y correctivo sobre el equipo.	49

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Descripción del proceso de acondicionamiento del equipo	17
Tabla 2	Demostración del estado inicial del equipo y descripción de partes del equipo	21
Tabla 3	Matriz de validación para las propuestas #1 y #2.....	26
Tabla 4	Matriz de decisión comparación de atributos propuesta #1	28
Tabla 5	Matriz de decisión comparación de atributos propuesta #2	29
Tabla 6	Piezas antes y después del mantenimiento.....	35
Tabla 7	Especificación de componentes y precios de los recursos utilizados para el acondicionamiento del equipo	41
Tabla 8	Valores de mano de obra encargada de la puesta en marcha del equipo.....	42

INDICE DE PLANOS

Plano 1 Sistema Balancín.....	50
Plano 2 Sistema de soporte.....	51
Plano 3 Sistema de transición mecánico.....	52
Plano 4 Polea de transición.....	53
Plano 5 Base de la transición.....	54
Plano 6 Agarre #1.....	55
Plano 7 Agarre #2.....	56
Plano 8 Placa de Soporte ángulo de unión.....	57
Plano 9 Llave de ajuste de eje.....	58

Capítulo 1

1.1 Introducción

El avance de la ingeniería mecánica ha sido esencial para el desarrollo de tecnologías que sostienen la industria moderna. En este contexto, el balanceo de sistemas rotativos se ha establecido como una técnica fundamental para garantizar la estabilidad, eficiencia y durabilidad de equipos como turbinas, rotores, ventiladores y motores. El desbalance en un sistema rotativo no solo genera vibraciones excesivas que reducen la vida útil de los componentes, sino que también puede derivar en fallos graves que afectan la seguridad y productividad en sectores críticos como la automotriz, la manufactura y la generación de energía.

El balanceo, tanto dinámico como estático, es una competencia técnica que requiere de conocimientos teóricos sólidos y habilidades prácticas. Los ingenieros deben ser capaces de diagnosticar problemas de desbalance, calcular correcciones y aplicar soluciones efectivas utilizando herramientas y equipos especializados. En este contexto, las máquinas balanceadoras son fundamentales, permitiendo realizar mediciones precisas y aplicar correcciones directas en sistemas rotativos. Sin embargo, estas herramientas no solo tienen aplicaciones en la industria, sino también en la educación técnica, donde su uso fortalece la formación de estudiantes en áreas como mantenimiento industrial, mecánica de maquinaria y dinámica vectorial.

En la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), la formación técnica se apoya en herramientas como la máquina balanceadora, ubicada en el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS). Este equipo, fundamental para el estudio práctico de procesos de balanceo, ha estado inoperativo por más de 20 años, limitando la capacitación de los estudiantes en áreas críticas como mantenimiento industrial, dinámica vectorial y mecánica de maquinaria.

Estudios previos han demostrado que restaurar la máquina es más económico que adquirir una nueva, con un costo estimado de \$16,000 frente a \$30,000. Además, se han propuesto mejoras como el cambio del motor DC por uno AC con variador de frecuencia, y la digitalización de componentes en CAD para optimizar su ensamblaje.

En conclusión, este proyecto busca acondicionar la máquina balanceadora para su uso académico, restaurando componentes, fabricando piezas faltantes y calibrando el equipo. Esto no solo permitirá una formación práctica de calidad, sino que también fomentará la sostenibilidad al maximizar la vida útil del equipo y reducir costos institucionales. Con ello, ESPOL reafirma su compromiso con la excelencia académica, preparando a sus estudiantes para los desafíos de la industria moderna.

1.2 Descripción del Problema

En la Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL), uno de los objetivos principales en la formación técnica es ofrecer a las estudiantes prácticas aplicadas que complementen su aprendizaje teórico, fortaleciendo su preparación para el mundo laboral, para esto la universidad cuenta con el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS), un espacio equipado con diversas herramientas y maquinarias que respaldan la enseñanza técnica de calidad.

Entre estas máquinas se encuentra la balanceadora, un equipo esencial para el estudio de ejes y rotores, que permite a los estudiantes desarrollar competencias prácticas en procesos de balanceo. Sin embargo, este equipo ha permanecido inoperativo durante aproximadamente 20 años, lo que representa una limitación significativa para la formación técnica de los futuros ingenieros. La máquina balanceadora es fundamental para ofrecer una base sólida en el análisis y corrección de desbalances en sistemas rotativos.

En un proyecto anterior sobre la misma máquina, se determinó que, a pesar de su antigüedad, el equipo es viable para su restauración y uso académico, siendo más rentable que adquirir un equipo nuevo (Amaya & Cevallos, 2023). Además, se realizaron mejoras como el cambio de motor y la digitalización de piezas en CAD para optimizar el ensamblaje y la seguridad durante su uso. Este antecedente refuerza la relevancia de restaurar la máquina balanceadora como una solución sostenible y eficiente para el fortalecimiento de las prácticas educativas en la ESPOL.

La recuperación de este equipo no solo cerraría una brecha en las prácticas académicas actuales, sino que también promovería la sostenibilidad al extender la vida útil de una máquina existente, reduciendo la necesidad de adquirir equipos nuevos y los costos asociados. Esto permite a la universidad optimizar sus recursos y demostrar un compromiso con la gestión responsable de su infraestructura, alineándose con principios de sostenibilidad y eficiencia económica.

1.3 Justificación del Problema

El acondicionamiento y puesta en marcha de la máquina balanceadora en la ESPOL es clave para fortalecer la formación técnica de los estudiantes, proporcionando una herramienta práctica para desarrollar competencias en balanceo dinámico y estático, esenciales en sectores como el automotriz, manufacturero y aeroespacial. Este equipo también tiene un impacto significativo en materias como Mantenimiento Industrial, donde facilita el análisis de vibraciones para diagnosticar y prevenir fallas en sistemas rotativos, contribuyendo a una gestión eficiente de equipos.

En Mecánica de Maquinaria, la máquina permite aplicar cálculos de ubicación y distribución de masas en componentes rotativos, integrando principios de Dinámica Vectorial, se enfoca en el cálculo preciso de la posición y magnitud del peso necesario para equilibrar

sistemas, fortaleciendo la comprensión práctica de conceptos teóricos como equilibrio y movimiento rotacional.

Además, este proyecto fomenta la sostenibilidad institucional mediante la restauración de equipos olvidados, optimizando recursos y promoviendo una cultura de mantenimiento preventivo que los estudiantes podrán replicar en su vida profesional. Con ello, la ESPOL no solo mejora la calidad de la enseñanza técnica, sino que también consolida su compromiso con la formación de ingenieros preparados para liderar soluciones innovadoras en la industria moderna.

El acondicionamiento de la máquina balanceadora, como se ha mencionado previamente, brindará a los estudiantes la oportunidad de trasladar sus conocimientos teóricos al ámbito práctico, fortaleciendo su formación técnica. Este proyecto está alineado con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 4 (ODS 4), al garantizar que los futuros profesionales de carreras de ingeniería cuenten con herramientas educativas de calidad que les permitan desarrollar las competencias necesarias para destacar en el mercado laboral competitivo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar la implementación y puesta en marcha de la máquina balanceadora, garantizando la efectividad como herramienta de aprendizaje práctico en la ESPOL.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el estado actual de la máquina balanceadora identificando los componentes que requieren mantenimiento o reemplazo.
2. Desarrollar un plan de mantenimiento mecánico integral que contemple la limpieza, lubricación y cambio de piezas dañadas de la máquina.

3. Implementar la puesta en marcha de la máquina balanceadora asegurando que su funcionamiento sea adecuado para fines didácticos.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Balanceo industrial

El balanceo de ejes es un proceso clave en la ingeniería mecánica que se enfoca en corregir la distribución de masa en elementos rotativos para disminuir las fuerzas desbalanceadas que generan vibraciones. Cuando un eje gira de manera irregular debido a una distribución de masa inadecuada, se produce un desbalance que puede llevar a vibraciones excesivas, un desgaste prematuro de los componentes y, en casos extremos, fallas mecánicas. Por ello, el balanceo dinámico es crucial para asegurar un funcionamiento eficiente y prolongar la vida útil de las máquinas.

1.5.2 Aspectos más importantes del balanceo

En el libro *Teoría y prácticas de balanceo de rotores industriales* (Ercoli & La Malfa, 2003), indica que los aspectos más importantes del balanceo son los siguientes:

Disminución de Vibraciones: Al reducir las vibraciones, se mejora la comodidad del usuario y se minimiza el riesgo de daños en los componentes mecánicos, como rodamientos y cojinetes.

Eficiencia Energética: Un sistema adecuadamente balanceado opera de manera más eficiente, lo que puede resultar en un menor consumo de energía.

Ampliación de la Vida Útil: La reducción de vibraciones y desgaste extiende la vida útil de la maquinaria, lo que significa un ahorro significativo en mantenimiento y sustitución de equipos

Seguridad en la Operación: Un balanceo apropiado reduce el riesgo de fallos catastróficos que pueden poner en peligro la seguridad del personal y la integridad de la instalación.

1.5.3 Balanceadora de sistemas rotativos

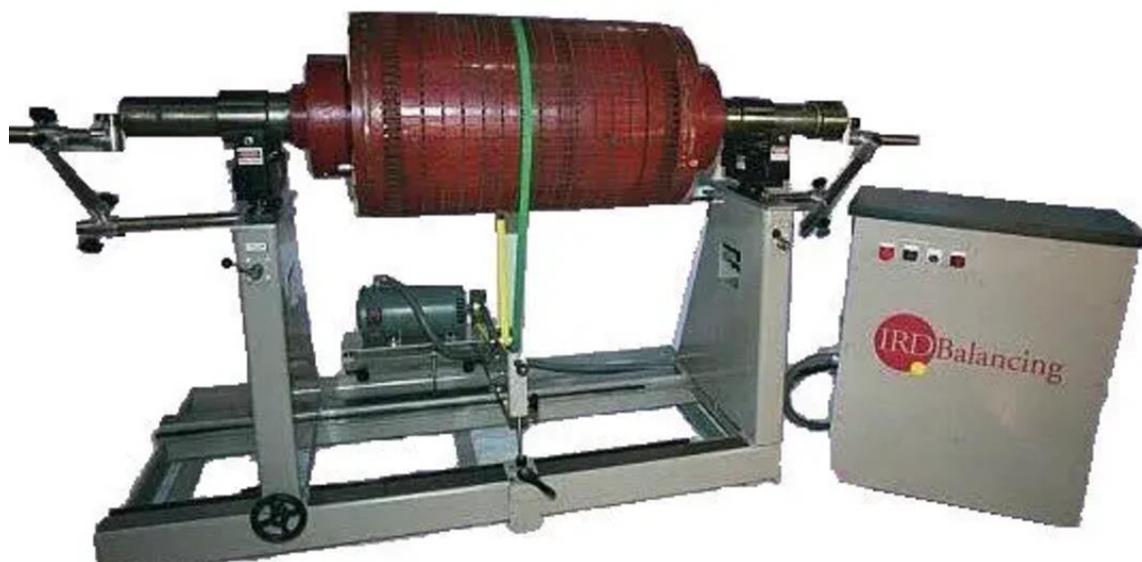
Las máquinas balanceadoras son equipos esenciales en la industria para corregir el desbalance de componentes rotativos, como ejes, rotores, y ruedas. Un desbalance puede provocar vibraciones dañinas que aceleran el desgaste de los componentes y pueden derivar en fallos mecánicos (Balancing).

1.5.4 Funcionamiento de una Balanceadora

El proceso de balanceo comienza con la colocación del rotor sobre los bancos o soportes de la máquina. Una vez en posición, se hace girar el rotor, y los sensores de vibración detectan cualquier desbalance existente. La unidad de control calcula la posición y cantidad de peso correctivo necesario. Luego, el operador realiza ajustes según las indicaciones del sistema de control, agregando o retirando pesos hasta que el rotor esté dentro de los límites de balanceo especificados por la norma ISO 1940 para su clase de calidad (ver ilustración 1).

Ilustración 1

Balanceadora para sistemas rotativos



Nota: La figura ilustra la forma de una balanceadora clase B:50 (Balancing)

1.5.4 Partes Principales de una Balanceadora

Como se ilustra en el manual de usuario para el balanceo de rotores de Schenck (GmbH, 2014), podemos dividir de forma simple a una máquina balanceadora de la siguiente forma:

Bancada o Base: Es la estructura que sostiene y estabiliza todos los componentes de la máquina balanceadora. La bancada debe ser rígida y robusta para minimizar la influencia de vibraciones externas y ofrecer una base estable para el proceso de balanceo

Rodillos de Soporte: Estos rodillos sujetan la pieza a balancear y permiten su rotación. Están diseñados para mantener el rotor en una posición precisa y asegurar un giro sin fricciones adicionales, lo cual es vital para realizar mediciones precisas de desbalance.

Sensores de Vibración o Acelerómetros: Capturan las vibraciones generadas por el desbalance de la pieza rotativa. Los datos recolectados por los sensores son esenciales para calcular la cantidad y posición de material que debe ser retirado o añadido para corregir el desbalance

Unidad de Control y Análisis: Esta unidad es el “cerebro” de la máquina balanceadora, encargada de procesar las señales de los sensores y proporcionar instrucciones sobre cómo corregir el desbalance. Generalmente, incluye una pantalla de visualización donde se muestran los datos y las recomendaciones de corrección (Schenck RoTec GmbH, s.f.).

Motor de Rotación: Es el componente que impulsa la pieza rotativa durante el proceso de balanceo. Dependiendo del tipo de balanceadora, el motor puede ofrecer velocidades ajustables para simular diferentes condiciones de operación y mejorar la precisión del balanceo.

1.5.5 Especificaciones Reales de la Máquina Balanceadora

Un ejemplo de especificaciones técnicas de una máquina balanceadora de uso industrial es la máquina que se puede encontrar en el CDTS o también nombrada B-50 (Balancing).

- Capacidad máxima de peso: Hasta 5000 lb.

- Diámetro máximo de la pieza: 1,200 mm.
- Velocidad de balanceo: Ajustable entre 100 y 2,500 RPM.
- Precisión de balanceo: Hasta 0.1 gramos - mm.
- Orientación: Horizontal.
- Tipo de accionamiento neumático.

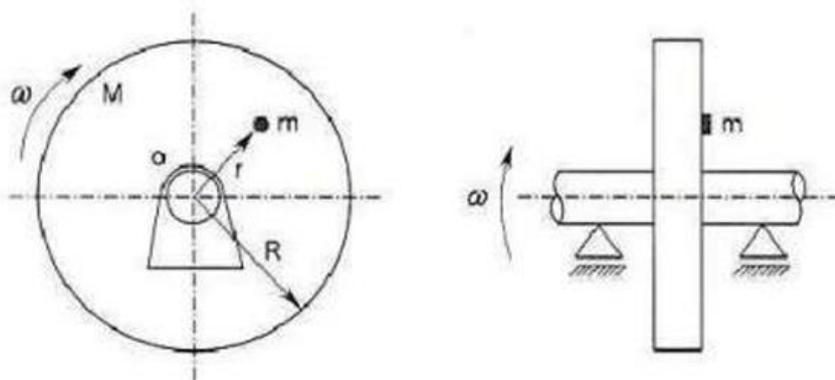
1.5.6 Principios de Vibración en Sistemas Rotativos

Los sistemas rotativos, como los ejes, motores y turbinas, están sujetos a fuerzas dinámicas que provocan vibraciones. Estas vibraciones son el resultado de desequilibrios, fricción, o irregularidades en la fabricación y montaje de los componentes. El análisis de vibraciones en sistemas rotativos es fundamental para garantizar su funcionamiento eficiente y prolongar su vida útil, ya que permite identificar y corregir problemas potenciales antes de que provoquen daños mayores o fallos en el equipo (Mobley, 2002).

Para evaluar el estado de la máquina, se considera necesario medir el nivel de desbalance. El modelo utilizado incluye un disco que gira en torno a su eje de rotación, con una masa y un radio definidos, al cual se le añade una pequeña masa en gramos ubicada a una distancia específica en milímetros desde el centro. Durante el procedimiento, el disco alcanza una velocidad angular expresada en radianes por segundo, como se muestra en la Ilustración 2 (Ercoli & La Malfa, 2003).

Ilustración 2

Esquema de fuerzas en el balanceo de un sistema rotativo



Nota: El esquema representa las fuerzas dinámicas al momento del balanceo (Ercoli & La Malfa, 2003)

Con la siguiente ecuación obtenida al igualar la fuerza centrípeta y el desplazamiento del centro de masa, se define el desbalance por unidad de masa, también conocido como desbalance específico. Este parámetro es fundamental para analizar y comparar los efectos del desbalance, ya que está directamente relacionado con la masa del rotor (Ercoli & Malfa, 2002).

$$m * \omega^2 * r = M * \omega^2 * \varepsilon \quad (1.1)$$

$$\varepsilon = m * r / M = U / M \quad (1.2)$$

1.5.7 Importancia del Análisis de Vibraciones

El análisis de vibraciones es una técnica clave de mantenimiento predictivo en sistemas rotativos, ya que permite detectar fallas en una etapa temprana y reducir el tiempo de inactividad del equipo. Este análisis ayuda a identificar patrones y frecuencias de vibración inusuales, lo que facilita el diagnóstico de problemas y la planificación de intervenciones de mantenimiento oportunas (Beebe, 2004).

1.5.8 Métodos de Control y Reducción de Vibración en Sistemas Rotativos

El control de vibraciones en sistemas rotativos implica varios métodos de monitoreo y mantenimiento (Moblely, 2002)., tales como:

Balanceo: Realizar un balance dinámico para reducir el desbalance de componentes, logrando que el eje de rotación coincida con el centro de masa del componente.

Alineación: Usar equipos de alineación láser o herramientas mecánicas para corregir desalineaciones en los ejes y acoples, reduciendo las vibraciones producidas por fuerzas desiguales.

Mantenimiento de Componentes Críticos: Reemplazar o reparar componentes desgastados, como cojinetes y sellos, para evitar vibraciones causadas por juego o desgaste excesivo.

1.5.9 Tipos de Vibraciones y Sus Causas

1.5.9.1 Vibración Debida al Desbalance

El desbalance es una de las causas más comunes de vibración en sistemas rotativos. Este ocurre cuando el centro de masa de un componente no coincide con el eje de rotación, lo que genera una fuerza centrífuga que varía con la velocidad de rotación. El desbalance puede ser causado por defectos en el montaje o en el desgaste de las piezas. Al aumentar la velocidad, la vibración causada por el desbalance se amplifica, pudiendo afectar gravemente el desempeño del equipo (Beebe, 2004).

1.5.9.2 Vibración por Desalineación

La desalineación ocurre cuando el eje de rotación de un componente no está alineado correctamente con el eje de otro componente acoplado. Esto provoca fuerzas desiguales durante la operación y vibraciones en la estructura del equipo. La desalineación puede ser angular, paralela o una combinación de ambas, y suele detectarse por el aumento de vibración a altas frecuencias (Beebe, 2004).

1.5.9.3 Vibración Debido a Desgaste o Juego en Componentes:

Componentes como cojinetes y engranajes se desgastan con el tiempo y el uso, lo que crea juego o espacios no deseados entre las piezas. Este desgaste incrementa la vibración en los sistemas rotativos y puede causar resonancias dañinas, que empeoran a medida que el equipo opera a diferentes velocidades (Beebe, 2004).

1.5.9.4 Vibración por Resonancia.

La resonancia ocurre cuando la frecuencia de vibración natural de un componente coincide con la frecuencia de operación, lo que amplifica la vibración de forma significativa. Este fenómeno puede causar daños graves a los sistemas si no se controla adecuadamente, por lo que es esencial diseñar los sistemas rotativos para evitar que sus frecuencias naturales coincidan con las frecuencias de operación habituales (NASA, 2013).

1.5.10 Proceso de Balanceo y Verificación

La norma ISO 1940 también detalla los métodos de balanceo y verificación que deben seguirse para corregir desbalances. Estos incluyen procedimientos de balanceo dinámico, en los que el rotor se ajusta en uno o dos planos de corrección. Estos métodos se realizan en equipos de balanceo especializados, como los ofrecidos por fabricantes líderes en el sector, como Schenck y Hofmann, quienes han desarrollado manuales que integran los requisitos de ISO 1940 para guiar a los ingenieros en la implementación de estas prácticas (ISO, 2003).

1.5.11 Normas y Estándares de Balanceo (ISO 1940)

La norma ISO 1940-1:2003 establece los requisitos de calidad de balanceo para rotores en un estado constante o rígido, definiendo los límites de desbalance permisibles para diversos tipos de maquinaria rotativa. Este estándar es ampliamente utilizado en la industria para asegurar que los sistemas rotativos operen sin generar vibraciones excesivas, lo que minimiza el desgaste de componentes y reduce el riesgo de fallos prematuros. En particular, la norma ISO 1940 clasifica los rotores en distintas categorías de calidad de balanceo, asignándoles una clase que define el nivel de tolerancia de desbalance permitido según el tipo de rotor y su aplicación específica (ISO, 2003)

1.5.12 Clases de Balanceo y Categorías de Calidad

Las clases de balanceo definidas en ISO 1940 abarcan desde la G0.4 para rotores de alta precisión, como los de turbinas, hasta la G4000, adecuada para maquinaria pesada y menos sensible a vibraciones, como trituradoras y molinos. Cada clase de calidad representa un límite máximo de desbalance específico, medido en términos de masa residual y velocidad de operación. Por ejemplo, la clase **G2.5** es común para motores eléctricos y ventiladores, mientras que **G6.3** se aplica a equipos de uso industrial general, como bombas y compresores (ISO, 2003).

1.5.13 Proceso de Restauración y Puesta en Marcha de Maquinaria Inactiva

Realizar el mantenimiento de una máquina que ha estado fuera de operación durante un período prolongado requiere un proceso exhaustivo para identificar posibles daños por desuso y asegurar que esté en condiciones óptimas para volver a funcionar (Campbell & Jardine, 2011). Los pasos fundamentales son los siguientes:

1.5.13.1 Inspección Física y Documentación del Estado Actual:

Antes de cualquier intervención, es importante hacer una inspección visual y detallada del equipo, verificando el estado de las piezas y componentes, como rodamientos, correas, motores, y sistemas eléctricos. Documenta el estado inicial del equipo y registra cualquier signo de corrosión, deterioro, desgaste o daño mecánico, lo cual servirá como base para identificar las áreas que requieren atención prioritaria (Campbell & Jardine, 2011)

1.5.13.2 Diagnóstico de Componentes y Revisión de Sistemas:

Realiza pruebas de diagnóstico en componentes críticos, especialmente en sistemas de transmisión, lubricación, y controles electrónicos si el equipo los posee. Se recomienda realizar análisis de vibración y alineación, así como medir la resistencia y continuidad en los circuitos

eléctricos, asegurando que no existan problemas internos debido a la inactividad prolongada (Campbell & Jardine, 2011)

1.5.13.3 Limpieza y Lubricación:

Una limpieza exhaustiva es esencial para eliminar acumulaciones de polvo, óxido, grasa o residuos, y puede ser necesario desmontar algunas partes para limpiar áreas de difícil acceso. La lubricación es clave para el funcionamiento sin fricción de las partes móviles, por lo que se deben usar los lubricantes especificados por el fabricante, considerando que algunos componentes requieren propiedades específicas (Campbell & Jardine, 2011).

1.5.13.4 Reemplazo de Componentes Críticos:

Cambiar componentes dañados, desgastados o caducados, como sellos, empaques, correas o cables, ya que componentes de goma y plástico suelen deteriorarse rápidamente con el tiempo. Además, se recomienda sustituir aceites y fluidos que pueden haber perdido sus propiedades de viscosidad y protección debido al desuso (Mobley, 2002).

1.5.13.5 Calibración de los Sistemas y Ajustes de Parámetros:

Realizar la calibración de sensores, controles y mecanismos de la máquina para asegurar precisión en las mediciones y operaciones. Los ajustes de parámetros deben realizarse conforme a los valores recomendados por el fabricante o los requisitos específicos de la aplicación (NASA, 2013).

1.5.13.6 Pruebas Operativas y Validación de la Función:

Antes del uso regular, realizar pruebas de funcionamiento a baja velocidad o carga para verificar que todos los sistemas trabajen sin problemas. Monitorea el equipo para detectar vibraciones, ruidos anormales, o aumentos de temperatura en los componentes. Una vez confirmada la estabilidad del sistema, se podrá realizar pruebas a velocidad y carga normal para validar el desempeño completo del equipo (Balancing).

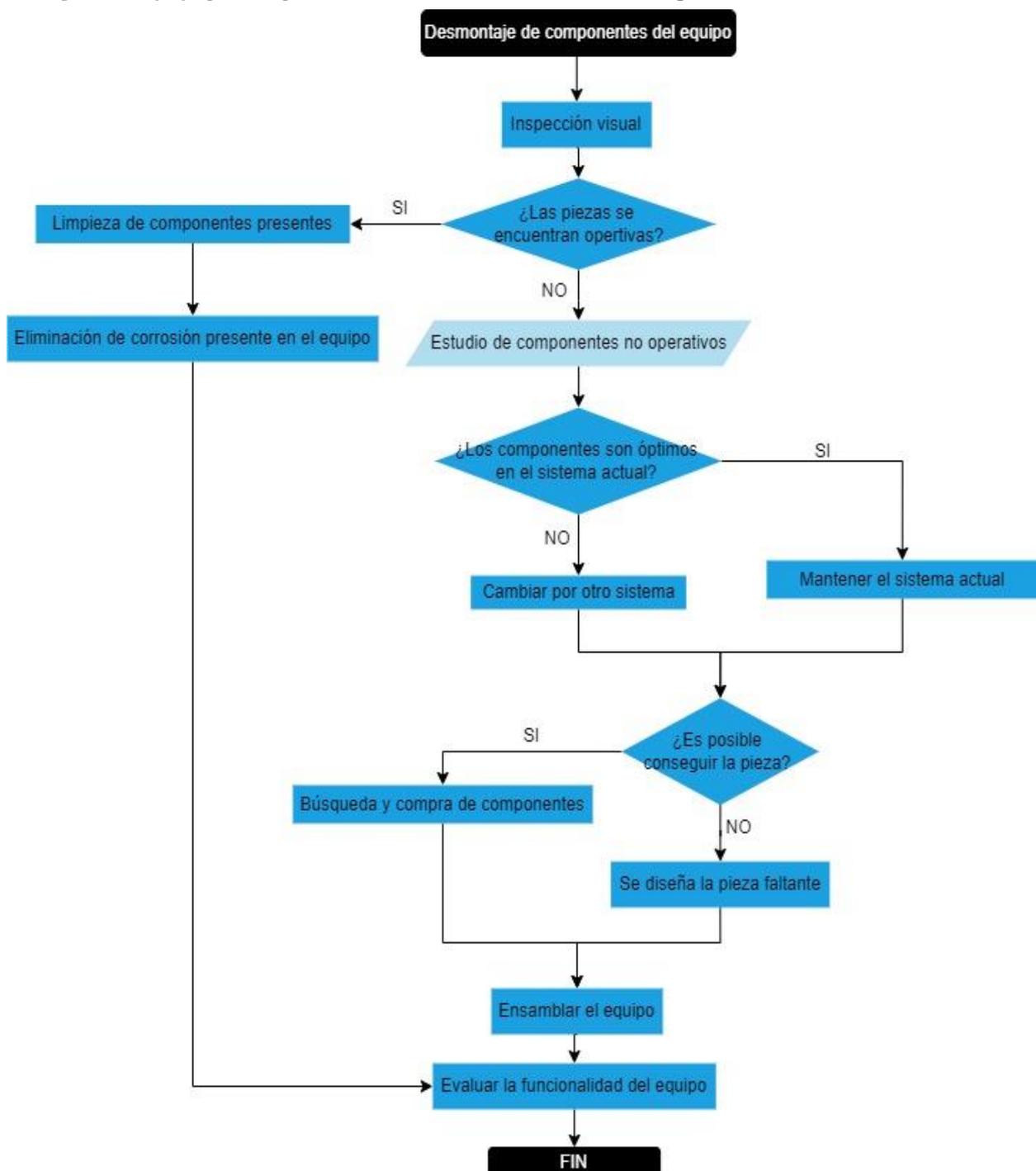
CAPITULO 2

2.1 Proceso de acondicionamiento de maquina balanceadora

El siguiente diagrama de flujo ilustra el procedimiento que se llevará a cabo para el acondicionamiento de la máquina balanceadora. Este esquema proporciona una representación clara de cada etapa del proceso, desde la inspección inicial y el diagnóstico del estado del equipo, hasta las actividades de mantenimiento, reemplazo de componentes, y las pruebas finales para garantizar su correcto funcionamiento.

Ilustración 3

Diagrama de flujo para el proceso de acondicionamiento de la maquina balanceadora.



La siguiente tabla se presenta de manera clara y organizada las distintas fases involucradas en el proceso de restauración de la máquina balanceadora. En ella se detallan aspectos fundamentales como los tiempos estimados para cada etapa, las metodologías empleadas, y las actividades específicas a realizar. Este formato permite visualizar de manera simplificada y comprensible el alcance y desarrollo del proyecto, facilitando su explicación y seguimiento.

Tabla 1

Descripción del proceso de acondicionamiento del equipo

No.	Operación	Partes	Tiempo para la operación [h]	Método para realizar la operación	Justificación de la operación	Herramientas o metodología usada	Validación
1	Verificación del estado actual	Todo el equipo	4 horas	Inspeccionar la máquina para detectar daños, piezas faltantes o desgaste en los componentes.	Es crucial para planificar restauraciones y garantizar funcionalidad futura.	Calibradores, multímetros y herramientas básicas de inspección.	Pruebas funcionales aseguran que el equipo opere según los estándares requeridos.
2	Estudio de componentes faltantes o dañados del equipo	Sistema neumático Estabilización axial Sistema de frenado Sistema de poleas y banda Sistema eléctrico del motor y motor	6 horas	Inspeccionar las piezas y se comparan con un modelo operativo para identificar elementos ausentes o en mal estado.	Permite planificar restauraciones y garantizar la funcionalidad del equipo tras su acondicionamiento.	Calibradores, herramientas de medición, manual técnico y modelos de referencia.	Se verifica mediante pruebas funcionales tras reponer o reparar los componentes identificados.

3	Desmontaje de componentes	Motor Bases frontales Pedestal Rodillos Bancada Dispositivo de transmisión por correa	6 horas	Utilizar un procedimiento secuencial documentado, empleando herramientas específicas para el diseño	Es necesario para identificar daños internos, realizar limpieza profunda y preparar las piezas para el reacondicionamiento.	Llaves mecánicas, destornilladores, extractores xxxxx.	Se asegura que todas las piezas sean desmontadas sin daños adicionales y organizadas para su posterior reinstalación.
4	Limpieza	Pedestal Rodillos Bancada Bases frontales Sistema de desplazamiento axial	2 horas	Utilizar desengrasante, cepillos y agentes químicos específicos, aplicados según el material de cada componente.	Elimina contaminantes que pueden afectar el funcionamiento y prolonga la vida útil del equipo.	Cepillos, paños, desengrasantes, productos anticorrosivos y equipo de protección personal.	Se revisa visualmente cada pieza para asegurar que no queden residuos ni corrosión antes del ensamblaje.
5	Eliminación de la corrosión superficial	Pedestal Bancada Bases frontales Sistema de desplazamiento axial	3.5 horas	Utilizar lijado mecánico, chorro de arena o productos químicos desoxidantes, dependiendo del nivel de corrosión presente.	La corrosión puede debilitar los componentes, comprometer el funcionamiento y afectar la durabilidad del equipo.	Lijas, herramientas de chorro de arena, desoxidantes químicos y equipo de protección personal.	Inspección visual para confirmar que las superficies estén limpias y sin restos de corrosión.
6	Aplicación de antioxidantes	Pedestal Bancada Bases frontales Sistema de desplazamiento axial	2 horas	Utilizar un pincel, rodillo o pulverizador para aplicar uniformemente el antioxidante sobre las áreas tratadas y limpias.	Previene la oxidación futura en componentes metálicos expuestos, asegurando su durabilidad y buen estado.	Pinceles, rodillos, pulverizadores y productos antioxidantes específicos para el material.	Pinceles, rodillos, pulverizadores y productos antioxidantes específicos para el material.

7	Tratamiento superficial de pintura	Pedestal Bancada Bases frontales Sistema de desplazamiento axial	4 horas	Aplicar una capa uniforme de pintura utilizando un pincel, rodillo o pistola pulverizadora. Se puede aplicar varias capas dependiendo de las especificaciones del producto.	La pintura proporciona una barrera protectora contra la oxidación y el desgaste, y también mejora la estética del equipo. Además, ayuda a reducir el impacto de factores ambientales que podrían dañar los componentes metálicos.	Pistolas de pintura, rodillos, pinceles, productos de preparación de superficie (como desengrasantes y lijas) y pintura adecuada para el tipo de material a tratar.	Se inspecciona la aplicación de la pintura para asegurar que esté bien distribuida, sin burbujas, manchas ni áreas no cubiertas. También se revisa la adherencia y el grosor adecuado de la
8	Ensamble de componentes	Motor Bases frontales Pedestal Rodillos Bancada Dispositivo de transmisión por correa	5 horas	Seguir los procedimientos secuenciales especificados en el manual de ensamble, asegurando la correcta colocación de cada componente y su fijación mediante los elementos de sujeción apropiados.	El ensamblaje es esencial para garantizar que todas las partes del equipo estén unidas correctamente, permitiendo su funcionamiento adecuado.	Herramientas manuales y eléctricas (destornilladores, llaves, etc.), dispositivos de medición (calibradores y medidores de alineación), y equipo de protección	La validación se realiza mediante una inspección visual para confirmar que todas las piezas estén correctamente ensambladas y fijadas. También se llevan a cabo pruebas operativas para verificar que el equipo funcione correctamente después del ensamblaje.
9	Gestión para adquisición de elementos faltantes	Sistema de poleas Motor Rodamientos desgastados Mangueras para el sistema neumático	72 horas	Identificación de las piezas necesarias, solicitud de cotizaciones y compra a proveedores.	Es crucial para completar el acondicionamiento del equipo, asegurando que funcione correctamente.	Software de gestión, plataformas de proveedores y equipos de medición para validar las piezas.	Verificación de que las piezas adquiridas cumplen con las especificaciones y están en buen estado.

10	Diseño de diseño de piezas faltantes	Sistema de frenado Sistema de soporte transversal	12 horas	Identificar las piezas faltantes, se deben diseñar de acuerdo con las especificaciones técnicas y se generan los planos necesarios para su fabricación.	Es necesario diseñar y fabricar las piezas faltantes para asegurar que el equipo funcione correctamente y cumpla con los estándares técnicos requeridos.	Software de diseño asistido por computadora (CAD), máquinas de mecanizado, y herramientas de medición para verificar la precisión de las piezas fabricadas.	Se valida asegurando que las piezas diseñadas encajen correctamente en el equipo y funcionen como se espera mediante pruebas de ensamblaje.
11	Ensamble de las nuevas piezas	Sistema de frenado Sistema de soporte transversal Sistema de poleas Motor Rodamientos desgastados Mangueras para el sistema neumático	6 horas	Las nuevas piezas se ensamblan de acuerdo con las especificaciones del diseño, siguiendo un proceso secuencial de montaje, asegurando la correcta alineación y fijación de cada componente.	El ensamblaje de las nuevas piezas es necesario para completar la restauración del equipo y asegurar que funcione de manera eficiente y segura.	Herramientas de ensamblaje (destornilladores, llaves), equipos de alineación (calibradores y medidores), y dispositivos de prueba para verificar el funcionamiento del equipo.	Se valida mediante inspección visual y pruebas de funcionamiento para garantizar que las piezas encajen correctamente y el equipo opere según los estándares establecidos.

Tabla 2*Demostración del estado inicial del equipo y descripción de partes del equipo*

Parte del equipo	Ilustración de la pieza
Bancada	
Pedestales	
Sistema de soporte con rodamiento	

Brazos Axiales



Sistema balancín



Transmisión



Poleas



Motor



2.2 Análisis preliminar del equipo

Durante el desarme parcial del equipo y mediante una inspección visual detallada, se pudo constatar el deterioro significativo ocasionado por el paso del tiempo y la exposición a condiciones adversas mismas que se pueden visualizar en la ilustración 4 y 5. Este análisis permitió identificar tanto la ausencia como el daño de componentes clave, afectados por corrosión, desgaste y acumulación de suciedad.

Entre las principales observaciones se destaca la falta de elementos esenciales del sistema neumático, los cuales son fundamentales para su correcto funcionamiento. Además, se evidenció un deterioro considerable en las partes restantes de dicho sistema, lo que confirma la necesidad de una revisión y restauración exhaustiva.

Asimismo, se identificó la ausencia de rodamientos críticos necesarios para el correcto funcionamiento de la máquina balanceadora, así como daños en el sistema de anclaje del equipo, lo que compromete su estabilidad y operatividad. Estos hallazgos subrayan la importancia de realizar una intervención integral para garantizar la restauración completa y funcional del equipo.

Ilustración 4

Estado inicial del equipo al momento de iniciar el acondicionamiento



Ilustración 5

Desarme parcial del equipo en el estado inicial del acondicionamiento



2.3 Requerimientos de diseño

Durante el proceso de desarme y limpieza de la máquina balanceadora, se identificaron problemas significativos relacionados con las piezas faltantes y deterioradas, lo que requirió evaluar alternativas para garantizar la funcionalidad del equipo. Uno de los aspectos más críticos encontrados fue el sistema de transmisión de potencia, originalmente diseñado con un mecanismo de activación neumática.

Con el paso del tiempo, varias piezas de este sistema se han perdido o han sufrido daños irreparables debido a la exposición a factores ambientales y la falta de mantenimiento. Esta situación ha resultado en la ausencia de componentes clave para la operatividad del sistema neumático, lo que compromete su restauración en su configuración original.

Dado este contexto, se plantea la necesidad de tomar una decisión entre dos posibles soluciones: *Propuesta #1*- conservar y restaurar el sistema neumático actual; o *Propuesta #2* -reemplazar el sistema neumático por uno mecánico. Esta evaluación será realizada considerando factores como viabilidad técnica, costos asociados y los requerimientos funcionales específicos para garantizar que la solución seleccionada sea la más adecuada para cumplir con los objetivos del proyecto.

Para determinar la viabilidad de implementar un cambio en el sistema de transmisión, se llevará a cabo una evaluación exhaustiva basada en criterios esenciales que el equipo debe cumplir, independientemente de si se mantiene el sistema original o se realiza la modificación. Esta evaluación preliminar permitirá identificar si las condiciones requeridas son alcanzadas en su mayoría (ver tabla 2), lo que serviría como base para proceder con un análisis comparativo más detallado entre las dos alternativas.

Entre los aspectos clave que se analizarán se incluyen:

- *Capacidad de tensado*: Verificar que el sistema realice un correcto tensado de la banda, garantizando su funcionalidad.
- *Transmisión eficiente del movimiento*: Confirmar que la banda transmite el movimiento de manera adecuada y sin pérdidas significativas.
- *Integridad de las piezas*: Asegurar que todas las piezas necesarias para el sistema estén presentes y en condiciones óptimas de operación.
- *Compatibilidad estructural*: Validar que el sistema soporte de manera segura el motor instalado.
- *Control del frenado*: Comprobar que el sistema sea capaz de frenar el movimiento del motor de forma efectiva.

- *Utilidad didáctica:* Garantizar que el equipo cumpla con su función como herramienta educativa, permitiendo a los estudiantes comprender los principios del balanceo y la transmisión de potencia.
- *Movilidad operativa:* Verificar que el equipo se desplace libremente sobre la bancada, asegurando su facilidad de operación y ajustes durante las prácticas.

Tabla 3

Matriz de validación para las propuestas #1 y #2

<i>Análisis de equipo</i>	<i>Situación actual</i>	<i>Propuesta #1</i>	<i>Propuesta #2</i>
El equipo hace un correcto temple de la banda	χ	✓	✓
El equipo transmite el movimiento de la banda correctamente	χ	✓	✓
Se encuentran las piezas completas	χ	χ	χ
El sistema soporta el motor	χ	✓	✓
El equipó permite frenar el movimiento del motor	χ	✓	χ
Funciona como material didactico para los estudiantes	χ	✓	✓
Se desplaza libremente a traves de la bancada	χ	✓	✓

Al comparar los resultados obtenidos de la matriz inicial, se concluye que ambas opciones presentan viabilidad técnica. Sin embargo, para realizar un análisis más profundo y preciso, es necesario evaluar cada alternativa bajo criterios más específicos e indispensables que deben cumplir los componentes del sistema.

En esta instancia, se asignará un peso o valor a cada uno de los atributos clave, utilizando una escala del 1 al 5, donde el valor mínimo representará una menor factibilidad en el criterio evaluado. Este enfoque, que se detalla en las tablas 3 y 4, permitirá cuantificar de manera precisa

la relevancia de cada criterio en relación con los objetivos establecidos para el proyecto. La alternativa que obtenga el mayor puntaje después de la evaluación en la matriz de decisión será considerada como la opción óptima para implementar. Los criterios evaluados incluirán los siguientes aspectos esenciales:

- *Temple de la banda:* Capacidad del sistema para tensar adecuadamente la banda y garantizar la funcionalidad.
- *Transferencia de movimiento:* Eficiencia en la transmisión del movimiento de la banda al eje del sistema.
- *Desplazamiento en la bancada:* Facilidad para mover el equipo en su estructura de soporte.
- *Ensamble:* Compatibilidad y facilidad de montaje de los componentes del sistema.
- *Operatividad:* Funcionamiento general del sistema en condiciones reales de uso.
- *Facilidad didáctica:* Capacidad del equipo para ser utilizado como herramienta educativa en entornos académicos.
- *Instalación del motor:* Viabilidad de integrar el motor de manera segura y eficiente en el sistema.
- *Seguridad:* Cumplimiento de estándares de seguridad para garantizar un uso confiable.
- *Facilidad de mantenimiento:* Sencillez para realizar ajustes, reparaciones o sustituciones de piezas cuando sea necesario.
- *Precio:* Análisis del costo asociado a la implementación de cada alternativa, considerando su impacto en el presupuesto del proyecto.
- *Durabilidad:* Evalúa cuánto tiempo puede mantenerse operativo el sistema antes de requerir reemplazos o reparaciones significativas.
- *Eficiencia energética:* Analiza si el sistema seleccionado optimiza el consumo de energía, especialmente si se planea utilizarlo frecuentemente.

- *Compatibilidad técnica:* Asegúrate de que el sistema sea completamente compatible con el resto de los componentes de la máquina balanceadora.
- *Tiempo de implementación:* Considera cuánto tiempo tomará implementar y calibrar el sistema seleccionado, especialmente si hay limitaciones de tiempo en el proyecto.

Tabla 4

Matriz de decisión comparación de atributos propuesta #1

Criterios	<i>Extremadamente fácil</i>	<i>Fácil</i>	<i>Medio</i>	<i>Difícil</i>	<i>Extremadamente difícil</i>	Total
Propuesta #1	5	4	3	2	1	
<i>Temple de la banda</i>	χ					5
<i>Transferencia de movimiento</i>	χ					5
<i>Desplazamiento en la bancada</i>	χ					5
<i>Ensamble</i>				χ		2
<i>Operatividad</i>		χ				4
<i>Facilidad didáctica</i>			χ			3
<i>Instalación del motor</i>				χ		2
<i>Seguridad</i>			χ			3
<i>Facilidad de mantenimiento</i>					χ	1
<i>Precio</i>				χ		2
<i>Durabilidad</i>			χ			3
<i>Eficiencia energética</i>					χ	1
<i>Compatibilidad técnica:</i>	χ					5
<i>Tiempo de implementación</i>					χ	1
						Total
						42

2.4 Justificación de alternativas de diseño

A través del análisis de las piezas existentes en la máquina balanceadora, se determinó realizar varias modificaciones clave para garantizar su operatividad en un entorno académico. Se decidió reemplazar el motor DC de 5 HP por uno de capacidad similar de 5HP pero a menor revolución de 1715 RPM, clara mente esto implicaría un cambio en el torque final aplicable al momento de utilizar el equipo, misma que podemos visualizar en las siguientes ecuaciones.

Torque Original del equipo

$$T = \frac{P * 7121}{N} = \frac{5 * 7121}{2500} = 14.242[N * m] \quad (2,1)$$

Nuevo torque dado en el remplazo del motor

$$T = \frac{P * 7121}{N} = \frac{3 * 7121}{1715} = 20.77[N * m] \quad (2.2)$$

Cálculo de los nuevos parámetros de operatividad del equipo. Para esto usaremos como punto de partida la inercia presente en un cilindro dado que para que el motor pueda girar cualquier eje se debe superar esta inercia.

$$I = \frac{M * R^2}{2} \quad (2,3)$$

Donde

- I: Inercia del rotor (kg·m²).
- M: Masa del rotor (kg).
- R: Radio del rotor (m).

Pero también se podría calcular la inercia con ayuda del torque (T) y la aceleración angular (α) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$T = I \cdot \alpha$$

(2,4)

Una vez calculado el torque de equipo calculamos la inercia máxima del equipo con el nuevo motor (para esto asumimos una inercia de 5 rad/s²).

$$I_{\text{nuevo}} = \frac{T_{\text{nuevo}}}{\alpha} = \frac{20.77}{5} = 4.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

(2,5)

A comparación de la inercia máxima del equipo original:

$$I_{\text{original}} = \frac{T_{\text{nuevo}}}{\alpha} = \frac{20.77}{5} = 2.848 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

(2,6)

Ahora igualando las capacidades originales con las nuevas:

$$I_{\text{original}} = \frac{1}{2} m_{\text{máx}} r_{\text{máx}}^2$$

(2,7)

$$I_{\text{nueva}} = \frac{1}{2} m_{\text{máx}} r_{\text{máx}}^2$$

(2,8)

Despejando:

$$m_{\text{máx}} r_{\text{máx}}^2 = 2 \times I_{\text{original}}$$

(2,9)

$$m_{\text{nuevo}} r_{\text{nuevo}}^2 = 2 \times I_{\text{nuevo}}$$

(2,10)

Relacionando ambas ecuaciones

$$\frac{m_{\text{nuevo}} r_{\text{nuevo}}^2}{m_{\text{máx}} r_{\text{máx}}^2} = \frac{I_{\text{nuevo}}}{I_{\text{original}}}$$

(2,11)

$$\frac{m_{\text{nuevo}} r_{\text{nuevo}}^2}{m_{\text{máx}} r_{\text{máx}}^2} = \frac{4.15}{2.848} = 2.848$$

(2,12)

Peso máximo del rotor

$$m_{\text{nuevo}} = 2300 \times 1.457 = 3341 \text{ kg}$$

(2,13)

Diámetro máximo del rotor

$$r_{\text{nuevo}} = r_{\text{máx}} \times \sqrt{1.457}$$

(2,14)

$$r_{\text{máx}} = \frac{2380}{2} = 1190 \text{ mm} = 1.19 \text{ m}$$

(2,15)

$$r_{\text{nuevo}} = 1.19 \times \sqrt{1.457} = 1.19 \text{ m} \equiv 1190 \text{ mm}$$

(2,16)

Resumiendo, las nuevas especificaciones del equipo con motor de 5 HP a 1715 RPM:

Torque máximo: 20.77

Inercia máxima permitida: 4.15 kg-m²

Peso máximo del Rotor: 3340 kg (antes 2300 kg)

Diámetro Máximo del Rotor: 1440 mm (antes 1190 mm)

Longitud Máxima del Rotor: 2960 mm (antes 2030 mm)

Con el uso del motor AC, se incorporará una caja de control equipada con un variador de frecuencia, permitiendo un ajuste preciso de la velocidad y facilitando su manejo en las prácticas.

Adecuado para las necesidades prácticas de los estudiantes, optimizando así su funcionalidad sin comprometer su desempeño. Adicionalmente, se implementará un cambio en el sistema de tensado de piezas, pasando de un sistema neumático a uno mecánico, lo que simplifica el mantenimiento y reduce la complejidad operativa.

Por último, durante el ensamblaje se priorizarán procesos de limpieza y pintado, documentando las piezas reemplazadas, así como los componentes adquiridos o fabricados para completar la restauración. Estas mejoras aseguran que la máquina cumpla con su funcionalidad requerida, ofreciendo un entorno práctico y seguro para las actividades académicas de los estudiantes.

CAPITULO #3

3.1. Resultado y Análisis

3.1.1 Resultados obtenidos tras el mantenimiento superficial de las piezas del equipo

Tabla 6

Piezas antes y después del mantenimiento

Parte del equipo	Antes del mantenimiento	Post mantenimiento
Bancada		
Pedestales		
Sistema de soporte con rodamiento		

Sistema
balancín



Transmisión



Poleas



Motor



3.1.2 Resultados de las alternativas para el acondicionamiento

La transición de un sistema hidráulico a uno mecánico en la máquina balanceadora implicó el diseño y fabricación de una polea de aluminio para esto se usaron materiales reciclados de la universidad fundiéndolos (como se observa en la ilustración #6), con el fin de hacer una pieza a mecanizar.

Ilustración 6

Fundición de material base para la construcción de polea de transmisión



Un aspecto relevante de esta modificación fue la implementación de un nuevo método para tensar la banda encargada de transferir el torque a los ejes en prueba. Aunque este sistema mecánico podría considerarse menos práctico en comparación con el diseño hidráulico original, la decisión estuvo fundamentada en la falta de componentes clave del sistema anterior, como ejes, cojinetes y otros elementos, cuya reposición resultaba inviable debido a su alto costo y limitada disponibilidad.

Además, el análisis realizado mediante una matriz de decisión demostró que el sistema mecánico ofrece varias ventajas, entre ellas la simplificación de las tareas de mantenimiento y una reducción significativa en los costos asociados. Este enfoque no solo mejora la sostenibilidad del equipo al reducir la dependencia de repuestos específicos, sino que también

facilita las labores de mantenimiento furas del equipó. Estos cambios realizados en el equipo, así como la limpieza de los diferentes componentes se puede visualizar en la ilustración #7

Ilustración 7

Estado actual de la maquina balanceadora



3.1.3 Resultados del sistema de soporte de ejes en movimiento

En relación con el sistema de soporte para los ejes en movimiento, se llevó a cabo el procedimiento de mantenimiento detallado en el capítulo 2, lo que permitió identificar y reemplazar los componentes faltantes. Entre las piezas adquiridas o fabricadas se encuentran pernos, anillos y rodamientos diseñados para soportar fuerzas axiales. Adicionalmente, se mecanizó un bocín necesario para el correcto montaje de uno de los rodamientos principales, y se fabricó el eje correspondiente para garantizar su funcionalidad.

Como parte de las mejoras realizadas, se incluyó el diseño y fabricación de una llave de calibración especial, indispensable para ajustar la altura del sistema según las necesidades operativas. Este sistema ha sido reacondicionado con éxito y se encuentra operativo,

permitiendo la colocación de los ejes en la parte superior de manera eficiente y segura, cumpliendo con los requisitos técnicos establecidos.

3.1.4 Resultados del sistema eléctrico y motor del equipo

Uno de los mayores retos del proyecto fue la ausencia total del sistema eléctrico de la máquina balanceadora. Para resolver esta problemática, se fabricaron bases específicas destinadas a montar un sistema de arranque y paro proporcionado por la universidad. Esto permitió reducir los costos asociados, limitando las adquisiciones necesarias a un variador de frecuencia que regula la velocidad de rotación del motor.

Posteriormente, se realizaron las conexiones eléctricas necesarias para integrar el variador al suministro de corriente y al motor de manera eficiente y segura.

Con el objetivo de mejorar el funcionamiento del equipo, se optó por reemplazar el motor original, que está inoperativo, por uno de igual potencia, pero con una velocidad angular diferente. En este sentido, se realizó el cambio de un motor de 2500 rpm a uno de 1715 rpm, lo que modifica parcialmente las condiciones de operación establecidas por el fabricante.

Es importante destacar que, tras el cálculo de las nuevas capacidades operativas del equipo luego del cambio de motor, se determinó que la longitud máxima permitida y el peso máximo soportado por la máquina balanceadora permanecerán sin modificaciones. Esto se debe a las limitaciones impuestas por otros componentes del sistema, los cuales restringen cualquier aumento en dichas capacidades.

3.2. Planos de fabricación y ensamble

Como parte fundamental del proceso de reacondicionamiento de la máquina balanceadora, se elaboraron planos de fabricación detallados para las piezas faltantes y

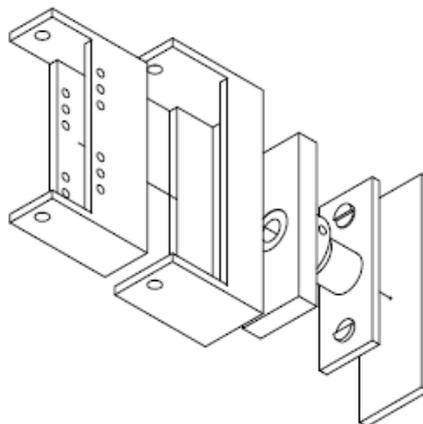
componentes modificados. Estos planos fueron diseñados utilizando software CAD, lo que permitió generar modelos precisos que optimizaron la manufactura y garantizan la compatibilidad con el sistema existente. Entre los elementos fabricados destacan ejes, bocinas, y sistemas de sujeción, cuyas dimensiones y especificaciones técnicas se definieron en los planos, asegurando su correcta integración al equipo.

Durante el ensamblaje, se siguió un procedimiento meticuloso basado en los planos generados, asegurando que cada componente estuviera alineado y ajustado según las tolerancias establecidas. Además, se incluyó una guía técnica para facilitar el montaje y la verificación de cada etapa del proceso, mejorando la eficiencia y reduciendo posibles errores. Este enfoque permitió no solo completar la restauración mecánica, sino también garantizar la funcionalidad del equipo para cumplir con los requisitos académicos.

El uso de planos detallados no solo optimizó el ensamblaje, sino que también dejó un recurso técnico valioso que podrá ser utilizado en futuras labores de mantenimiento o modificaciones, contribuyendo a la sostenibilidad y operatividad a largo plazo de la máquina balanceadora.

Ilustración 8

Diagrama de vista explosionada extraída de los planos del equipo.



3.3. Análisis de los costos realizados al acondicionamiento

El proceso de reacondicionamiento de la máquina balanceadora implicó una optimización significativa de los recursos disponibles haciendo uso de la economía circular. Los principales gastos como se muestran en la tabla 7, estuvieron relacionados con la adquisición de componentes clave como: el variador de frecuencia, panel de control, rodamientos y las bandas, también se consideraron materiales para la fabricación de piezas faltantes, incluyendo ejes, poleas y sistemas de sujeción. Adicionalmente, se destinaron recursos a herramientas y consumibles necesarios para el ensamblaje, limpieza y pintado del equipo.

El análisis económico demuestra que la restauración del equipo resultó considerablemente más rentable que la adquisición de una máquina nueva, reduciendo los costos a menos de una décima parte del valor de una máquina nueva en el mercado. Esta propuesta no solo cumplió con los objetivos técnicos esperados, sino que también optimizó el presupuesto al priorizar la reutilización de componentes existentes y minimizar la necesidad de adquisiciones externas.

Tabla 7

Especificación de componentes y precios de los recursos utilizados para el acondicionamiento del equipo

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio total
4	Perno M 4 x 0,7 x 3.5''	\$ 0.25	1.00
6	Perno M 5 x 0.8 x 2.5''	\$ 0.30	1.80
4	Perno M 6 x 1 x 1.5''	\$ 0.15	0.60
9	Perno M 4 x 0,7 x 2.5''	\$ 0.25	2.25
1	Desoxidante	\$ 1.25	1.25
2	Pintura industrial esmalte	\$ 5.5	11.00
4	Lija 180	\$ 0.40	1.6
2	Lija 360	\$ 0.40	0.8
2	Lija 500	\$ 0.50	1

1	Rodamiento CMB 5307 2RS	\$	55.00	55.00
3	Rodamiento axial de ½ ‘’	\$	4.50	13.50
VARIADOR SINAMICS G120X 5 HP 3F				
1	200-240V MODBUSSIEMENS MODELO: 6SL3220-1YC20-0UB0	\$	595.00	595.00
PANEL OPERADOR BOP-2 P/SINAMICS				
1	G120X/G120C/G120 - SIEMENS	\$	45.24	45.24
2	Rodamiento 5214 2RS	\$	16	32
2	Rodamiento CMB 40*18*12	\$	12.50	23.00
1	Valore de material base del aluminio	\$	16	16
Total				801.04

Tabla 8

Valores de mano de obra encargada de la puesta en marcha del equipo.

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio total
10	Horas de trabajo del especialista de estudio del equipo	4.60	46
12	Horas de trabajo del diseñador	3.11	43.42
4	Horas de trabajo del especialista en conexiones de sistema de control	12.25	50
36	Horas del encargado de montaje y desmontaje del equipo	2.93	105.48
1	Mecanización de la polea	\$ 60	60
1	Mecanización bocín de polea	\$ 10	10
1	Mecanización bocín rodamiento porta ejes	\$ 10	10
Total			334.9

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

Tras la inspección inicial del equipo, se evidenció un alto nivel de deterioro debido a la corrosión, así como la ausencia de múltiples componentes esenciales, ocasionada tanto por el paso del tiempo como por intervenciones previas. Como resultado de este diagnóstico, se determinó la necesidad de realizar ajustes en las capacidades del equipo, lo que llevó a la sustitución del sistema de transmisión y del motor para garantizar su funcionalidad en un entorno académico.

Se logró restablecer la operatividad mecánica de la máquina balanceadora, garantizando su funcionalidad para fines académicos y permitiendo el desarrollo de competencias prácticas en balanceo dinámico y estático, fundamentales para la formación técnica de los estudiantes. Además, se elaboró un plan de mantenimiento preventivo en conjunto a un dibujo CAD detallado de la máquina, siendo las herramientas clave para asegurar su sostenibilidad operativa y su correcto uso en el largo plazo.

El reacondicionamiento de la máquina balanceadora es una solución técnica y económicamente viable en comparación con la adquisición de un equipo nuevo. La reutilización de componentes existentes y la fabricación de piezas faltantes en los talleres de ESPOL optimizó recursos y demostró un compromiso con la sostenibilidad, permitiendo brindar una educación de calidad como dicta el ODS 4.

4.1.2 Recomendaciones

- Es fundamental que se continúe con el plan de mantenimiento establecido para garantizar que el equipo pueda extender su vida útil.
- Dado la ubicación del equipo, es fundamental llevar a cabo una inspección antes de cada uso con el fin de prevenir posibles daños ocasionados por el paso del tiempo.

- Es importante recordar que el equipo opera con conexiones trifásicas, por lo que, antes de encenderlo, se debe priorizar la verificación de su correcta conexión.
- En lo que respecta al análisis de vibraciones proporcionado por el equipo, el proyecto abarcó todo lo relacionado con su restauración mecánica, lo que abre la posibilidad de futuras mejoras, como la implementación de un sistema de control que facilite el cálculo computacional de balanceo.
- Es importante considerar que el cambio de motor ha implicado una modificación en sus especificaciones técnicas, siendo la velocidad de rotación la más afectada. Sin embargo, esta situación podrá ser corregida mediante ajustes en la polea del motor o cambios en el sistema de transmisión.
- En todo momento que el equipo sea utilizado con fines académicos, debe haber una persona encargada de su supervisión y observación. Además, se debe considerar la posibilidad de desarrollar sistemas adicionales que refuercen la sujeción del eje a estudiar.

Referencias

- Amaya, A., & Cevallos, J. (10 de 02 de 2023). Restauración mecánica de una máquina balanceadora a partir de la ingeniería inversa. Guayaquil, Guayas, Ecuador. Recuperado el 8 de 01 de 2025, de Tesis académicas ESPOL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/60817>
- Balancing, I. (s.f.). *IRD Balancing*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2024, de IRD: <https://www.directindustry.es/prod/ird-balancing/product-58542-1248027.html>
- Campbell, J. D., & Jardine, A. K. (2011). *Aintenance Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*. (J. McGlynm, Ed.) London, E.E.U.U.: CRC Press. Recuperado el 07 de Diciembre de 2024, de https://www.academia.edu/24085890/ASSET_MANAGEMENT_EXCELLENCE_Optimizing_Equipment_Life_Cycle_Decisions
- Ercoli, L., & La Malfa, S. (2003). *Teoria y Practica del balanceo de rotores industriales* (Vol. #2). Libarería, España: Alsina. Recuperado el 01 de Diciembre de 2024, de <https://es.scribd.com/document/373716090/Teoria-y-practica-balanceo-L-E-S-M-pdf>
- GmbH, S. R. (05 de 2014). *Manual de balanceo de rotores*. Recuperado el 23 de Diciembre de 2024, de JP Balancer: <https://www.schenck-rotec.com/es>
- ISO, I. O. (2003). *Normativa para el balanceo industrial 1940-1*. Recuperado el 22 de Octubre de 2024, de ISO 1940-1: <https://www.iso.org/standard/27092.html>

Anexos

Ilustración 9

Configuración y calibración del variador de frecuencia del equipo



Ilustración 10

Procedimiento de puesta en marcha del equipo

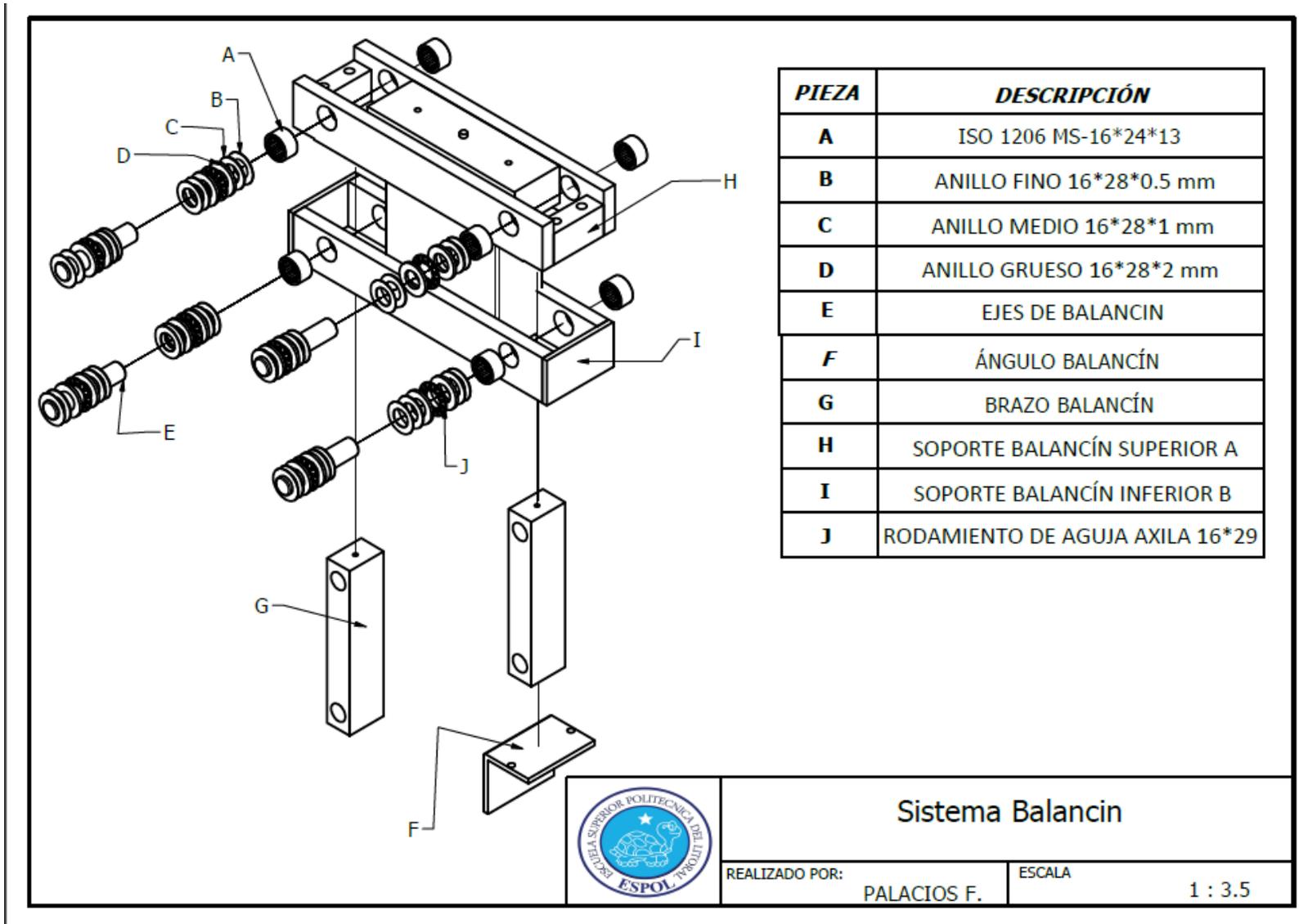
Procedimiento para la Puesta en Marcha del Equipo

- 1 Verificar que el equipo esté correctamente conectado a una fuente de alimentación trifásica de 220 V.
- 2 Antes de encender el equipo, comprobar que no existan fallas en el sistema eléctrico.
- 3 Inspeccionar el estado general del equipo y corroborar su correcta configuración con el diagrama de uso.
- 4 Medir la pieza que se va a balancear y ajustar la separación de los pedestales de acuerdo con sus dimensiones.
- 5 Asegurar el equipo utilizando el tornillo de fijación correspondiente.
- 6 Activar el sistema de freno del balancín para evitar movimientos no deseados.
- 7 Posicionar la banda de transmisión del equipo sobre la pieza a estudiar.
- 8 Instalar el eje, rotor u otro componente que se vaya a evaluar o rectificar.
- 9 Fijar los brazos axiales en los laterales del equipo para garantizar su estabilidad.
- 10 Descender el carro de transmisión hasta que la banda quede correctamente centrada.
- 11 Ajustar la velocidad de rotación (RPM) necesarias para la práctica utilizando el variador de frecuencia.
- 12 Una vez que el equipo alcance las RPM establecidas para el estudio, liberar la tensión de la banda mediante el sistema de transmisión.

Ilustración 13

Esquema de mantenimiento predictivo y correctivo sobre el equipo.

Mantenimiento Preventivo			
<i>Frecuencia</i>	<i>Actividad</i>	<i>Herramientas Necesarias</i>	<i>Observaciones</i>
<i>Semanal</i>	Inspección visual	Ninguna	Revisar suciedad y daños que puedan comprometer al uso del equipo
<i>Mensual</i>	Lubricación de piezas móviles	Aceite lubricante y aplicador	Usar lubricante solo en las piezas necesarias para el correcto uso del equipo y a la bancada para ayudar al deslizamiento del equipo
<i>Anual</i>	Verificar del estado de los rodamientos	Llave y equipo para desarme	Ajustar si es necesario y reemplazar los rodamientos de estar averiados
<i>Nota: Para cada mantenimiento en el caso de encontrar un desperfecto o avería en el equipo comunicarse con el personal pertinente, para su revisión y posterior arreglo.</i>			
Mantenimiento Correctivo			
<i>Problema</i>	<i>Sintoma</i>	<i>Causa Posible</i>	<i>Solución</i>
<i>Banda</i>	<i>Se genera un giro irregular en el sistema medido.</i>	Uso prolongado, mal ajuste de las poleas, daño en los rodamientos de la polea, malacolocacion de la banda	Reemplazar la banda en el caso de daño grave, en el caso de no presentar daños considerables solo bulcanisar la seccion dañada
	<i>Salida abrupta de las poleas</i>		
	<i>Se genera un desbalanceo agresivo en el sistema.</i>		
<i>Poleas</i>	<i>Se genera un ruido y vibraciones excesivo cuando el equipo esta en funcionamiento</i>	Desgaste o instalación incorrecta ya sea de las poleas o de la banda	Verificar la alineacion de la bandeja y el rodamiento de las mismas, reemplar de ser necesario
	<i>Se desfasa la banda al momento de comenzar a girar</i>		
<i>Rigidez del siema de balanceo</i>	<i>El balancin se precanta rigido y no es sensible ante el movimiento del rotor</i>	Desgaste de los componenetes totativos, corrosion de los componenetes o falta de mantenimiento de estos componentes	En el caso de encontrar fallas o daños en algun rodamiento se recomienda un cambio inmediato en el caso de corrosion realizar una limpieza a la pieza
	<i>Los rodamiento de los pedestales deslizan en ves de rotar</i>		
<i>Problema eléctrico (motor/variador)</i>	<i>El sistema no ensiende</i>	Sobrecarga o conexión incorrecta	Revisar conexiones, en el canso de encontrar un corfte rebisar para cambio de fusible o cables desgastados. En el caso de una desprogramacion siga los pasos nesesaris con respecto al motor que se valla a usar.
	<i>El variador no regula las RPM del equipo</i>	El equipo puede estar desprogramado o alguna conecion esta defectuosa	
	<i>El variador de frecuencia enciende pero el equipo nmo se mueve</i>		



Plano 1 Sistema Balancín

PIEZA	DESCRIPCIÓN
A	BASE DE ALUMINIO
B	BASE CON ROSCA DE NIVEL
C	PERNO M8 * 60
D	PERNO M5 * 40
E	BASE DE AJUSTE DE ALTURA
F	MODULO ESTABLE SOPORTA EJES
G	EJE RODAMIENTO MONTA EJES
H	MODULO ANGULAR
I	BOCÍN DE ACOPLES
J	RODAMIENTO 5307 - 2R7 C3
K	PERNO PUNTA PLANA M5 * 5
L	BOCIN DE AJUSTE
M	TUERCA DE PRESIÓN M10*1.5
N	ANILLO 14*29*1 mm
O	RODAMIENTO DE AGUJA AXILA 14*28
P	PERNO SE SUJECIÓN



SISTEMA DE SOPORTE PARA EL EJE

REALIZADO POR: PALACIOS F. ESCALA: 1 : 6

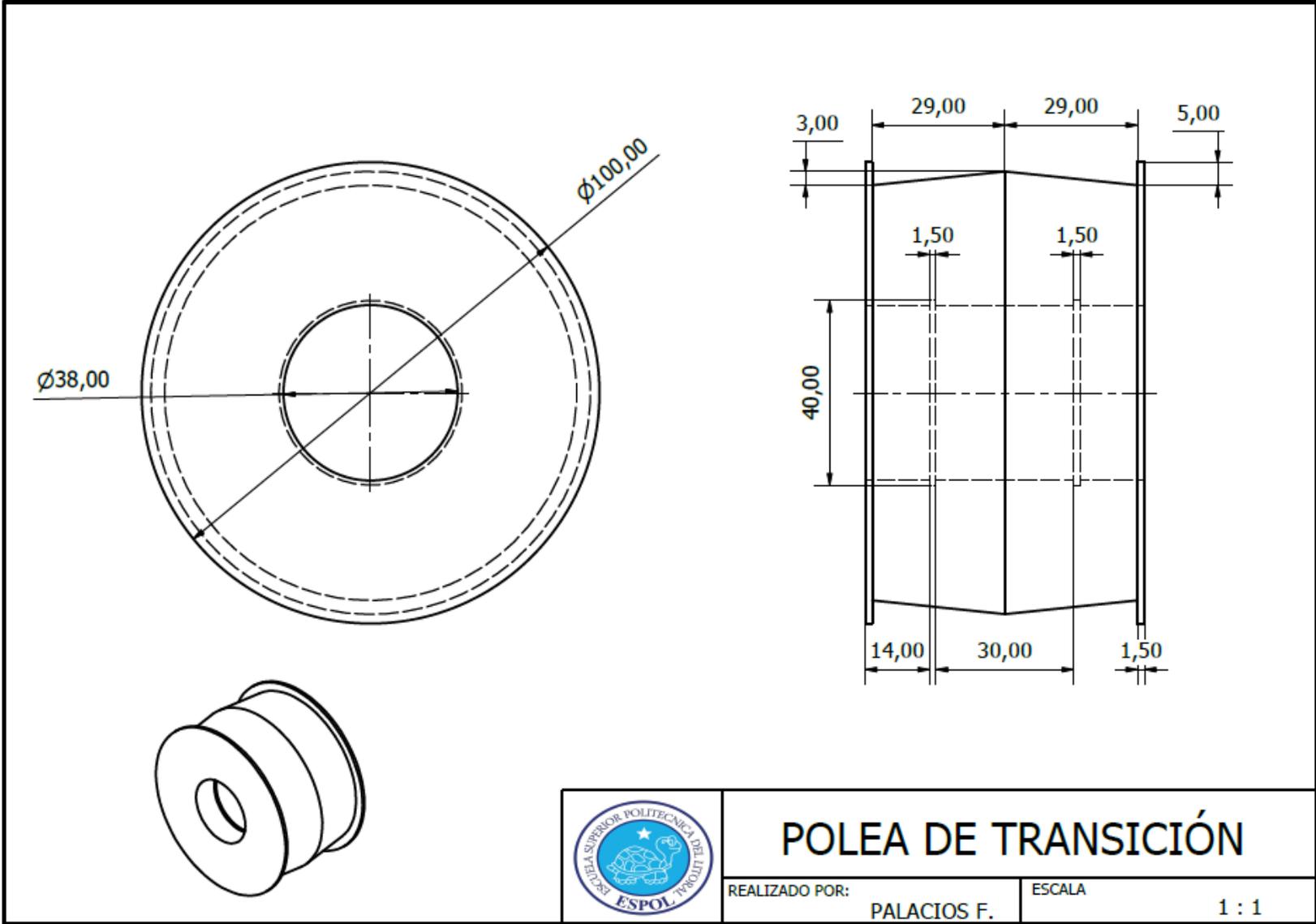
Plano 2 Sistema de soporte

PIEZA	DESCRIPCIÓN
A	ESTRUCTURA DE LA TRANSMISIÓN
B	PLACA PORTA MOTOR
C	AGARRE P #2
D	AGARRE P #1
E	ANGULO DE UNIÓN
F	REGULADOR DE TENSIÓN DE LA BANDA
G	POLEA DE TRANSMISIÓN
H	PERNO DE SUJECCIÓN DE LA POLEA
I	ARANDELA AS 1252
J	ANILLO 16*24*1 mm
K	RODAMIENTO KB S 2030
L	TORNILLO M12 :1
M	LLAVE DE AJUSTE
N	PLACA DE AJUSTE
O	PERNO DE AHORCAMIENTO
P	PERNO CANDADO M14

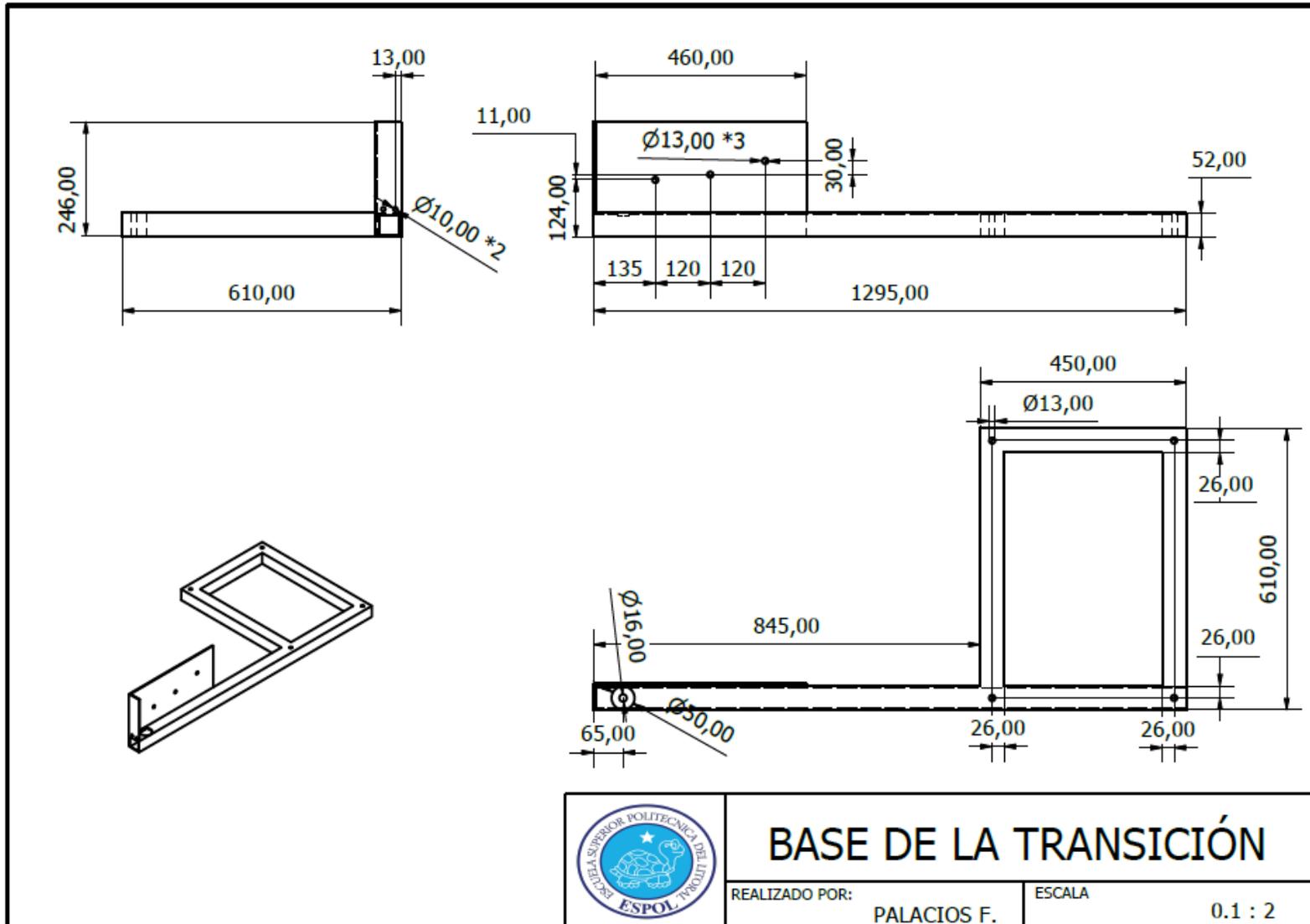
Q	PERNO M12 * 80
R	PERNO M 12 * 3
S	PERNO M8*20
T	PERNO M8*50

	SISTEMA DE TRANSICIÓN MECÁNICO	
	REALIZADO POR: PALACIOS F.	ESCALA 0.09 : 2

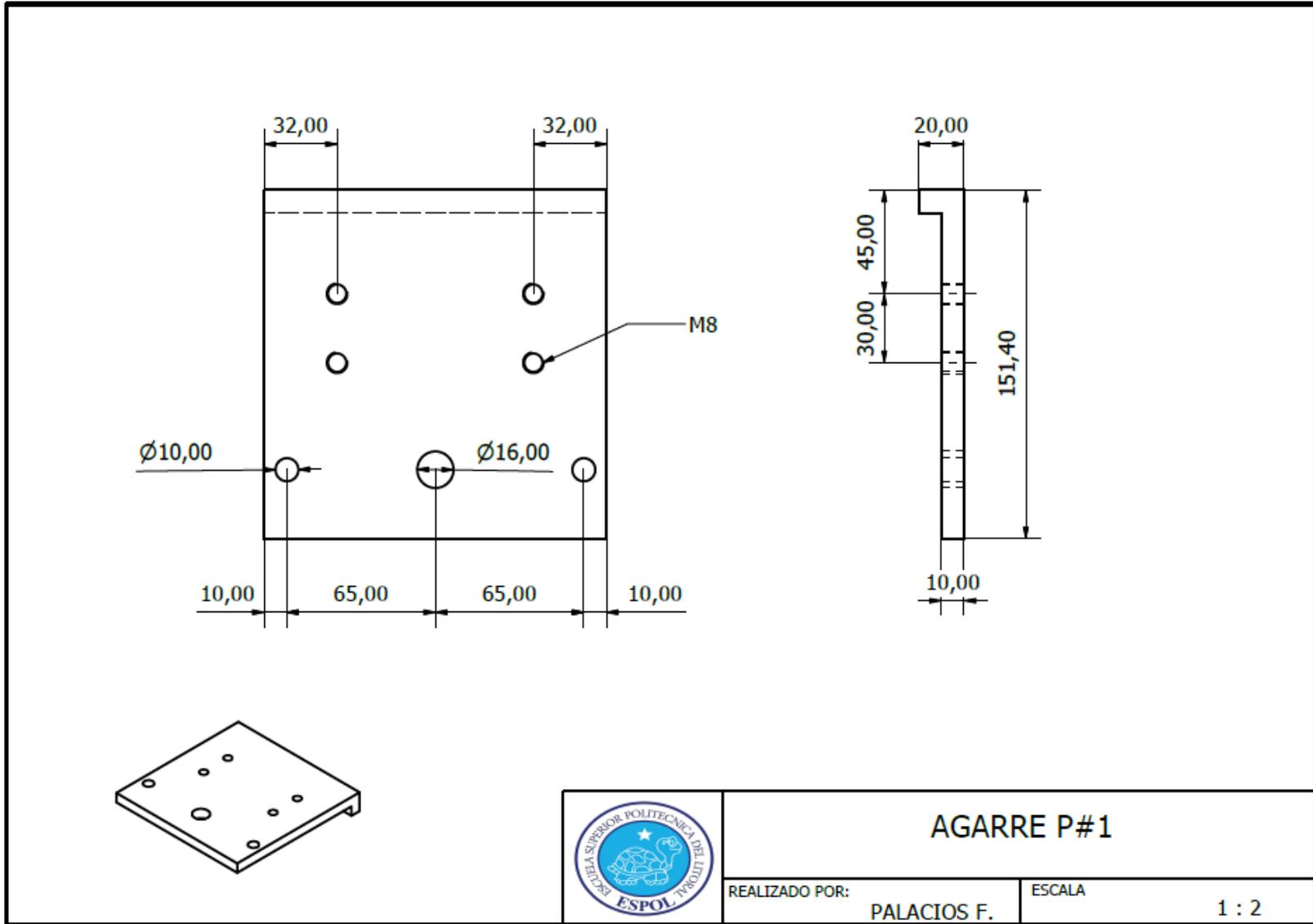
Plano 3 Sistema de transición mecánico



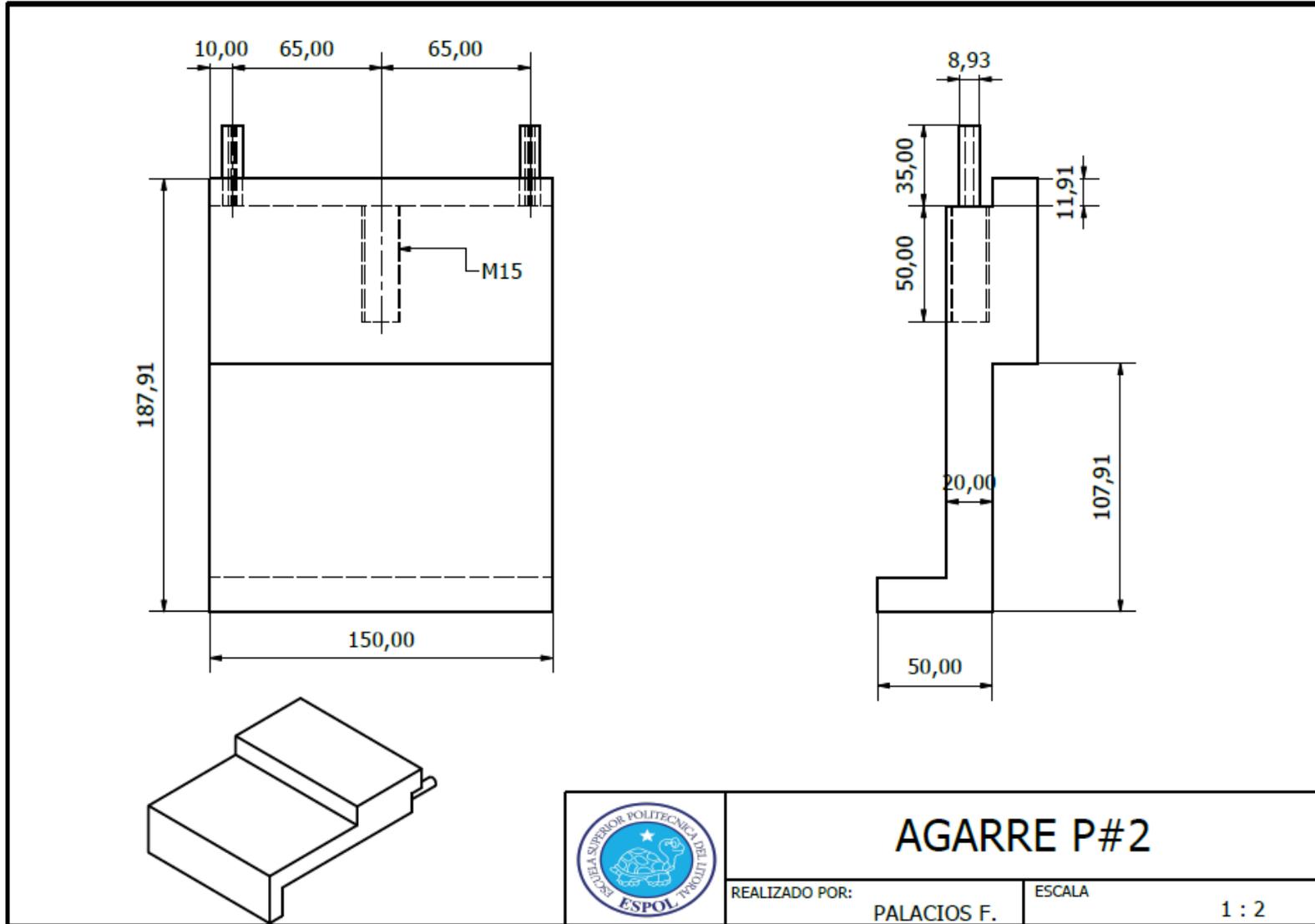
Plano 4 Polea de transición



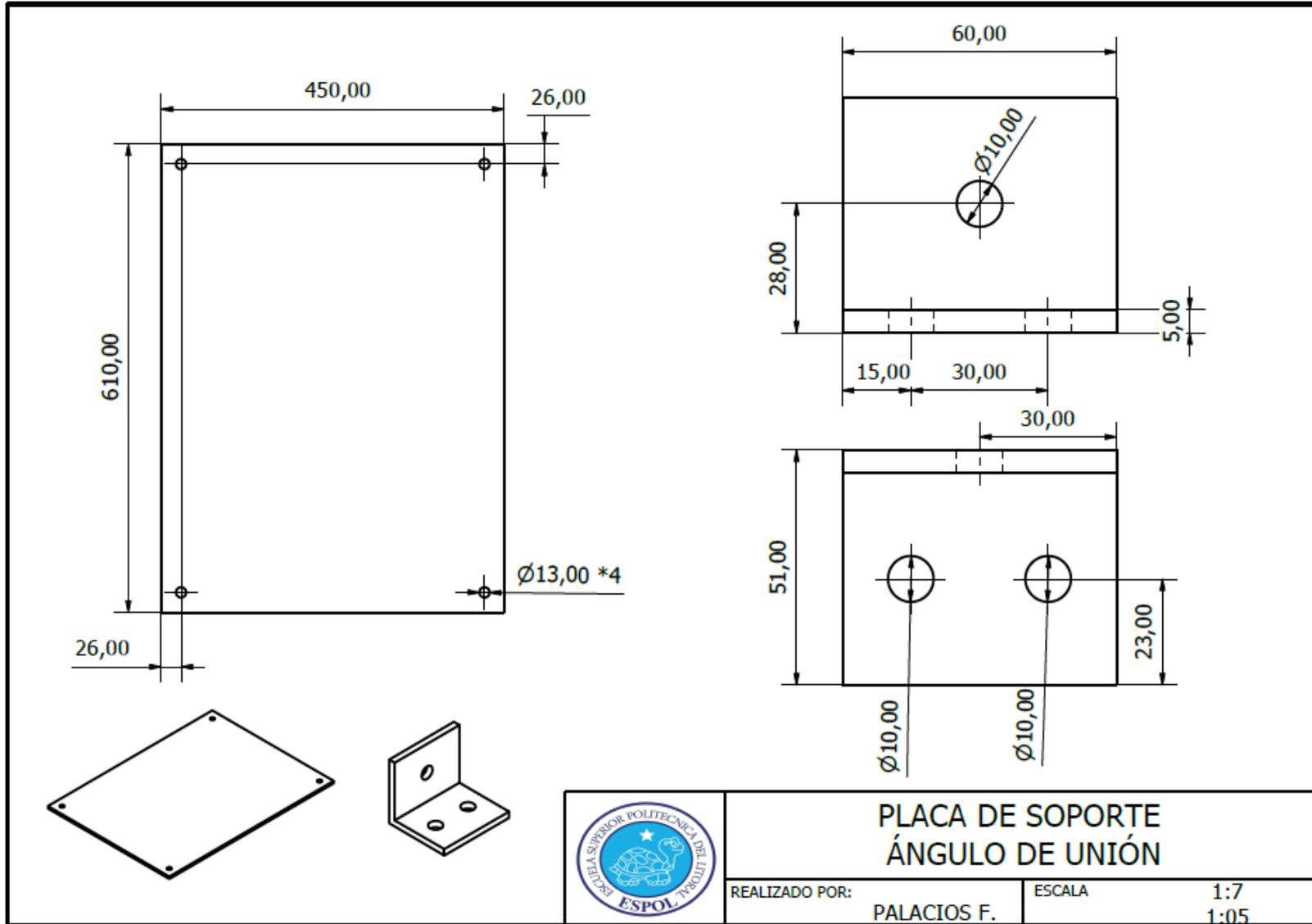
Plano 5 Base de la transición



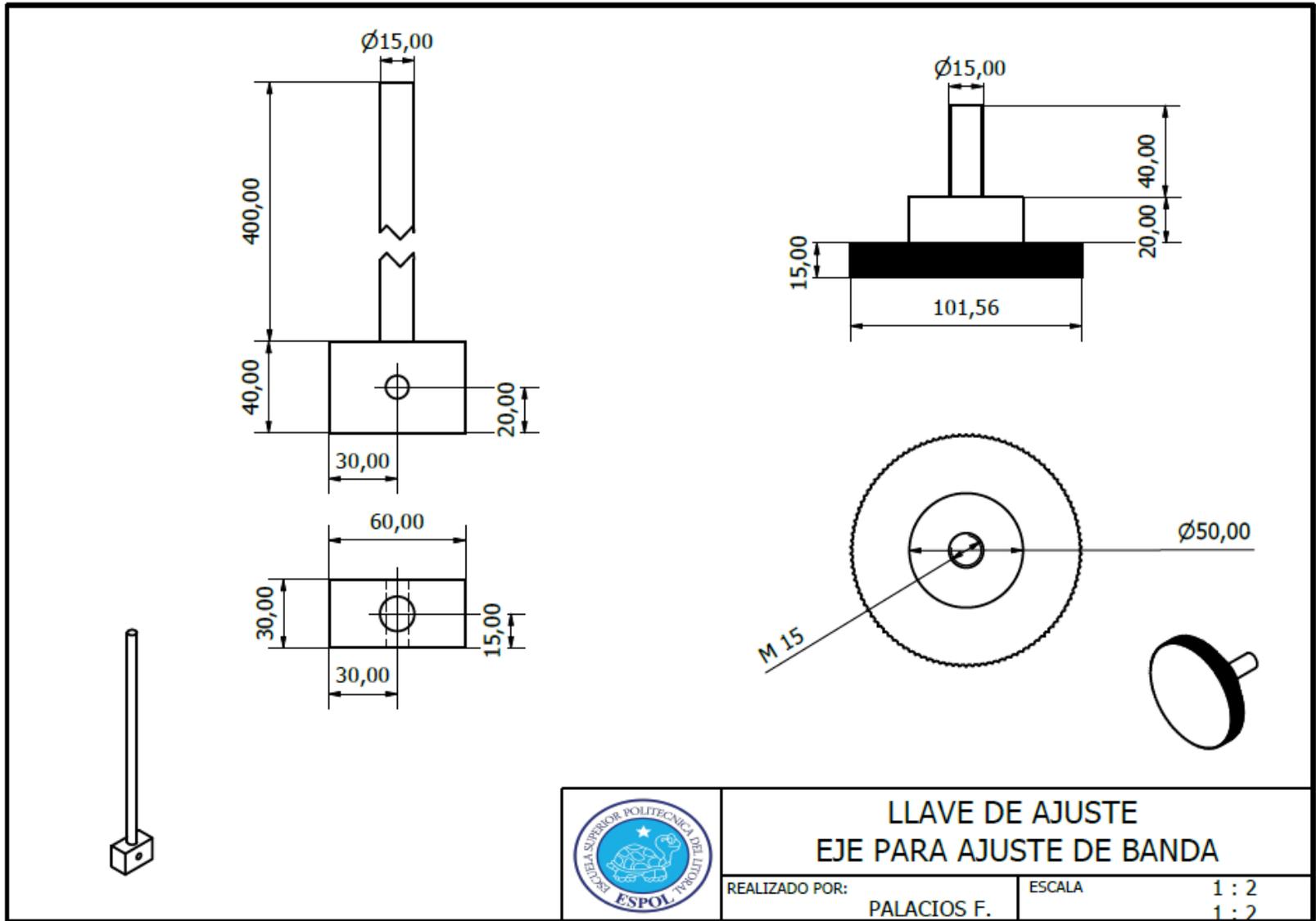
Plano 6 Agarre #1



Plano 7 Agarre #2



Plano 8 Placa de Soporte ángulo de unión



Plano 9 Llave de ajuste de eje