

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial

“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MÓDULO PARA ESTUDIO DE ANÁLISIS VIBRACIONAL, ALINEAMIENTO LÁSER Y BALANCEO DINÁMICO PARA LA EMPRESA MAHE PERÚ.”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de:

Ingeniero Industrial

Autor:

Luis Angel Acero Condo

Asesor:

Mg. Ing. Carlos Pedro Saavedra López

<https://orcid.org/0000-0002-8242-5664>

Lima- Perú

2022

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo primero a Dios por la vida y salud, por sobresalir de la pandemia que nos tocó vivir el Covid -19.

Y a mis padres Cila y Julio, a mi esposa Leydi, a mis hijos Leonardo, Luis y Mia, por su paciencia y su apoyo incondicional, gracias a ellos ha sido posible culminar este trabajo de investigación y desarrollo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia que en todo momento me brindaron su apoyo, su tiempo y la paciencia para poder culminar mi carrera profesional, a mis amigos que en cada momento me han sabido dar un buen consejo y seguir hacia adelante. Doy gracias a mis profesores y mi asesor, por compartir su conocimiento y experiencia para elaborar esta tesis y crecer de forma profesional.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
TABLA DE CONTENIDOS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ECUACIONES	9
RESUMEN EJECUTIVO	10
ABSTRACT.....	11
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Realidad problemática	12
1.1.1. <i>Referencias Internacionales</i>	13
1.1.2. <i>Referencias Nacionales</i>	14
1.2. Referencias de la Empresa.....	15
1.2.1. <i>Fundación</i>	15
1.2.2. <i>Visión</i>	16
1.2.3. <i>Misión</i>	16
1.2.4. <i>Organigrama</i>	16
1.2.5. <i>Principales Competidores</i>	18
1.2.6. <i>Principales Proveedores</i>	19
1.2.7. <i>Principales Clientes</i>	20
1.2.8. <i>Principales Productos y Servicios que Brinda la Empresa</i>	21
1.3. Formulación del Problema	22
1.3.1. <i>Problema General</i>	22
1.3.2. <i>Problemas Específicos</i>	22
1.4. Objetivo General	22
1.4.1. <i>Objetivos Específicos</i>	23
1.5. Justificación.....	23
1.6. Limitaciones	23
1.7. Contextualización de la experiencia profesional.....	24
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	26
2.1. Antecedentes	26
2.2. Bases Teóricas	29
2.2.1. <i>Generalidades: Vibración Mecánica</i>	29
2.2.2. <i>Características de la Vibración</i>	29
2.2.3. <i>Medición de las Vibraciones</i>	30
2.2.4. <i>Conversión entre medidas</i>	31
2.2.5. <i>Adquisición de Datos</i>	32
2.2.6. <i>Selección del Tipo de Medida</i>	32
2.2.7. <i>Los Transductores de Vibración</i>	33

2.2.8.	<i>Transductores de Velocidad (Tipo Piezoeléctrico)</i>	33
2.3.	Generalidades del Desalineamiento y Alineamiento Laser	35
2.3.1.	<i>Fundamentos del Desalineamiento</i>	35
2.3.2.	<i>Métodos de Alineamiento</i>	39
2.4.	Balanceo Dinámico	40
2.5.	Especificaciones Técnicas del Módulo	43
2.5.1.	<i>Cálculo de Velocidad Crítica del Eje</i>	47
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA		50
3.1.	Nacimiento de la Idea	50
3.2.	Objetivos	50
3.3.	Estrategia y Metodología	50
3.4.	El Desarrollo del Módulo Vibracional	51
3.5.	Confeción y Adquisición de Componentes	54
3.6.	Pintado y Ensamblado del Módulo	55
3.7.	Tiempos de Fabricación.....	60
3.1.	Costos de la Fabricación del Módulo.....	61
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....		62
4.1.	Resultados en Mahe Perú EIRL	62
4.2.	Resultados en los Clientes que Compraron el Módulo.....	63
4.2.1.	<i>Resultados en TASA</i>	63
4.2.2.	<i>Resultados en SOLTRAK</i>	65
4.2.3.	<i>Resultados en NOV</i>	67
4.1.	Coherencia con los Objetivos	68
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		70
5.1.	Conclusiones.....	70
5.1.1.	<i>Respecto al Problema General:</i>	70
5.1.2.	<i>Respecto al Objetivo General:</i>	71
5.1.3.	<i>Respecto a los Problemas Específicos:</i>	71
5.2.	Recomendaciones	72
REFERENCIAS.....		73
ANEXOS		77
Anexo N° 1. Planos del Módulo Desarrollado, Obtenidos en SolidWorks		77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales competidores.	18
Tabla 2 Principales proveedores.....	19
Tabla 3 Principales clientes.....	20
Tabla 4 Principales Equipos que brinda la empresa.	21
Tabla 5 Principales Servicios que brinda la empresa.	21
Tabla 6 Componentes del Banco de Velocidad Crítica y Desbalance.	46
Tabla 7 Parámetros para el análisis modal.	48
Tabla 8 Lista de modos.	49
Tabla 9 Costos de fabricación del módulo.	61
Tabla 10 Facturación mensual promedio en MAHE antes y después del módulo.....	62
Tabla 11 Cumplimiento de mantenimientos predictivos en TASA.	64
Tabla 12 Costos de mantenimiento en TASA.	65
Tabla 13 Ventas de los equipos Pruftechnik en SOLTRAK.	66
Tabla 14 Costos de mantenimiento en NOV	67
Tabla 15 Precios de módulos de análisis vibracional en el mercado local.	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Organigrama de la empresa MAHE PERU EIRL.....	17
Figura 2 Módulo de estudios vibraciones Pruftechnik.	28
Figura 3 Onda Sinusoidal.	30
Figura 4 Relaciones entre el Desplazamiento, Velocidad y Aceleración.	31
Figura 5 Esquema del Transductor de Velocidad Piezoeléctrico.	34
Figura 6 Espectro vibracional o señal con el transductor.	34
Figura 7 Frecuencia de la vibración axial a 1 RPM por desalineamiento angular.	35
Figura 8 Frecuencia de la vibración radial a 2 RPM por desalineamiento paralelo.....	36
Figura 9 Alineamiento en frío con compensación térmica por dilatación de sus apoyos.	38
Figura 10 Métodos de alineamiento.....	39
Figura 11 Beneficios de alineamiento laser.	39
Figura 12 Las Fuerzas por desbalance de un rotor son equivalentes a una fuerza estática y a un par dinámico.	40
Figura 13 Descomposición de las vibraciones en los apoyos A y B en una vibración estática y un par dinámico.	41
Figura 14 Eliminación de las fuerzas estática y dinámica con adición de masas.....	42
Figura 15 Banco de Prueba.	44
Figura 16 Partes que componen el módulo.	44
Figura 17 Eje soportado entre dos apoyos con masa central.....	47
Figura 18. Eje soportado entre apoyos cortos con masa central.....	47
Figura 19 Forma modal 1.....	48
Figura 20 Forma modal 2.....	49
Figura 21 Módulo de armado final.	51
Figura 22 Inicio de ensamble de módulo.	52
Figura 23 Eje principal.	52

Figura 24 Plataforma secundaria para alojamiento de chumacera y eje.....	53
Figura 25 Discos de duraluminio para simulación de desbalance.....	53
Figura 26 Base de motor.	54
Figura 27 Motor alojado en la base.	55
Figura 28 Base en forma de c porta chumacera.....	56
Figura 29 Plataforma para porta base en c.	56
Figura 30 Acoplamiento entre motor y eje principal.....	57
Figura 31 Eje principal con acoplamiento, chumaceras y discos de Duraluminio.	57
Figura 32 Eje principal y su conjunto instalado en su plataforma.....	58
Figura 33 Eje principal con motor y chumacera.....	58
Figura 34 Incorporación de tablero electrónico:.....	59
Figura 35 Tablero con variador de velocidad.....	59
Figura 36 Prueba con vibrómetro.	60
Figura 37 Impacto del módulo en la facturación de MAHE.....	63
Figura 38 Cumplimiento del mantenimiento predictivo en TASA.....	64
Figura 39 Ahorro de costos de Mantenimiento en el periodo de veda en TASA.	65
Figura 40 Ventas de equipos Pruftechnik en SOLTRAK.	66
Figura 41 Costos de mantenimiento en NOV.	68
Figura 42 Comparación de precios.....	69
Figura 43 El modulo trabajando con un equipo de alineamiento laser.	70

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ecuación de velocidad.....	31
Ecuación 2: Ecuación de aceleración.	32
Ecuación 3: Ecuación de movimiento vibratorio.....	40
Ecuación 4: Ecuación de desbalance.	41
Ecuación 5: Ecuación de velocidad crítica.	47

RESUMEN EJECUTIVO

Mahe Perú EIRL se ocupa de la venta de equipos y servicios de mantenimiento predictivo. Hay una gran preocupación en los clientes, cuando los equipos se dañan por un mal manejo o cuando no se tienen resultados en el mantenimiento predictivo, por un uso incorrecto de los equipos. Ante esto se propuso en MAHE, el diseño e implementación de un módulo para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico orientado a mejorar el servicio de capacitaciones en cuanto al manejo de equipos de mantenimiento predictivo en un plazo breve y a un bajo costo, frente a los equipos convencionales importados.

Se estudiaron los módulos de propósitos similares existentes en el mercado nacional, todos de manufactura extranjera, determinándose los puntos clave y características que justificaban su alto precio. Entonces se plantearon cambios en el material y en el diseño de la estructura sin perder la funcionabilidad, se prepararon los planos en SolidWorks; el módulo desarrollado fue probado y obtuvo las mismas prestaciones que los equipos importados.

El proyecto se desarrolló e implementó en 10 días y se consiguió un costo tan bajo que actualmente es el módulo de más bajo precio en el mercado local. Por lo que MAHE ya distribuyó tres unidades entre sus clientes, aumentando la facturación mensual, luego de realizarse el módulo.

El módulo no solo facilitó las capacitaciones en los equipos de alineamiento láser y balanceo dinámico dentro de las empresas, sino que también facilitó el entrenamiento en el uso correcto de estos equipos, y proporcionó un ambiente seguro para el estudio del análisis vibracional.

Palabras clave: módulo de estudio de vibraciones, alineamiento láser, balanceo dinámico.

ABSTRACT

MAHE Peru EIRL deals with the sale of predictive maintenance equipments and services. There is great concern among customers when equipment is damaged due to mishandling or when there are no results in predictive maintenance due to incorrect use of the equipment. Given this, MAHE proposed the design and implementation of a module for the study of vibrational analysis, laser alignment and dynamic balancing aimed at improving the training service regarding the operation of predictive maintenance equipment in a short time and at a low cost compared to conventional imported equipment.

The modules of similar purposes existing in the national market, all of foreign manufacture, were studied, determining the key points and characteristics that justified their high price. Changes in the material and in the design of the structure were then proposed without losing functionality, the drawings were prepared in SolidsWork; the developed module was tested and obtained the same performance as the imported equipment.

The project was developed and implemented in 10 days and the cost was so low that it is currently the lowest priced module in the local market, for which MAHE has already distributed three units among its clients, increasing the monthly billing, after the module was made.

The module not only facilitated training in laser alignment and dynamic balancing equipment within companies, but also facilitated training in the correct use of this equipment and provided a safe environment for the study of vibrational analysis.

Keywords: vibration study module, laser alignment, dynamic balancing.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La empresa Mahe Perú EIRL, se desempeña en diferentes técnicas de mantenimiento predictivo, tanto en ventas de equipo para: Análisis vibracional, balanceo dinámico, termografía, alineamiento láser y ultrasonido acústico, así como da servicios de capacitación para el uso de los equipos. Los clientes son la pieza más importante para todo rubro de negocio, y es por ello que la calidad de nuestros productos y el cumplimiento en las entregas es fundamental para cumplir las exigencias y demandas del mercado; actualmente la competencia directa tiene el 50% del mercado, y con una productividad del 90%, mientras que la empresa Mahe Perú EIRL cubre el 25% del mercado, lo cual representa la importancia de cumplir de manera eficiente con los servicios y entrega de los productos.

En la actualidad, no solo es necesario que las empresas obtengan buenos equipos orientados al mantenimiento predictivo, sino que tengan personal altamente capacitado en el manejo de dichos equipos, ya que de lo contrario se puede producir que las máquinas se malogren o que en ocasiones la producción se retrase. La empresa Mahe Perú EIRL. Cuenta con una variedad de clientes a nivel nacional, quienes en los últimos años han mostrado su disconformidad en cuanto a los resultados que tienen en su empresa, que se ven reflejados en bajos niveles de eficiencia y eficacia, con las consecuentes pérdidas económicas, que es consecuencia del incorrecto manejo que tienen los ingenieros y técnico de los equipos. Frente a esta problemática es que en la empresa Mahe Perú EIRL se diseñó y fabricó un módulo para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico orientado a mejorar el servicio de capacitaciones en cuanto al manejo de equipos de mantenimiento predictivo.

1.1.1. Referencias Internacionales

Espinoza Ronquillo (2019) en su tesis presentó como objetivo específico realizar el respectivo levantamiento de información y diagnósticos actuales a los diferentes equipos rotatorios en base a los análisis vibratorios. Repotenciando así el mantenimiento predictivo para conocer e identificar las fallas más comunes en los equipos rotatorios ocasionados por, malos alineamientos, golpeteos por desgastes, temperaturas inadecuadas, engranajes en posiciones no correctas. Para lograrlo es necesario que el personal conozca diferentes tipos de normas internacionales y la manera en que se implementan a la hora de manipular los equipos. Como último aspecto se tiene que hay que evaluar los posibles daños económicos de no manejar bien los equipos. El antecedente contribuye a reforzar la importancia conocer el manejo de equipos de análisis vibracional, alineamiento laser y balanceo dinámico orientado a mejorar económicas de una empresa productora. Como se pretende en el presente trabajo de suficiencia.

Espino Román et al. (2017) tuvieron como objetivo principal realizar un prototipo didáctico orientado a monitorear el proceso de vibraciones, con el fin de garantizar el buen funcionamiento de la maquinaria, de esta manera se establece tener un buen mantenimiento predictivo de la maquinaria, orientada a detectar fallas que detectadas a tiempo ayuda a disminuir en 25% las pérdidas de la empresa, todo este sistema de maquinaria para dar mantenimiento predictivo está orientado siempre a que el persona esté debidamente capacitado para manejarlas, por lo que el antecedente contribuye a reforzar la importancia de establecer el modelo de estudio como se pretende en el presente trabajo de suficiencia.

En la tesis de Angulo Acunso (2013) el equipo analizador de vibraciones mecánicas en sistemas rotativos es una clara explicación de un sistema macarrónico que incluye el diseño mecánico, la adquisición y control de señales; además del análisis a través del software Labview. Siendo una herramienta de gran utilidad en el estudio de vibraciones

mecánicas de forma didáctica para los estudiantes de ingeniería, preparándolos para su posterior desempeño en el campo industrial. Por lo que el antecedente contribuye a reforzar la importancia de establecer el modelo de estudio como se pretende en el presente trabajo de suficiencia.

1.1.2. Referencias Nacionales

En la tesis de Cabrera Centurión (2021) se resalta la importancia de la disciplina ingeniería de vibraciones y sus aplicaciones en la industria, en consecuencia, se identifica la necesidad de proveer a los estudiantes de ingeniería, el conocimiento necesario para garantizar un buen desenvolvimiento en su desarrollo profesional, es por ello que, se propuso el diseño de un módulo de laboratorio para el estudio de las vibraciones mecánicas, esto con el objetivo que, en él, se aprecie experimentalmente el cambio en las vibraciones al variar los parámetros inercia, rigidez y fuerza de excitación Finalmente, se cumplió el objetivo general y los objetivos específicos al culminar el diseño de un módulo que permita a los estudiantes analizar, mediante la experimentación, los cambios en las vibraciones mecánicas al variar los parámetros inercia, rigidez y fuerza de excitación. Por lo que el antecedente contribuye a reforzar la importancia de establecer el modelo de estudio como se pretende en el presente trabajo de suficiencia.

Maraví Chuquilín (2020) en su tesis refiere que actualmente se fabrican máquinas rotativas que pueden alcanzar hasta 20,000 rpm durante su operación. Estas se usan en diferentes campos de aplicación y en diferentes tipos de industria. Según estadísticas, las causas de falla que más afectan a estos equipos son el desbalance, el desalineamiento y la soltura estructural, lo cual se puede produce elevados niveles de vibración y afecta el normal desempeño de estos equipos, produciendo grandes costos para las empresas. En ese sentido, en este trabajo se busca describir los métodos y procedimientos más usados actualmente para corregir tales condiciones. Para tal fin, se realizará una recopilación de literatura técnica relacionada a estos tópicos, estándares internacionales, manuales y

casos de estudio publicados. Se concluye que los métodos de balanceo actuales están enfocados en técnicas de control activas y, en el caso del desalineamiento, se recomienda el uso de sistemas láser. Por lo que el antecedente contribuye a reforzar la importancia de establecer el modelo de estudio como se pretende en el presente trabajo de suficiencia.

Velasquez Araujo y Vega Villafana (2020) en su tesis muestran el procedimiento de cálculo para realizar el Diseño de un Sistema de Entrenamiento de Potencia Mecánica para la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica -UNS. En el diseño se muestra cómo se realiza los diversos cálculos para la selección adecuada de elementos de transmisión a utilizar como poleas, fajas, engranajes rectos, engranajes helicoidales, cadena de rodillos, rodamientos y chavetas. Se toma como variable independiente la distancia entre centros y a partir de ella se construye las experiencias vivenciales logrando con ellos todo un conjunto de accesorios diferentes con los cuales se puede ir armando diferencias módulos, todo ello con el fin de tener diversidad a la hora de las prácticas de laboratorio. Por lo que el antecedente contribuye a reforzar la importancia de establecer el modelo de estudio como se pretende en el presente trabajo de suficiencia.

1.2. Referencias de la Empresa

1.2.1. Fundación

La empresa tiene su sede en el distrito de Puente Piedra en Lima, el número de Oficina: 01-5484304 y con Celular: 977193999 / 997856067, Asimismo se tiene como correo de ventas: ventas@maheperu.com y presenta también una página web cuyo sitio es: web: www.maheperu.com.

Cabe mencionar que Mahe Perú EIRL., es una empresa peruana que se fundó en el año 2016, y tiene como principal rubro brindar diferentes técnicas de mantenimiento predictivo dando una total confianza en su ejecución, apoyado por personal debidamente calificado, certificado y con años de experiencia, todo esto para la satisfacción de nuestros clientes y a su vez estamos guiados a una mejora continua de excelencia y calidad. La planta se encuentra en el distrito de Puente Piedra en la ciudad de Lima.

1.2.2. Visión

En Mahe Perú EIRL, buscamos el desarrollo constante sostenido y comprometido con nuestros clientes a fin de ser una de las mejores empresas reconocidas en el mercado, buscando siempre el liderazgo y la excelencia.

1.2.3. Misión

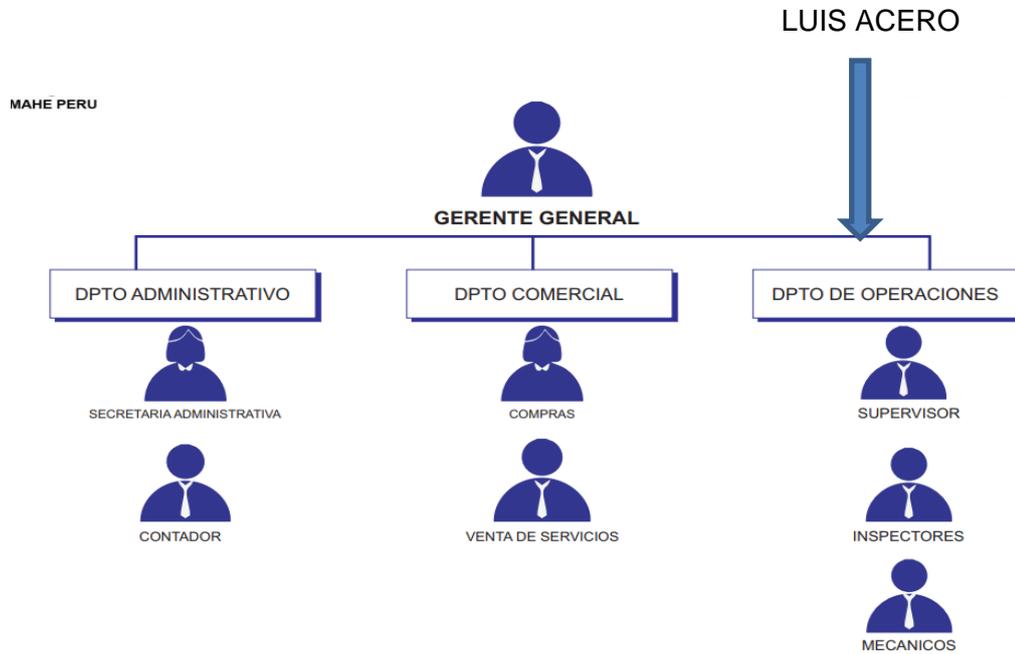
Nuestra empresa MAHE PERU EIRL, desempeña diferentes técnicas de mantenimiento predictivo dando una total confianza en su ejecución, apoyado por personal debidamente calificado, certificado y con años de experiencia, todo esto para la satisfacción de nuestros clientes y a su vez estamos guiados a una mejora continua de excelencia y calidad

1.2.4. Organigrama

Actualmente el diseño de la organización de la empresa MAHE PERU EIRL. es de tipo funcional, ya que están agrupados por especialidades.

Figura 1

Organigrama de la empresa MAHE PERU EIRL.



Fuente: Empresa MAHE PERU EIRL.

1.2.5. Principales Competidores

La empresa MAHE PERU EIRL. ha evaluado el mercado y determino que sus competidores más importantes son:

Tabla 1

Principales competidores.

N°	Nombre del competidor	Logo	Actividad
1	Soltrak SA		Servicio de mantenimiento predictivos, alineamiento laser, análisis vibracional, balanceo dinamico y venta de equipos
2	ADEMINSA		Servicio de mantenimiento predictivos, alineamiento laser, análisis vibrecional, balanceo dinamico y capacitaciones.
3	ESI Perú		Servicio de mantenimiento predictivos y correctivos.
4	Predimas SA		Servicio de mantenimiento predictivos y ensayos no destructivos.
5	Predictivo Total		Servicio de mantenimientos predictivos y correctivos.

Fuente: Empresa MAHE PERU EIRL.

1.2.6. Principales Proveedores

La empresa MAHE PERU EIRL. .ha evaluado el mercado y determino que sus proveedores más importantes son:

Tabla 2

Principales proveedores.

N°	Nombre del proveedor	Logo	Actividad
1	SEDISA SAC		Proveedor de equipos predictivos como analizador de vibraciones, alineamiento laser , balanceo dinámico y termografía.
2	SKF del Perú S.A		Proveedor de equipos predictivos analizador de vibraciones y alineamiento laser.
3	TECNIFAJAS S.A		ventas de equipos de inductor magnético para rodamientos.
4	TECNIFLOW		Venta de alineador laser de poleas y inductor magnético.
5	SOLMINSA SAC		Venta de insumos de ensayos no destructivo.
6	SUDAMERIS PERU SAC		Venta de inductor magnético y rodamientos.

Fuente: Empresa MAHE PERU EIRL.

1.2.7. Principales Clientes

La empresa MAHE PERU EIRL. ha evaluado el mercado y determino que sus clientes más importantes son:

Tabla 3

Principales clientes.

N°	Nombre de los clientes	Logo	Rubro
1	TP terminales del Perú		Ventas de hidrocarburos a nivel nacional. (Diesel , gasolina).
2	Farmagro S.A		Ventas de fertilizantes para la agronomía y herbicidas.
3	NOV Perú		Servicio de perforación de gas y petróleo.
4	Owen Illinois		Sservicio de fabricación de botellas de vidrios para industria cervecera y gaseosas.
5	Pesquera TASA		Servicio de producción de aceite y conservas de atunes.
6	Minera Quenuales		Perforación de minerales de cobre y otros.
7	Minera Antapacay		Perforación de minerales de oro y otros.

Fuente: Empresa MAHE PERU EIRL.

1.2.8. Principales Productos y Servicios que Brinda la Empresa

Tabla 4

Principales Equipos que brinda la empresa.

Equipos	Modelo	Utilidad
Vibracheck 100 marca Idear S.		Sirve para analisis de vibraciones dinamico
Equipo de alineamiento laser marca Fixtur laser		Sirve para alineamiento de ejes.

Fuente: Empresa MAHE PERU EIRL.

Tabla 5

Principales Servicios que brinda la empresa.

Equipos	Modelo	Utilidad
Análisis vibracional		El análisis de vibraciones es una técnica para saber el estado de las máquinas y poder determinar su buena funcionalidad en el tiempo o realizar un correctivo. " En el mantenimiento predictivo me diante análisis de vibraciones se evalua la evolución del comportamiento de las máquinas mediante las vibraciones, de manera que se identifica fallas incipientes a fin de lograr un rendimiento optimo de los equipos
Balaceo Dinámico		La técnica de balaceo consiste en identificar tanto la cantidad de gramos y la posición en que debe colocarse una cantidad de masa para compensar la fuerza ejercida por efecto del desequilibrio
Alineamiento láser		La alineación de ejes por láser es rápido, eficaz y optimiza la vida útil de las maquinarias industriales y sus componentes.

Fuente: Empresa MAHE PERU EIRL.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema General

¿Cómo diseñar y fabricar un módulo para el estudio del análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico orientado a llevar a cabo mejores capacitaciones para los ingenieros y técnicos que se dedican al mantenimiento predictivo en las diversas empresas?

1.3.2. Problemas Específicos

¿Cómo diseñar e implementar un sistema mecánico para la simulación del fenómeno de análisis de vibración, alineamiento laser y balanceo dinámico?

¿Cómo definir la información necesaria para diseñar y fabricar un módulo para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico orientado a llevar a cabo mejores capacitaciones para los ingenieros que se dedican al mantenimiento predictivo en las diversas empresas?

¿Cómo definir cuál es el mejor modulo para para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico orientado a llevar a cabo mejores capacitaciones para los ingenieros que se dedican al mantenimiento predictivo en las diversas empresas?

1.4. Objetivo General

Conseguir el diseño y fabricación de un módulo para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico en un corto plazo, orientado a llevar a cabo mejores capacitaciones para los ingenieros que se dedican al mantenimiento predictivo en las diversas empresas, con las mismas prestaciones que los equipos importados que lideran este mercado y a costos sustancialmente menores que lo hagan accesible para las industrias en nuestro país.

1.4.1. Objetivos Específicos

Diseñar e implementar un sistema mecánico para la simulación del fenómeno de análisis vibracional, alineamiento laser y balanceo dinámico.

Definir la información necesaria para diseñar y fabricar un módulo para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico orientado a llevar a cabo mejores capacitaciones para los ingenieros que se dedican al mantenimiento predictivo en las diversas empresas.

Definir cuál es el mejor modulo para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico orientado a llevar a cabo mejores capacitaciones para los ingenieros y técnicos que se dedican al mantenimiento predictivo en las diversas empresas.

1.5. Justificación

Tiene Justificación teórica, porque se sustenta de manera teórica con base en los antecedentes internacionales y nacionales que respaldan este estudio.

Tiene Justificación académica: Porque el presente trabajo servirá de guía para otros profesionales que estén buscando referencias para el sustento y desarrollo de sus propias investigaciones.

Tiene justificación práctica porque: Los resultados obtenidos en el presente trabajo de suficiencia motivarán a empresas del mismo rubro a replicar la aplicación del módulo para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico que se oriente a poder dar un mejor servicio a los clientes.

1.6. Limitaciones

En el desarrollo del presente trabajo de suficiencia se presentaron las siguientes limitaciones:

- Información desactualizada, hoy en día los equipos tecnológicos avanzan rápidamente con nuevos diseños nueva información más actualizadas nuevos software y variedad de sensores.
- Falta de apoyo por parte de la gerencia para el desarrollo de la investigación ya que estos equipos y módulos predictivos son muy costosos la empresa tiene el temor de su inversión, pero al final se dieron cuenta que es muy necesario estar en la vanguardia de la tecnología y capacitación.
- Sobrecarga laboral de los propios trabajadores que dificultaron el motivo de realizar algún apoyo en el diseño mecánico ya que este módulo implica dedicación y detalles como realizar un dibujo de ingeniería, tablero eléctrico y mecanizados de las piezas para ensamblar el módulo.

1.7. Contextualización de la experiencia profesional

La experiencia profesional se ha logrado en la empresa Mahe Perú E.I.R.L., específicamente me desarrolle en el área de asesoría y post venta en el área de ingeniería predictiva, en la empresa Mahe tengo el cargo de jefe de operaciones, teniendo como funciones manejo del área ingeniería y técnicos de campos, planificar y elaborar los programas de mantenimiento, gestionar todas las actividades operativas relacionadas al mantenimiento predictivo, elaborar informes de cada trabajo realizados a nuestros clientes, garantizar el cumplimiento y la calidad del servicio, aprobar requerimientos de materiales para el proceso de mantenimiento, liderar los equipos de trabajo para la mejora continua, optimizar el uso de herramientas, maquinarias y sistemas empleados en el proceso y analizar los indicadores de mantenimiento.

En el año 2020 me contrata la empresa Mahe Perú para incrementar las ventas y el apoyo de la post venta de sus servicios ,ventas de equipos predictivos, por lo cual me di cuenta de la necesidad de diseñar el módulo de vibraciones, alineamiento laser y balanceo

dinámico porque nuestro clientes nos pedían capacitar a sus técnicos e ingenieros ya que a veces no lograban el objetivo de realizar un buen manejo de los equipos, entonces me propuse a diseñar y fabricar el módulo de estudios y así lograr que sus profesionales logren realizar un buen mantenimiento electromecánico a sus equipos y lograr el objetivo de un buen mantenimiento de sus equipos y tengan buena productividad.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El “mantenimiento Predictivo es la aplicación racional de tecnologías de punta con el objetivo de identificar y monitorear las fallas, para planificar en forma conveniente su reparación, minimizando las pérdidas en la producción por parada de la máquina. Los objetivos del mantenimiento predictivo son los siguientes: Reducir los costos de mantenimiento, minimizar las fallas imprevistas, ejecutar los mantenimientos de los equipos en forma específica y solo cuando es absolutamente necesario y mantener elevada la confiabilidad de los equipos” (Martinez Trinidad, 2017).

Las diversas innovaciones tecnológicas que actualmente surgen, implican que las industrias han debido hacer cambios en sus procesos productivos para ser competitivos. Como resultado de ello, cada vez hay equipos rotatorios que giran a altas velocidades, elaborados materiales más livianos y con alta flexibilidad mecánica. Estos diseños han hecho necesario controlar los incrementos de las fuerzas estáticas y dinámicas en los equipos, lo que produce fatiga y desgaste en sus partes, y aumenta la posibilidad de fallas, por diversas causas y su intensidad depende de estas fuerzas, de las cuales algunas se pueden anticipar, pero otras son de carácter imprevisto (Benítez Cortés, 2013).

Las tecnología empleada por mantenimiento predictivo es la siguiente: MONITOREO DE VIBRACIONES Y SEÑALES DE MUY ALTA FRECUENCIA Sí hay algún parámetro fuera de especificación entonces es una falla que causará el incremento del nivel vibracional, esta falla puede ser identificada por su comportamiento dinámico (amplitud, frecuencia y ángulo de fase), por ejemplo; un engranaje de dientes rectos excéntrico produce vibraciones de las siguientes características, alta vibración en el sentido radial en la línea que une los centros de los engranajes, a las siguientes frecuencias:

- 1 x RPM: velocidad de giro del engranaje excéntrico.

- GMF: # de dientes x RPM del engranaje excéntrico. Los impactos mecánicos repetitivos y transcientes, generan picos de energía que excitan las frecuencias naturales de los elementos que son golpeados, los impactos son a baja frecuencia y las frecuencias naturales son a muy alta frecuencia y se producen con la fricción entre dos superficies.

La medición a muy alta frecuencia es utilizada para detectar defectos incipientes en; rodamientos, engranajes, ejes y cojinetes por rozamiento al fallar la lubricación, cavitación, solturas, etc.

El mantenimiento de una máquina depende de los niveles máximos tolerables de vibración espectral o de señales de muy alta frecuencia, establecidos sobre la base de estándares internacionales de máquinas similares o que son calculados en forma estadística en base a los valores históricos tomados en dicha planta.

El Alineamiento láser es una técnica que consiste en el posicionamiento correcto de dos o más ejes que están dispuestos en serie o en paralelo; es decir, el movimiento centrado de cada uno depende del o de los otros para el adecuado funcionamiento de la máquina. A través de un emisor de rayo láser, un prisma que recibe el rayo y un detector digital, el operador obtiene la información correcta para la alineación de los ejes. El detector electrónico permite el ingreso de las medidas de los ejes y detecta la inclinación de los mismos.

En cuanto al El Balanceo Dinámico es una técnica que permite corregir fallas de desbalanceo en maquinarias, reduciendo las vibraciones que pueden provocar una falla catastrófica o que se generan fuerzas centrífugas perjudiciales para el sistema que interactúa con el rotor.

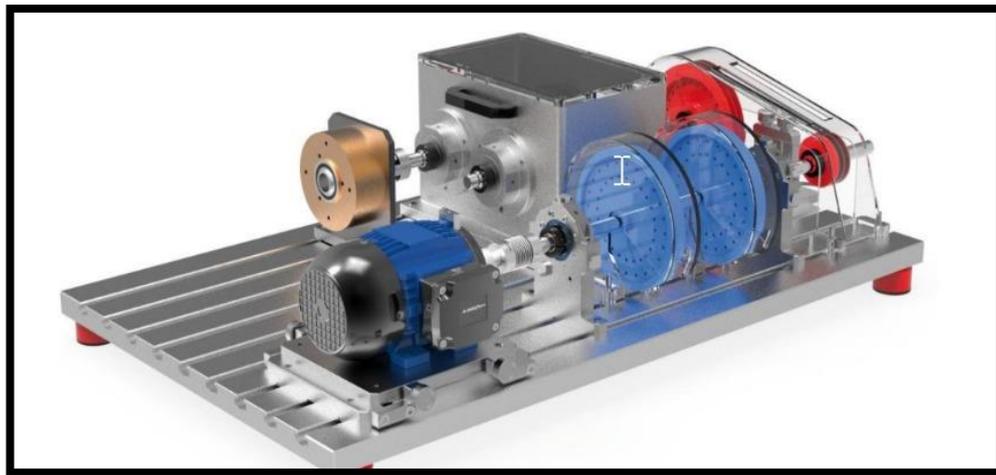
El presente trabajo se sustenta en el diseño del módulo de pruebas, y ante eso sostiene que, en el año 2008, el profesor Robert Cooper en colaboración con estudiantes

de Ingeniería Mecánica de la universidad Autónoma de Occidente, realizó la adecuación y construcción de un Banco de Pruebas para desbalanceo. El equipo constaba de un eje apoyado entre dos rodamientos con dos discos para ubicar las masas de prueba y la transmisión se realizaba por medio de bandas dirigidas por un motor eléctrico con una velocidad de rotación fija. La señal de vibración se adquiría por medio de dos sensores de proximidad y un tercer sensor intentó ser adaptado con el propósito de captar la señal de fase, la cual es indispensable para realizar balanceo en dos planos. Esta adaptación no se logró y como consecuencia, el balanceo del sistema se realizaba mediante prueba y error. El equipo salió de operación en el 2013.

Comercialmente se pueden encontrar diversos módulos de pruebas para velocidades críticas, el costo aproximado de estos módulos oscila entre 8,000 y 20,000 dólares americanos.

Figura 2

Módulo de estudios vibraciones Pruftechnik.



2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Generalidades: Vibración Mecánica.

Las máquinas y estructuras vibran en respuesta a una o más fuerzas pulsantes que a menudo son llamadas fuerzas excitadoras. La magnitud de la vibración no solamente depende de la fuerza sino también de las propiedades del sistema, el análisis vibracional aplica técnicas de eliminación porque hay numerosas fallas que producen vibraciones de características similares.

La gran mayoría de empresas del mundo han impulsado el Análisis Vibracional en sus plantas debido al ahorro que ha logrado en los gastos de mantenimiento, al ser parte muy importante del Mantenimiento Predictivo.

2.2.2. Características de la Vibración

Las características fundamentales de la vibración son; Frecuencia, Amplitud y Fase:

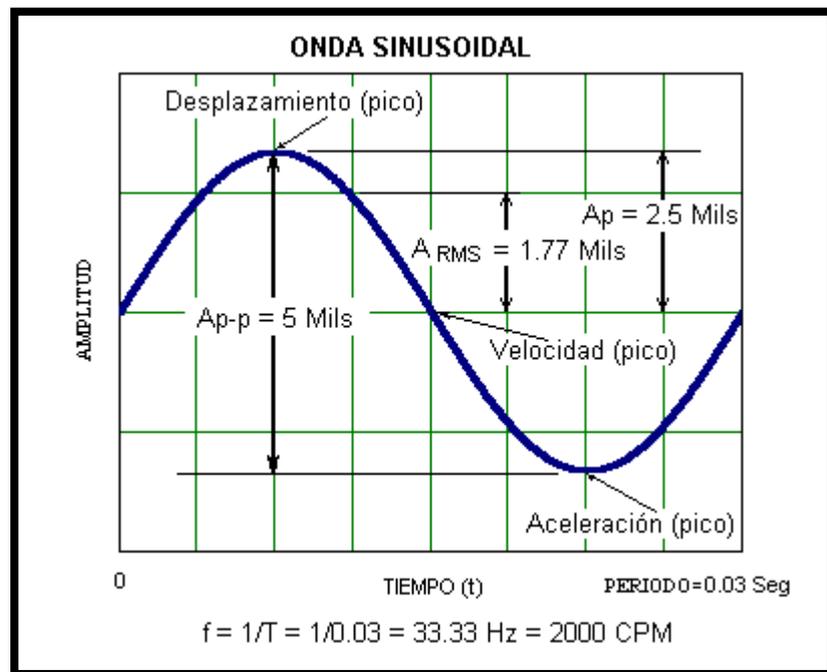
- Frecuencia ($f = 1/T$); Es el número de ciclos en un determinado período de tiempo, se expresa en; Ciclos por segundo (Hertz), Ciclos por minuto (CPM) o múltiplos de la velocidad de operación de la máquina (Órdenes). Período (T); Es el tiempo requerido para completar un ciclo de vibración.
- Amplitud (A); Es el desplazamiento máximo de la vibración, puede ser expresada en Múltiples formas, tales como:
 - Pico: Se mide desde el punto neutral hasta la cresta. (A_p)
 - Pico - Pico: Se mide desde la cresta inferior hasta la superior. (A_{p-p})
 - RMS: Raíz cuadrática media, ($A_{RMS} = 0.707 A_p$) solamente para una onda sinusoidal.

- Angulo de Fase de la Vibración (ϕ); Es la posición angular de un objeto en cualquier Instante con respecto a una referencia de la misma frecuencia (Grados).

En las Figuras 3 y 4, se observa que la aceleración y el desplazamiento están desfasados en 180 grados y la velocidad está desfasada de la aceleración y desplazamiento en 90 grados.

Figura 3

Onda Sinusoidal.



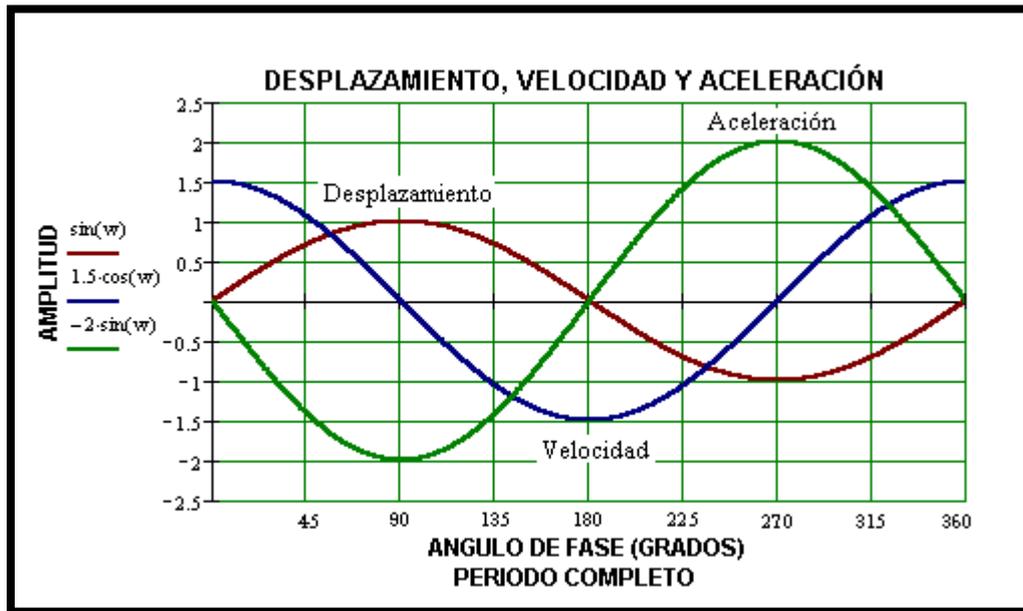
2.2.3. Medición de las Vibraciones

- **Desplazamiento;** es la medida dominante a bajas frecuencias, inferiores a 600 CPM y está relacionado a los esfuerzos de flexión de sus elementos.
- **Velocidad;** Es la medida dominante en el rango de frecuencias de 600 CPM hasta 60,000 CPM, está relacionado a la fatiga del material.

- **Aceleración;** Es la medida dominante a altas frecuencias, mayores que 60,000 CPM y está relacionado a las fuerzas presentes en la máquina.

Figura 4

Relaciones entre el Desplazamiento, Velocidad y Aceleración.



2.2.4. Conversión entre medidas

El gráfico de la figura 4 muestra la relación que hay entre el desplazamiento, velocidad y aceleración. Los valores pico pueden ser relacionados con las siguientes fórmulas:

Ecuación 1: Ecuación de velocidad.

$$\text{Velocidad} = 2\pi Fd$$

Ecuación 2: *Ecuación de aceleración.*

$$\text{Aceleración} = 2\pi fV = (2\pi f)^2 D$$

Dónde:

- D = Desplazamiento pico (Mils)
- f = Frecuencia (CPS)
- V = Velocidad pico (Pulg/seg)
- A = Aceleración pico (Pulg/seg²) (1 g = 386.1 Pulg/seg²)

2.2.5. Adquisición de Datos

Los datos de vibración de una máquina se obtienen por medio de un transductor o pick up que convierte la vibración mecánica en una señal eléctrica; la calidad de la señal depende del rango de trabajo del transductor, de la forma de montaje en la máquina, de la selección del punto de toma y de las limitaciones del instrumento.

2.2.6. Selección del Tipo de Medida

Tres medidas de vibración están disponibles; desplazamiento, velocidad y aceleración; lo ideal sería que el transductor proporcione directamente la medida seleccionada pero desgraciadamente las limitaciones del transductor no siempre permiten una medida directa de vibración en la medida seleccionada.

La medida se selecciona en base a las frecuencias de vibración presentes en la máquina, el tipo de análisis a ser efectuado y a la información que se desea obtener.

- El Desplazamiento absoluto, se usa para bajas frecuencias (de 0 a 1,200 CPM) y se relaciona a los esfuerzos, se mide con un acelerómetro y la señal es doblemente integrada para obtener desplazamiento.

- El Desplazamiento relativo, de un eje puede ser medido con un captador de proximidad instalado en la caja de cojinetes.
- La Velocidad, se usa para el monitoreo de máquinas en el rango de frecuencias (de 600 a 60,000 CPM) y se relaciona con la fatiga, se mide directamente con un pick up de velocidad o con un acelerómetro donde la señal es integrada para obtener velocidad.
- La Aceleración, es la medida óptima para frecuencias superiores a 60,000 CPM y se relaciona con la fuerza.

2.2.7. Los Transductores de Vibración

Los transductores de vibración tienen una sensibilidad (constante de respuesta en mV/mil, mV/[pulg/seg] o mV/g) que convierte las vibraciones mecánicas en señales eléctricas, para ser procesadas y acondicionadas por los colectores o analizadores de vibración.

La sensibilidad del transductor de vibración es constante en un rango de frecuencias, fuera de ella se debe aplicar un factor de corrección. Es preferible trabajar en el rango de frecuencias en la cual la sensibilidad es constante.

2.2.8. Transductores de Velocidad (Tipo Piezoeléctrico)

Estos transductores tienen una señal de salida proporcional a la velocidad pero no tiene partes móviles internas, las vibraciones de las máquinas producen esfuerzos en los discos piezoeléctricos del sensor y estos generan una pequeña señal eléctrica que es amplificada para poder ser medida, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Esquema del Transductor de Velocidad Piezoeléctrico.

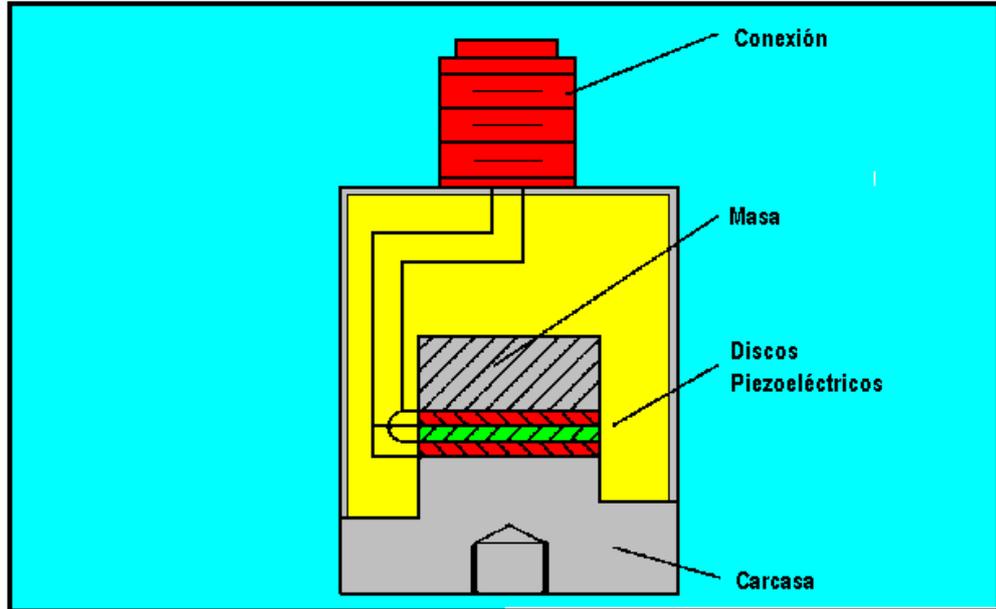
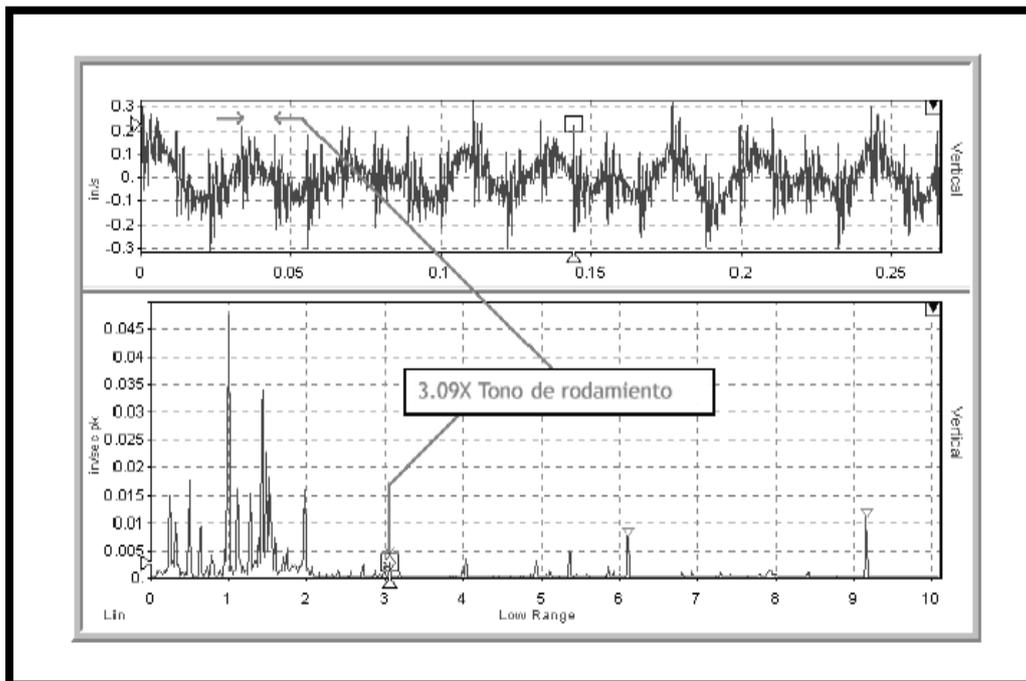


Figura 6

Espectro vibracional o señal con el transductor.



2.3. Generalidades del Desalineamiento y Alineamiento Laser

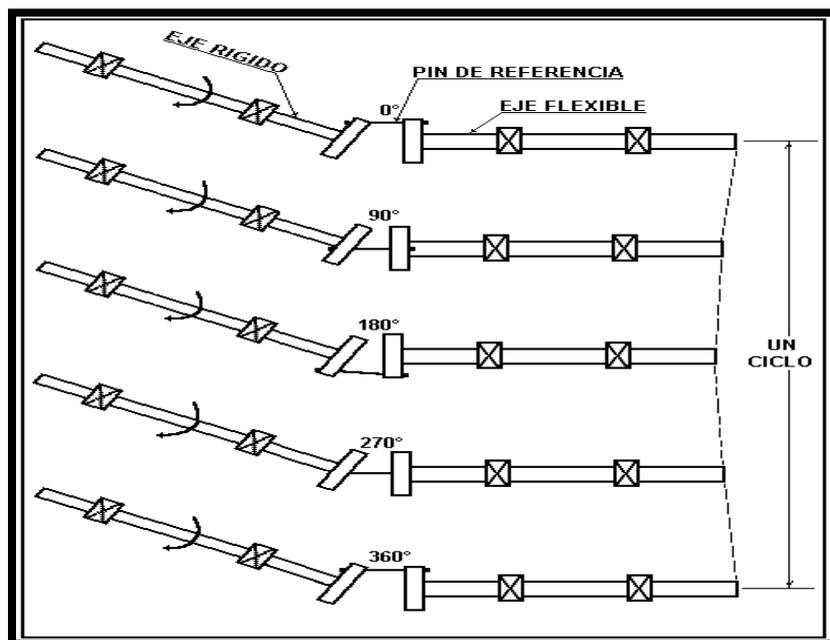
La falta de alineamiento entre dos ejes acoplados causa fuerzas en los cojinetes que dependen de la precarga rotativa y de la rigidez del eje; Esta falla no es fácil de solucionar, porque para alinear correctamente un eje con otro se deben conocer los siguientes factores; dilatación térmica de los pedestales, tipos de cojinetes, especificaciones técnicas del acoplamiento y las limitaciones físicas del equipo para alinear.

2.3.1. Fundamentos del Desalineamiento

Cuando hay desalineamiento angular, la vibración axial tiene una frecuencia igual a 1 RPM Figura 7, considerando; un eje rígido y un pin del acoplamiento como referencia, observamos que; por cada giro del eje rígido, el eje flexible tiene un ciclo de movimiento axial. El eje doblado o deflexionado vibra en forma similar que el desalineamiento angular, ambas generan vibraciones axiales importantes.

Figura 7

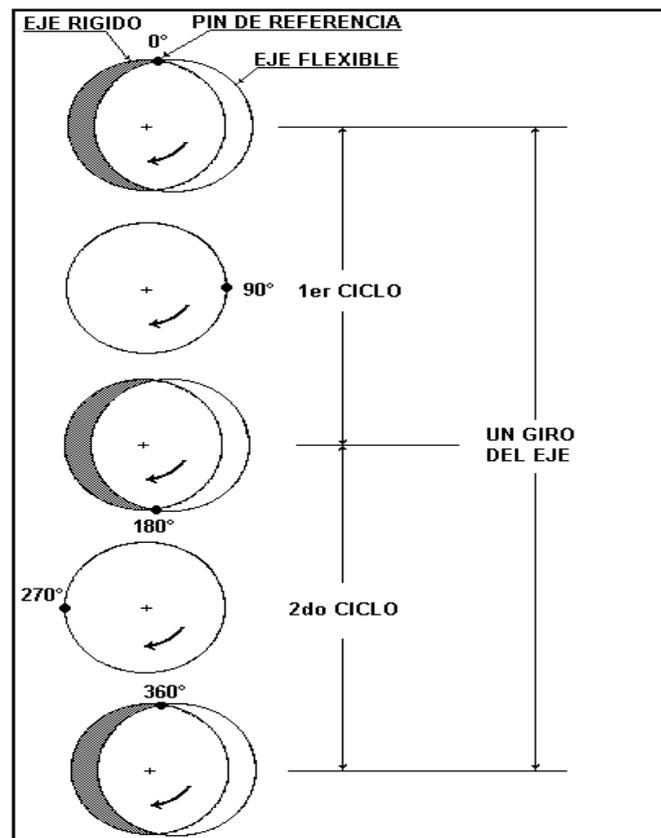
Frecuencia de la vibración axial a 1 RPM por desalineamiento angular.



Cuando hay desalineamiento paralelo, la vibración radial tiene una frecuencia igual a 2 RPM Figura 8, considerando; uno de los ejes rígido y un pin del acoplamiento como referencia, observamos que; por cada giro del eje rígido, el eje flexible tiene dos ciclos de movimiento radial, la órbita generada es del tipo banana y los ángulos de fase de las vibraciones radiales a 1 RPM en los apoyos cercanos al acoplamiento son 180°, si el desalineamiento es severo se producen también vibraciones a 3 RPM. Las vibraciones radiales causadas por el desalineamiento, predominan en la dirección del desalineamiento, si el desalineamiento paralelo es vertical, entonces la vibración producida será en la dirección vertical.

Figura 8

Frecuencia de la vibración radial a 2 RPM por desalineamiento paralelo.



Hay muchas razones para que exista una condición de desalineamiento, tales como; falla en la cimentación, esfuerzos en las tuberías, variaciones de temperaturas entre pedestales y falta de torque en las uniones empernadas de los apoyos, estas condiciones deberían ser verificadas para asegurar un alineamiento satisfactorio. Esta vibración indeseable causa desgaste; en los engranajes, en el acoplamiento y en los cojinetes.

Antes de proceder a alinear se debe observar lo siguiente:

- Desacoplar e inspeccionar: cople, pernos, tuercas, bocinas, cubos y cambiar los que se encuentran deteriorados.
- Verificar la perpendicularidad de los cubos con respecto al eje; No deben ser mayores que 0.002 pulgadas TIR, corregir si fuera necesario.
- Verificar la redondez de los cubos, principalmente en el área de medición (si se utilizan diales comparadores), no deben ser mayores que 0.002 pulgadas TIR, corregir si fuera necesario.
- Verificar los juegos axiales tanto de la máquina motriz como de la máquina accionada, corregir si fuera necesario, comparar con el juego axial que puede absorber el acoplamiento y ajustar la distancia entre los cubos para evitar los esfuerzos axiales.
- Instalar un dial en los sentidos horizontal y vertical del cubo (extremo del lado del cople) de la máquina accionada y ajustar los pernos de las tuberías, si el dial varía en 0.001 pulgadas hay problemas de esfuerzos en las tuberías que deben ser eliminados.

Cuando las lecturas de vibración indican una condición de desalineamiento y al verificar los ejes se comprueban que no hay desalineamiento entonces es posible que la

máquina está siendo distorsionada y los cojinetes desalineados por montaje inapropiado de la máquina.

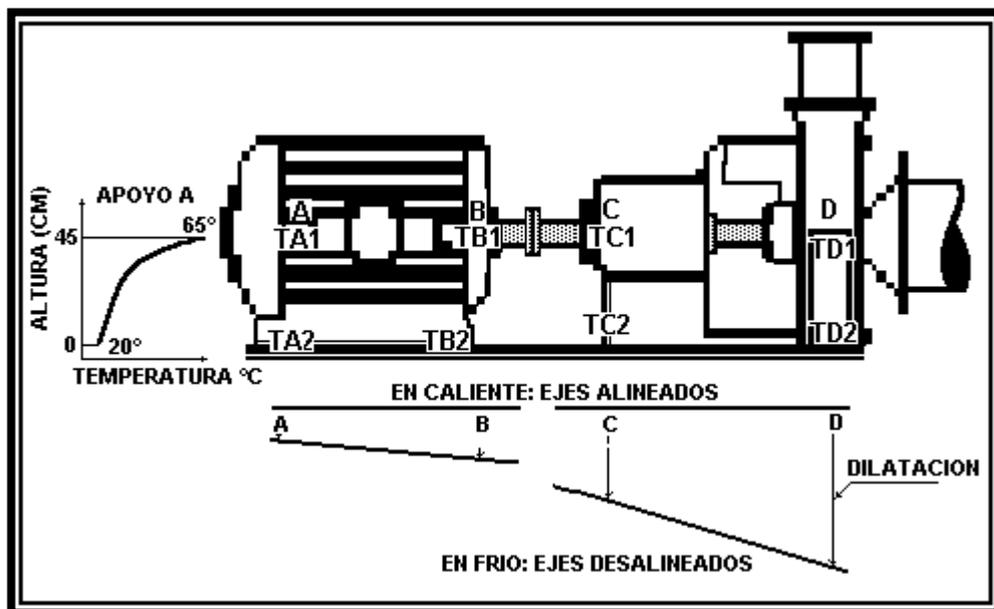
El eje deflexionado también presenta una segunda armónica (2 RPM) en el espectro de frecuencias porque causa desalineamiento y estará en fase con la frecuencia fundamental (1 RPM). Si se observa desfase o cambio del ángulo de fase, entonces; hay soltura y no hay deflexión.

Las patas cojas también generan altos niveles de vibración a 1 RPM y 2 RPM, que fácilmente se confunden con el desalineamiento y la distorsión, la mejor manera de identificar el problema es aflojando y ajustando las tuercas de los apoyos y observando continuamente los niveles de vibración.

En la Figura 9 se podrá apreciar como es el montaje de un alineamiento motor – bomba con compensación térmica.

Figura 9

Alineamiento en frío con compensación térmica por dilatación de sus apoyos.



2.3.2. Métodos de Alineamiento

Figura 10

Métodos de alineamiento.

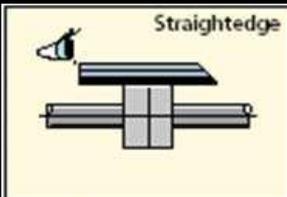
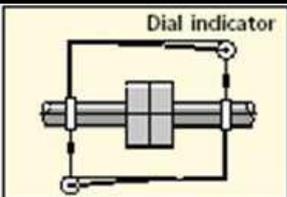
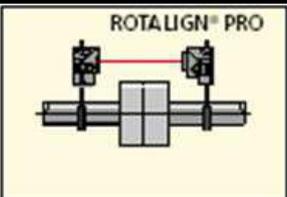
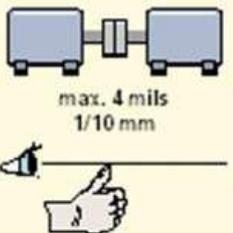
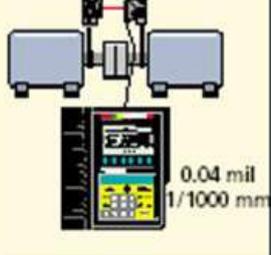
Método	 Straightedge	 Dial indicator	 ROTALIGN® PRO
Entrenamiento requerido por el operador	 The Wizard Years of experience	 The Specialist Weeks to months	 Anyone A few hours
Resolución (Precisión) del alineamiento	 max. 4 mils 1/10 mm	 0.4 mil 1/100 mm	 0.04 mil 1/1000 mm

Figura 11

Beneficios de alineamiento laser.



2.4. Balanceo Dinámico

El desbalance es una condición que existe en un rotor cuando una fuerza o movimiento vibratorio es transmitido a sus cojinetes como resultado de las fuerzas centrífugas, esta fuerza dependerá de la velocidad de rotación y de la cantidad de desbalance.

Ecuación 3: Ecuación de movimiento vibratorio

Desbalance:

$$\text{Fuerza Centrífuga (Kg)} = 111.786 \times 10^{-10} (\text{m.g.R}) (\text{RPM})^2$$

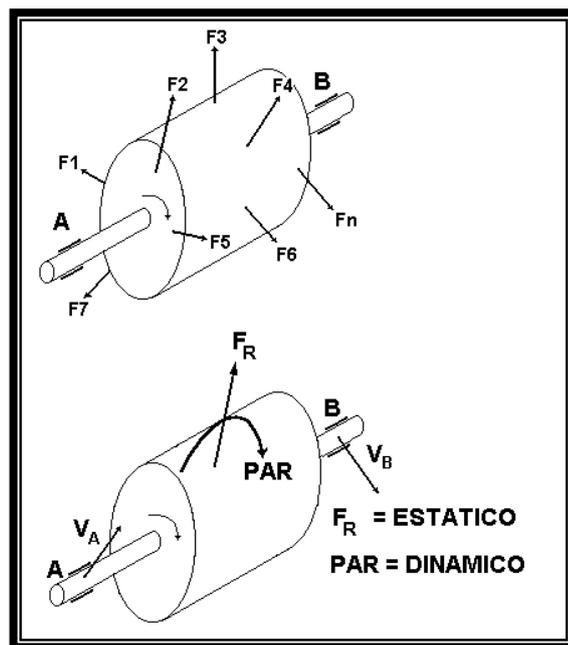
$$F = 111.786 \times 10^{-10} W.R (\text{RPM})^2$$

$m g = W = \text{Peso en gramos (gr)}$.

$R = \text{Radio (cm)}$

Figura 12

Las Fuerzas por desbalance de un rotor son equivalentes a una fuerza estática y a un par dinámico.



La cantidad de desbalance se expresa con el producto $m R$ (gr masa - cm), puede convertirse a otro radio variando la masa de acuerdo a la siguiente ecuación.

Ecuación 4: *Ecuación de desbalance.*

$$\text{Desbalance} = m_1 R_1 = m_2 R_2 = \dots = m_1 R_1$$

En las ecuaciones 3 y 4 se observa que la fuerza centrífuga es función del cuadrado de la velocidad de rotación del rotor y directamente proporcional al desbalance.

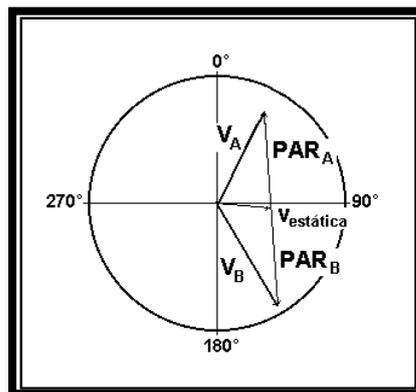
La sumatoria de todas las fuerzas radiales producto de una distribución desigual del peso del rotor con respecto a su centro de rotación es igual a una fuerza resultante ($F_R =$ Estático) y a un momento (par dinámico). La fuerza estática (F_R) se transmite a los apoyos A y B, en la misma dirección y sentido, el par dinámico se transmite también a los apoyos A y B con fuerzas de igual magnitud pero de sentido contrario. La sumatoria de las dos fuerzas por efecto estático y por efecto dinámico tanto en el apoyo A como en el B, causan vibraciones, tal como se indica en la Figura 13.

Al graficar en un diagrama polar las vibraciones V_A y V_B podemos descomponer en:

- Una vibración (V estática); por efecto de la fuerza estática F_R .
- Dos vibraciones (PAR_A y PAR_B), por efecto del par dinámico Figura 14.

Figura 13

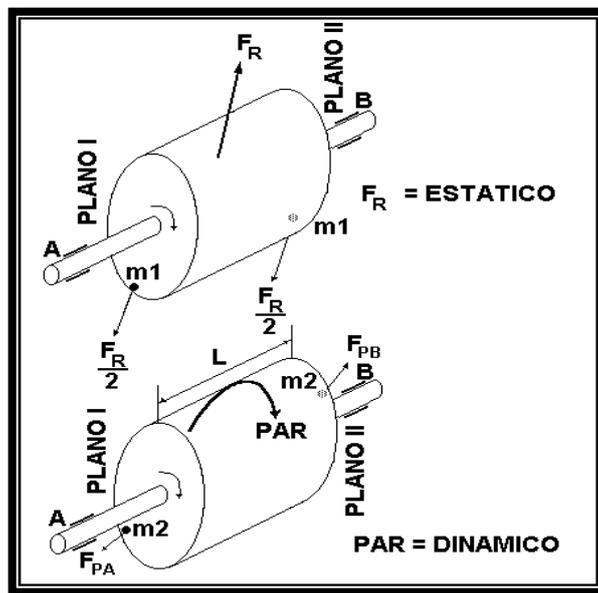
Descomposición de las vibraciones en los apoyos A y B en una vibración estática y un par dinámico.



En este gráfico polar, considerando las magnitudes de las vibraciones estática y dinámica, podemos determinar qué tipo de desbalance es el más importante; si el par dinámico es despreciable entonces el desbalance estático es el más importante y el rotor puede ser balanceado utilizando el procedimiento de balanceo para un solo plano y si ambos son importantes entonces el rotor debería ser balanceado en dos planos.

Figura 14

Eliminación de las fuerzas estática y dinámica con adición de masas.



El desbalance estático puede ser eliminado instalando dos pesos de corrección en los planos I y II (son iguales si están ubicadas a un mismo radio), tal como se indica en la figura 2.11., que ambas generan una fuerza centrífuga igual y opuesta a la fuerza estática (F_R). El desbalance dinámico puede ser eliminado instalando dos masas ubicadas una de otra a 180° en los planos I y II, que producen un momento o par opuesto al par dinámico.

2.5. Especificaciones Técnicas del Módulo

El presente proyecto está constituido por un sistema mecánico rotativo construido para realizar pruebas de severidad de vibración, desbalance y desalineamiento.

El sistema mecánico compone el pilar fundamental de la generación del fenómeno a analizar.

De acuerdo a las características que el sistema debe cumplir, se selecciona el material más conveniente por costo, disponibilidad, rigidez, resistencia al ambiente, se utilizó el Acero 1020 y Acero A36.

El eje en el que irán montados los dos discos de aluminio para realizar el desbalance y balancear adecuadamente cómo se comporta la vibración.

Son discos que están perforados y distribuidos en partes iguales para colocar pesos de pruebas y verificar como se puede corregir o equilibrar las masas para obtener un buen balanceo dinámico y apreciar un buen comportamiento en las vibraciones.

El disco de masas está diseñado con la finalidad de simular el desbalanceo.

El montaje del motor y el eje esta acoplado con un acoplamiento mecánico consecuentemente apoyado en dos chumaceras, en el tramo intermedio que está montado también el disco de aluminio o masas.

Siguiendo la metodología anteriormente mostrada en el análisis del eje principal se determina los factores de seguridad en los puntos críticos: como los discos para colocar las masas.

Se utilizaron chumaceras sobre una base de Acero A36, para obtener mejor estabilidad, el eje principal es de un Acero 1020 y los discos de aluminio de un material que es Duraluminio.

El banco de pruebas diseñado y fabricado, se ilustra en la Figura 15.

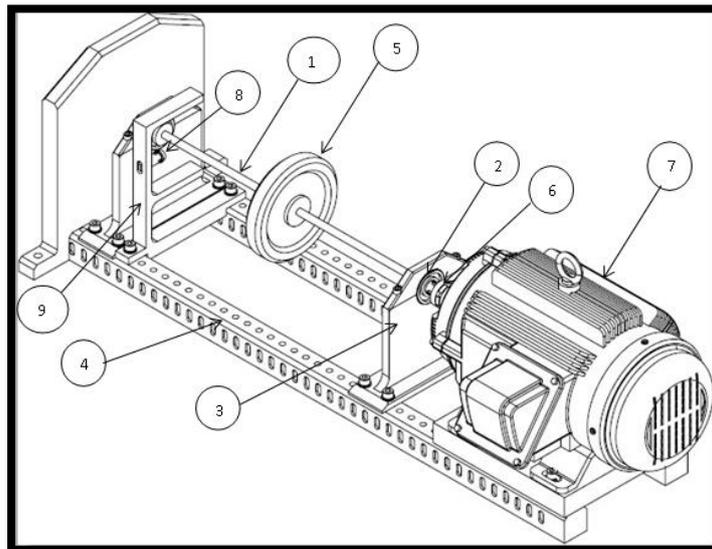
Figura 15

Banco de Prueba.



Figura 16

Partes que componen el módulo.



Como se muestra en la Figura 16, el módulo consta de un eje de sección transversal constante (1) soportado en cada uno de sus extremos por rodamientos (2), cuyos alojamientos (3) se encuentran anclados a la estructura base (4). Entre los alojamientos se encuentra dos disco (5) fijado al eje que lo hace girar solidariamente; el eje es impulsado mediante un acoplamiento directo (6) por un motor (7) ajustado a la estructura base y el movimiento del motor es gobernado por un variador de frecuencia ubicado en la parte inferior de la estructura.

Junto al alojamiento del rodamiento ubicado al extremo opuesto al motor, se encuentra un sensor de proximidad (8) ajustado en su respectiva base (9) sujeta a la estructura principal. El sensor tiene como propósito la adquisición de datos del comportamiento vibratorio del eje. La señal de vibración es recibida por la tarjeta de adquisición de datos para ser procesada y visualizada en un computador.

Características. Las características del banco son especificadas en la Tabla 6.

Tabla 6

Componentes del Banco de Velocidad Crítica y Desbalance.

Componente	Característica
Eje	Material: Acero 1020 , Longitud: 540 mm Sección transversal circunferencial , diámetro de 25.4 mm
Rodamientos	SKF Referencia: P205 Rodamientos oscilantes de bolas para eje de 1 pulgada
Disco	Masa: 2,000 kg MATERIAL: Duraluminio.
Acople	NSPT Acople flexible de quijada de goma BL 075
Motor	WEG de 0.5 HP 3600 RPM
Variador de frecuencia	WEG de 0.5 HP MODELO : CFW100
Sensores de proximidad	SHINKAWA Referencia: VK202
Programa para tratamiento de datos de vibración	SCILAB Versión: 5.3.3 Balanceo y Velocidad Crítica

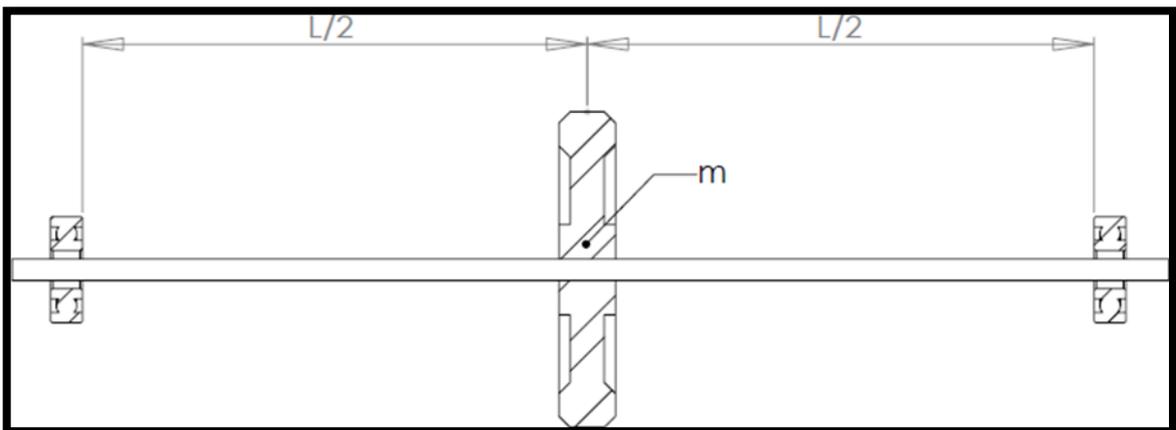
Fuente: Montoya Echeverry, Nelson Javier y Cardona García, Luis Alfonso. (2014).

2.5.1. Cálculo de Velocidad Crítica del Eje

Cálculo analítico de la velocidad crítica. Para calcular la velocidad crítica, se utiliza la ecuación para eje soportado entre apoyos cortos, con una masa rotando en el centro.

Figura 17

Eje soportado entre dos apoyos con masa central.



Ecuación 5: *Ecuación de velocidad crítica.*

$$N_c = \frac{\sqrt{48 \cdot E \cdot I / m \cdot L^3}}{2 \cdot \pi}$$

De donde

Nc: Velocidad crítica

E: Módulo de elasticidad

I: Momento de inercia

d: Diámetro del eje

m: Masa: Longitud entre apoyo

$$E = 203 \text{ GPa}$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$d = 9,53 \text{ mm}$$

$$m = 2,440 \text{ kg}$$

$$L = 0.435 \text{ m}$$

$$N_c = 1348,079 \text{ rpm}$$

Análisis modal en SolidWorks. La velocidad crítica derivada de los cálculos, es comparada con el resultado obtenido al realizar un modelo utilizando un software de análisis por elementos finitos, en este caso SolidWorks, con dos propósitos: realizar validación del cálculo analítico de la primera velocidad crítica y encontrar el valor de la segunda. Esto para limitar la operación del banco a valores inferiores a ésta.

Tabla 7

Parámetros para el análisis modal.

Parámetros	Descripción
Material del eje	Acero 1020
Tipo de malla	Malla sólida
Número de frecuencias	3
Carga Aplicada	23.54 N
Longitud libre de barra	435 mm
Tipo de elemento finito	Tetraédricos
Número total de nodos	17,439
Número total de elemen	10,294
Tipo de interpolación	Cuadrática

Fuente: Montoya Echeverry, Nelson Javier y Cardona García, Luis Alfonso. (2014).

Figura 19

Forma modal 1.

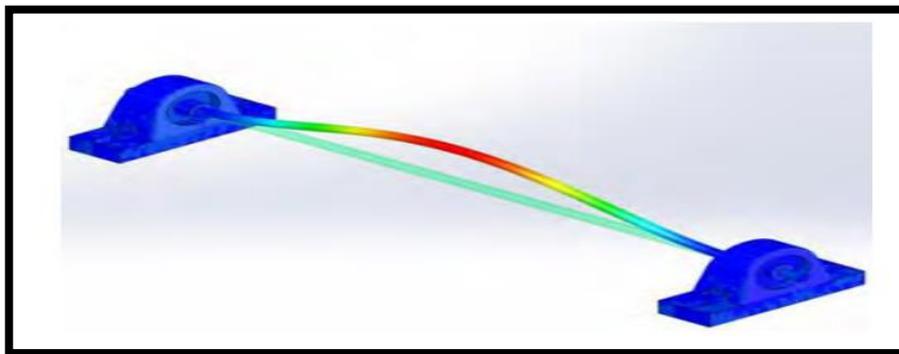


Figura 20

Forma modal 2.

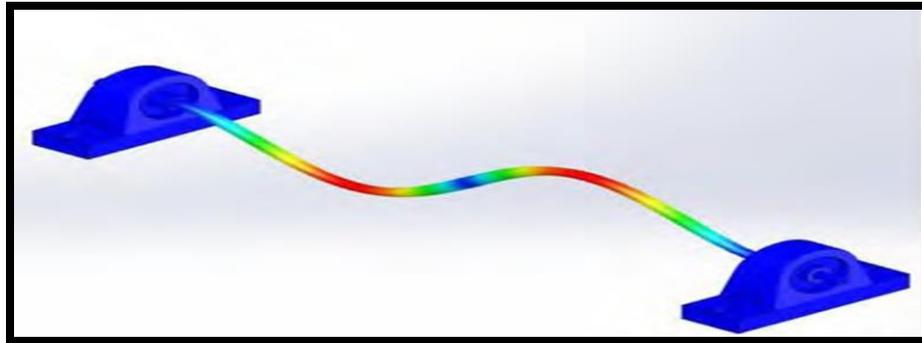


Tabla 8

Lista de modos.

Número de modos	Velocidad (rpm)
1	1,398.5
2	3,840.0
3	7,486.7

Fuente: Montoya Echeverry, Nelson Javier y Cardona García, Luis Alfonso. (2014).

Los valores de velocidad hallados mediante cálculos y con el software solidWorks, tienen una diferencia porcentual interior a 4%, corroborando que la frecuencia de velocidad crítica se encuentra en los valores encontrados. Con respecto a los modos vibración reportamos con el software solidWorks, los modos 2 y 3 se encuentran por fuera del rango de operación del Banco de Pruebas debido a que la velocidad máxima que el Banco alcanzara será de 2400 rpm.

CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

3.1. Nacimiento de la Idea

Se comenzó a trabajar en el área de Operaciones de Ingeniería Predictiva de MAHE en abril del 2020, con la consigna de incrementar ventas de equipos predictivos, ventas de servicios predictivos como análisis de vibraciones, alineamiento laser y balanceo, y también servicios de mantenimiento predictivos.

Durante el desarrollo de estas actividades se evidencio la necesidad de contar con un módulo de análisis vibracional. Se había observado que la competencia que contaba con un módulo de estos capacitaba al personal técnico e ingenieros de los clientes con muy buenos resultados en el servicio.

El alto costo de este equipo en el mercado condujo a proponer al gerente general Carlos Celis; el diseño e implementación de un módulo de estudios vibracional, alineamiento y balanceo dinámico a un costo mucho menor que el original, con el objetivo de incrementar ventas y servicios.

3.2. Objetivos

Diseñar e implementar un módulo de estudios vibracional, alineamiento y balanceo dinámico con alta fiabilidad y económico, como alternativa frente a los altos costos de estos módulos en el mercado local, en un plazo alcanzable.

3.3. Estrategia y Metodología

Se estudiaron los módulos de estudios vibracional, alineamiento y balanceo dinámico disponibles en el mercado el de Pruftechnik y el de SKF. Se evaluaron los

mecanismos que disponen en sus módulos para realizar el análisis vibracional, el alineamiento y balanceo dinámico.

En base a lo anterior se plantearon los mecanismos más adecuados de acuerdo a los recursos disponibles para conseguir los objetivos propuestos.

3.4. El Desarrollo del Módulo Vibracional

La gerencia acepto el proyecto; suministró presupuesto y apoyo del personal cadista para el levantamiento de los planos en SolidWorks. Con el ingeniero cadista se diseñó el modulo, para fabricar las piezas del módulo vibracional, los planos salieron bien y empezamos con la fabricación de las piezas y las compras electrónica.

Figura 21

Módulo de armado final.

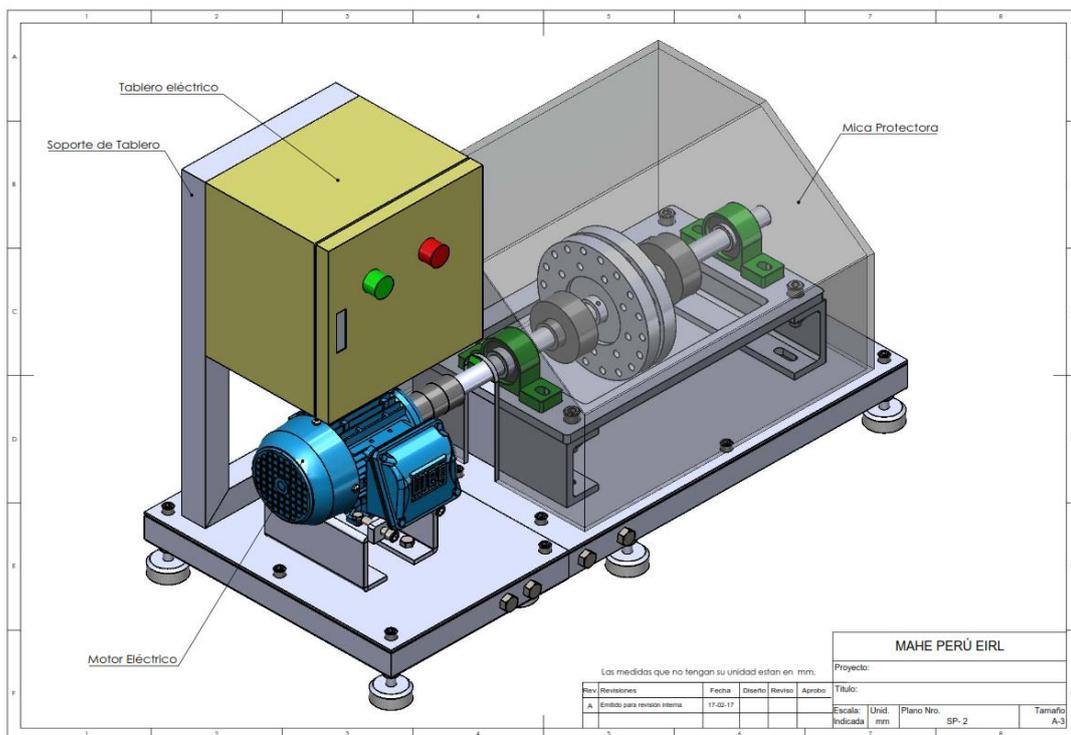


Figura 22

Inicio de ensamble de módulo.

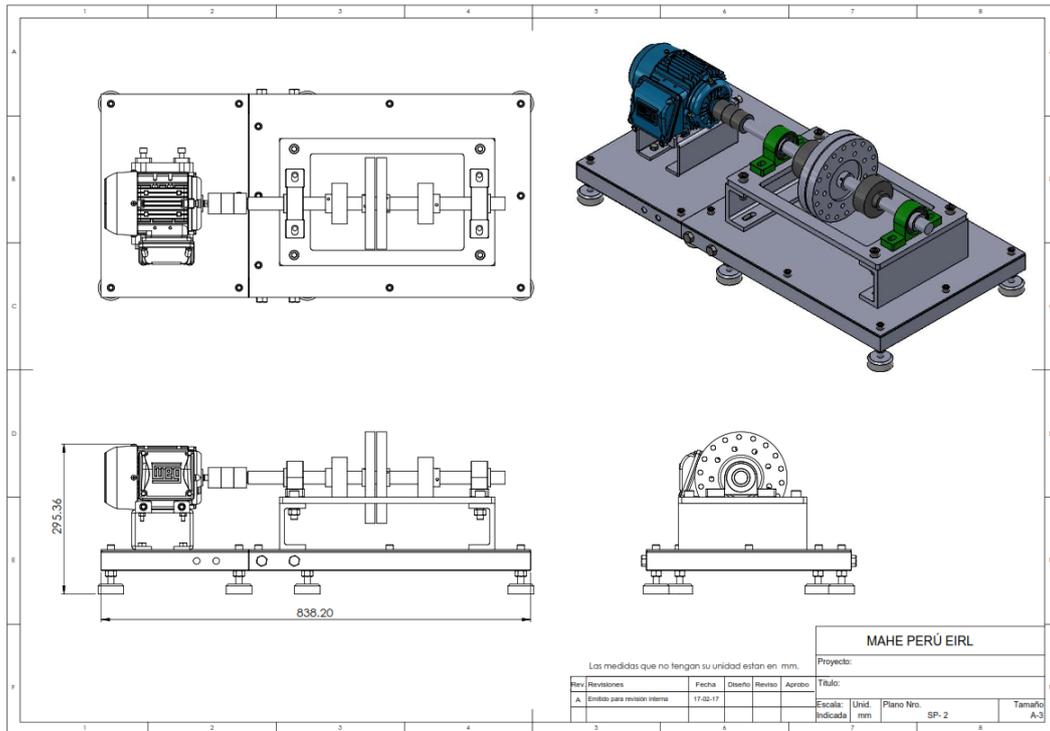


Figura 23

Eje principal.

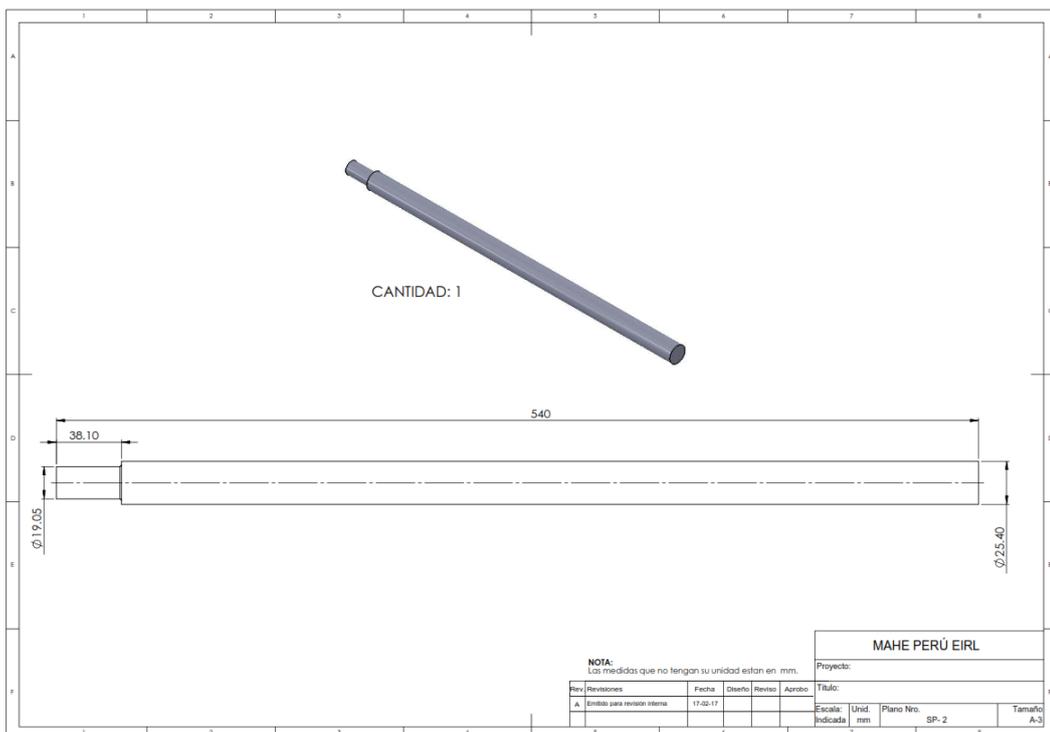


Figura 24

Plataforma secundaria para alojamiento de chumacera y eje.

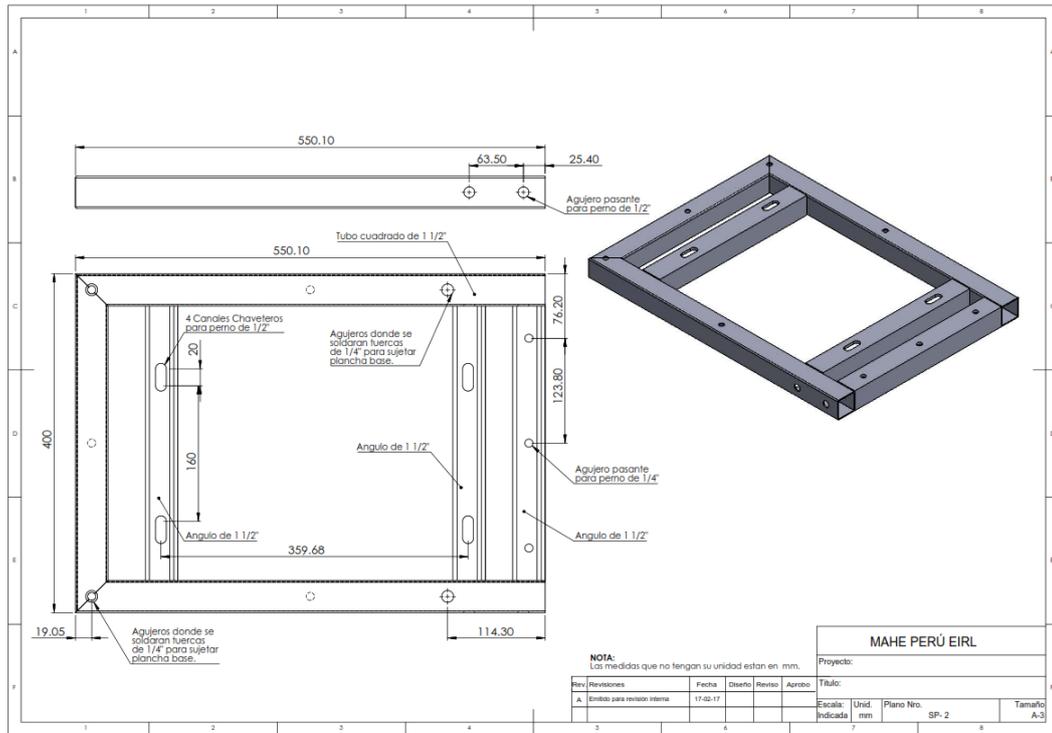


Figura 25

Discos de duraluminio para simulación de desbalance.

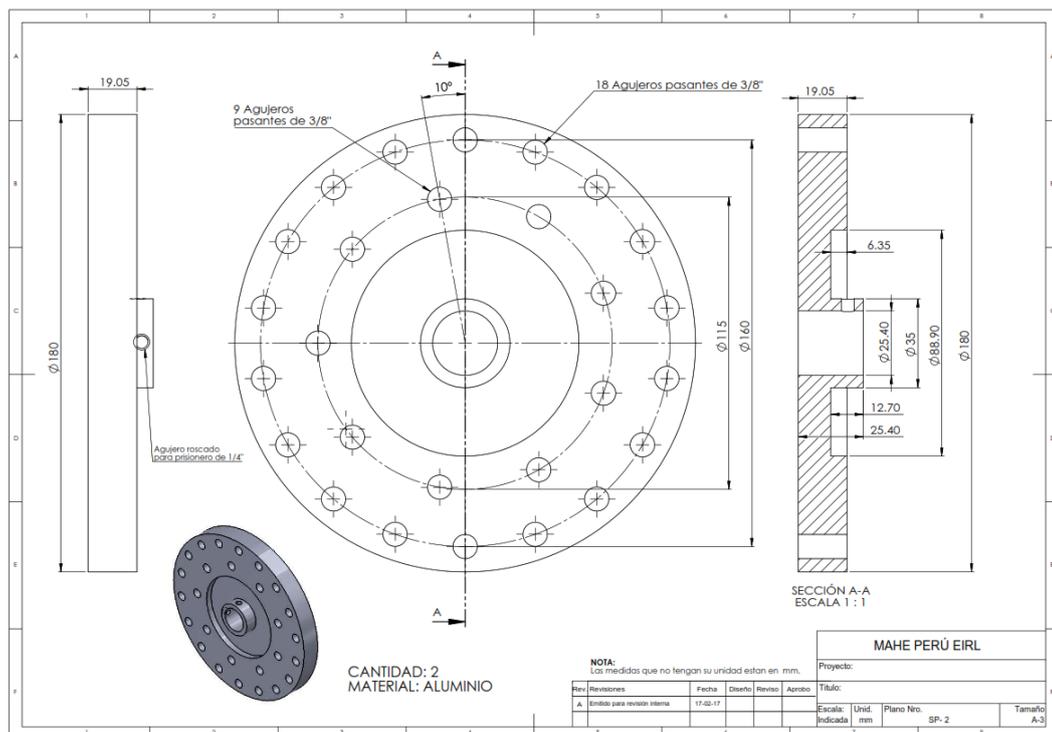
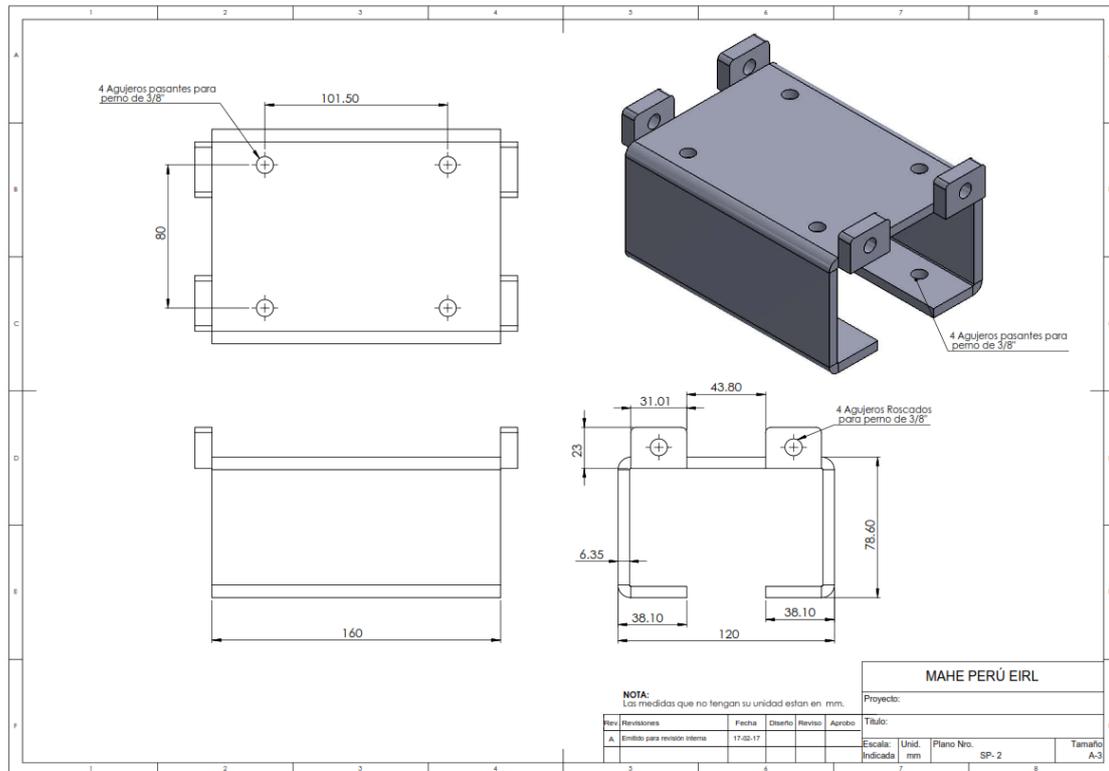


Figura 26

Base de motor.



3.5. Confección y Adquisición de Componentes

Se maquinaron las siguientes piezas en torno:

- Maquinado del eje principal en Acero 1020 a un diámetro de 25.4 mm.
- Maquinado de cupling que une motor con el eje.
- Maquinado de los dos discos de material duraluminio para simular el desbalance, el diseño y medida se encuentra en los planos más detallados.

Otras confecciones:

- Corte y dobléz de plancha de 3/8" en forma de U, para soportar el eje con los componentes de la chumacera y discos de Duraluminio.

- Fabricación de la base principal en Acero A36, con las medidas ya detalladas que está en los planos.

Adquisiciones y suministros:

- Compra de motor marca WEG DE 0.5 HP con 3600 rpm.
- Compra de variador de velocidad para motor de 0.5 hp.
- Compra de suministro eléctrico para armado de tablero eléctrico.

3.6. Pintado y Ensamblado del Módulo

Se aplicó recubrimiento anticorrosivo a los componentes, mediante pintura de polvo electrostático al pintado de los componentes módulo y se procedió el ensamblaje.

Instalación del motor en la base del módulo:

Figura 27

Motor alojado en la base.



Colocación de la porta base en c para chumacera:

Figura 28

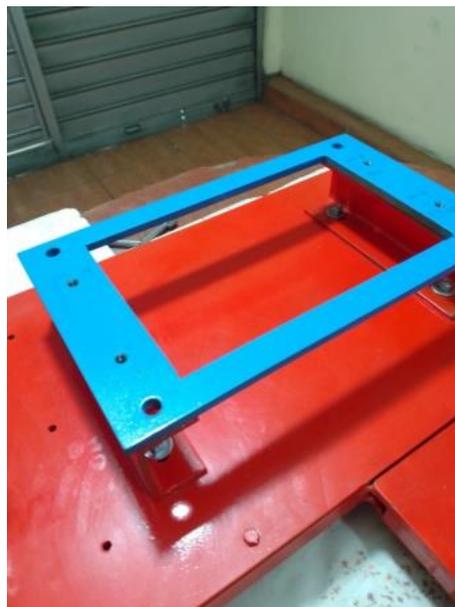
Base en forma de c porta chumacera.



Colocación de plataforma para porta base en c:

Figura 29

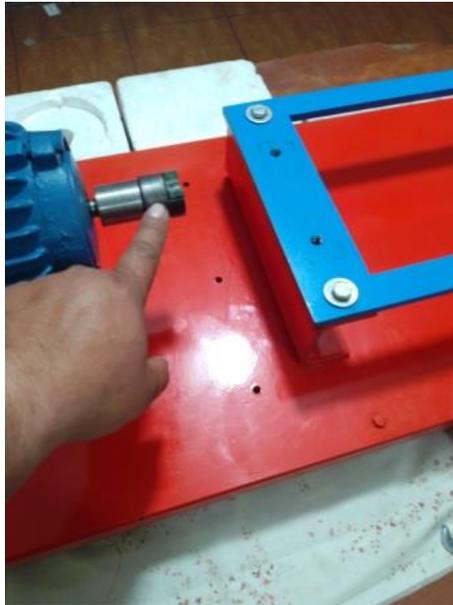
Plataforma para porta base en c.



Instalación de acoplamiento entre el eje del motor y eje principal:

Figura 30

Acoplamiento entre motor y eje principal.



Armado del eje principal con chumacera, acoplamiento y discos de Duraluminio:

Figura 31

Eje principal con acoplamiento, chumaceras y discos de Duraluminio.



Figura 32

Eje principal y su conjunto instalado en su plataforma.

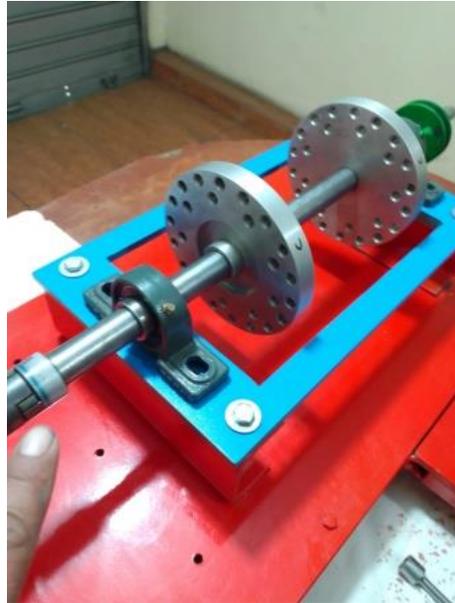
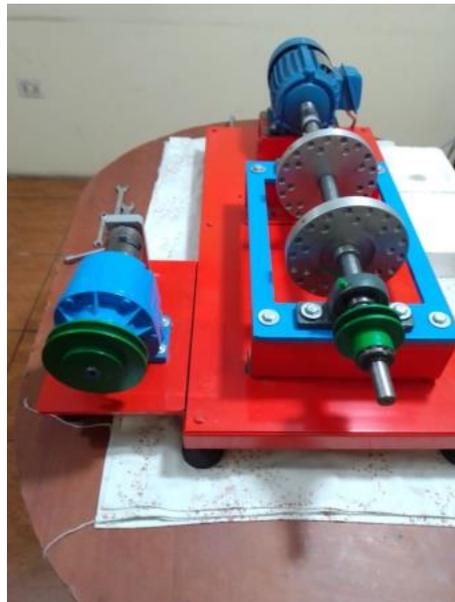


Figura 33

Eje principal con motor y chumacera.



Instalación de tablero electrónico con variador:

Figura 34

Incorporación de tablero electrónico:



Figura 35

Tablero con variador de velocidad.



Finalmente se realizó un ensayo de análisis vibracional al módulo mediante vibrómetro.

Figura 36

Prueba con vibrómetro.



3.7. Tiempos de Fabricación

El diseño y fabricación de módulo para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico, tomo unos 10 días en su fabricación.

3.1. Costos de la Fabricación del Módulo

Tabla 9

Costos de fabricación del módulo.

Detalle	Costo USD \$
Material eje de 700 mm en Acero 1020	18.06
Maquinado del Eje Principal	30.97
Material discos de 6 pulg. Duraluminio, 2 unidades	90.32
Maquinado de los Dicos Duralumnio	108.39
Acoplamiento (para unir motor y eje)	18.06
Maquinado de couplig	30.97
Maquinado de huecos de perforación	25.81
Fabricación de base principal, en Acero A36	154.84
Fabricación de base de 3/8" en forma de C	51.61
Fabricación de plancha para la base de soporte de 3/8"	30.97
Compra de motor marca WEG, de 0.5 HP	154.84
Compra de variador de velocidad para 0.5 HP	141.94
Compra de tablero eléctrico y suministro eléctricos	64.52
Compra de pernos varios	9.03
Compra de pintura base y acabado	12.90
Costo del personal cadista por dos días	129.03
Costo del personal operativo para el ensamble por 7 días dedicados	516.13
Total	1,588.39

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por MAHE.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1. Resultados en Mahe Perú EIRL

El desarrollo e implementación del módulo con las prestaciones planteadas, se alcanzó en 10 días, este desarrollo impactó favorablemente la facturación de Mahe Perú EIRL., que apoyo en el desarrollo e implementación del módulo.

Las ventas y servicios por análisis vibracional, balanceo dinámico, termografía, alineamiento láser y ultrasonido acústico, así como por servicios de capacitación de la compañía Mahe Perú EIRL., antes de desarrollar el modulo, se encontraban alrededor de 50,000 dólares americanos mensuales.

Con el desarrollo, implementación y venta del módulo la facturación de la compañía alcanzó los 70,000 dólares, los servicios se multiplicaron desarrollándose capacitaciones in situ en las instalaciones de los clientes, lo que con llevo al aumento de las capacidades técnicas de su personal, mejorándose la gestión de los equipos y evitándose mantenimientos correctivos en planta, una menor dependencia de personal externo en la gestión predictiva.

Tabla 10

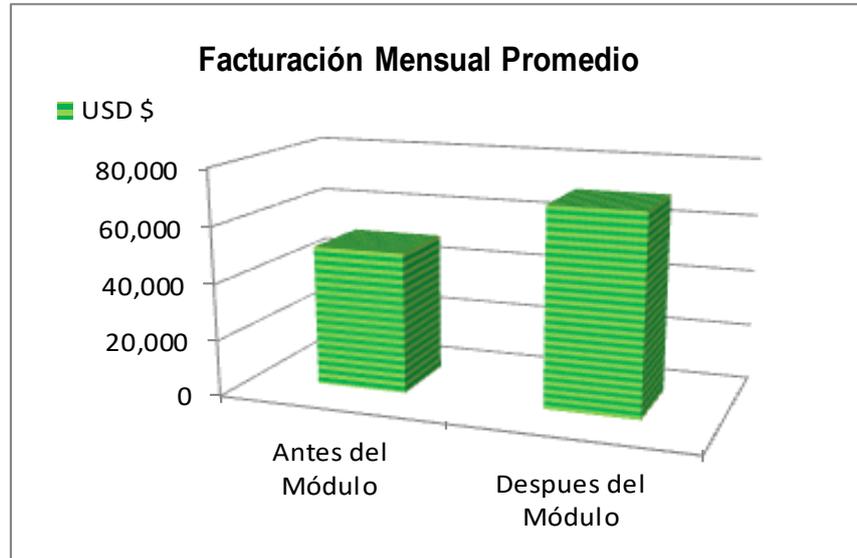
Facturación mensual promedio en MAHE antes y después del módulo.

Facturación mensual promedio	USD \$
Antes del Módulo	50,000
Despues del Módulo	70,000

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por MAHE.

Figura 37

Impacto del módulo en la facturación de MAHE.



4.2. Resultados en los Clientes que Compraron el Módulo

4.2.1. Resultados en TASA

TASA es una compañía de producción en el rubro pesquero, durante la veda se preparan los equipos para la producción.

Antes de adquirir el módulo para estudio de análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico, solo contaban con dos técnicos calificados para realizar el alineamiento laser y balanceo dinámico a los equipos en los mantenimientos durante la veda cumpliéndose solo el 60% del objetivo del mantenimiento, ahora con el módulo adquirido se preparó más personal lográndose alcanzar el 100% de los mantenimientos propuestos.

Tabla 11

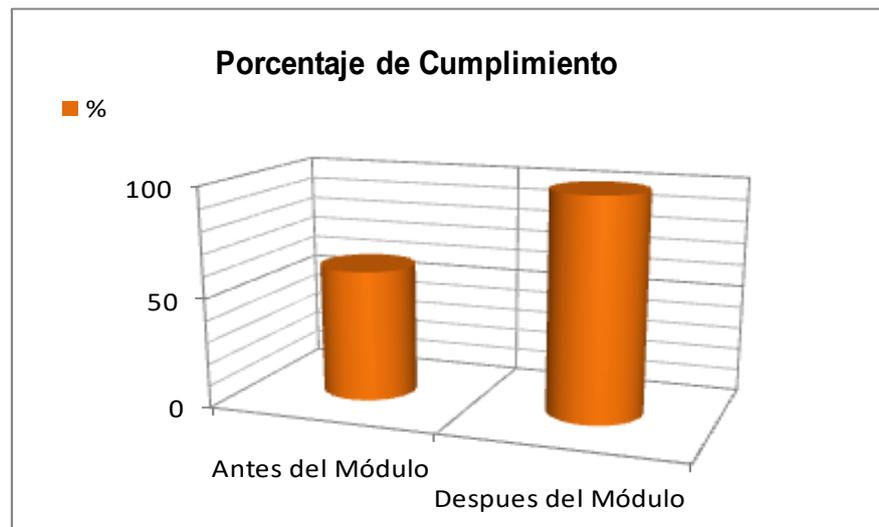
Cumplimiento de mantenimientos predictivos en TASA.

Cumplimiento de mantenimiento predictivo	%
Antes del Módulo	60
Despues del Módulo	100

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por TASA.

Figura 38

Cumplimiento del mantenimiento predictivo en TASA.



Y como consecuencia del cumplimiento de los mantenimientos predictivos oportunos se redujo sustancialmente el costo de mantenimiento de los equipos, se registraron menos rodamientos dañados, ventiladores, etc.

Tabla 12

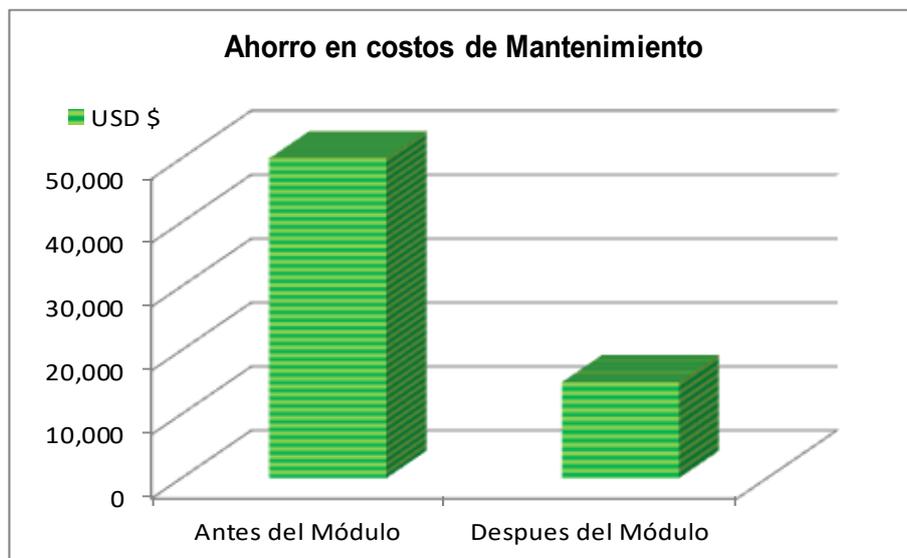
Costos de mantenimiento en TASA.

Costos de mantenimiento	USD \$
Antes del Módulo	50,000
Despues del Módulo	15,000

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por TASA.

Figura 39

Ahorro de costos de Mantenimiento en el periodo de veda en TASA.



4.2.2. Resultados en SOLTRAK

SOLTRAK es el representante en el Perú de los productos Pruftechnik, estos son equipos de análisis de vibración, alineamiento dinámico y balanceo laser; SOLTRAK tiene el compromiso de vender por lo menos tres equipos mensuales con Pruftechnik para mantener la representación.

Antes de adquirir el modulo que le suministramos sus ventas estaban en promedio por un equipo mensual, algo de 40,000 dólares americanos; era una situación crítica, muchos clientes no los tomaban por el alto costo, veían una recuperación muy lenta en el beneficio costo.

Con el modulo se hicieron demostraciones personalizadas con los clientes in situ en sus instalaciones y se consiguieron más ventas, se alcanzaron los 120,000 dólares americanos, mejoraron sustancialmente las ventas.

Tabla 13

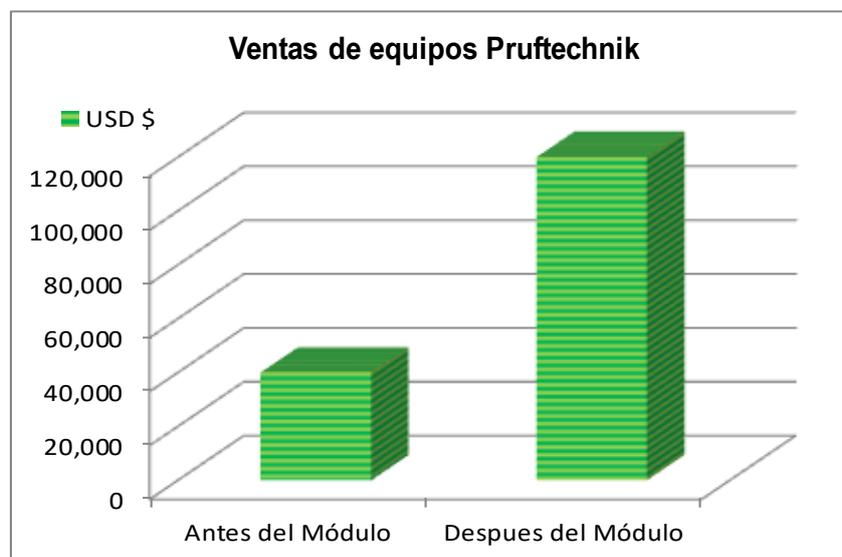
Ventas de los equipos Pruftechnik en SOLTRAK.

Ventas Pruftechnik	USD \$
Antes del Módulo	40,000
Despues del Módulo	120,000

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por SOLTRAK.

Figura 40

Ventas de equipos Pruftechnik en SOLTRAK.



4.2.3. Resultados en NOV

NOV es una compañía de servicios en pozos de petróleo y gas. Antes de adquirir el modulo NOV tenía solo un mecánico calificado para alineamiento y balanceo de sus máquinas centrifugas horizontales y verticales desplazadas en sus diferentes proyectos de servicios en perforación de pozos en el Perú.

Entonces tenía problemas para realizar el mantenimiento predictivo de sus equipos antes del inicio de la perforación y en la práctica como durante la perforación las operaciones no se detienen; se llegaban a mantenimiento correctivos, desplazando en campo equipos de back up para contingencias, con el alto costo que esto lleva.

Luego de adquirir el módulo, se realizaron entrenamiento y capacitaciones a los demás mecánicos de la compañía para atender el mantenimiento de los equipos antes de vestir los proyectos en los servicios que NOV provee en perforación.

El costo de mantenimiento se redujo enormemente, se evitaba e desplazamiento innecesario de equipos, repuestos y componentes de alto costo, reduciéndose sustancialmente el inventario en locaciones remotas; proporcionando más utilidades por proyecto a la compañía, ayudando a atenuar la crisis que se presentó cuando escaseaban los proyectos de perforación en el Perú por la coyuntura, evitando así el cierre de la oficina en el país.

Tabla 14

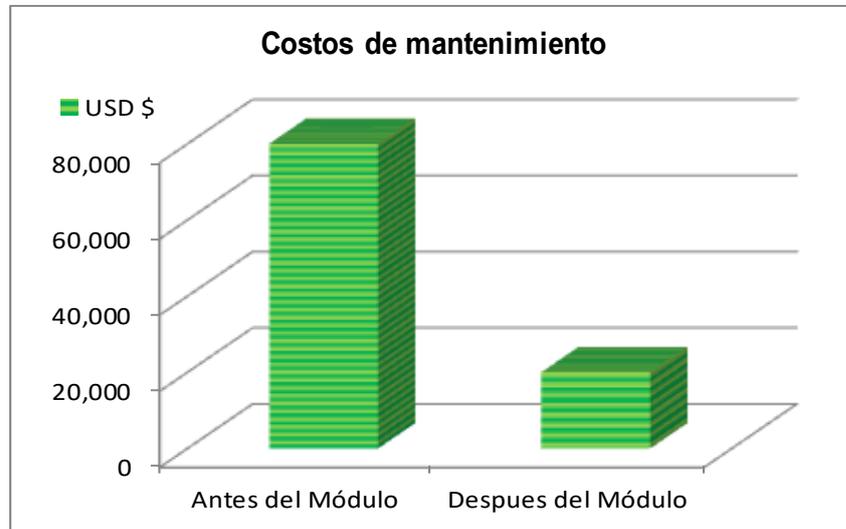
Costos de mantenimiento en NOV

Costos de mantenimiento	USD \$
Antes del Módulo	80,000
Despues del Módulo	20,000

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por NOV.

Figura 41

Costos de mantenimiento en NOV.



4.1. Coherencia con los Objetivos

El desarrollo e implementación del módulo en MAHE, demostró que es posible realizar este equipo en el Perú con la misma prestación de los módulos importados y a un costo más accesible, estos eran los objetivos planteados los mismos que fueron alcanzados en su totalidad.

Hasta el momento en Mahe Perú EIRL, se ha fabricado 3 módulos para nuestros clientes a un precio de venta de 4,000 dólares, siendo la alternativa más económica del mercado.

Tabla 15

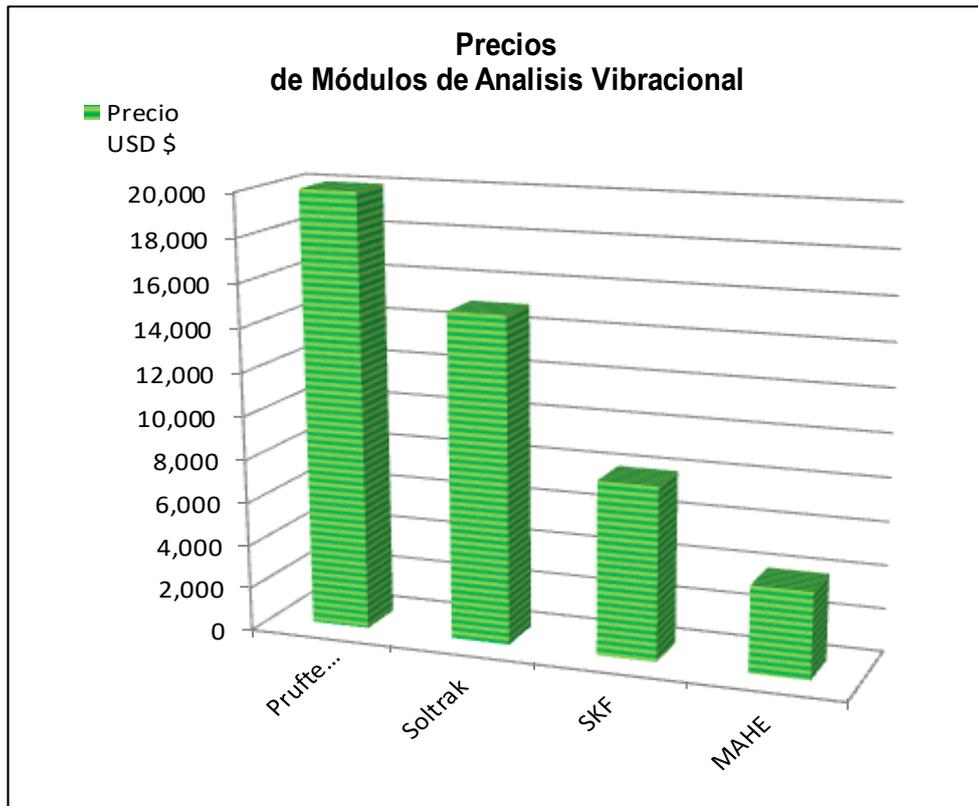
Precios de módulos de análisis vibracional en el mercado local.

Proveedor	Precio USD \$
Pruftechnik	20,000
Soltrak	15,000
SKF	8,000
MAHE	4,000

Fuente: Elaboración propia en base al mercado local, Pruftechnik, Soltrak, SKF y MAHE.

Figura 42

Comparación de precios.



CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

5.1.1. Con respecto al Problema General:

- El estudio de los módulos importados disponibles en el Perú, nos permitió obtener la siguiente conclusión: para desarrollar un módulo práctico deberíamos cambiar el material importado por uno de disponibilidad local y se debe simplificar el diseño de la estructura sin sacrificar la funcionalidad a fin de conseguir las mismas prestaciones.
- El módulo para el estudio del análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico no solo facilita las capacitaciones en los equipos de alineamiento laser y balanceo dinámico dentro de las organizaciones donde disponen del mismo, sino que también facilita el entrenamiento en el uso correcto de estos equipos, así como también proporciona un ambiente seguro para el estudio de análisis vibracional.

Figura 43

El modulo trabajando con un equipo de alineamiento laser.



5.1.2. Con respecto al Objetivo General:

- Se consiguió realizar el diseño e implementación del módulo para el estudio del análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico propuesto, el modulo obtenido proporcionó facilidades en las capacitaciones y entrenamientos con los equipos de alineamiento laser y balanceo dinámico dentro de la empresa donde se desarrolló , así como en las empresas que lo adquirieron.
- El desarrollo del módulo para el estudio del análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico; se realizó en un corto plazo, en un tiempo razonablemente práctico, tomo solo diez días hábiles.
- El sistema mecánico desarrollado para el modulo, le permite alcanzar las mismas prestaciones que sus similares de marcas importadas como Pruftechnik.
- El modulo desarrollado alcanzo un bajo costo final, que permitió colocarlo a un precio más bajo respecto a las marcas importadas tales como Pruftechnik, en el mercado nacional, favoreciendo la industria de nuestro país.

5.1.3. Con respecto a los Problemas Específicos:

- Con relación al primer problema específico de diseñar e implementar un sistema mecánico para el modulo; el diseño de la estructura del módulo se simplifico, no siendo necesario que el modulo sea desarmable o que requiera planos para desarmarlo, pero conservando su funcionabilidad, lo que permitió una reducción del costo de fabricación.
- Con relación al segundo problema específico de definir información necesaria para diseñar y fabricar el modulo para el estudio vibracional, alineamiento laser y balanceo dinámico se comparó con los módulos locales e importados, que cumplió la

funcionabilidad exitosa del módulo de estudio, para la capacitación de los técnicos e ingenieros.

- Con relación al tercer problema específico de definir el módulo más adecuado, el módulo para el estudio del análisis vibracional, alineamiento láser y balanceo dinámico se desarrolló con materiales disponibles localmente, lo que también contribuyó al bajo costo del módulo

5.2. Recomendaciones

- Es recomendable el uso de estos módulos en las empresas industriales, ya que facilita los programas de mantenimiento predictivo, reduciendo en un monto significativo tremendamente los costos de mantenimiento de sus equipos, evitándose paradas innecesarias y pérdidas.
- Se debe promover el uso de tecnología alternativa basándose a la experiencia nacional y no estar supeditado a módulos importados, tal como se ha demostrado el presente trabajo de investigación.
- Para una mejor presentación y durabilidad, se recomienda el uso del material del módulo, tales como acero inoxidable, aluminio especial, para su uso en cualquier tipo de laboratorios, pero sin afectar la funcionabilidad del módulo.

REFERENCIAS

- Angulo Acunso, Karen Nataly y Salazar Vaca, José Julián. (2013). **Diseño y Construcción de un Equipo de Laboratorio para estudiar Vibraciones Mecánicas en Sistemas Rotativos para el Laboratorio de Mecanismos y Vibraciones del Decem de la Escuela Politécnica del Ejército**. Artículo, Universidad de las Fuerzas Armadas. Quito, Ecuador.
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7283>.
- Baldeón Silva, Carlos Arturo. (2013). **Diseño y construcción de un banco didáctico para pruebas de vibraciones y alineación láser en motores asíncronos para el Laboratorio de Electricidad de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo**. Título (Ingeniería en Eléctrico Mecánica). Guayaquil, Ecuador. Carrera de Ingeniería en Eléctrico Mecánica, Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Benítez Cortés, Ricardo Adolfo. (2013). **Diseño e Implementación de un Banco Didáctico para Alineación de Elementos Rotativos y Balanceo de Masas en Cantiléver**. Título (Ingeniero Mecánico). Santiago de Cali, Colombia. Programa de Ingeniería Mecánica, Departamento de Energética y Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente.
- Cabrera Centurión, José Gonzalo. (2021). **Diseño de un módulo educativo para el estudio de las vibraciones mecánicas mediante la variación de los parámetros inercia, rigidez y fuerza de excitación**. Título (Ingeniero Mecánico). Lima, Perú. Facultad De Ciencias E Ingeniería, Pontificia Universidad Católica Del Perú.

Cruz Martínez, Osmar Elías; López Huezo, Josué Efrain y Portillo García, Roberto Isaac.

(2022). **Propuesta de Diseño de un Banco Didáctico para el Balanceo Dinámico de Rotores**. Título (Ingeniero Mecánico). San Salvador, El Salvador. Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.

Espino Román, Piero; Davizón Castillo, Yasser Alberto; Olaguez Torres, Juana Eugenia;

Lizárraga Lizárraga, Alejandro; Benítez García, Israel y Núñez Nalda, José Víctor.

(2017). **Prototipo didáctico para la enseñanza de vibraciones mecánicas mediante el diseño de un banco de pruebas de desbalance y velocidad crítica**.

Bilbao, España. Artículo en colaboración. Revista DYNA Ingeniería e Industria. Febrero de 2017.

<https://www.revistadyna.com/busqueda/prototipo-didactico-para-ensenanza-de-vibraciones-mecanicas-mediante-diseno-de-un-banco-de-pruebas-d>.

Espinoza Ronquillo, Clemente Douglas. (2019). **Repotenciación del mantenimiento**

predictivo basado en el análisis de vibración enfocado a equipos rotatorios usados para el proceso de producción de una planta química ubicada en

Guayaquil-Ecuador. Título (Ingeniero en Eléctrico Mecánica). Guayaquil, Ecuador.

Carrera de Ingeniería en Eléctrico Mecánica, Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Maraví Chuquilín, César Adrián. (2020). **Métodos de Balanceo y Alineamiento para**

Máquinas Rotativas. Trabajo de Investigación para obtener el grado académico de

Bachiller en Ciencias con Mención en Ingeniería Mecánica. Lima, Perú. Facultad De

Ciencias E Ingeniería, Pontificia Universidad Católica Del Perú.

Martínez Trinidad, Ciro. (2017). **Análisis Vibracional en Equipos Rotativos y Mantenimiento Predictivo, Capítulo I: Mantenimiento Predictivo.** Curso. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Unidad de Educación Continua CENACE, Fundación Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra – UPSA.

Martínez Trinidad, Ciro. (2017). **Análisis Vibracional en Equipos Rotativos y Mantenimiento Predictivo, Capítulo II: Teoría Vibracional Básica.** Curso. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Unidad de Educación Continua CENACE, Fundación Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra – UPSA.

Martínez Trinidad, Ciro. (2017). **Análisis Vibracional en Equipos Rotativos y Mantenimiento Predictivo, Capítulo VIII: Balanceo Dinámico.** Curso. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Unidad de Educación Continua CENACE, Fundación Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra – UPSA.

Martínez Trinidad, Ciro. (2017). **Análisis Vibracional en Equipos Rotativos y Mantenimiento Predictivo, Capítulo IX: Desalineamiento.** Curso. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Unidad de Educación Continua CENACE, Fundación Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra – UPSA.

Montoya Echeverry, Nelson Javier y Cardona García, Luis Alfonso. (2014). **Diseño y Montaje de un Banco de Pruebas para Ensayos de Velocidad Crítica y Desbalance.** Título (Ingeniero Mecánico). Santiago De Cali, Colombia. Programa De Ingeniería Mecánica, Departamento Energética y Mecánica, Facultad De Ingeniería, Universidad Autónoma De Occidente.

Orozco Daza, Jose Rafael y Tinoco Bayuelo, Fidel Antonio. (1999). **Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas Didáctico para la Alineación de Máquinas y Adecuación De Un Torno Como Maquina Balanceadora.** Titulo (Ingeniero Mecánico). Cartagena de Indias, Colombia. Área de Mecánica, Facultad de Ingeniería Mecánica, Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar.

Pinzón Castrillón, Juan Eduardo. (2020). **Construcción de un Banco de Prácticas para Alineación de Ejes en Máquinas Rotativas para los Laboratorios de la Universidad Antonio Nariño Sede Cucuta.** Titulo (Tecnólogo en Mantenimiento Electromecánico Industrial). Cúcuta, Colombia. Programa de Tecnología en Mantenimiento Electromecánico Industrial, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica FIMEB, Universidad Antonio Nariño.

Sánchez-Acevedo, Heller; R. Nova, Fabian y Madrigal, Jhon A. (2018). **Metodología para el balanceo de rotores empleando un analizador de vibraciones.** Revista UIS Ingenierías, vol. 17, núm. 2, 2018, Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia.

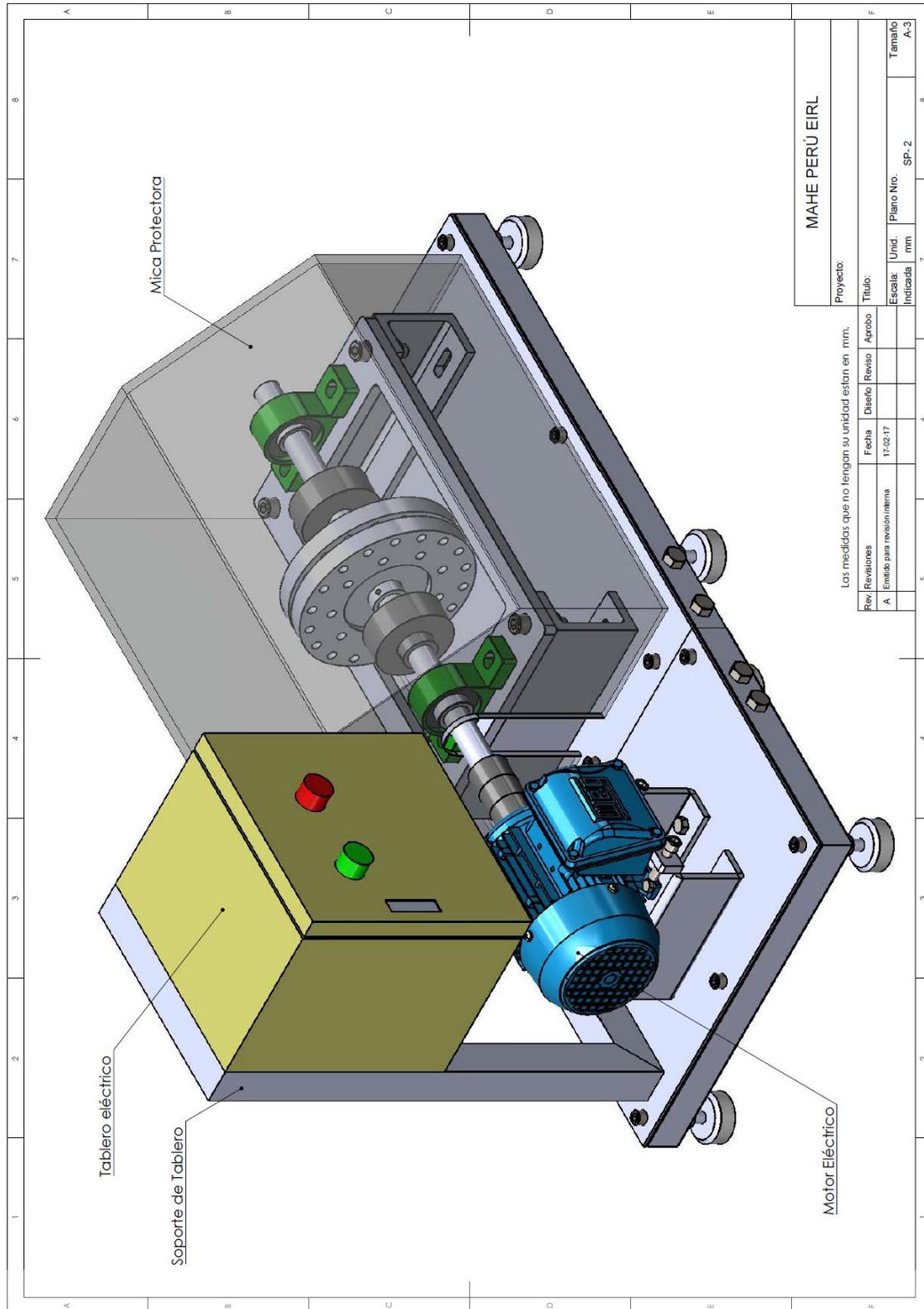
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553756965026>.

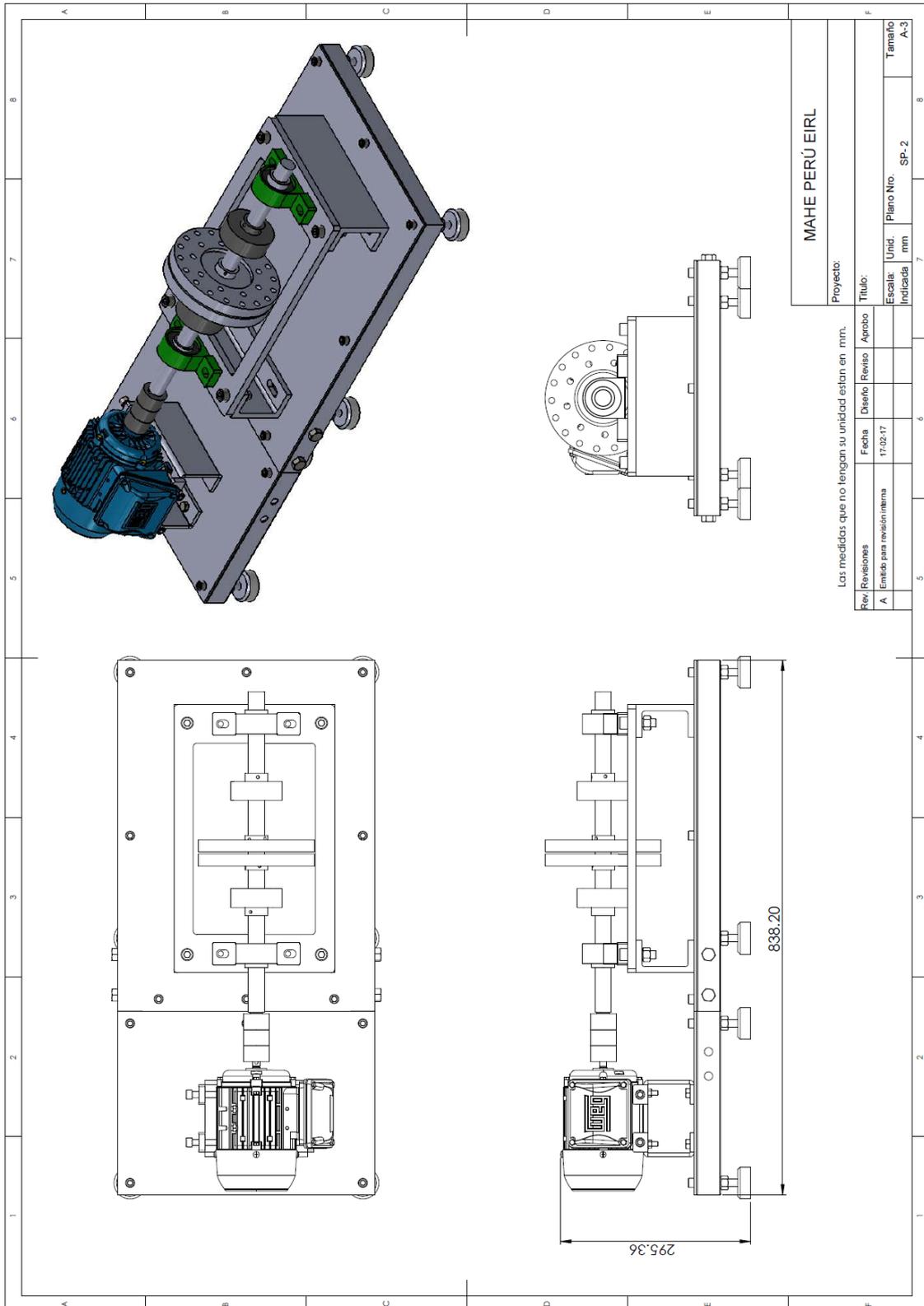
SOLTRAK F, Representante en el Perú de Pruftechnik. (2022). **Curso Manejo Rotalign Ultra IS.** División de capacitación de SOLTRAK F, especializados en equipos Pruftechnik. Lima, Perú. Con licencia Pruftechnik.

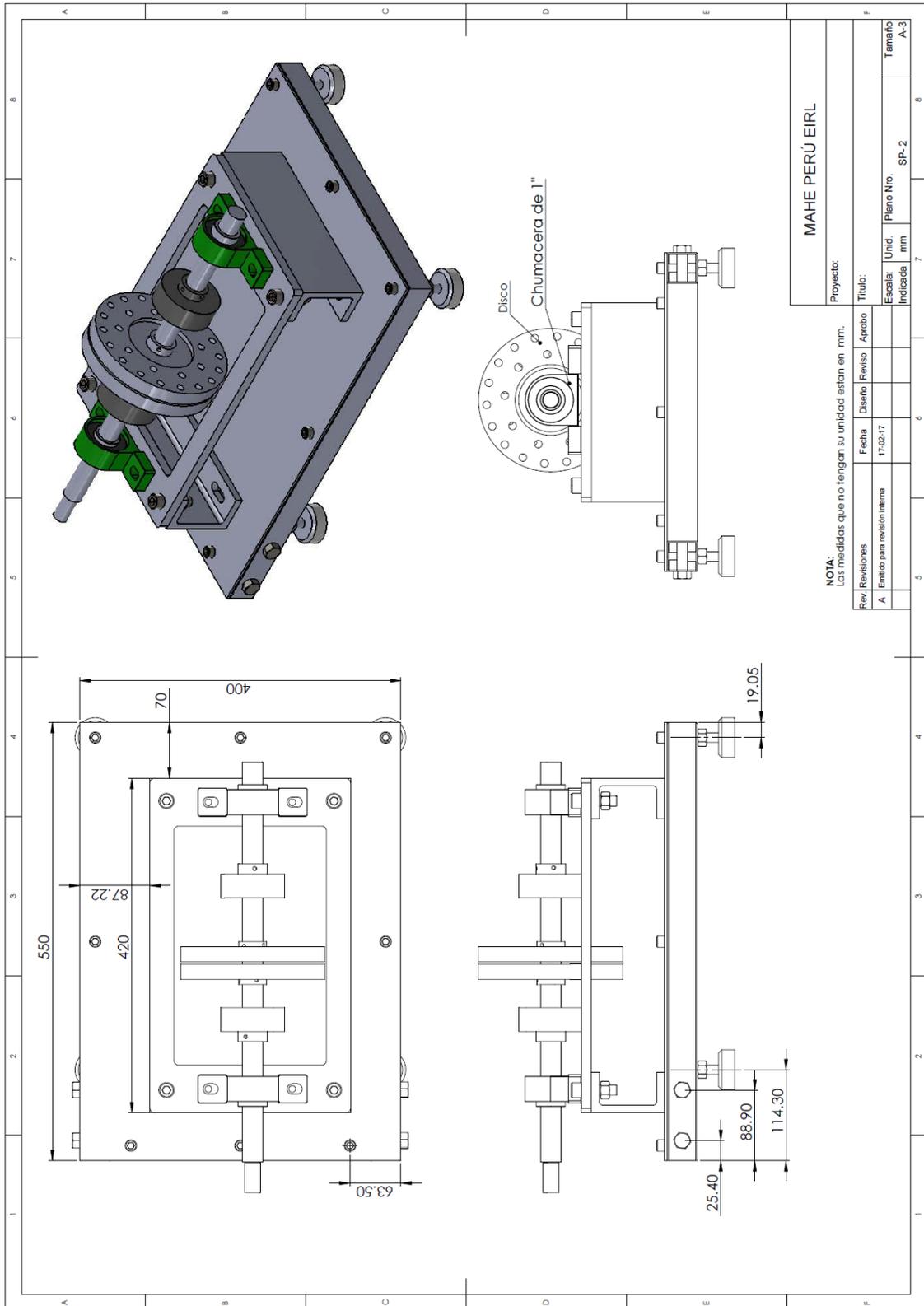
Velasquez Araujo, Yako Lenon y Vega Villafana, Ashley Stewart. (2020). **Diseño de un sistema de entrenamiento de potencia mecánica para la escuela profesional de ingeniería mecánica – UNS.** Titulo (Ingeniero Mecánico). Nuevo Chimbote, Perú. Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa.

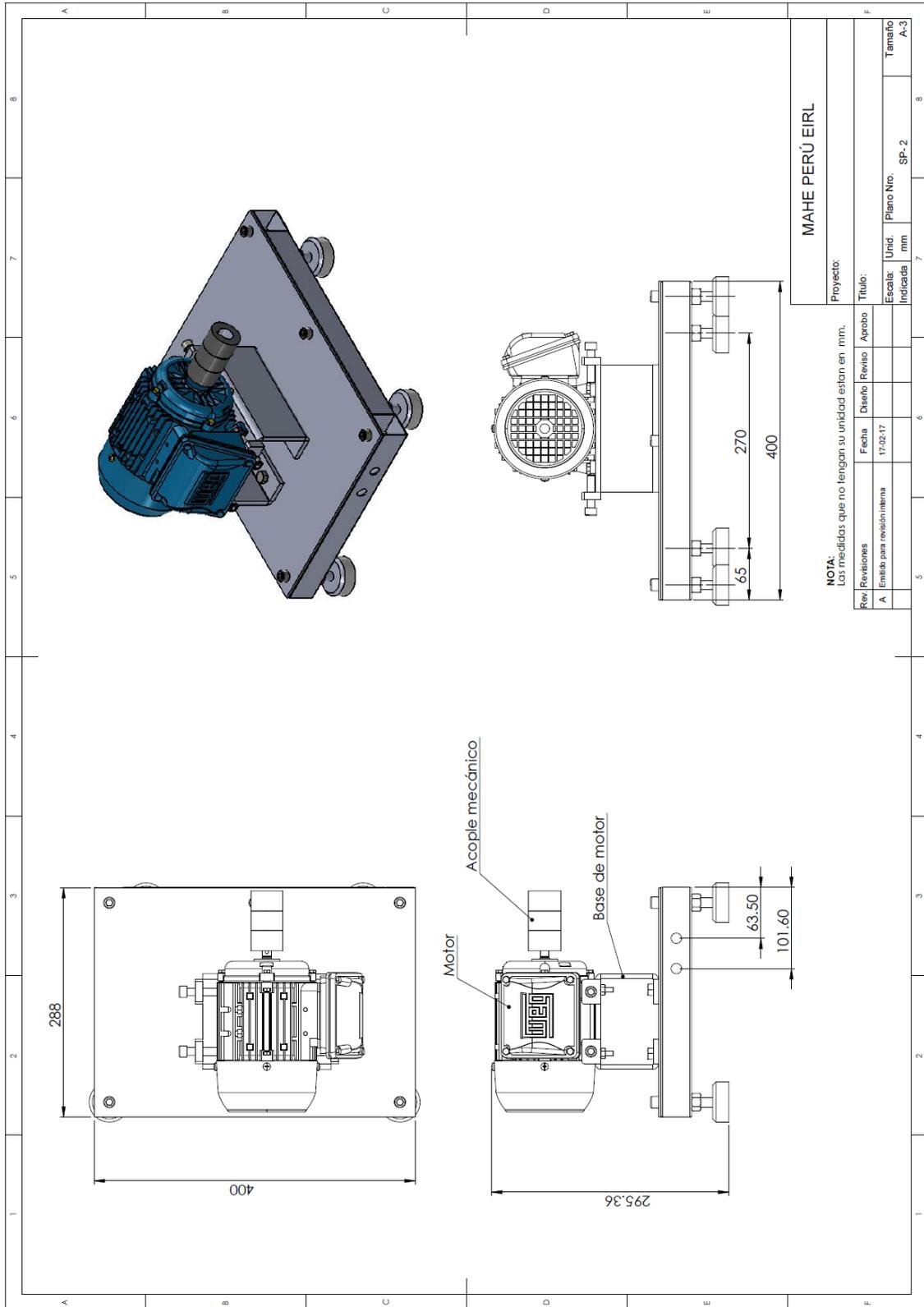
ANEXOS

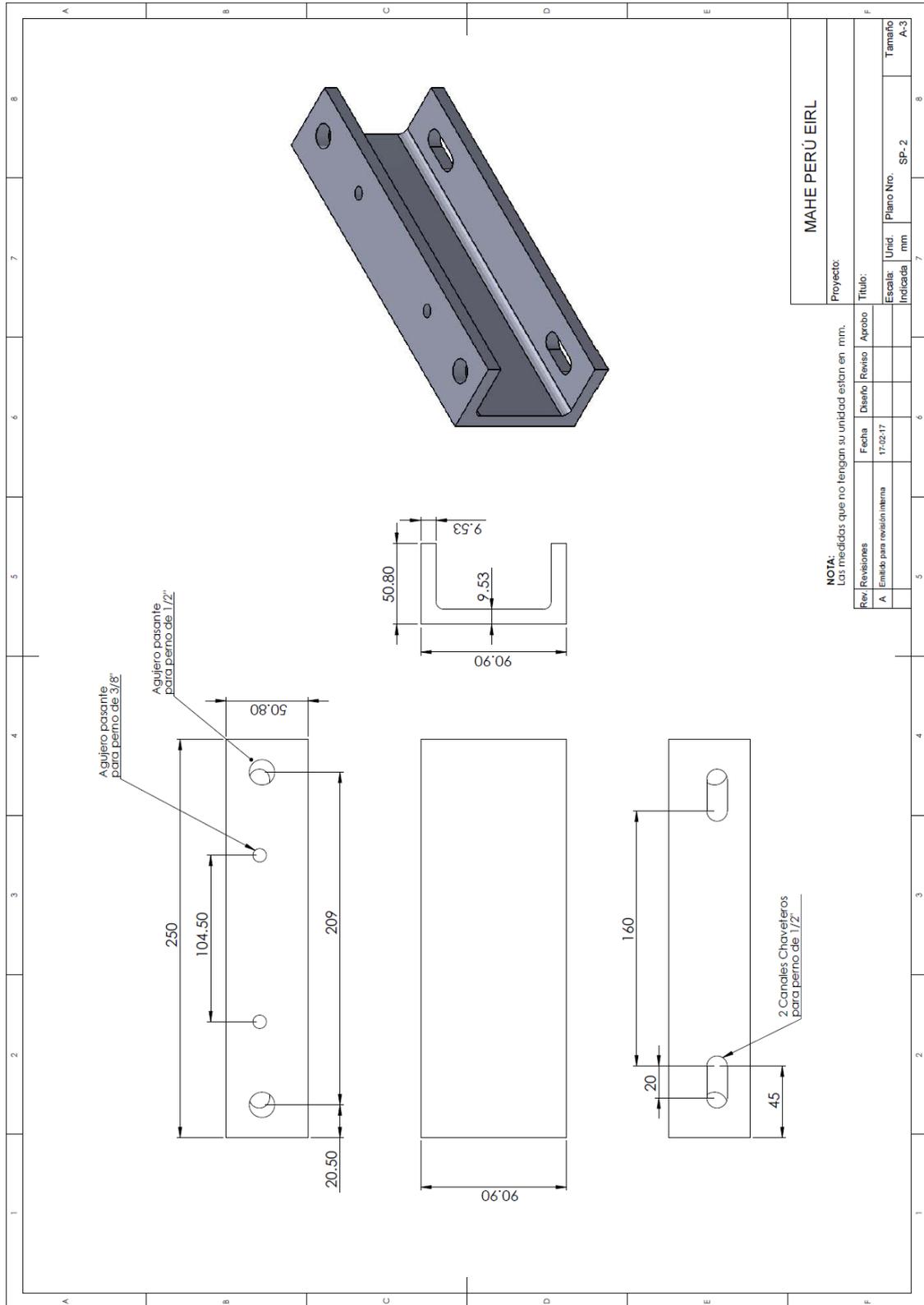
Anexo N° 1. Planos del Módulo Desarrollado, Obtenidos en SolidWorks.

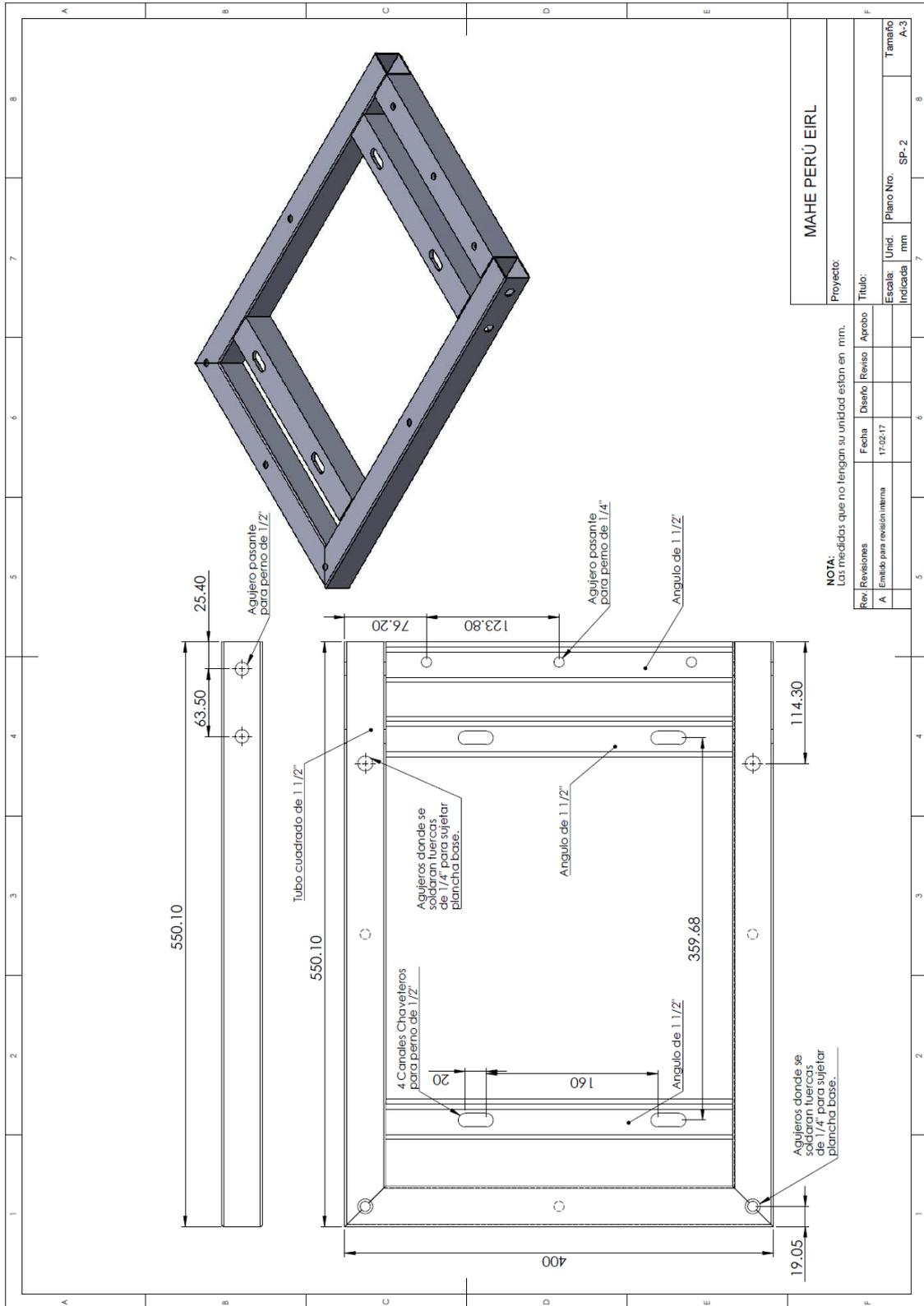


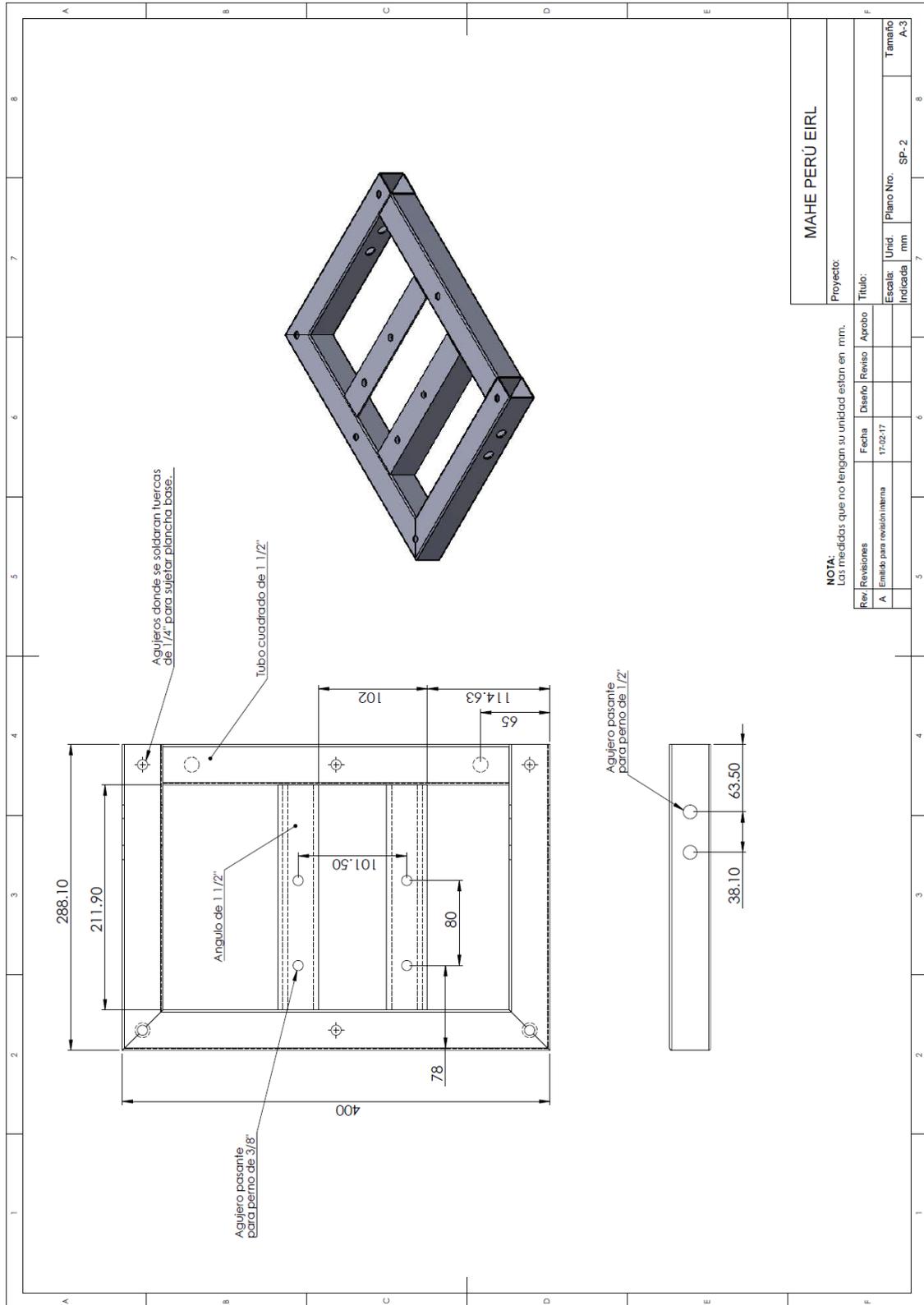


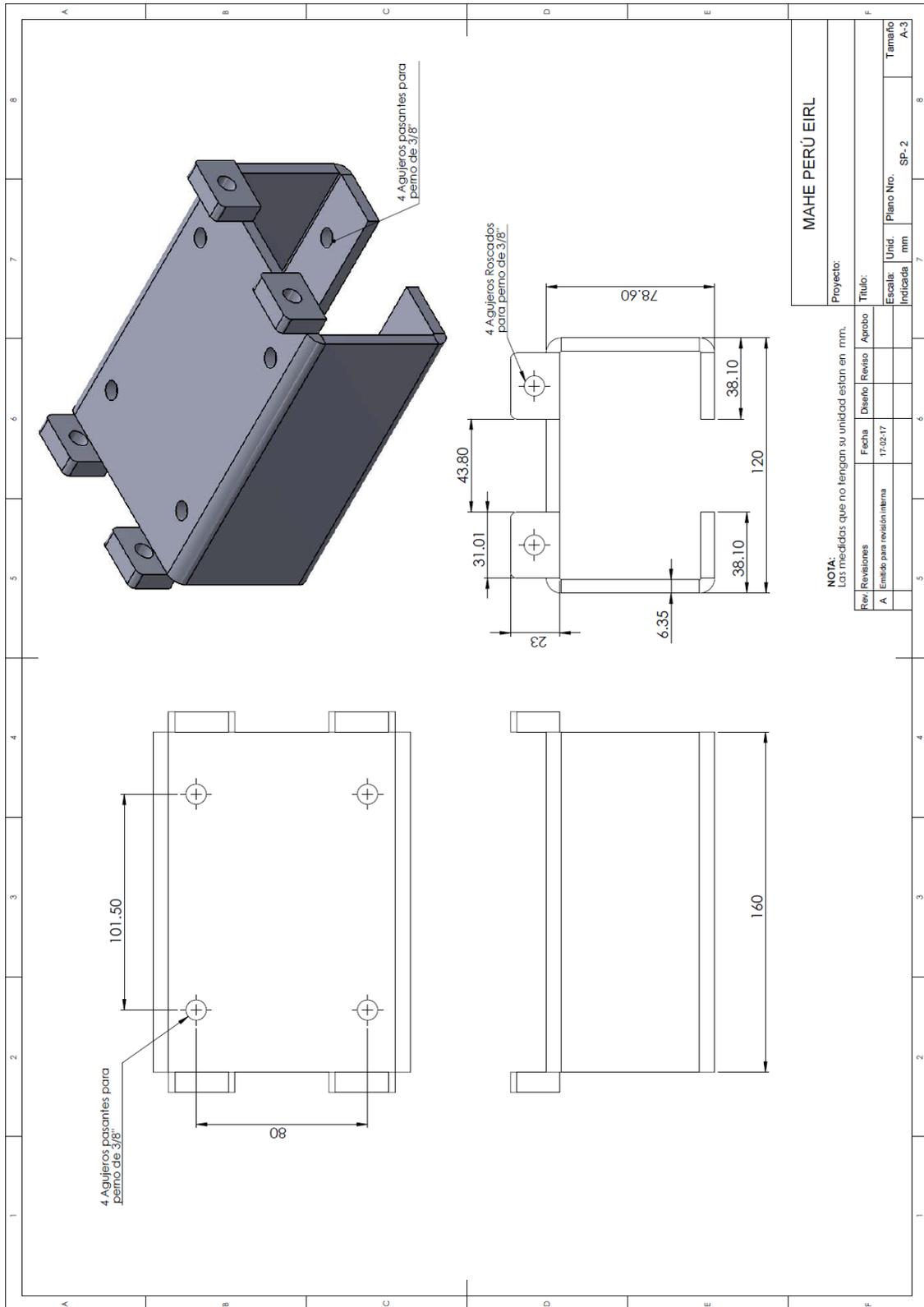


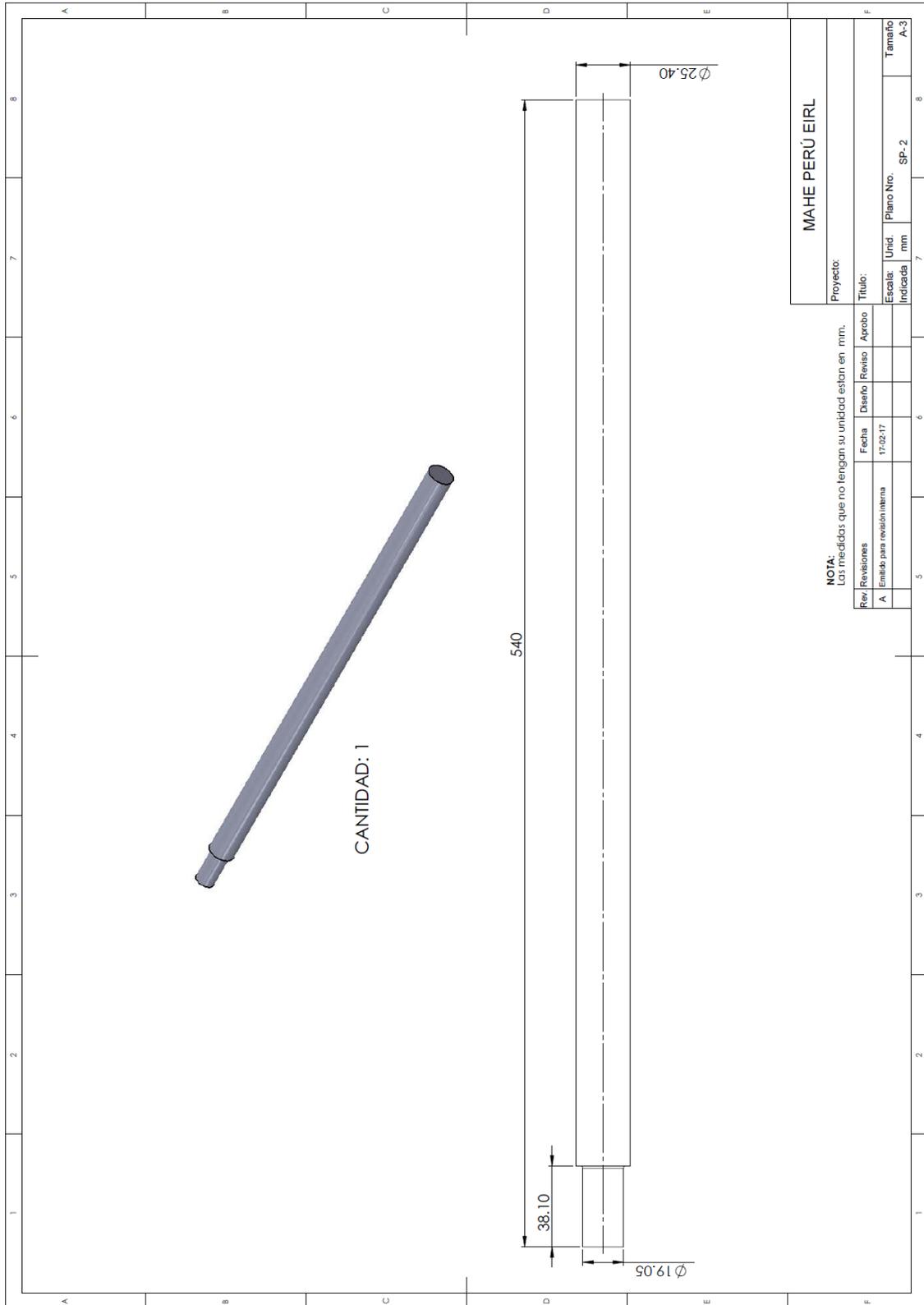


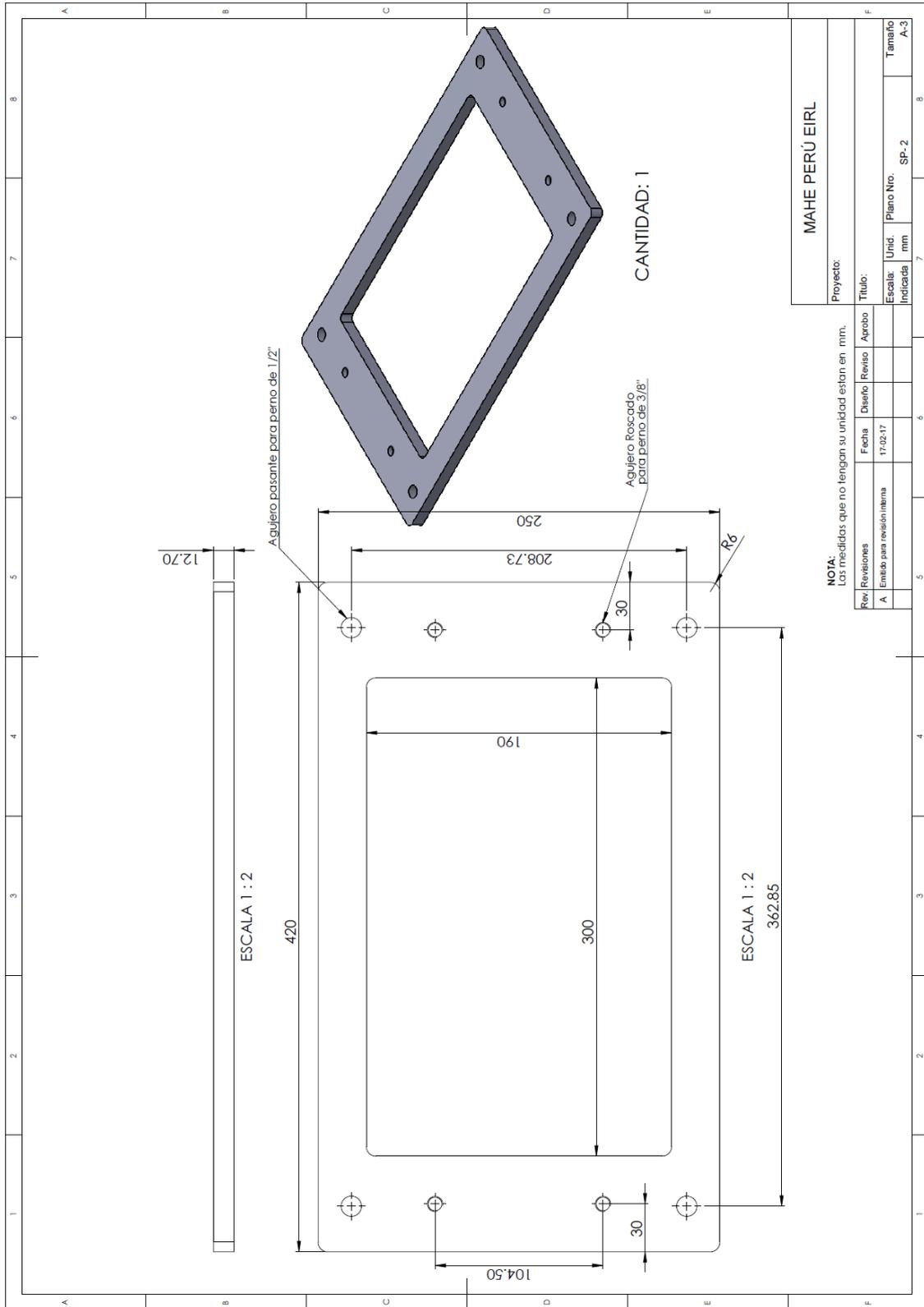


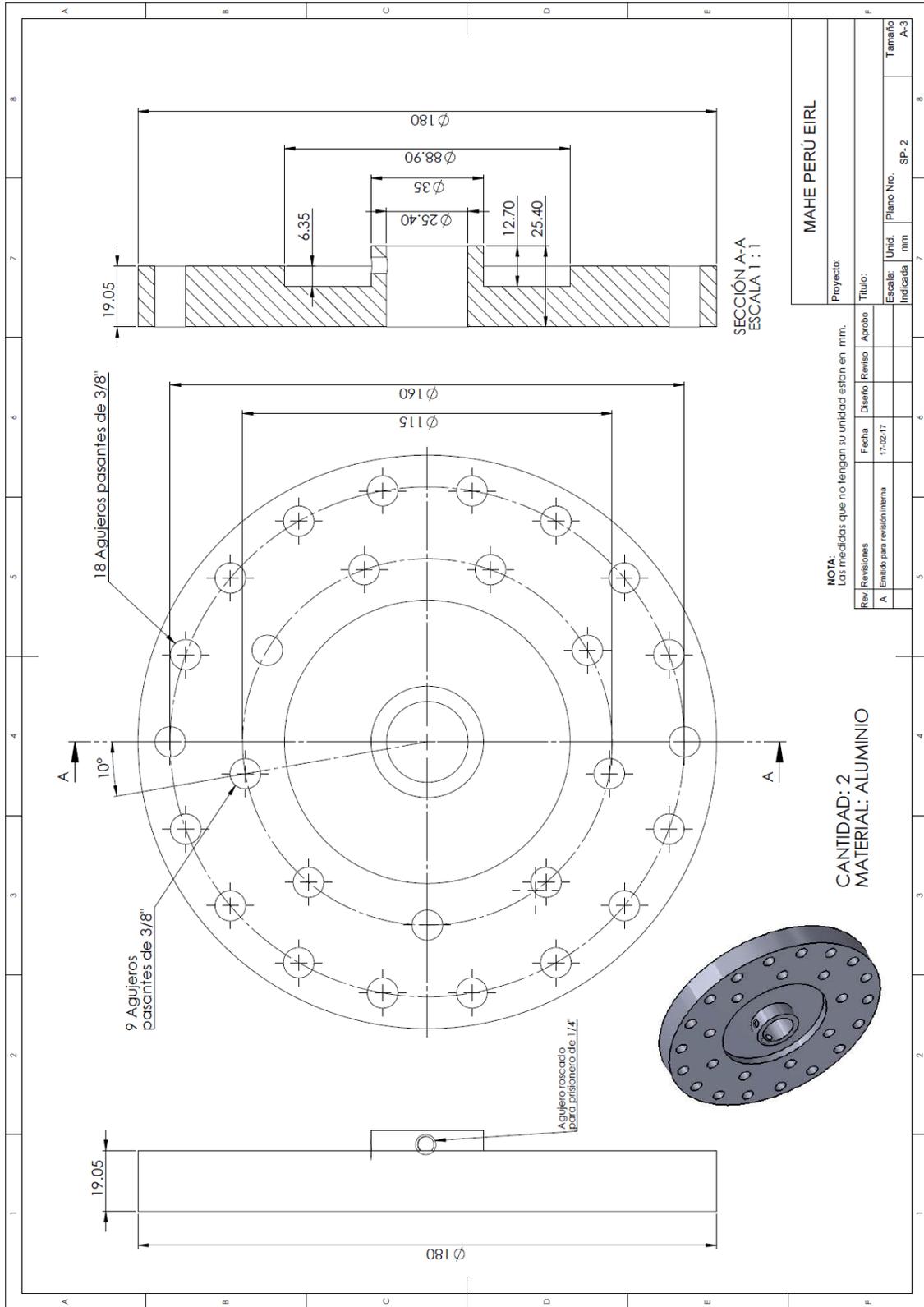












Proyecto: MAHE PERÚ EIRL

Título:

Escala: Unid. Plano No. SP-2

Indicada mm

Tamaño A-3

NOTA:
Los medidas que no tengan su unidad estan en mm.

Rev/Revisiones	Fecha	Diseño	Reviso	Aprobo
A	Emisión para revisión interna	17/02/17		

CANTIDAD: 2
MATERIAL: ALUMINIO

