

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Rediseño de un banco de prueba de bombas centrífugas

INGE-3104

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Esteban Gabriel Yerovi Avendaño

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedicado a mi Dios Padre, a quien le pedí me permitiera estudiar esta carrera en mi querida ESPOL, prometiéndole ejercerla siempre con el de guía y bajo su tutela, a quien ya no solo le dedico esta tesis, sino mi entera profesión.

Dedicado a mi madre, Linda Avendaño, mujer incansable, a quien adoro con todo mi ser y a quien estaré agradecido eternamente por sus sacrificios, a mi padre, Oswaldo Yerovi, por ser soporte en mi juventud, a mi hermana, Camila Yerovi, por ser mi referente y mi estela, mi reflejo a seguir, excelsa y brillante profesional en este hermoso ejercicio de la ingeniería mecánica.

Agradecimientos

Eternamente agradecido con mi familia, quien siempre fue soporte, a mis padres y a mi hermana, la Mgtr. Camila Yerovi, por ser los pilares de quien soy ahora.

Al MSc. Camilo Ramírez, por sus incansables consejos y por su apoyo durante mi desarrollo tanto profesional como personal, por ayudar a construir la fortaleza que ahora tengo.

Al Ab. Julio Chuiza, por sus sabios consejos, por escucharme cuando más lo necesité y por ser un soporte con sus conocimientos técnicos para esta tesis.

Last but not least, I wanna thank me, I wanna thank me for believing in me, I wanna thank me for doing all this hard work, I wanna thank me for having no days off.

Declaración Expresa

Yo Esteban Gabriel Yerovi Avendaño acuerdo y reconozco 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 durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor 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, 17 de octubre del 2025.



Esteban Gabriel Yerovi

Avendaño

Evaluadores

PhD. Emérita Delgado Plaza

Profesor de Materia

PhD. Mario Patiño Aroca

Tutor de proyecto

Resumen

Para el adecuado desarrollo de las habilidades y del conocimiento técnico del estudiante, es imprescindible que tenga contacto con componentes prácticos cuyas aplicaciones le permitan comprender la teoría estudiada en clase.

En el caso de las materias relacionadas con el estudio de la mecánica de fluidos y los sistemas de bombeo, este componente didáctico no se encuentra presente debido a la obsolescencia del banco de prueba de bombas centrífugas Gilkes GH-90.

El rediseño se basó en la norma ISO 9906, relacionado a tolerancias de equipos de instrumentación, y en los estándares de selección establecidos por el Hydraulic Institute. Asimismo, conforme a la ISO 17025, se elaboró un programa de mantenimiento y una guía de operación correspondiente

Durante el desarrollo del proyecto se evidenció el deterioro significativo de los sistemas eléctricos y electrónicos del banco de prueba, así como su desactualización frente a los estándares industriales modernos.

Como resultado, se obtuvo un diseño alineado con las necesidades y tecnologías empleadas en la industria. El programa de mantenimiento propuesto busca aumentar el factor de confiabilidad del nuevo sistema, destacando la importancia de un programa bien estructurado, pues permite utilizar el equipo de forma eficiente, segura y sostenible en el tiempo.

Palabras Clave:

Banco de prueba, fluidodinámico, instrumentación aplicada, bombas centrífugas.

Abstract

For the proper development of students' skills and technical knowledge, it is essential that they have contact with practical components whose applications allow them to understand the theory studied in class.

In the case of subjects related to the study of fluid mechanics and pumping systems, this didactic component is not present due to the obsolescence of the Gilkes GH-90 centrifugal pump test bench.

The redesign was based on the ISO 9906 standard, related to tolerances of instrumentation equipment, and on the selection standards established by the Hydraulic Institute. Likewise, in accordance with ISO 17025, a maintenance program and a corresponding operating guide were developed.

During the project's development, significant deterioration of the test bench's electrical and electronic systems became evident, as well as its obsolescence compared to modern industry standards.

As a result, a design aligned with the needs and technologies used in the industry was obtained. The proposed maintenance program seeks to increase the reliability factor of the new system, highlighting the importance of a well-structured program, as it allows the equipment to be used efficiently, safely and sustainably over time.

Keywords:

Test bench, fluid dynamics, applied instrumentation, centrifugal pumps.

Índice general

Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del problema.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Banco de prueba.....	4
1.4.2 Instrumentación.....	6
1.4.3 Bombas centrífugas.....	9
1.4.4 Curvas características en pruebas de bombas.....	11
Capítulo 2.....	14
2.1 Metodología de diseño.....	15
2.2 Consideraciones de diseño.....	16
2.3 Condición actual del equipo.....	17
2.3.1 Estado mecánico de los componentes.....	18
2.3.2 Estado eléctrico de los componentes.....	19
2.4 Casa de la calidad.....	21
2.5 Propuestas de alternativas de diseño.....	23
2.6 Matriz de decisión.....	25
2.7 Rediseño del sistema.....	27
2.7.1 Criterios de selección – accesorios.....	27
2.7.2 Criterios de selección – bombas.....	29
2.7.3 Criterios de selección – motores.....	29
2.7.4 Criterios de selección – Variador de frecuencia.....	30
2.7.5 Flujo de trabajo del sistema.....	31

Capítulo 3.....	32
3.1 Dimensionamiento y selección de componentes mecánicos.	33
3.2 Dimensionamiento y selección de componentes eléctricos.	37
3.3 Diagrama de fuerza y de control del nuevo sistema.	40
3.4 Estructura del nuevo sistema.	43
3.5 Parámetros para el mantenimiento del equipo.	46
3.6 Funcionamiento para la realización de las prácticas.....	47
3.7 Análisis de costos.....	48
Capítulo 4.....	50
4.1 Conclusiones y recomendaciones	51
4.1.1 Conclusiones.....	51
4.1.2 Recomendaciones	52

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral.
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional.
DC	Corriente Continua.
AC	Corriente Alterna.
NPSH	Altura Neta Positiva de Aspiración.
PME	Punto Máximo de Eficiencia.
P&ID	Diagrama de Tuberías e Instrumentación.
VFD	Variador de Frecuencia.
IP	Índice de Protección contra Polvo y Humedad
PVC	Policloruro de Vinilo
CW	Dirección en el sentido de las agujas del reloj. (Clock Wise)
CCW	Dirección contraria al sentido de las agujas del reloj (Counter Clock Wise)
ISO	International Standard Organization

Simbología

HP	Caballos de fuerza
kW	Kilovatio
V	Voltio
A	Amperio
RPM	Revoluciones por minuto
N	Newton
Kg	Kilogramo
l/s	Litros por segundo
mm	Milímetro
m	Metro
MPa	Megapascales
kPa	Kilopascales
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
m/s	Metro por segundo

Índice de figuras

Figura 1.1 <i>Placa informativa de controlador DC</i>	5
Figura 1.2 <i>Placa informativa de motor DC</i>	6
Figura 1.3 <i>Elementos funcionales de un sistema de instrumentación</i>	6
Figura 1.4 <i>Accesorios para instrumentos de medición de presión, mejorado y extraído de Instrumentación Industrial, Creus</i>	8
Figura 1.5 <i>Componentes de una bomba centrífuga dónde 1. Es el punto de entrada del fluido hacia la bomba y 2. Es el punto de salida de fluido de la bomba</i>	10
Figura 1.6 <i>Curva de rendimiento de bomba vs Curva de demanda del sistema</i>	12
Figura 1.7 <i>Carga hidrostática de la bomba</i>	13
Figura 2.1 <i>Fases del proceso de diseño</i>	15
Figura 2.2 <i>Diagrama P&ID del sistema actual incluyendo el sistema de instrumentación</i>	17
Figura 2.3 <i>Simbología del diagrama P&ID</i>	18
Figura 2.4 <i>Válvula de sistema bypass de conexión de bombas</i>	18
Figura 2.5 <i>Estado interno del tanque reservorio</i>	19
Figura 2.6 <i>Controladores DC y panel de sensores del sistema de motores</i>	20
Figura 2.7 <i>Motores tipo Shunt de la marca Normand Electrical junto al selector de sensores integrado al sistema</i>	20
Figura 2.8 <i>Resumen de la condición actual de los equipos</i>	21
Figura 2.9 <i>Requisitos mínimos necesarios para levantar la casa de la calidad</i>	22
Figura 2.10 <i>Casa de la calidad, rediseño de banco de prueba de bombas centrífugas</i>	23
Figura 2.11 <i>Sketch de alternativa 1</i>	24
Figura 2.12 <i>Sketch de alternativa 2</i>	25
Figura 2.13 <i>Suma de puntuaciones y porcentajes</i>	26
Figura 2.14 <i>Coeficiente de pérdidas para accesorios de conexión de flujo de tuberías</i>	28
Figura 2.15 <i>Coeficiente de pérdidas para válvulas empleadas en sistema de tuberías</i>	28
Figura 2.16 <i>Rating de clasificación para numeración IP</i>	30
Figura 2.17 <i>Flujograma de trabajo del sistema de banco de prueba de bombas centrífugas</i>	31

Figura 3.1 <i>Imagen referencial ilustrativa de codo 90° PVC empleado en sistema de tuberías de banco de prueba</i>	34
Figura 3.2 <i>Imagen referencial ilustrativa de válvula de bola PVC empleado en sistema de tuberías de banco de prueba</i>	34
Figura 3.3 <i>Imagen ilustrativa referencial de variador de frecuencia a emplear en el sistema</i> ..	38
Figura 3.4 <i>Sensor TFF-600 FUTEK para torque</i>	39
Figura 3.5 <i>FB 420 2.0 Shaft Speed como tacómetro para medición de RPM del sistema</i>	39
Figura 3.6 <i>Flujómetro electromagnético</i>	40
Figura 3.7 <i>Transductores de presión</i>	40
Figura 3.8 <i>Diagrama de fuerza de sistema motor – variador de frecuencia, banco de prueba de bombas</i>	41
Figura 3.9 <i>Diagrama de control sistema motor – variador de frecuencia, banco de prueba de bombas</i>	42
Figura 3.10 <i>Diseño 3D del reservorio de banco de prueba, elaborado con software Inventor 2023 Professional</i>	43
Figura 3.11 <i>Simulación del peso conjunto motor – bomba como cargas puntuales en plancha soporte</i>	43
Figura 3.12 <i>Sección de modelo de plancha de acero perforada, de 4.5 mm de espesor</i>	44
Figura 3.13 <i>Modelo de plancha de separación de reservorios, con un vertedero triangular en su parte superior</i>	44
Figura 3.14 <i>Sistema de tuberías de banco de prueba de bombas centrífugas</i>	45
Figura 3.15 <i>Ensamblaje final del sistema de banco de prueba de bombas</i>	46
Figura 3.16 <i>Configuración de tuberías propuesta para la tabla explicativa original del manual de banco de Prueba Gilkes GH-90</i>	47

Índice de tablas

Tabla 2.1 <i>Comparación por pares</i>	25
Tabla 2.2 <i>Ejes de matriz de decisión explicados</i>	26
Tabla 2.3 <i>Matriz de decisión</i>	27
Tabla 3.1 <i>Coefficiente de pérdidas para cada accesorio</i>	34
Tabla 3.2 <i>Listado de variadores de frecuencia a emplear en el sistema</i>	38
Tabla 3.3 <i>Listado de sensores a emplear en el sistema</i>	39
Tabla 3.4 <i>Tabla actualizada de configuración de tuberías, adaptación de tabla original en nual de operación del equipo</i>	48
Tabla 3.5 <i>Estimación general de los costos de los elementos del banco de prueba, considerando precios en el mercado nacional, a excepción de aquellos elementos que son de importación</i> ..	49

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Diagrama P&ID actual de banco de prueba de bombas.
- PLANO 2 Diagrama de fuerza y control – Motor y Variador.
- PLANO 3 Estructura de banco de prueba de bombas.
- PLANO 4 Sistema de tuberías de banco de prueba.
- PLANO 5 Plancha perforada de banco de prueba.
- PLANO 6 Plancha triangulada de banco de prueba.
- PLANO 7 Ensamblaje final.

Capítulo 1

1.1 Introducción

Los estudios relacionados con bombas centrífugas han evolucionado desde su uso en los comienzos de la revolución industrial, ya que la necesidad de optimizar la eficiencia de estos dispositivos ha provocado que se involucre toda la tecnología disponible con la finalidad de encontrar los puntos de operación óptimos que maximicen su funcionamiento.

Estas tecnologías incluyen desde aplicar cálculos avanzados en mecánica de fluidos hasta emplear el diseño asistido por computadora y la dinámica de fluidos computacional (CFD, siglas en inglés) como herramientas que potencien la funcionalidad de las bombas centrífugas.

Ante la notable ausencia de un equipo con las características necesarias para que el estudiante pueda comprender los parámetros de funcionamiento vinculados a bombas centrífugas, se desea restaurar el equipo de banco de prueba de bombas Gilkes GH90, y así recuperar un sistema que permita al estudiante comprender la teoría de bombas y la aplicación de estos principios, asegurando al alumnado una educación de calidad.

La finalidad de implementar un nuevo banco de prueba para bombas centrífugas, acompañado con un programa de prácticas de laboratorio, es que el estudiante sea capaz de analizar e interpretar sus curvas de operación. Esto les permitirá estar preparados para enfrentar los desafíos técnicos propios del entorno laboral. Al mismo tiempo, la institución podrá participar activamente de programas de investigación y desarrollo relacionados con el estudio y la optimización del funcionamiento bombas centrífugas.

Para el desarrollo de este proyecto será de vital importancia integrar la aplicación de conocimientos en turbomaquinarias, mecánica de fluidos y diseño mecánico. Se incluirá de manera complementaria, las teorías de confiabilidad s relacionadas con el mantenimiento industrial para asegurar la operatividad y sostenibilidad del rediseño propuesto.

1.2 Descripción del problema

En el laboratorio de Termofluidos de la ESPOL se encuentra actualmente inactivo el banco de prueba de Bombas Gilkes GH90, con el potencial de brindar prácticas relacionadas con el comportamiento de bombas y sus respectivos parámetros de operación. El equipo presenta conflictos en su sistema de instrumentación, su programa de mantenimiento debido a la antigüedad de los componentes y enfrenta una considerable desactualización en sus sistemas electrónicos. A su vez, el sistema de purgas del tanque reservorio y el cebado de las bombas necesita ser renovado.

La modernización de este equipo le permitirá a la institución recuperar un activo que fortalecerá la interacción de los estudiantes con el programa académico del área de termofluidos, lo que facilitará el acceso de la universidad a certificaciones de nivel internacional al contar con equipos didácticos de primer nivel, alineados con las a situaciones reales que se enfrentan en la industria.

1.3 Justificación del problema

Para poder tener una visión práctica e integral de los principios teóricos vistos en clase, se requiere del complemento de prácticas de laboratorio que permitan al estudiante visualizar y entender el comportamiento de equipos y máquinas que muestran en su funcionamiento la aplicación directa de estos principios.

La recopilación de datos, el manejo práctico de sistemas y la comparativa entre el resultado experimental y teórico permiten no solo entender de mejor manera lo aprendido en el aula, sino también comprender como diversos factores de la vida real alteran las respuestas finales de dichos sistemas.

El banco de prueba de bombas Gilkes GH90 cumple una función esencial en el aprendizaje de los fundamentos teóricos relacionados con el comportamiento hidráulico de estos equipos, incluyendo las reglas de semejanza, operación en serie y paralelo, y el fenómeno de cavitación. Sin embargo, al encontrarse actualmente fuera de servicio, se pierde un elemento crucial para la validación experimental teórica, lo que limita la capacidad de interrelacionar la teoría con la práctica.

Por lo descrito en el párrafo anterior y frente a la necesidad de mantener actualizados los equipos e instrumentos destinados a las prácticas de laboratorio, en este trabajo de titulación se realizará un rediseño del banco de prueba que permita incorporar un recurso adicional al proceso enseñanza-aprendizaje de la turbomaquinaria hidráulica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Rediseñar un banco de prueba para bombas centrífugas, aplicando principios de sistemas termofluidos, para recuperar un equipo clave en actividades académicas y de investigación relacionadas con dinámica de fluidos y bombeo en carreras técnicas de la ESPOL.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar el estado actual del banco de prueba, identificando los puntos críticos que requieran actualizaciones o reparaciones, para cumplir con los estándares institucionales.
- Establecer parámetros de diseño mediante el análisis de componentes deteriorados y elementos que dificulten futuras mejoras o mantenimientos, con el objetivo de asegurar la sostenibilidad del sistema.
- Diseñar la nueva configuración del banco de prueba, seleccionando los equipos e instrumentos adecuados para conformar el sistema renovado, con el fin de garantizar su funcionalidad y adaptación a las demandas académicas y de investigación.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Banco de prueba

En líneas generales, un banco de prueba es un equipo que posee una configuración específica que permite simular condiciones de operación con distintos fines, a nivel comercial, los bancos de pruebas cumplen la función de control de calidad, eficiencia y seguridad de diferentes dispositivos de diversas índoles, ya sean equipos puramente mecánicos como engranajes, bandas transportadoras y motores; hasta equipos hidráulicos o neumáticos como pistones.

Sin embargo, estos versátiles sistemas tienen una serie de aplicaciones en el ámbito científico, académico e investigativo, donde juegan un rol clave para la comprensión y el estudio del diseño de nuevos sistemas que se adapten a alguna necesidad previamente definida.

En el caso del banco de prueba de bombas Gilkes GH 90, es un equipo que nació con la finalidad de hacer un enfoque en el aprendizaje sobre los diversos parámetros de bombas, empleando un sistema de sensores que muestran señales digitalizadas y analógicas y regulando la potencia mecánica entregada al sistema empleando dos motores con su respectivo controlador DC, un selector de señal y una configuración de tuberías y válvulas que permite hacer pruebas tanto en configuración en serie como paralelo.

Los componentes del banco de prueba Gilkes tienen por origen el Reino Unido, país desde el cual fue donado todo este sistema, sus motores DC son Normand Electrical de 3 HP, su sistema de controladores DC son Erskine systems limited, mientras que la carcasa y el sistema general tiene su montaje, diseño y elaboración con la empresa Gilbert Gilkes & Gordon Ltd. Ubicada en la ciudad de Kendal.

Como indica Doebelin existen dos métodos generales disponibles en la resolución de problemas de ingeniería: teórica y experimental [1], la mayoría de problemas que se encuentran en la frontera del conocimiento requieren una extensa repetición de pruebas experimentales que permitan modelar o generar sistemas de resolución de dichos problemas, hasta el momento, inexistentes para dicha problemática, por lo que correctos sistemas de medición y prueba son necesarios y deben permitir la repetibilidad y la replicación de los ensayos realizados.

Figura 1.1

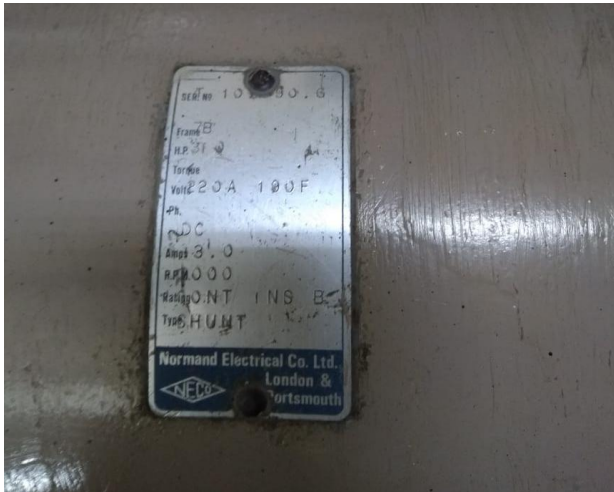
Placa informativa de controlador DC



Nota. La imagen muestra todos los datos operativos del sistema controlador DC del sistema de motores, este componente es vital pues es la directa interacción máquina – hombre del equipo.

Figura 1.2

Placa informativa de motor DC



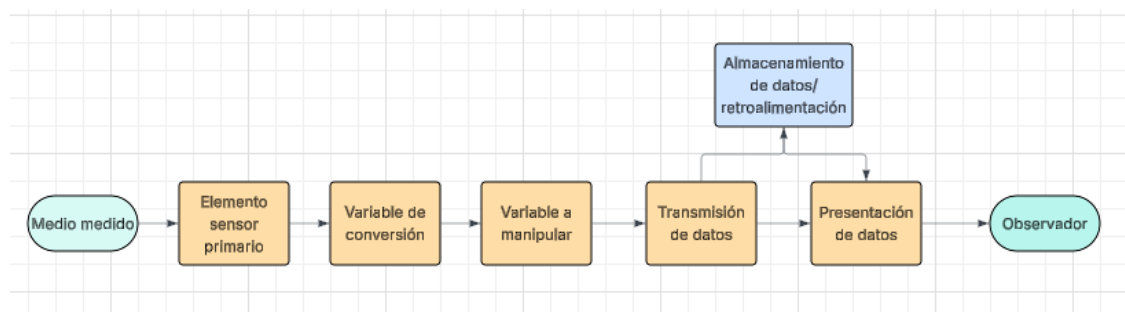
Nota. La placa indica las características del motor DC empleado por el sistema, 3 HP configuración tipo Shunt (conexión en paralelo de dos o más dispositivos a través de una resistencia con fines de medición), opera a unos 3 Amperios y a un total de 220 Voltios.

1.4.2 Instrumentación

Respecto a la instrumentación en ingeniería experimental, es importante durante el proceso de elaboración del sistema comprender el comportamiento de los experimentos a ejecutarse para la correcta selección de los sistemas de instrumentación, pues estos son clave en la retroalimentación, lectura y seguimiento del comportamiento de los diversos parámetros que se desean estudiar [1], los esquemas de los sistemas de instrumentación poseen una serie de elementos funcionales (ver figura 1.3):

Figura 1.3

Elementos funcionales de un sistema de instrumentación



Nota. Este diagrama de flujo representa el comportamiento típico utilizado por los sensores para medir y permitirle al usuario interpretar datos y así relacionarlo con las variables de control de un sistema (readecuado y extraído de Measurement Systems, Application and Design. E. Doebelin).

Estos sistemas de medición, por lo general, tienen una diversa serie de clasificaciones según funcionalidad y método de lectura de los datos, la clasificación más relevante y conocida es aquella que divide a los sistemas de instrumentación en analógicos y digitales.

Sistema de instrumentación analógico: Un sistema de instrumentación analógico emplea componentes mecánicos para generar lecturas que son instantáneas en respuesta al comportamiento de la variable o parámetro que analiza, por lo que la señal de salida varía de forma continua directamente con la señal de entrada [2].

Sistema de instrumentación digital: En el caso de los instrumentos digitales, estos reciben la señal analógica y mediante el empleo de electrónica transformar dicha información en tiempo real, llevándolo a lecturas digitales que pueden generar un registro en el tiempo.

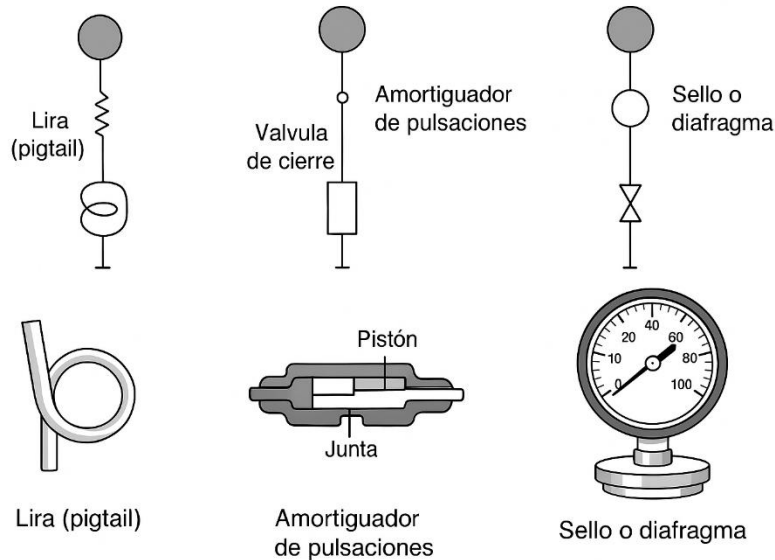
Para sistemas que se exponen al comportamiento de fluidos, es vital comprender como funciona la instrumentación y lectura de señales para presión y flujo, especialmente sus principios teóricos, como se detalla a continuación:

Presión: La presión es la representación de la fuerza de contacto aplicada por unidad de área, por lo que esta actúa netamente sobre una superficie, existe una serie de unidades mediante las cuales la presión puede ser representada, entre las cuales destacan: pascal, bar, atmósferas; kilogramo por centímetro cuadrado y libras por pulgada cuadrada, el sistema internacional emplea los pascales como su unidad estándar y representa la fuerza aplicada de 1 Newton sobre un cuerpo de 1 kilogramo que genera una aceleración de 1 m/s^2 [2]

En el caso de los instrumentos de medición, es importante recalcar que estos miden presiones relativas, ya que miden secciones internas de flujo, en el ámbito operativo de estos sistemas, si el proceso supera una presión de 25 bares es necesario en su sistema de conexión la colocación de una válvula de alivio, para que su desmontaje se pueda realizar de manera segura, la temperatura juega un rol importante en el equipo de medición instalado, pues esto definirá si se emplea una pigtail para temperaturas altas, o de ser ya excesivo para el equipo, emplear una longitud de tubería a una distancia considerable para llegar a temperaturas admisibles por el componente.

Figura 1.4

Accesorios para instrumentos de medición de presión, mejorado y extraído de Instrumentación Industrial, Creus.



Nota. La presente imagen muestra ciertos accesorios que protegen a los equipos de medición de presión de diversos fenómenos físicos como temperaturas elevadas en el caso de la lira (o pigtail) o caídas violentas de presión.

Flujo/caudal: Los medidores de caudal tienen, por su parte, dos grandes clasificaciones, aquellos medidores de caudal masa y los que son medidores de caudal volumétrico [1], en el caso del último, es el que se emplea en sistemas de medición de fluidos, el caudal es la medida que representa el volumen de un líquido o gas por unidad de tiempo, los principios de medición de los medidores volumétricos giran en torno a:

- Presión diferencial: Placas orificio, tubo venturi y tubo pitot para la generación de lecturas, emplea el equilibrio de fuerzas con silicio difundido.
- Área variable: Uso de rotámetros que emplean puentes de impedancias para las lecturas.
- Velocidad: Generalmente emplean turbinas, sondas ultrasónicas e incluso flotadores en canales abiertos, que emplean un potenciométrico piezoeléctrico para la generación de las señales
- Fuerza: Emplea placas de impacto para las lecturas, dichas placas emplean galgas extensiométricas para la generación de señales y transmisión de información.
- Tensión inducida: medidores magnéticos generan lecturas que son transmitidas por un convertidor potenciométrico.

Al aplicar elementos de presión en la gran mayoría de medidores, los medidores de caudal se basan en el teorema de Bernoulli en tubería horizontal para generar la lectura de datos, expresándose el caudal en función de la presión diferencial.

1.4.3 Bombas centrífugas

Como menciona Cengel, “La palabra bomba es un término general que designa a cualquier máquina que añade energía a un fluido” y “El objetivo de tener una bomba es añadir energía al fluido, lo que da como resultado un incremento en la presión de este, no necesariamente un aumento en la velocidad del fluido cuando pasa por la bomba” [3]. Existen una serie de parámetros fundamentales que permiten analizar el rendimiento real de una bomba, una de las medidas fundamentales es el gasto volumétrico, el cual se expresa como sigue:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (1.1)$$

El flujo volumétrico depende del flujo másico (\dot{m}) y la densidad del fluido (ρ).

Otro parámetro fundamental para el rendimiento de bombas es la carga hidrostática neta, la cual se define como el cambio de la carga hidrostática de la entrada de la bomba con la carga hidrostática de salida:

$$H = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_{sal} - \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_{ent} \quad (1.2)$$

Dónde:

H: cabezal de bomba

P: Presión

z: altura respecto a la base del sistema

g: gravedad

ρ : densidad de fluido

Este parámetro es con frecuencia mencionado como altura de una columna equivalente de agua.

Otros parámetros necesarios que juegan un rol importante en la determinación del rendimiento de una bomba son:

- Potencia entregada al fluido
- Potencia al freno
- Rendimiento volumétrico
- Rendimiento hidráulico
- Rendimiento mecánico

Todos estos parámetros generan el rendimiento total al ser multiplicados entre sí, estas áreas permiten determinar aquellas secciones de la bomba que tienen bajas eficiencias y requieren una modificación (ver ecuación 1.3)

$$\eta = \eta_v \eta_h \eta_m \quad (1.3)$$

Dónde:

η : Eficiencia total

η_v : rendimiento volumétrico

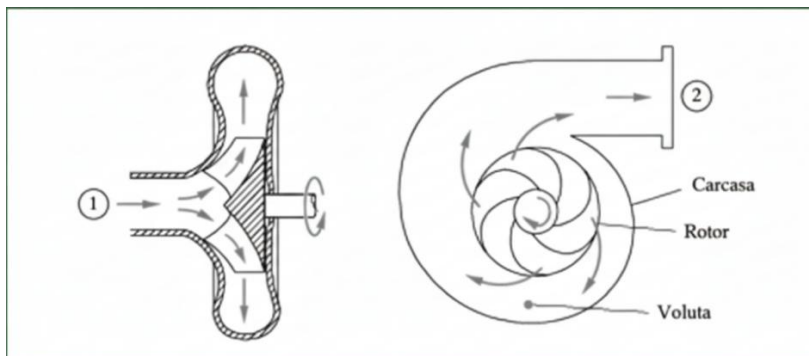
η_h : rendimiento hidráulico

η_m : rendimiento mecánico

Las bombas centrífugas son máquinas rotodinámicas constituidas por un rotor dentro de una carcasa, el fluido entra en dirección axial y son impulsados por los álabes del rotor (ver figura 1.5), debido a la fuerza empleada el fluido tomará direcciones tanto tangencial como radialmente hacia el exterior de este componente, al momento que el fluido atraviesa el rotor, el fluido aumentará tanto su velocidad como su presión.

Figura 1.5

Componentes de una bomba centrífuga, dónde 1. es el punto de entrada del fluido hacia la bomba y 2. Es el punto de salida de fluido de la bomba



Nota. La presente imagen muestra la estructura clásica de una bomba centrífuga, el punto 1 representa la entrada y las flechas representan el flujo del fluido, el movimiento del eje y de los rotores, la voluta cumple la función de guiar el fluido hacia la salida, el rotor dirige el fluido y aumenta su energía, mientras que la carcasa (típicamente de hierro fundido o acero) protege a todo el sistema. Extraído y mejorado del texto Frank M. White, Mecánica de Fluidos, 4ta Edición

1.4.4 Curvas características en pruebas de bombas

“Las curvas características se trazan casi siempre para velocidad de giro del eje n (normalmente en rpm) constante. El caudal Q (normalmente en galones por minuto para líquidos y en pies cúbicos por minuto para gases) se toma como variable independiente básica. Como variables dependientes, o <<de salida>> (Ver figura 1.6), se consideran la altura manométrica H (incremento de presión Δp para gases), la potencia al freno P_f y el rendimiento η ” [4].

La generación de las curvas de comportamiento de bombas son fruto de constantes ensayos experimentales que permiten construir, en base a la lectura de parámetros con anterioridad mencionados, la reacción general que tendrá este dispositivo frente a los distintos ajustes de variables de entrada, la variable de entrada ajustable general es la velocidad angular de giro que el motor proveerá al eje de la bomba, sin embargo, y aunque para la determinación de los diferentes valores la experimentación es necesaria, se conoce que el comportamiento de las bombas en líneas generales es como sigue:

- Cuando el flujo es inexistente, la eficiencia o rendimiento del sistema será 0, caso contrario, cuando el flujo alcanza su punto máximo de caudal la eficiencia del sistema alcanzará su culmen, generalmente situándose entre el 80 y 90% en caudales que rondan el 60% del caudal máximo.
- Es ideal en el comportamiento de la bomba que, la curva de rendimiento sea plana en secciones cercanas a la eficiencia máxima.
- La eficiencia nunca será independiente del cabezal y la potencia, ya que son fundamentales para la obtención de este valor.
- El aumento de la potencia al freno suministrada por el motor crecerá proporcionalmente con el aumento del caudal, los incrementos bruscos de potencia están directamente conectados a casos de álabes radiales, este comportamiento no es óptimo, ya que exige una mayor potencia del motor, es por esto que se priorizan modelos con álabes curvados hacia atrás.

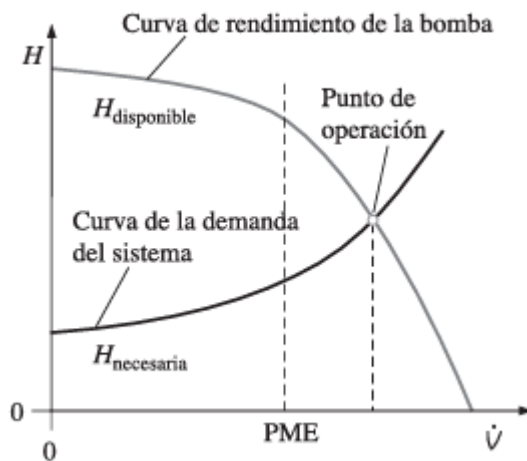
Es importante recordar que “El punto de operación permanente de un sistema de tuberías está establecido en el gasto volumétrico donde $H_{necesaria} = H_{disponible}$ ” [4], realizar toda esta clase de consideraciones, incluyendo pérdidas del sistema, empleo de codos y accesorios permitirá comprender el comportamiento de la bomba en el conjunto de tuberías, un análisis relevante a generar en las curvas de comportamiento es la curva de

cavitación, para evitar que la bomba sufra del efecto de cavitación es necesario mantener la presión local por arriba de la presión de vapor, estas mediciones se hacen en la entrada de la bomba, el parámetro de flujo es conocido como carga de aspiración neta positiva o net positive suction head (NPSH), los fabricantes exponen a sus componentes o equipos a diferentes puntos operativos ajustando los parámetros de gasto volumétrico y presión de entrada, situando caudales y temperaturas de fluido ya fijas, las presiones se reducen gradualmente y se detiene ese descenso hasta que se genere cavitación en algún punto de la bomba.

Es importante recordar que, para evitar el efecto de cavitación, fenómeno mediante el cual, por la caída de presión local por debajo de la presión de vapor, se generan burbujas que impactan violentamente en las aspas del rotor de la bomba, el NPSH real debe superar al NPSH requerido, y es importante mencionar que este valor depende de dos variables importantes, la temperatura del fluido y el caudal, la temperatura no puede ser despreciable en estas situaciones porque la presión está en función de la temperatura.

Figura 1.6

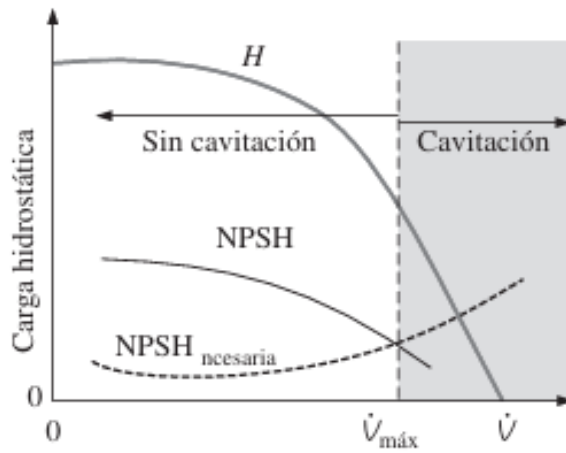
Curva de rendimiento de bomba vs Curva de demanda del sistema, cuyos ejes son el cabezal (eje Y) como variable dependiente y el flujo volumétrico (eje X) como variable independiente (extraído de Cengel). [3]



Nota. Esta gráfica, al comparar las curvas de rendimiento de la bomba con la de demanda del sistema permite la debida identificación del PME (Punto de máxima eficiencia) y el punto de operación del sistema generado.

Figura 1.7

Carga hidrostática de la bomba (eje X, variable dependiente) vs Flujo volumétrico (eje Y, variable independiente) (extraído de Cengel). [3]



Nota. Esta gráfica tiene por funcionalidad identificar los puntos operativos de cargas hidrostáticas de la bomba en función del caudal conociendo su límite máximo permisible en la zona libre del efecto de cavitación, esto es, la sección donde las presiones locales no disminuirán por debajo del punto de presión del vapor.

1.4.5 Normativas

Las normativas a emplear tienen como función brindar un soporte en los aspectos de selección de componentes y buenas prácticas de laboratorio, es menester recordar que, los equipos deben de cumplir con ciertos estándares brindados en la normativa ISO17025 para ser aptos para la enseñanza y mantenerse funcionales a lo largo del tiempo.

Otra normativa necesaria en este proceso que guiará aspecto de instrumentación es la ISO 9906 en su grado 3, que brinda el soporte de niveles máximos y mínimos de precisión requeridos para pruebas de bombas, con sus respectivas teorías y ecuaciones a aplicarse. Finalmente, la documentación de estándares y guías de selección del Hydraulic Institute servirán de soporte para aspectos relacionados con aplicaciones y buenas prácticas en entornos de sistemas de bombeo.

Capítulo 2

2.1 Metodología de diseño.

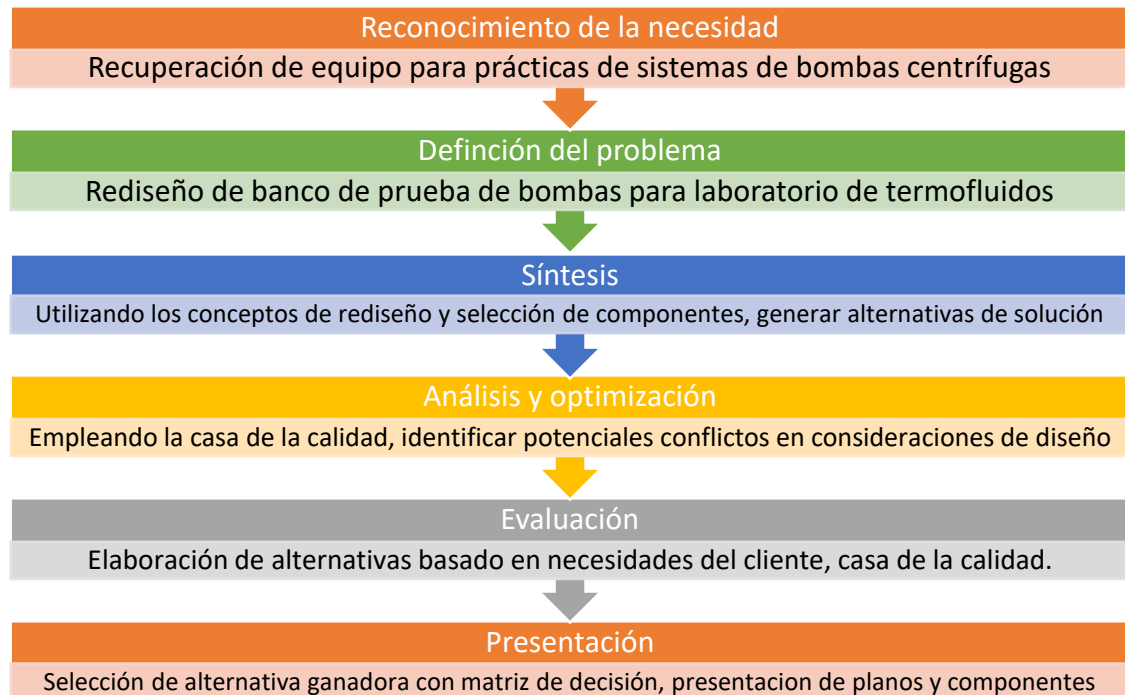
Para definir correctamente la metodología del diseño, es necesario comprender y desglosar debidamente lo que comprende un proceso de diseño (ver figura 2.1), este proceso inicia con la identificación y definición de una problemática que busca atenderse, el entender correctamente el universo que comprende esta problemática será clave para generar un plan que permita resolver esta necesidad.

La fase de identificación se caracteriza por ser un acto altamente creativo [5], esto debido a que depende de toda la información que se encuentre disponible sobre la problemática que se busca atender, la cual puede ser abrumante y extensa, o puede ser escasa y divagante, por lo que la recolección de dicha información es vital para el proceso de diseño.

Una vez se recolecta la información y se comprende la realidad de la situación que se busca solucionar, el proceso de síntesis, iteración y diseño conceptual dependerán en gran medida de todos los datos que se hayan previamente obtenido, pues permitirá analizar y optimizar correctamente la propuesta de diseño para su posterior evaluación, presentación y ejecución.

Figura 2.1

Fases del proceso de diseño.



Nota. Fases del proceso de diseño, con sus respectivas flechas que indican el flujo del proceso.

Como menciona Dieter, “el diseño de ingeniería puede llevarse a cabo por muchas razones diferentes y puede adoptar distintas formas” [6], se engloban así un general de cuatro potenciales procesos de diseño ajustados a las diferentes realidades que puede encontrar un ingeniero de diseño, en las que el autor señala con mayor relevancia a las siguientes:

- Diseño original, o también conocido como diseño innovador: Un diseño completamente desde cero, lo que implica un invento de una solución para una necesidad que no ha sido previamente atendida.
- Diseño adaptativo: Principalmente se emplea cuando se desea adaptar una solución ya existente a una necesidad distinta, generando una aplicación novedosa.
- Rediseño: El rediseño se basa en no modificar el principio de funcionamiento del equipo existente, se realiza una nueva selección de componentes o se modifican piezas o secciones con la finalidad de que se mejore o se recupere un sistema que ha presentado fallas en su uso.
- Diseño de selección: El diseño se concentran en la selección de componentes basados en aspectos como calidad, rendimiento y costo, estos componentes suelen regirse por normas y estándares.

Atendiendo a la problemática presentada, en el banco de prueba de bombas se deseó recuperar su funcionalidad en base a una acertada selección de nuevas piezas que se alineen a las necesidades modernas de aprendizaje y a los nuevos retos de enseñanza que representan los sistemas relacionados con bombas centrífugas, lo que definió a la metodología escogida en un rediseño basado en selección de componentes.

2.2 Consideraciones de diseño.

Las consideraciones de diseño permitieron dar las directrices del desarrollo del proceso de diseño, al conocer que el equipo estará expuesto a condiciones relacionadas con humedad y agua, la importancia de elegir equipos y sistemas de un I.P (Ingress Protection) de 55 se transforma en un punto clave para la protección, autonomía y operación del sistema, el peso y el ruido son también valores a considerar tomando en cuenta que es un equipo didáctico con fines educativos.

Una condición que no puede pasarse por alto es el mantenimiento del sistema, el equipo debe ser de fácil cuidado y mantenimientos, desarrollando un programa para el mantenimiento preventivo como lo indican las normas de laboratorio ISO17025.

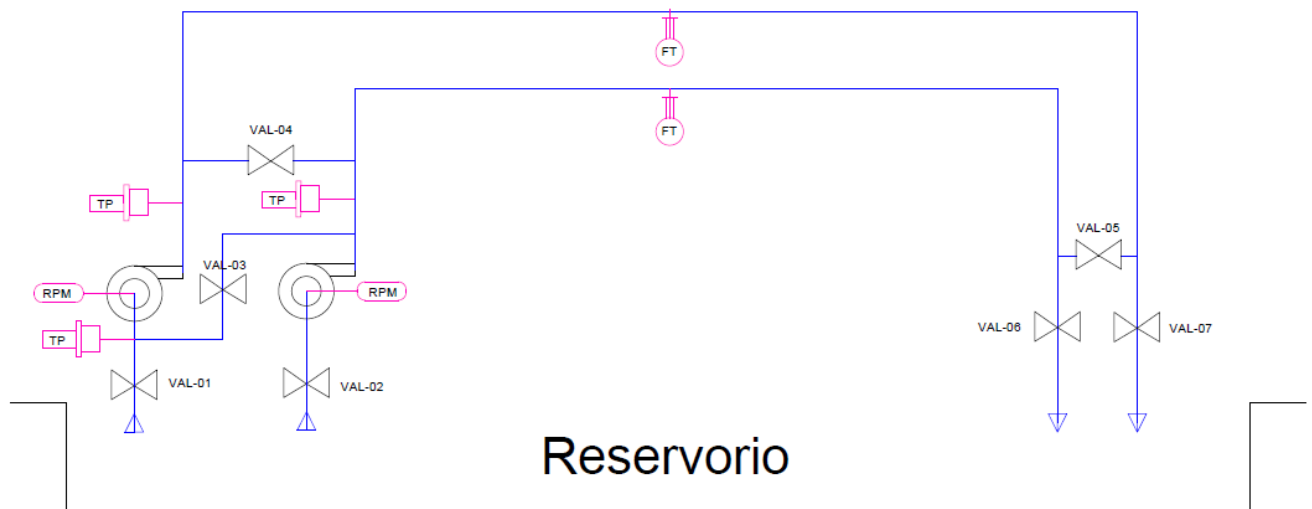
2.3 Condición actual del equipo.

Como se mencionó con anterioridad, para una correcta formulación del plan de solución de la problemática, se realizó un análisis integral de las condiciones actuales del equipo, tanto en el aspecto mecánico, eléctrico y de instrumentación del sistema actual, para así levantar los puntos críticos que impiden el funcionamiento del sistema.

Como un previo reconocimiento general, es necesario entender el flujo de comportamiento del sistema, sus componentes actuales y como cada uno de ellos actúan y operan con normalidad (ver figura 2.2)

Figura 2.2






Diagrama P&ID del sistema actual incluyendo el sistema de instrumentación.



Nota. La presente imagen describe todos los componentes que forman parte del sistema actual del banco de prueba de bombas, incluyendo su sistema de instrumentación (ver simbología en Figura 2.3).

Figura 2.3

Simbología de diagrama P&ID

Simbología	
	Flujómetro
	Tacómetro
	Transductor de presión
	Válvula de paso
	Bomba centrífuga

— Línea de agua

— Instrumentación

Nota. Esta imagen actúa como guía para comprender el diagrama P&ID del sistema actual encontrado en el banco de prueba de bombas Gilkes GH-90.

2.3.1 Estado mecánico de los componentes

Durante la revisión general del equipo, se detectó que prácticamente todas las válvulas de paso del sistema no funcionaban correctamente, no permitiendo el cierre o la apertura del sistema de paso de agua con facilidad, el sistema cuenta con un total de 7 válvulas, de las cuales 5 válvulas son de 1½ pulgada, y solo una se encontraba en buen estado.

Las dos válvulas restantes se ubican al ingreso de las bombas, siendo de 2 pulgadas y ninguna se encuentra correctamente habilitada para cumplir con las funciones respectivas de apertura o cierre, es importante mencionar que todas las válvulas del sistema son de la marca alemana Asahi AV Valve GmbH de origen alemán. (ver figura 2.4).

Figura 2.4

Válvula de sistema bypass de conexión de bombas.



Nota. Esta válvula permite que el sistema actúe como una bomba en solitario, la configuración del sistema de tuberías de este banco de prueba permite evaluar al sistema de bombas como paralelo o en serie.

En el caso del espacio reservorio, donde se acumula el agua que forma parte del proceso durante las prácticas, se aprecia un deterioro ligero en las planchas separadoras de las

secciones internas del tanque, el estado estructural general del sistema en líneas generales es óptimo y ha mantenido su capacidad de operación a pesar del paso de los años, indicio de buenos cuidados (ver imagen 2.5)

Figura 2.5

Estado interno del tanque reservorio de banco de prueba de bombas.



2.3.2 Estado eléctrico de los componentes

En el caso de los componentes electrónicos, se percibe un severo deterioro en todos los sistemas de instrumentación del equipo, incluso algunos de estos medidores se encuentran ausentes o sus pantallas se encuentran seriamente dañadas, el sistema controlador DC se encuentra inactivo al igual que los dos motores Normand Electrical 2000 RPM, 3 A, de 220 V y 3 caballos de fuerza (ver figura 2.6), debido a la ausencia de trabajos de mantenimiento y de cuidado de estas unidades.

El sistema cuenta también con un selector de sensores (ver figura 2.7), que permite al usuario seleccionar que sensores van a mostrar información en el panel de instrumentación del sistema, por otra parte, el estado general de los cables de todos estos sistemas presenta un deterioro considerable, natural al paso del tiempo.

Las pérdidas por daño de agua, polvo y humedad deben ser considerados en el proceso de rediseño, ignorar estos factores podría perjudicar considerablemente al nuevo sistema.

Figura 2.6

Controladores DC y panel de sensores del sistema de motores.



Nota. Los selectores son de la marca inglesa Erskine, su función es regular la cantidad de voltaje ingresado al sistema, y así regular la potencia mecánica que la bomba entrega al fluido.

Figura 2.7

Motores tipo Shunt de la marca Normand Electrical, junto al selector de sensores integrado al sistema



Figura 2.8

Resumen de la condición actual de los equipos.

Equipo	Código	Condición actual	Breve descripción
Bomba centrífuga 14 cm	BC-01	Activo	En funcionamiento
Bomba centrífuga 11 cm	BC-02	Activo	En funcionamiento
Válvula de paso 1` 1/2 in	VAL-03	Activo	En funcionamiento
Válvula de paso 1` 1/2 in	VAL-04	Inactivo	Requiere cambio
Válvula de paso 1` 1/2 in	VAL-05	Activo	En funcionamiento
Válvula de paso 1` 1/2 in	VAL-06	Inactivo	Requiere cambio
Válvula de paso 1` 1/2 in	VAL-07	Inactivo	Requiere cambio
Válvula de paso 2 in	VAL-01	Inactivo	Requiere cambio
Válvula de paso 2 in	VAL-02	Inactivo	Requiere cambio
Motor Normand Electrical - bomba 14	ME-01	Inactivo	Requiere cambio
Motor Normand Electrical - bomba 11	ME-02	Inactivo	Requiere cambio
Estructura banco de pruebas	EST-01	Activo	En funcionamiento
Panel de sensores	PS-01	Inactivo	Manómetros y lectores dañados, en aspecto estructural, se encuentra en buen estado
Selector de sensor	SEL-01	Inactivo	Requiere cambio
Controlador DC - bomba 14	CDC-01	Inactivo	Requiere cambio
Controlador DC - bomba 11	CDC-02	Inactivo	Requiere cambio
Transductor de presión - bomba 14	TP-01	Inactivo	Requiere cambio
Transductor de presión - bomba 11	TP-02	Inactivo	Requiere cambio
Tacómetro - bomba 11	TC-01	Inactivo	Requiere cambio
Tacómetro - bomba 14	TC-02	Inactivo	Requiere cambio
Flujómetro - bomba 11	FJ-01	Inactivo	Requiere cambio
Flujómetro - bomba 14	FJ-02	Inactivo	Requiere cambio

Nota. La presente figura resume el estado de los componentes actuales que influyen directamente en el trabajo principal del banco de prueba de bombas, donde se identifica que la mayoría de componentes han cumplido con su vida útil.

2.4 Casa de la calidad.

La casa de la calidad es un elemento clave que permite determinar correctamente todas las características de ingeniería e implementación que conecta al potencial rediseño de cualquier equipo basándose en las opiniones y requerimientos del cliente, al organizar la casa de la calidad es necesario implementar, al menos, los siguientes cuatro “cuartos”, de un total de 8, que serán necesarios en la estructuración y la guía de selección de las posteriores alternativas de diseño:

Cuarto 1: Las necesidades del cliente, todo aquello que el cliente siente que requiere o necesita en el equipo o componente que va a emplear para su uso.

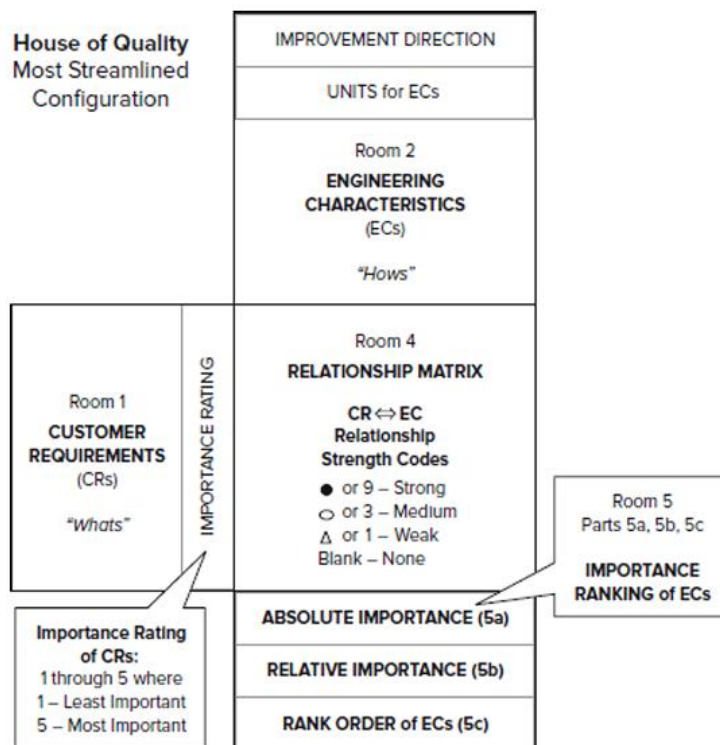
Cuarto 2: Características de ingeniería, son todas aquellas características relacionadas con aspectos técnicos que permiten cumplir y/o satisfacer los requisitos solicitados por el cliente.

Cuarto 4: Matriz de relación, esta sección de la casa de la calidad permite, mediante empleo de columnas y filas, relacionar y puntuar las conexiones existentes entre las características de ingeniería y los requerimientos del cliente, comprender como interactúan estos puntos entre sí e identificar potenciales conflictos, lo ideal es brindar una marcación clara a cada uno de estos sectores con una puntuación específica que permita levantar dicha información

Cuarto 5: Ranking de valoración de criterios de ingeniería, esta sección permite determinar el peso de los componentes y criterios seleccionados, para finalmente determinar aquellos que tendrán prioridad a la hora de levantar los diseños. (Ver figura 2.9)

Figura 2.9

Requisitos mínimos necesarios para levantar la casa de la calidad. extraído de Diseño de ingeniería, sexta edición, de George E. Dieter [6]



Nota. Estructura de requisitos mínimos para generar correctamente la casa de la calidad. extraído de Diseño de ingeniería, sexta edición, de George E. Dieter – lengua nativa: inglés.

A continuación, se detalla la casa de la calidad adaptada a las necesidades y requerimientos de rediseño para el sistema de banco de prueba de bombas centrífugas (ver figura 2.10)

Alternativa 1 – Emplear motor DC con controlador DC

La primera alternativa tiene como finalidad conservar el sistema de alimentación actual, las potenciales ventajas de esta propuesta sería el fácil control a bajas velocidades de la potencia ingresada al sistema completo, esto generará de forma implícita un mayor control de las curvas de comportamiento de la bomba.

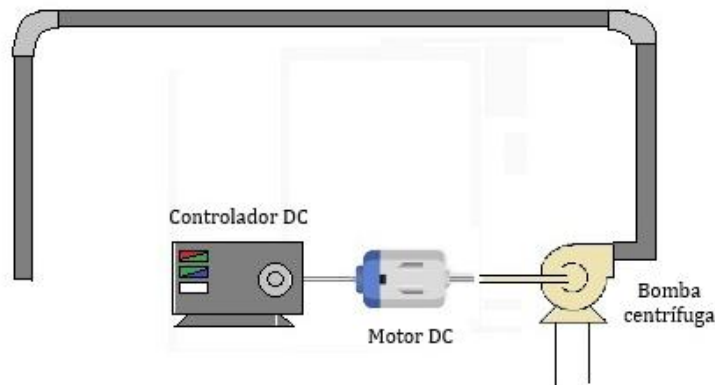
Esto promete una mayor precisión en el estudio de la eficiencia evaluada para cada uno de los casos o puntos de operación estudiados debido a que, a bajas revoluciones, los transformadores tienen mayor capacidad de respuesta frente a los sistemas AC.

En contraparte, estos sistemas son menos requeridos a nivel industrial, por lo que al encontrar controladores DC que requieran bajos recursos y una mayor protección frente a polvo y humedad, es complejo.

Otro punto a considerar es que al emplear un controlador DC para las potencias que maneja el sistema, se requeriría un equipo de mayores dimensiones y potencialmente, mayor peso, lo que implica conflictos serios con la ergonomía general del sistema (ver figura 2.11).

Figura 2.11

Sketch de alternativa 1.



Nota. Sketch práctico que muestra la configuración de alimentación con controlador y motor DC.

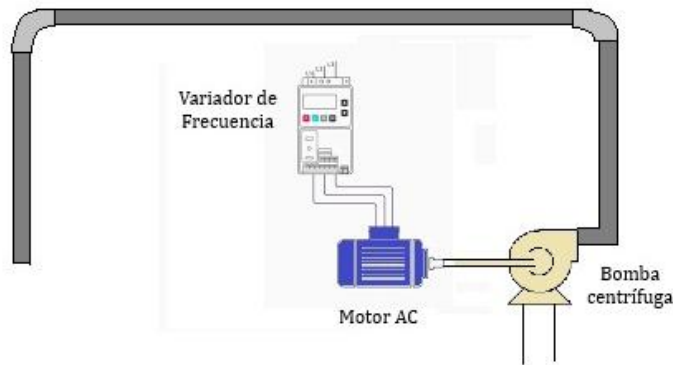
Alternativa 2 – Emplear motor AC con variador de frecuencia

El principal conflicto de este sistema es la capacidad de respuesta y control a bajas velocidades, esto puede llegar a compensarse con un sistema de variador de frecuencia vectorial, sin embargo, se verán involucrados mayores gastos de emplear esta clase de dispositivos. En otros apartados como el peso, disponibilidad de piezas de mantenimiento y calibraciones, al ser considerablemente empleados en la industria, los variadores de

frecuencia y los motores AC cuentan con programas completos que cubren estos aspectos (ver figura 2.12)

Figura 2.12

Sketch de alternativa 2.



Nota. Sketch práctico que muestra la configuración de alimentación con VFD y motor AC.

2.6 Matriz de decisión.

La matriz de decisión (tabla 2.3) girará en torno a los ejes de mayor importancia previamente presentados en la casa de la calidad para evaluar la funcionalidad de cada una de las alternativas (tabla 2.1) y elegir a la alternativa adecuada, la evaluación se realizó en base a: Mantenibilidad, autonomía, peso; escalabilidad y precisión operativa (tabla 2.2).

Tabla 2.1

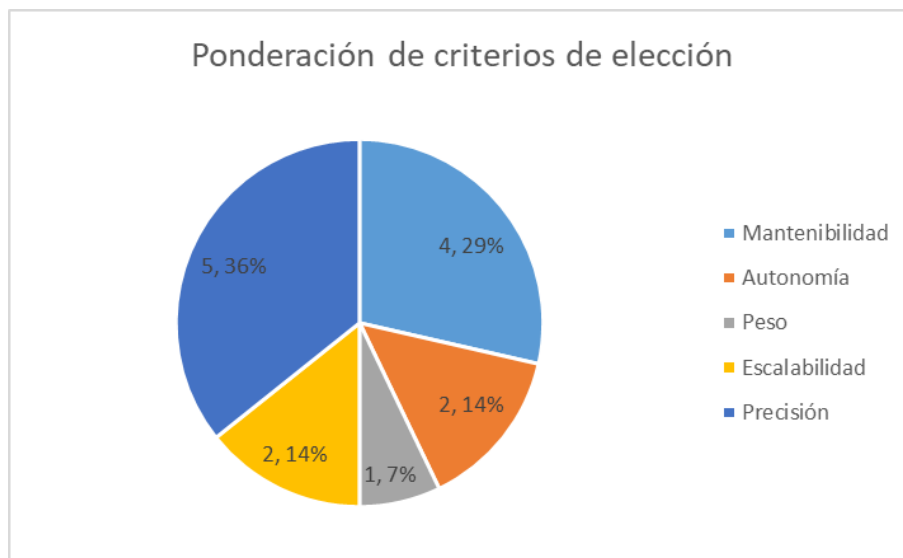
Comparación por pares

	A. Mantenibilidad	B. Autonomía	C. Peso	D. Escalabilidad	E. Precisión Operativa
A. Mantenibilidad		A/2	A/1	A/1	E/1
B. Autonomía			C/1	B/2	E/2
C. Peso				D/2	E/1
D. Escalabilidad					E/1
E. Precisión Operativa					

Nota. Comparación por pares donde 1: superior; 2: considerablemente superior; 3: muy superior al anterior comparado

Figura 2.13

Suma de puntuaciones y porcentajes



Nota. Estos porcentajes determinarán el peso que tendrá cada característica en la matriz de selección, el primer número indica la suma total de puntaje por sección, donde el total final es de 14, el segundo, el porcentaje final que tendrá cada sección dentro de la matriz de decisión.

Tabla 2.2

Ejes de matriz de decisión explicados.

Eje de matriz	Descripción
Mantenibilidad	Facilidad de mantenimiento del sistema, adquisición de repuestos (valor máximo de 5, peso del 29%)
Autonomía	Capacidad operativa del equipo para mantenerse activo sin generar falsas lecturas o desestabilizar el sistema de trabajo (valor máximo de 5, peso del 14%)
Peso	Característica física, influye en la ergonomía y la facilidad de transporte del nuevo sistema (valor máximo de 5, peso del 7%)
Escalabilidad	Capacidad de actualizar y modernizar el sistema (valor máximo de 5, peso del 14%)
Precisión	Control de velocidades y otros valores, para la generación de curvas de operación de bombas (valor máximo de 5, peso del 36%)

Tabla 2.3

Matriz de decisión.

Alternativa	Mantenibilidad (29%)	Autonomía (14%)	Peso (7%)	Escalabilidad (14%)	Precisión (36%)	Total
Alternativa I – Motor DC	2	1	2	1	5	56
Alternativa II – Motor AC	5	3	4	5	3	79

Nota. La ponderación se realiza del 1 al 5, donde 5 es la máxima puntuación posible y 1 la menor, este valor actúa como multiplicador para el porcentaje de relevancia que tiene el eje a evaluar.

2.7 Rediseño del sistema

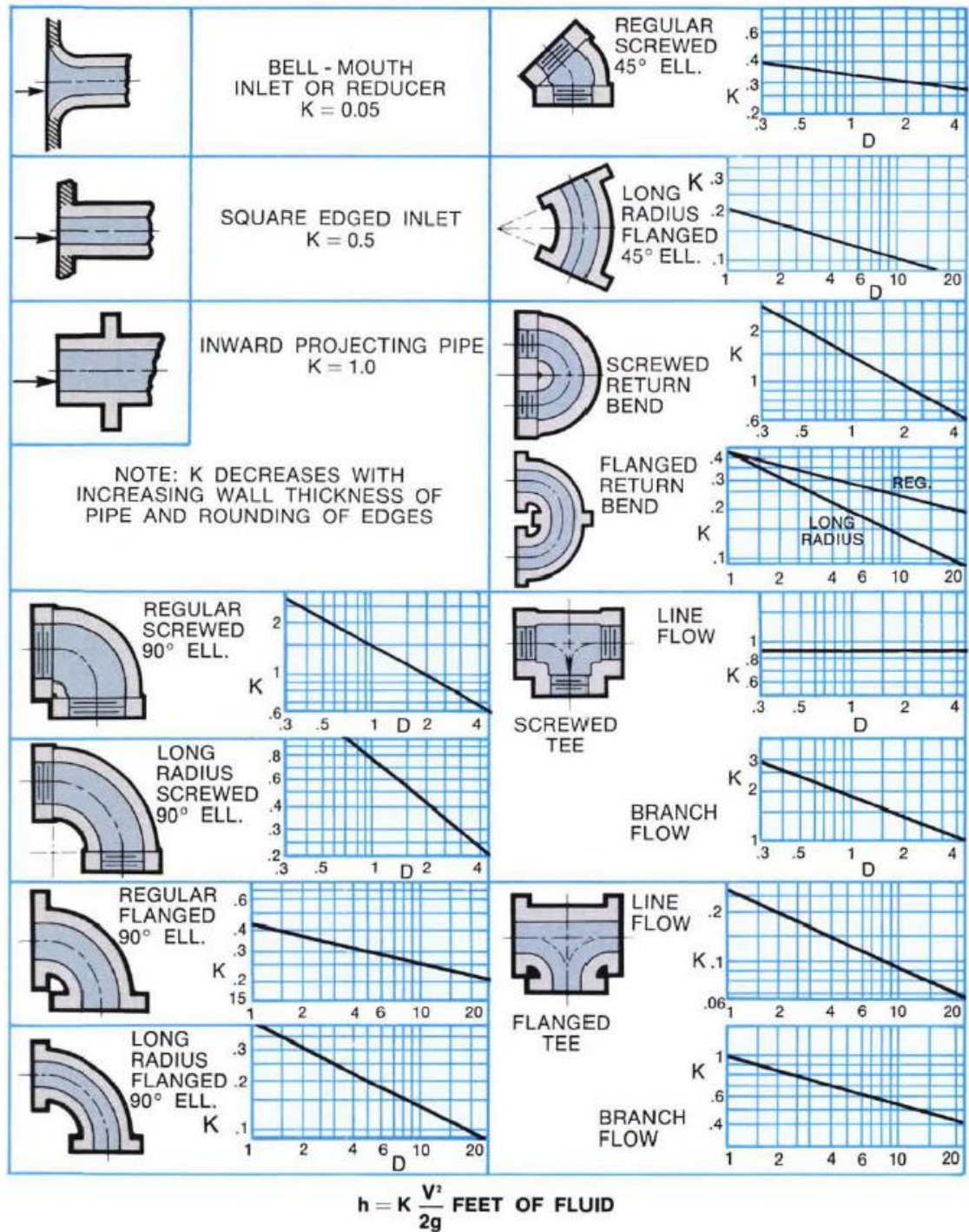
2.7.1 Criterios de selección – accesorios

Para la selección de los accesorios a emplear en el sistema, es necesario considerar aspectos relacionados con las pérdidas menores generadas en cada uno de ellos (figura 2.14) pues influyen en la precisión de los datos adquiridos por los sistemas de instrumentación [3].

Para ello, es necesario considerar el comportamiento del fluido y los efectos generados por el golpe de ariete, una reacción típica en líneas de tuberías, otro fenómeno son los remolinos, secciones donde se desperdicia energía mecánica y las lecturas pueden llegar a variar por la falta de desarrollo del flujo, esto obliga que los codos o válvulas se coloquen decenas de diámetro más abajo o arriba de los instrumentos de medición. [3]

Figura 2.14

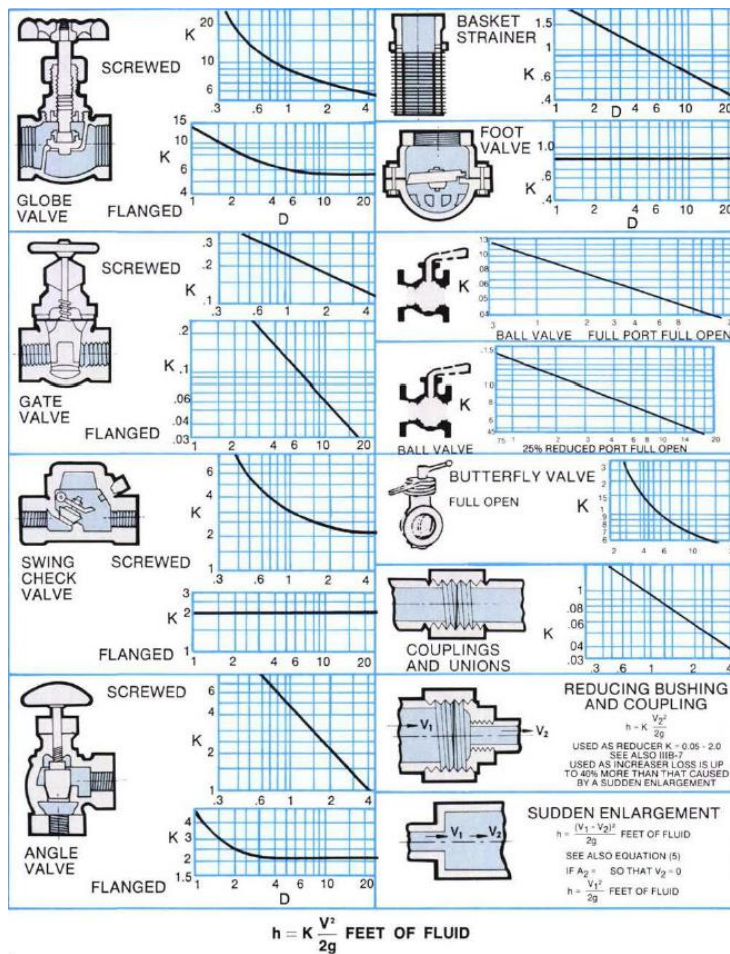
Coefficiente de pérdidas para accesorios de conexión de flujo de tuberías. [7]



Nota. Estos coeficientes permiten calcular las pérdidas relacionadas con accesorios de paso según el diámetro de la tubería empleado. Tomado del Hydraulic Institute Datatool, Pump section.

Figura 2.15

Coefficiente de pérdidas para válvulas empleadas en sistemas de tuberías [7].



Nota. Estos coeficientes permiten calcular las pérdidas relacionadas con válvulas según el diámetro de la tubería empleado. Tomado del Hydraulic Institute Datatool, Pump section.

2.7.2 Criterios de selección – bombas

Se busca principalmente que la bomba seleccionada tenga un amplio rango de operación para simular diferentes escenarios, y tenga a su vez, una elevada capacidad de resistencia a la corrosión ya que este último punto influye en el material de la bomba el cual es acero AISI 316, la bomba seleccionada debe ser tipo bare shaft, lo que permite seleccionar libremente la configuración del motor deseado, sin embargo, el montaje debe ser realizado con precisión para evitar inconvenientes.

2.7.3 Criterios de selección – motores

Para el criterio del motor es importante centrarse en su potencia y su capacidad operativa, respetando el diseño original, se optó por un motor de 3 HP de corriente alterna, con un IP de 55, la medida IP representa la protección de ingreso de partículas y fluidos al interior

del equipo, una alta protección contra fluidos y polvo es necesaria debido al ambiente al que estarán expuestos los motores del banco de prueba de bombas.

Figura 2.16

Rating de clasificación para numeración IP.

1 st numeral - solid foreign objects			2 nd numeral - water		
0	No protection		0	No protection	
1	Protected against solid foreign objects of 50 mm Ø and greater		1	Protected against vertically falling water drops	
2	Protected against solid foreign objects of 12,5 mm Ø and greater		2	Protected against vertically falling water drops when enclosure tilted up to 15°	
3	Protected against solid foreign objects of 2,5 mm Ø and greater		3	Protected against spraying water	
4	Protected against solid foreign objects of 1,0 mm Ø and greater		4	Protected against splashing water	
5	Dust-protected		5	Protected against water jets	
6	Dust-tight		6	Protected against powerful water jets	
<p>Example:</p>			7	Protected against the effects of temporary immersion in water	
			8	Protected against the effects of continuous immersion in water	
			9	Protected against high pressure and temperature water jets	

Nota. La presente imagen muestra el significado de la valoración IP para cada componente eléctrico empleado en la industria, los valores más altos representan mayor resistencia frente a condiciones de polvo, humedad y salpicaduras de agua. tomado del International Electrotechnical Commission [8]

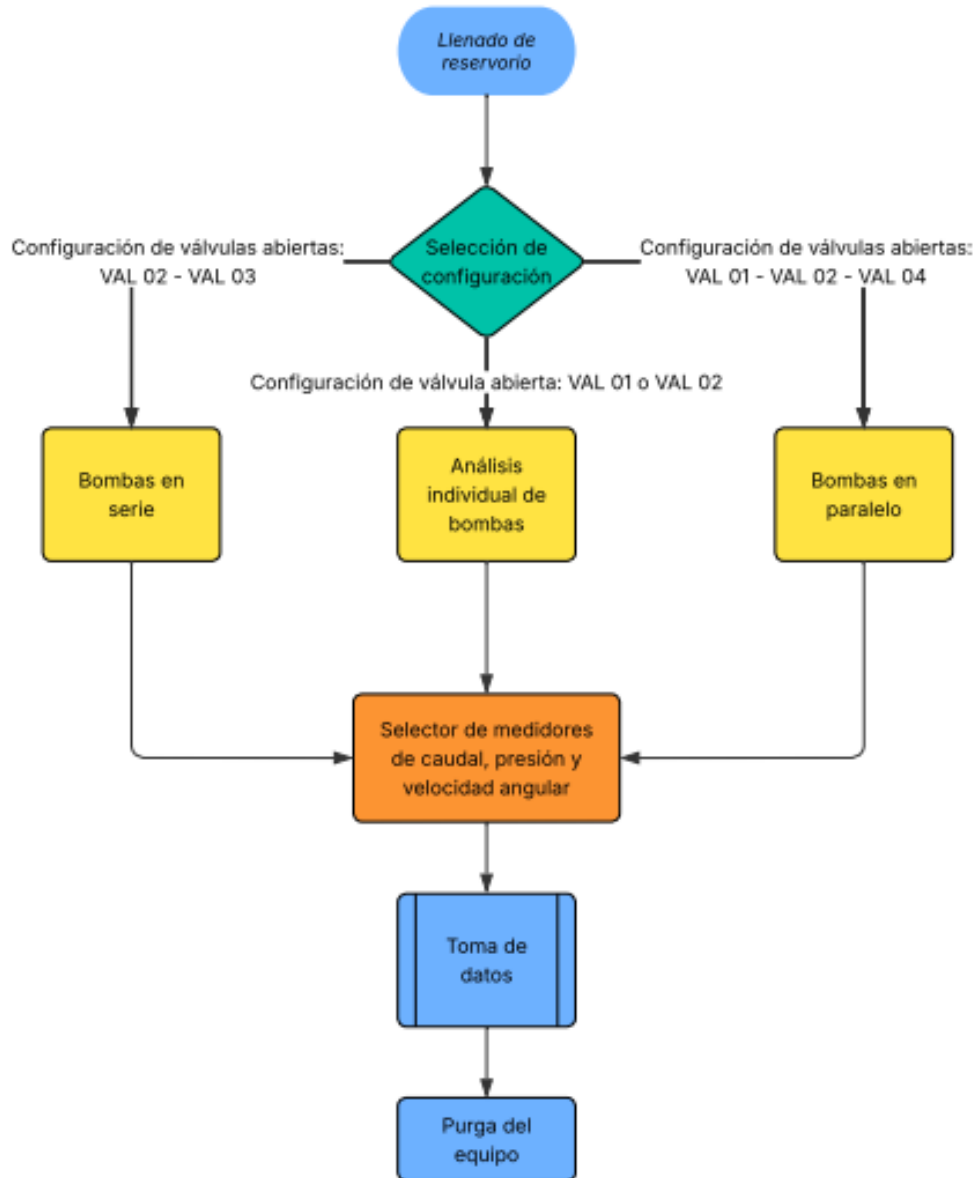
2.7.4 Criterios de selección – Variador de frecuencia

Se optó por un variador de frecuencia vectorial con límite de regulación de potencia de 4 HP, los variadores deben de adquirirse con una potencia ligeramente mayor al de los motores a utilizar por temas de eficiencia y potencias típicas de arranque, en el caso de un VFD con control vectorial, la precisión a bajas velocidades es alto y asegura una mayor exactitud a la hora de ajustar el torque final entregado por el motor.

2.7.5 Flujo de trabajo del sistema

Figura 2.17

Flujograma de trabajo del sistema de banco de prueba de bombas centrífugas.



Nota. Flujograma de trabajo que indica el proceso natural de trabajo óptimo para el equipo rediseñado, los códigos de válvulas hacen referencia a la figura 2.2.

Capítulo 3

3.1 Dimensionamiento y selección de componentes mecánicos.

Para el dimensionamiento y selección de componentes mecánicos es importante conocer las pérdidas máximas permisibles para el sistema evitando que dicha condición perjudique directamente a la toma de datos, se debe tomar en consideración los puntos operativos actuales de ambas bombas para conocer la respuesta general del sistema.

Considerando los datos de la bomba de mayor diámetro:

$$\phi_{b1} = 140 \text{ mm}$$

$$Q_{max.1} = 6.5 \text{ l/s}$$

$$h_{bmax.1} = 28 \text{ m}$$

Dónde:

ϕ_{b1} : diámetro del impeller bomba 1

$Q_{max.1}$ = caudal máximo de bomba 1

$h_{bmax.1}$ = cabezal máximo de bomba 1

Considerando los datos de la bomba de menor diámetro:

$$\phi_{b2} = 101.8 \text{ mm}$$

$$Q_{max.2} = 2.3 \text{ l/s}$$

$$h_{bmax.2} = 17 \text{ m}$$

Dónde:

ϕ_{b2} : diámetro del impeller bomba 2

$Q_{max.2}$ = caudal máximo de bomba 2

$h_{bmax.2}$ = cabezal máximo de bomba 2

La distancia desde el reservorio hasta la entrada de la bomba es:

$$z_2 - z_1 = \Delta z = 790 \text{ mm}$$

Mientras que la presión del sistema, será la presión atmosférica

$$P = 101,325 \text{ kPa}$$

Con estos valores iniciales, se puede evaluar los límites reales del sistema haciendo una selección de componentes para definir una tabla de pérdidas por cada accesorio:

Figura 3.1

Imagen referencial ilustrativa de codo 90° PVC empleado en sistema de tuberías de banco de prueba.



Figura 3.2

Imagen referencial ilustrativa de válvula de bola PVC empleado en sistema de tuberías de banco de prueba.



Debido a la carga operativa del sistema, no se requieren espesores elevados para soportar grandes presiones, por lo que la cédula seleccionada para tuberías y accesorios es la cédula 40.

Tabla 3.1

Coefficiente de pérdidas para cada accesorio.

Accesorio/Sección	Coefficiente K unitario	Cantidad
Ingreso al sistema	0.5	1
Salida del sistema	1.05	1
Válvula de bola	0,50	7
Codo de 90° PVC	0.9	4

Nota. Tabla de resumen de los coeficientes de pérdidas para accesorios de banco de prueba para diámetro de 2 pulgadas.

Para el análisis de comportamiento, es necesario considerar a su vez la velocidad del fluido para las diferentes condiciones

En el caso de que las bombas operen en paralelo, la velocidad se obtendría con el caudal producto de la suma de caudales máximos de ambas bombas:

$$Q_{max.tot} = Q_{max.1} + Q_{max.2} \quad (3.1)$$

$$Q_{max.tot} = 6,5 \text{ l/s} + 2,3 \text{ l/s}$$

$$Q_{max.tot} = 8,8 \text{ l/s} \cong 0,0088 \text{ m}^3/\text{s}$$

Es importante recordar que este es el máximo caudal al cual el sistema estará expuesto y, por lo tanto, la mayor velocidad que se generará en el fluido, la selección debe hacerse direccionado hacia la posición o situación operativa más crítica.

Para la velocidad:

$$Q_{max.tot} = A_{salida} * V_{max} \quad (3.2)$$

$$V_{max} = \frac{Q_{max.tot}}{A_{salida}} \quad (3.3)$$

$$V_{max} = \frac{0,0088 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi * (0,0381 \text{ m})^2}{4}}$$

$$V_{max} = 7,71 \text{ m/s}$$

Conociendo también que estos parámetros son obtenidos del libro de mecánica de Fluidos Cengel [3]:

$$\sum K = 0,5(1) + 1,05(1) + 0,50(7) + 0,9(4) \quad (3.4)$$

$$\sum K = 8,65$$

Por lo que las pérdidas generadas totales para los componentes seleccionados y la fricción de tuberías es:

$$h_f = \frac{V_{max}^2}{2g} \left(\sum \frac{f * l}{\phi_{tubería}} + \sum K \right) \quad (3.5)$$

Dónde:

V_{max} : Velocidad máxima del flujo

g : gravedad

l : longitud total de tubería (12 m)

f : factor de fricción para tubería PVC (generalmente, 0,05)

$\phi_{tubería}$: diámetro de tubería, dos secciones, de 2 in y 1 1/2 in

h_f : pérdidas totales por fricción de tuberías y accesorios

$$h_f = \frac{7,71^2}{2 * 9,81} \left(\frac{0,05 * 1,60}{0,0508} + \frac{0,05 * 10}{0,0381} + 8,65 \right)$$

$$h_f = 4,22 \text{ m}$$

El cabezal de pérdidas por fricción en tuberías y accesorios permitirá evaluar la potencia hidráulica generada en cada sección de las bombas, para comprender la potencia necesaria mínima de los motores y conservar la eficiencia máxima disponible del sistema.

En el caso de la bomba de mayor diámetro:

$$h_{sis-b1} = 4,22 \text{ m} + 28 \text{ m} + 0,79 \text{ m} \quad (3.6)$$

$$h_{sis-b1} = 33,01 \text{ m}$$

En el caso de la bomba de menor diámetro:

$$h_{sis-b2} = 4,22 \text{ m} + 17 \text{ m} + 0,79 \text{ m} \quad (3.7)$$

$$h_{sis-b2} = 22,01 \text{ m}$$

Potencia hidráulica para la bomba de mayor diámetro:

$$P_{hid-b1} = \rho * g * Q * h_{sis-b1} \quad (3.8)$$

$$P_{hid-b1} = 1000 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * 0,0044 \text{ m}^3/\text{s} * 33,01 \text{ m}$$

$$P_{hid-b1} = 1424 \text{ kg} * \text{m}^2/\text{s}^2 * \text{s}$$

$$P_{hid-b1} = 1424 \text{ J/s} \cong 1,42 \text{ kW}$$

Lo que arroja una potencia mínima necesaria para la operatividad del sistema de 1.91 HP, rango suficiente de operación para el motor de 3HP.

Potencia hidráulica para la bomba de menor diámetro:

$$P_{hid-b2} = \rho * g * \frac{Q}{2} * h_{sis-b2} \quad (3.9)$$

$$P_{hid-b2} = 1000 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * 0,0044 \text{ m}^3/\text{s} * 22,01 \text{ m}$$

$$P_{hid-b2} = 950,04 \text{ kg} * \text{m}^2/\text{s}^2 * \text{s}$$

$$P_{hid-b2} = 950,04 \text{ J/s} \cong 0,95 \text{ kW}$$

Lo que arroja una potencia mínima necesaria para la operatividad del sistema de 1.27 HP, rango suficiente de operación para el motor de 3 HP, indicando que los componentes seleccionados no perjudican a la capacidad de respuesta global del banco de prueba.

3.2 Dimensionamiento y selección de componentes eléctricos.

La selección de los principales componentes eléctricos (sensores y variadores de frecuencia) depende de los puntos de operación antes obtenidos para el dimensionamiento y selección de componentes mecánicos, para el caso del variador de frecuencia, inicialmente la potencia mecánica del sistema dictaminará el régimen operativo del motor:

$$\eta_{bomba} = \frac{P_{hid-b}}{P_{eje}} \quad (3.10)$$

La eficiencia de la bomba, típicamente se encuentra en el 80% para ambas bombas, ya conociéndose previamente las potencias hidráulicas, puede conocerse las potencias al eje para cada uno de los sistemas de bombeo:

$$P_{eje-b1} = \frac{1,42 \text{ kW}}{0,8}$$

$$P_{eje-b1} = 1,78 \text{ kW}$$

$$P_{eje-b2} = \frac{0,95 \text{ kW}}{0,8}$$

$$P_{eje-b2} = 1,19 \text{ kW}$$

De esta forma, se puede estimar la potencia activa total que entregará cada sistema, lo que determinará el total de la corriente nominal que empleará el equipo y el cual será clave para la selección del variador de frecuencia a emplear.

$$P_{elec} = \frac{P_{eje}}{\eta_{motor}} \quad (3.11)$$

La eficiencia típica de los motores trifásicos AC se suele situar en el 85%.

$$P_{elec-b1} = \frac{1,78 \text{ kW}}{0,85}$$

$$P_{elec-b1} = 2,09 \text{ kW}$$

$$P_{elec-b2} = \frac{1,19 \text{ kW}}{0,85}$$

$$P_{elec-b2} = 1,4 \text{ kW}$$

La potencia eléctrica nominal permitirá determinar la corriente nominal final del sistema mediante la fórmula 3.11:

$$I = \frac{P_{elec}}{\sqrt{3} * P.F * V}$$

Dónde:

P_{elec} : Potencia eléctrica nominal

$P.F$: Factor de potencia, a nivel local, situado en el 0.9

V : Voltaje de línea

I : Corriente nominal

$$I_{b-1} = \frac{2,09 * 1000}{\sqrt{3} * 0,9 * 240}$$

$$I_{b-1} = 5,59 A$$

$$I_{b-2} = \frac{1,4 * 1000}{\sqrt{3} * 0,9 * 240}$$

$$I_{b-2} = 3,74 A$$

La sobrecarga adecuada debe colocarse o situarse en, al menos, el 150% de la corriente nominal [9] para la selección de los variadores de frecuencia, mientras que la capacidad de control debe situarse para cada variador entre el 15-20% de la corriente nominal de carga esperada (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2

Lista de variadores de frecuencia a emplear en el sistema

Equipo	Marca	Intensidad nominal /salida máxima
ACS580-01-05A6-4	ABB	5,6 A/7,2 A
ACS580-01-07A2-4	ABB	7,2 A/ 10,1 A

Figura 3.3

Imagen ilustrativa referencial de variador de frecuencia a emplear en el sistema.



Nota. Variador de frecuencia ACS580 ABB, con versión disponible IP 55.

En [9]el caso de sensores, se indica la lista de sensores que deben ser empleados y seleccionados para el sistema, con la finalidad de que arrojen información necesaria para el desarrollo de las prácticas:

Tabla 3.3

Listado de sensores a emplear en el sistema.

Equipo	Cantidad	Marca
Transductor de torque	2	TFF-600 FUTEK
Tacómetro	2	FB420 2.0 Shaft Speed
Transductor de presión	2	Sensor transductor de presión nacional Roboticsec.
Flujómetro	2	Flujometro electromagnético acero Inox. 1 ½.

Nota. Sensores que retroalimentarán el sistema de información del banco de prueba de bombas

Figura 3.4

Sensor TFF-600 FUTEK para torque.



Nota. Sensor cuya función principal es registrar los valores de torque generados en el eje del motor.

Figura 3.5

FB420 2.0 Shaft Speed como tacómetro para medición de RPM del sistema.



Nota. Sensor que utiliza un disco conectado al eje para realizar lecturas de R.P.M.

Figura 3.6

Flujómetro electromagnético.



Nota. Flujómetro electromagnético digital clásica que genera lecturas de caudal y de consumo.

Figura 3.7

Transductores de presión.



Nota. Transductor de presión genérico que genera lecturas de presión.

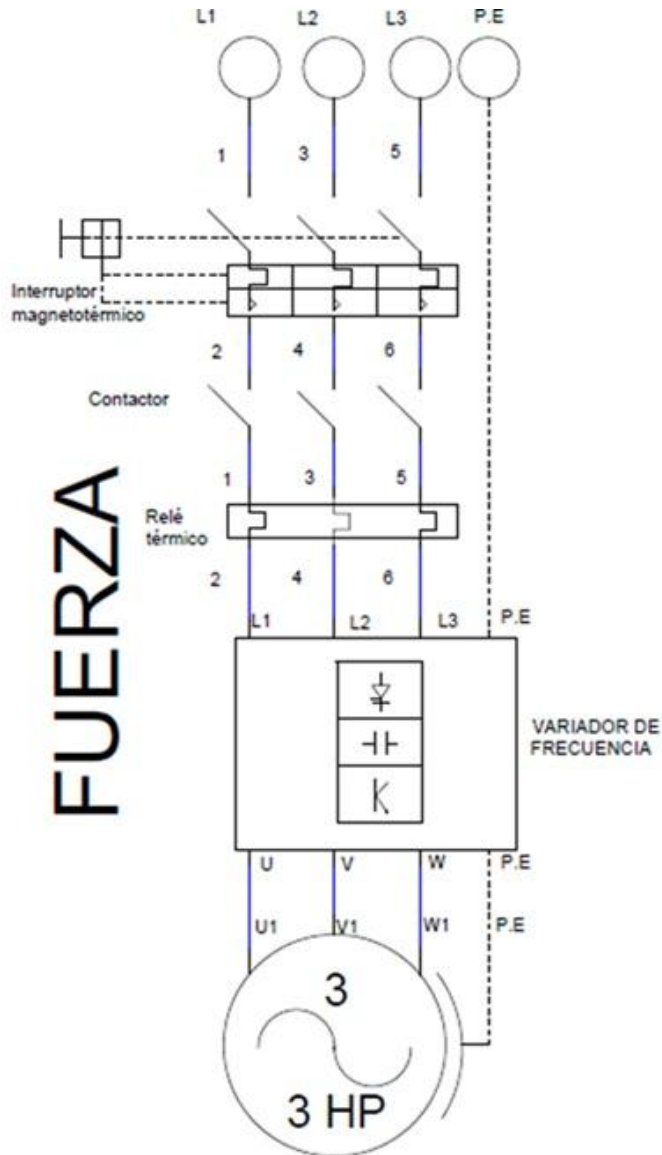
3.3 Diagrama de fuerza y de control del nuevo sistema.

El diagrama de fuerza del sistema de alimentación motor – Variador de frecuencia (Ver figura 3.8) muestra como el motor interactuará activamente con el sistema central de control del variador para regular la potencia de entrada y de esta forma generar las curvas de comportamiento de la bomba centrífuga, si bien los variadores seleccionados para cada caso individual son distintos, el sistema eléctrico tiene un comportamiento idéntico entre las partes.

Es importante recordar que el motor al ser trifásico, requiere de un sistema ligeramente más complejo para su control de frecuencia, lo que, si bien le permite ser más preciso, si no se seleccionase el correcto variador los amperajes de alimentación serían insuficientes para el encendido del sistema y la respuesta general del banco de prueba

Figura 3.8

Diagrama de fuerza de sistema motor – variador de frecuencia, banco de prueba de bombas.



Nota. En el presente diagrama se muestra todo el esquema de conexiones de fuerza desde el sistema de alimentación trifásico de la línea de conexión hasta el motor de corriente alterna, esta configuración es típica en todo sistema de control empleando un VFD y no tiene características relevantes diferentes respecto a cualquier circuito clásico de fuerza. (Colocar nombres de secciones al diagrama)

En el caso del diagrama de control (ver figura 3.9), constará de dos secciones, el diagrama de control del variador de frecuencia con su configuración de conexiones, donde cada relé controlará un comportamiento determinado en la respuesta del sistema, para la sección “KA1” el control se enfocará en activar el giro o accionamiento del motor, el “KA3” accionará la velocidad máxima del sistema mientras el “KA4” accionará la menor.

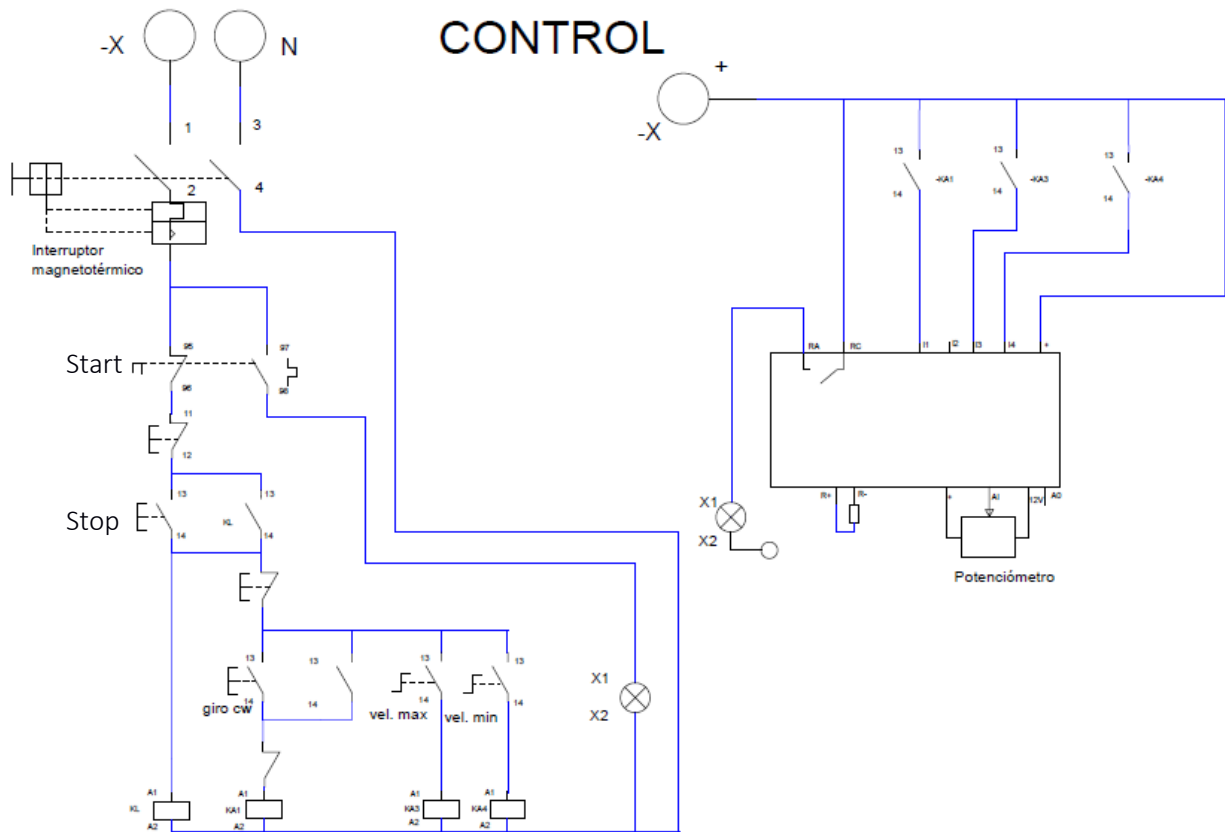
Para la sección de conexiones se omitió emplear giro c.c.w (counter clock wise) para evitar la posibilidad de rotura de sellos mecánicos de la bomba al activar giro contrario a giro c.w (clock wise), si bien se suelen emplear la posibilidad de alternar el giro para limpiezas o mantenimiento, por temas de seguridad del equipo se retiró la posibilidad de implementarlo en el sistema final.

El sistema cuenta con un potenciómetro para regulación analógica de la potencia entregada por la bomba, recordando que se desea replicar diferentes curvas de comportamiento para distintos puntos de operación y velocidad.

El sistema cuenta con un switch de encendido y un pulsador de arranque/paro de emergencia, para estar acorde con políticas de seguridad y protección del usuario al momento de operar el dispositivo.

Figura 3.9

Diagrama de control sistema motor – variador de frecuencia, banco de prueba de bombas.



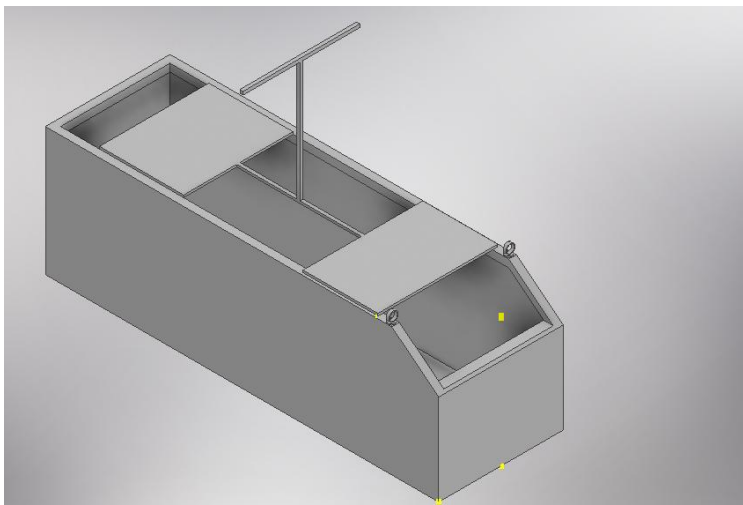
Nota. El presente diagrama muestra toda la configuración de conexiones para el sistema de control, incluyendo en la parte derecha la configuración de conexiones para el variador de frecuencia, la finalidad es activar velocidad máxima, mínima, sentido de giro y controlar vía potenciómetro la velocidad total entregada por el motor.

3.4 Estructura del nuevo sistema.

Durante el rediseño del banco de prueba (figura 3.10) se conservó la estructura original del sistema reservorio del banco de prueba, buscando optimizar el espacio e incluso la carga operativa total que recibiría el equipo, se realizó un análisis vía simulación (figura 3.11) de la sección que soportaría mayor peso continuo en el banco para confirmar que el equipo se encuentra en rangos permisibles para una operación segura, recordando que los motores trifásicos tienen un mayor peso que los clásicos motores de corriente continua.

Figura 3.10

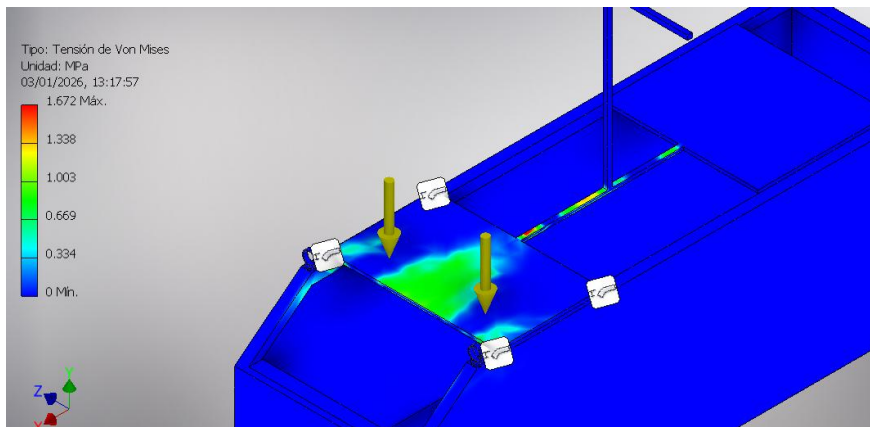
Diseño 3D del reservorio de banco de prueba, elaborado con software Inventor 2023 Professional.



Nota. Las planchas de separación internas del equipo fueron elaboradas como piezas aparte, para considerarlas dentro del montaje final.

Figura 3.11

Simulación del peso del conjunto motor – bomba como cargas puntuales en plancha soporte.



Nota. Se consideraron los pesos de los motores como cargas puntuales de 297 N, considerando que el rango típico de peso del conjunto motor – bomba se sitúa en los 25 a 30 kg, el esfuerzo máximo se situó en los 1.67 MPa, lo que respeta el punto de cedencia del material de las planchas (acero) que se sitúa en los 235 MPa [5].

Internamente, el equipo cuenta con un sistema de cuatro planchas (Figuras 3.12 y 3.13) cuya función es filtrar y separar el agua que va de una sección a otra cuando el bombeo es activado, estas planchas fueron modeladas para considerarlas dentro del listado de piezas final.

Figura 3.12

Sección de modelo de plancha de acero perforada, de 4.5 mm de espesor

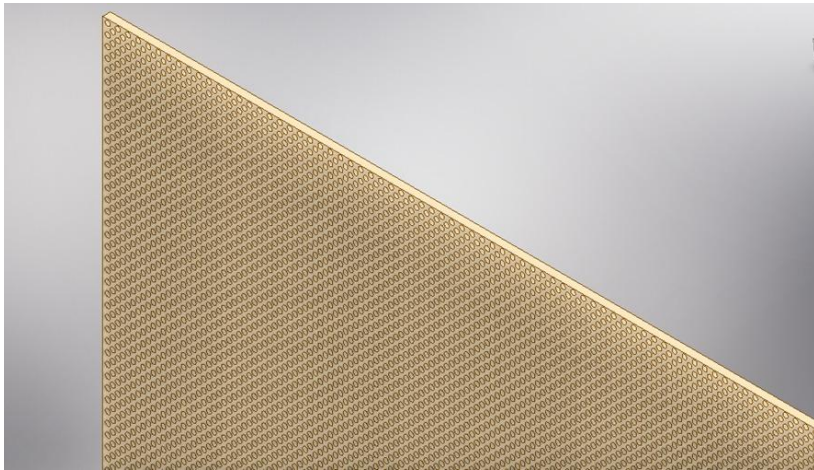
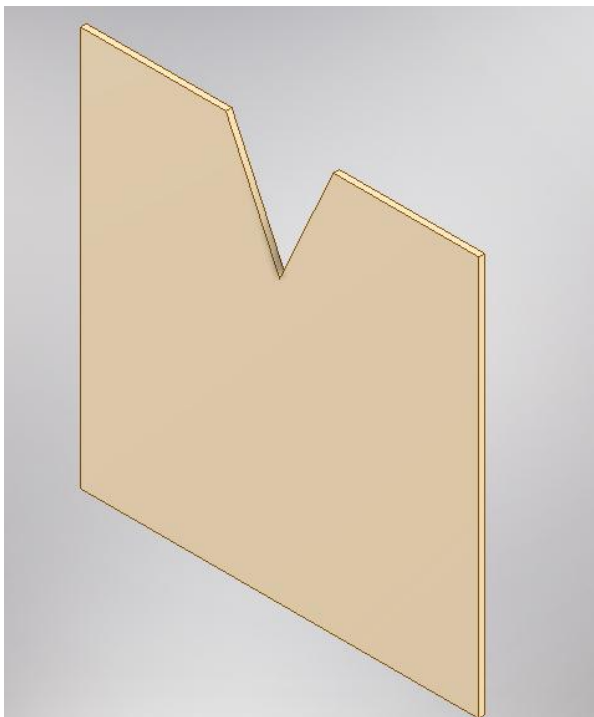


Figura 3.13

Modelo de plancha de separación de reservorios, con un vertedero triangular en su parte superior.

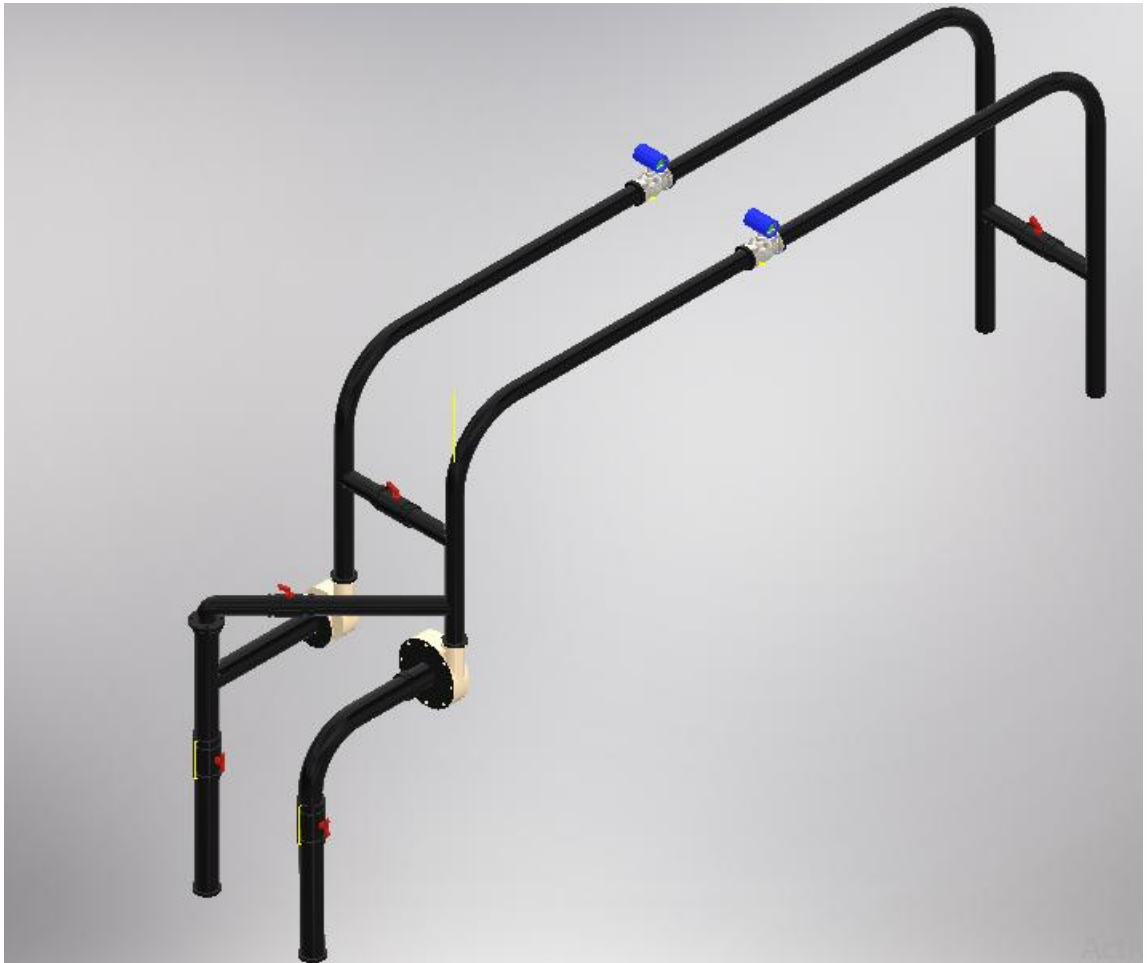


Nota. Esta plancha separa en dos secciones al reservorio, el agua de ingreso al bombeo y el agua de salida del bombeo.

Dentro del modelado se consideró al sistema de tuberías como un sistema aparte (Ver figura 3.14), para poder listar correctamente todos los componentes en la lista de piezas requeridas durante su rediseño, el cambio más notable es la colocación de los flujómetros digitales.

Figura 3.14

Sistema de tuberías de banco de prueba de bombas centrífugas.

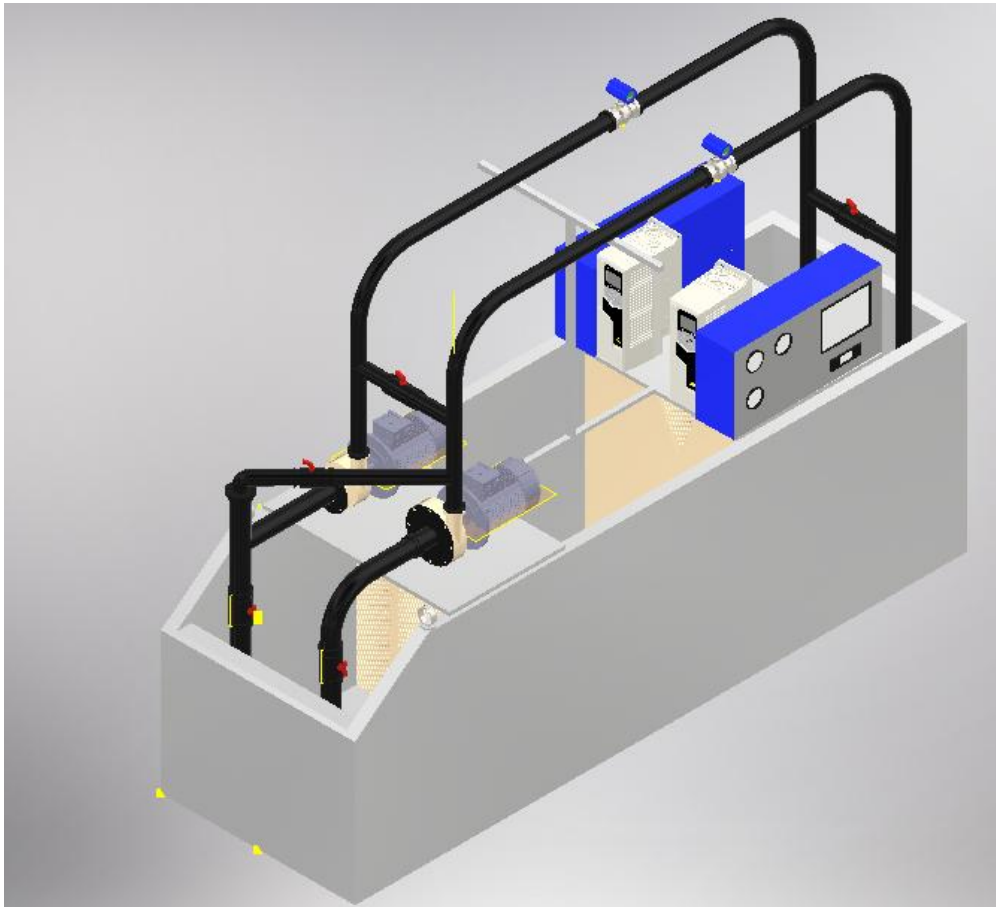


Nota. Dentro del sistema de tuberías fueron consideradas ambas bombas, esto debido a que por su buen estado y para mantener el comportamiento original del equipo, lo óptimo sería conservar las bombas que ha proveído el fabricante original.

Finalmente, el ensamblaje final (Ver figura 3.15) cuenta con los variadores de frecuencia y los motores de corriente alterna, que completan el rediseño, el nuevo sistema tiene por características un menor peso y mayor maniobrabilidad, un complemento importante es la implantación de flujómetros digitales electromagnéticos, que son mucho más precisos que los empleados anteriormente por el sistema original.

Figura 3.15

Ensamblaje final del sistema de banco de prueba de bombas



Nota. Ensamblaje final de banco de prueba con las respectivas planchas, motores, flujómetros, variadores de frecuencia y sistema de tuberías.

3.5 Parámetros para el mantenimiento del equipo.

El parámetro más importante es la determinación de las frecuencias de mantenimiento para cada una de las piezas del equipo, es decir, mediante las recomendaciones del fabricante y las cargas operativas del sistema, decidir con que periodicidad se realizarán las tareas de mantenimiento preventivo sobre cada uno de los componentes que conforman el dispositivo

Para el caso particular de la estructura del banco de prueba, las inspecciones visuales deben realizarse diariamente con la finalidad de detectar cualquier anomalía relacionada con impactos, golpes o desgastes por corrosión.

En el caso del estado interno de tuberías, se recomienda semestralmente realizar una purga química empleando ácido acético con la finalidad de arrastrar restos mineralizados

que puedan causar incrustaciones calcáreas y empeorar la capacidad de respuesta general de las pruebas realizadas en el equipo.

Para todos los sistemas de sensores, lo recomendable es realizar calibraciones y análisis de tolerancias cada 3 meses, esta es una de las partes críticas del banco de prueba pues cumplen la principal función de brindar la información para cada uno de los equipos.

La chumacera de los motores debe ser reemplazada únicamente si la carga operativa así lo demanda, esto último puede apreciarse si hay consumos eléctricos excesivos o aumentos de temperatura exagerados en la carcasa del motor, en aspectos de mantenimiento de ambos motores, realizar las tareas diarias de limpieza en puntos de acceso a la intemperie es más que suficiente.

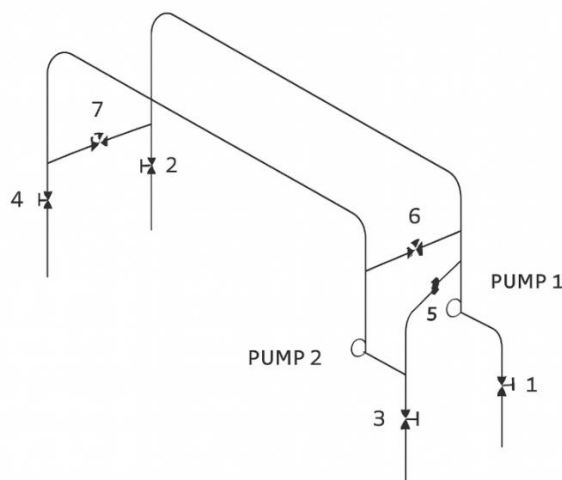
3.6 Funcionamiento para la realización de las prácticas.

Para el funcionamiento del equipo en prácticas, es importante recordar que su objetivo final es permitirle al docente generar las curvas de operación del equipo en distintas configuraciones, tanto de forma individual para cada bomba como en serie y paralelo, ya que esto permitirá al estudiante entender plenamente cómo funcionan estos equipos y como se conectan con la parte teórica vista en clase.

Para ello, se respetó las configuraciones originales del equipo (Ver figura 3.16), tanto la estructura de tuberías como las bombas originales, para que el técnico docente tenga facilidad de adaptación con lo señalado por el manual del equipo.

Figura 3.16

Configuración de tuberías propuesta para la tabla explicativa original del manual de banco de prueba Gilkes GH-90 [10]



Nota. El presente diagrama da una guía para la tabla a continuación (Tabla 3.4), que indica las configuraciones correctas de apertura de válvulas para cada tipo de prueba.

Tabla 3.4

Tabla actualizada de configuración de tuberías, adaptación de tabla original en manual de operación del equipo. [10]

Acción a realizar	Número de válvula						
	1	2	3	4	5	6	7
Solo bomba 1	Abierto	Abierto	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado
Solo bomba 2	Cerrado	Cerrado	Abierto	Abierto	Cerrado	Cerrado	Cerrado
Operación en paralelo	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Cerrado	Cerrado	Abierto
Operación en serie	Abierto	Cerrado	Cerrado	Abierto	Abierto	Cerrado	Cerrado
Bomba 2 (comportamiento de turbina, flujo interno)	Abierto	Cerrado	Abierto	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Abierto
Bomba 2 (comportamiento de turbina, flujo externo)	Abierto	Cerrado	Cerrado	Abierto	Abierto	Cerrado	Cerrado

Nota. Los parámetros señalados en esta tabla permitirán la configuración respectiva para cada tipo de prueba o práctica que desee realizarse en el sistema.

3.7 Análisis de costos.

El análisis de costos da una dimensión global de los precios de los elementos que componen al equipo, este valor juega un papel preponderante a la hora de armar el plan de mantenimiento, pues uno de los factores que determinan la criticidad de los equipos y el nivel de prioridad que se le destina es el costo que representa reemplazarlos vs el costo que representa repararlos o realizarles sus respectivos mantenimientos preventivos.

Finalmente, se hace una estimación general de los costos que representará el equipo para su actualización, en base a los planos presentados en el anexo y los componentes eléctricos y mecánicos presentados en las secciones 3.1 y 3.2:

Tabla 3.5

Estimación general de los costos de los elementos del banco de prueba, considerando precios en el mercado nacional, a excepción de aquellos elementos que son de importación.

Elemento	Precio unitario	Cantidad	Precio final
Tubería PVC	\$ 7,60	3 metros	\$ 22,80
Codo 90° PVC	\$ 1,31	4	\$ 5,24
Válvula globo PVC 1 ½ in	\$ 5,60	5	\$ 28,00
Válvula globo roscable PVC 2 in	\$ 22,72	2	\$ 45,44
Variador de frecuencia ABB ACS580-01-05A6-4	\$ 2060,80	1	\$ 2060,80
Variador de frecuencia ABB ACS580-01-07A2-4	\$ 2060,80	1	\$ 2060,80
Motor AC de 3 HP	\$ 299,49	2	\$ 598,98
Transductor de presión genérico	\$ 32,50	2	\$ 65,00
Flujómetro digital (9 l/s)	\$ 3098,03	2	\$ 6196,06
Transductor de Torque FUTEK TFF-600	\$ 6360,63	2	\$ 12721,26
Tacómetro FB420 Shaft Speed	\$ 689,00	2	\$ 1378,00
Total final:			\$ 25182,38

Nota. En el caso particular del tacómetro FB 420 y el transductor de torque FUTEK TFF – 600, sus precios son referenciales considerando que son equipos que deben obtenerse por importación.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

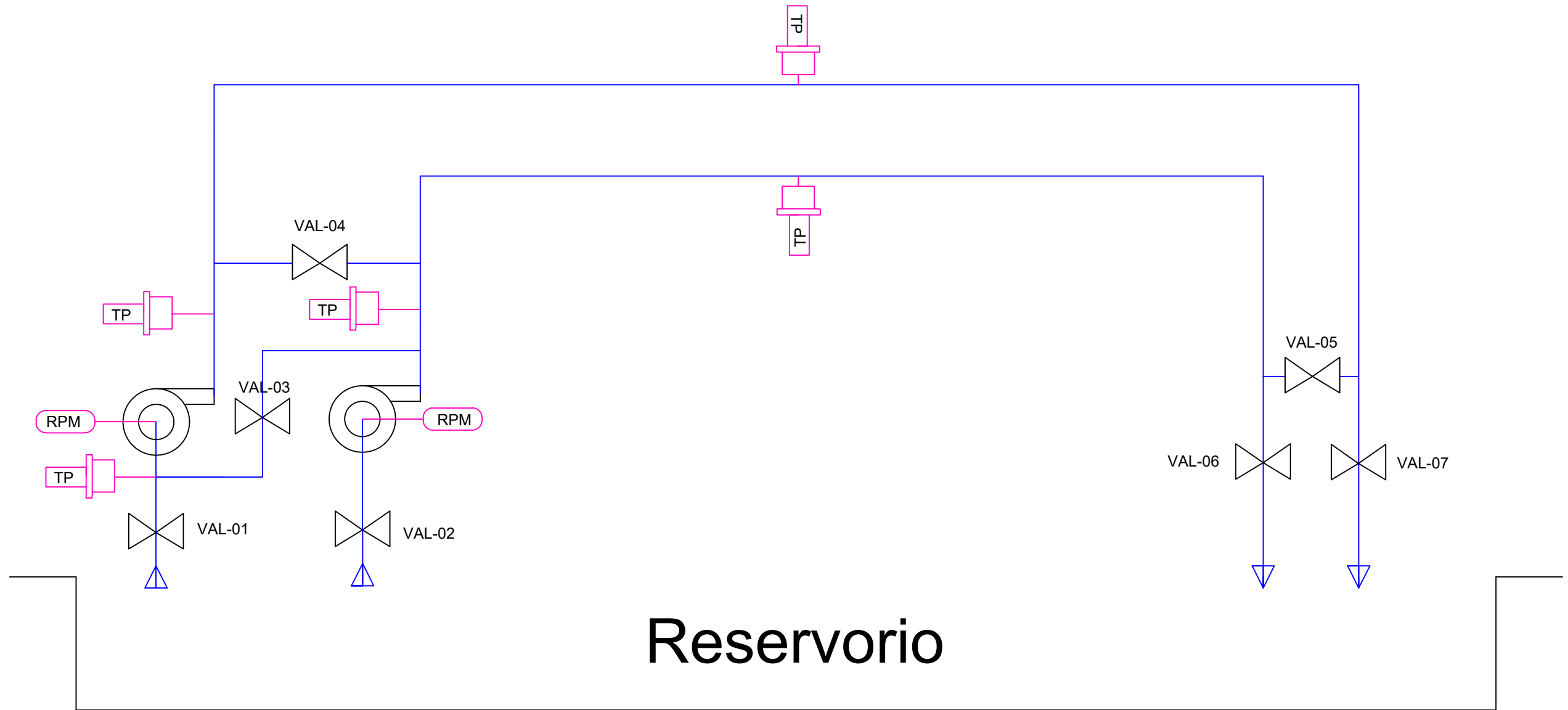
- Se realizó el rediseño del banco de prueba de bombas centrífugas Gilkes GH-90, con la finalidad de obtener un equipo listo para prácticas de laboratorio multidisciplinarias, alineadas con la actualidad de la industria y los potenciales retos que los estudiantes enfrentarán en la vida laboral, recordando que la gran mayoría de sistemas de interacción máquina hombre emplean instrumentación digital para comunicar directamente el estado de líneas de tuberías.
- Durante la evaluación del actual banco de prueba, se identificó que el reservorio se encontraba en óptimas condiciones, sin embargo, la gran mayoría de válvulas que delimitan el paso del fluido y permiten generar diferentes configuraciones se encontraban considerablemente desgastadas, así mismo, se encontraron fallencias crónicas en los sistemas eléctricos, electrónicos y de instrumentación.
- Se propuso un renovado sistema de control de velocidades empleando motores de corriente alterna y variadores de frecuencia, son dispositivos modernos propensos a facilitar mejoras y trabajos de mantenimiento, ya que, son encontrados con frecuencia en el mercado, esto debido a su amplio uso en el campo industrial, permitiendo al estudiante conectar de forma temprana con equipos modernos.
- Al actualizar los componentes antes descritos, el nuevo banco de prueba permite a la institución adaptarse a las nuevas necesidades académicas e investigativas, al entender como los nuevos equipos influyen en aspectos críticos a nivel industrial.
- Durante el desarrollo del diseño, se realizó la simulación de cargas y esfuerzos que permitieron verificar la correcta respuesta del banco de prueba al nuevo sistema planteado.
- Se ha desarrollado un programa de mantenimiento y de operación de prácticas para el técnico docente y profesores del área que comprenden los 21 ítems necesarios para realizar el seguimiento de cada uno de los componentes, es necesario recordar que la normativa para laboratorio ISO 17025 exige que los sistemas y equipo empleados de forma didáctica deben de contar con ambos documentos para funcionar como guía, tanto para el docente que interactúa con estos sistemas como para el estudiante que se empieza a familiarizar con la teoría empleada a la práctica.

4.1.2 Recomendaciones

- El emplear un software que reciba automáticamente los datos recibidos por los sistemas de instrumentación harían del equipo un potencial elemento didáctico muy completo, listo para adaptarse a la escalabilidad propia que ofrecen estos nuevos componentes electrónicos.
- Se recomienda potencialmente implementar un sistema de control preciso complementario al variador de frecuencia (Sistema PLC), que permita explorar nuevos puntos de operación del sistema.
- Seguir el plan de mantenimiento permitirá aumentar el factor de confiabilidad del equipo asegurando su operación de forma estable el mayor tiempo posible, al ser un equipo destinado a la enseñanza y de carácter didáctico su exigencia será menor, sin embargo, esto no representa que no deba recibir sus trabajos preventivos, en especial en su sistema de instrumentación que, al ser moderno y altamente automatizado, es propenso a descalibraciones, por lo que su monitoreo constante es necesario.
- Socializar con el alumnado el cuidado de este equipo, así como buscar constantemente potenciarlo, esto permitirá a la institución participar de forma activa en programas de investigación y desarrollo de sistemas de bombeo, ya que tiene un mercado amplio en la industria tanto nacional como extranjera

Apéndice A

Reservorio

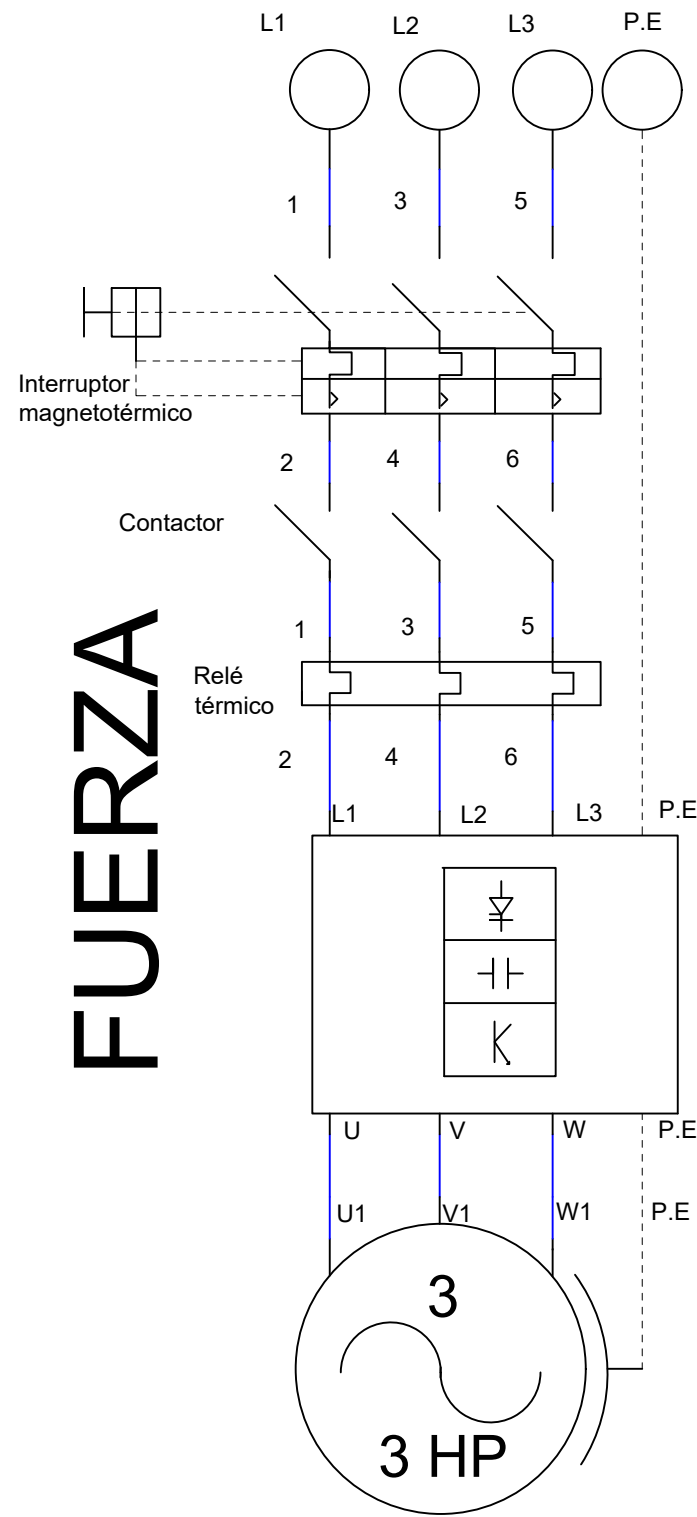


Simbología

	Tacómetro	Línea de agua
	Transductor de presión	
	Válvula de paso	Instrumentación
	Bomba centrífuga	

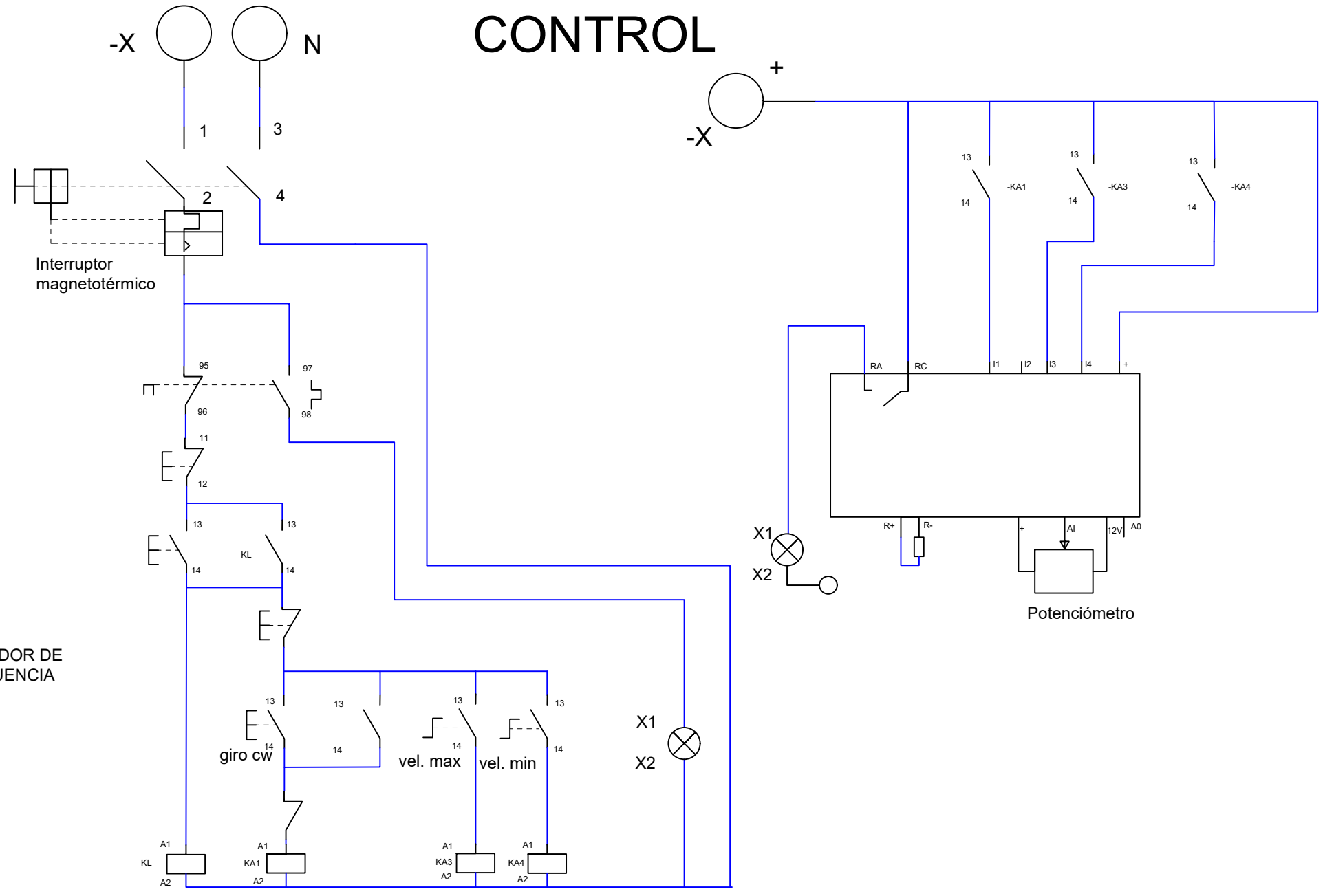
	Fecha	Nombre	Firmas	E.S.P.O.L Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción		
Dibujado	27/10/25	E. Yerovi		Material	nn	
Revisado					Tratamiento	nn
Norma	ISO-2768m				Página	1
Escala nn	Diagrama P&ID actual de banco de prueba de bombas					

FUERZA

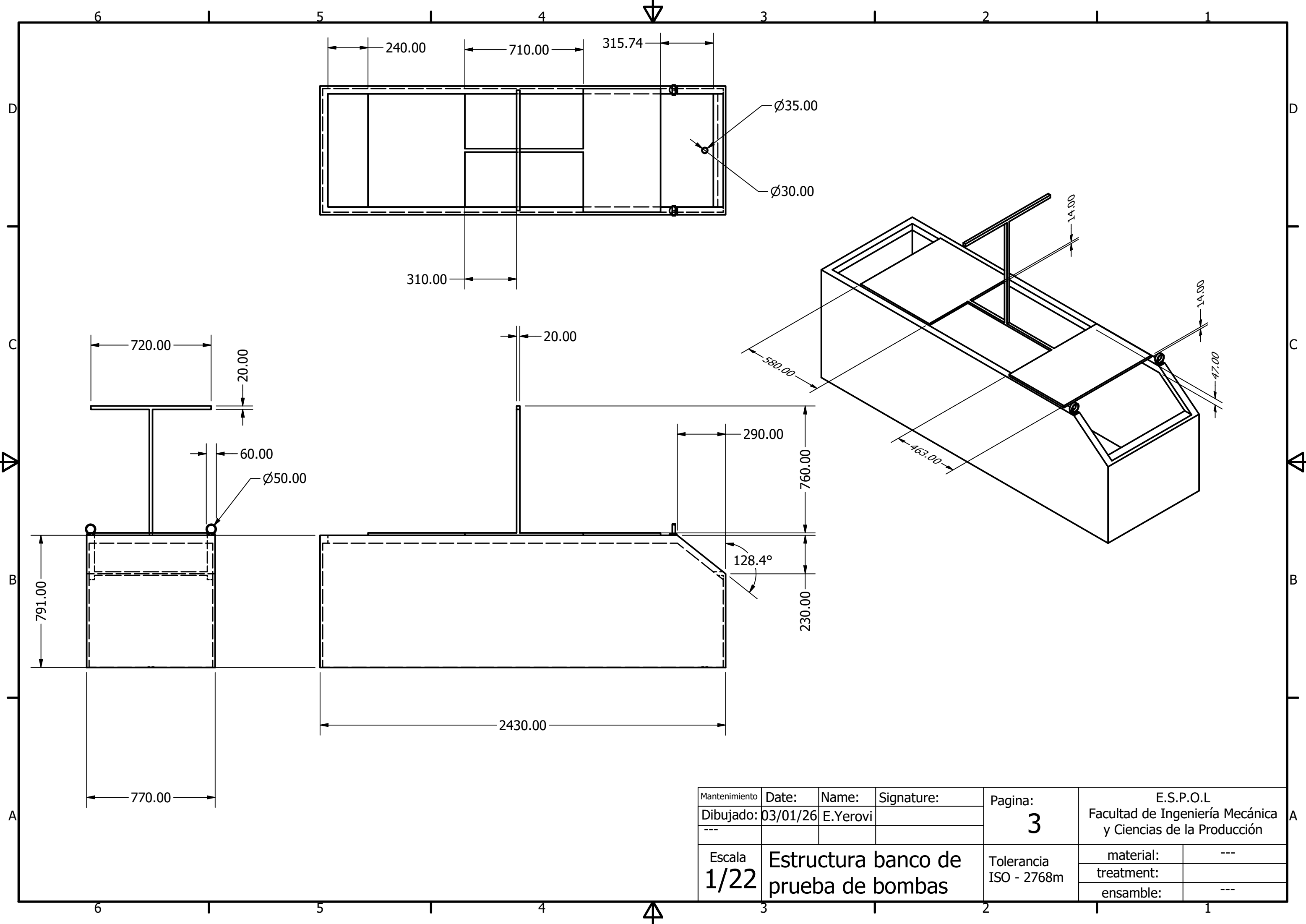


VARIADOR DE FRECUENCIA

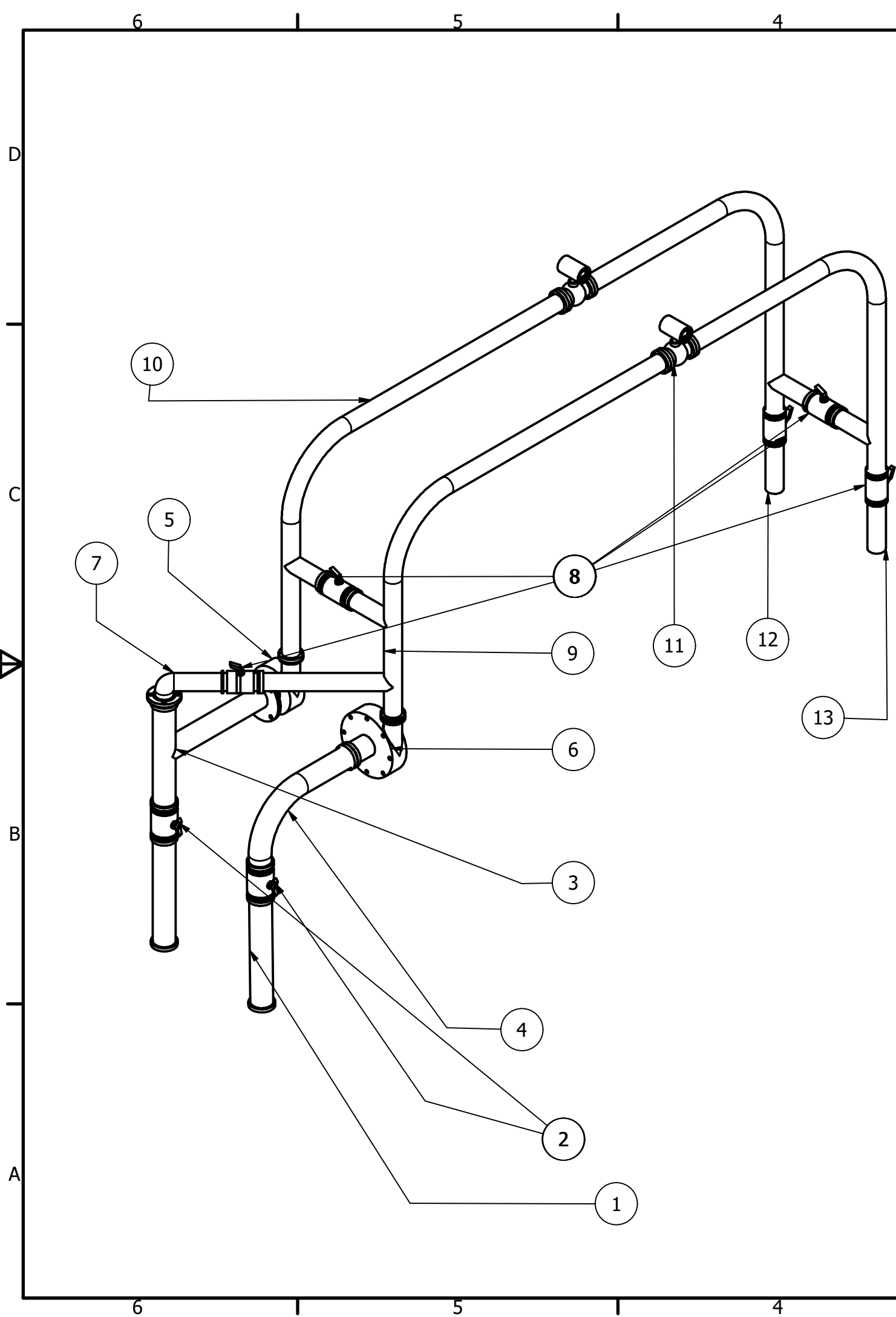
CONTROL



	Fecha	Nombre	Firmas	E.S.P.O.L Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción	
Dibujado	15/12/25	E. Yerovi		Material	nn
Revisado		M. Patiño		Tratamiento	nn
Norma				Página	2
Escala nn	Diagrama fuerza y control Motor y Variador				



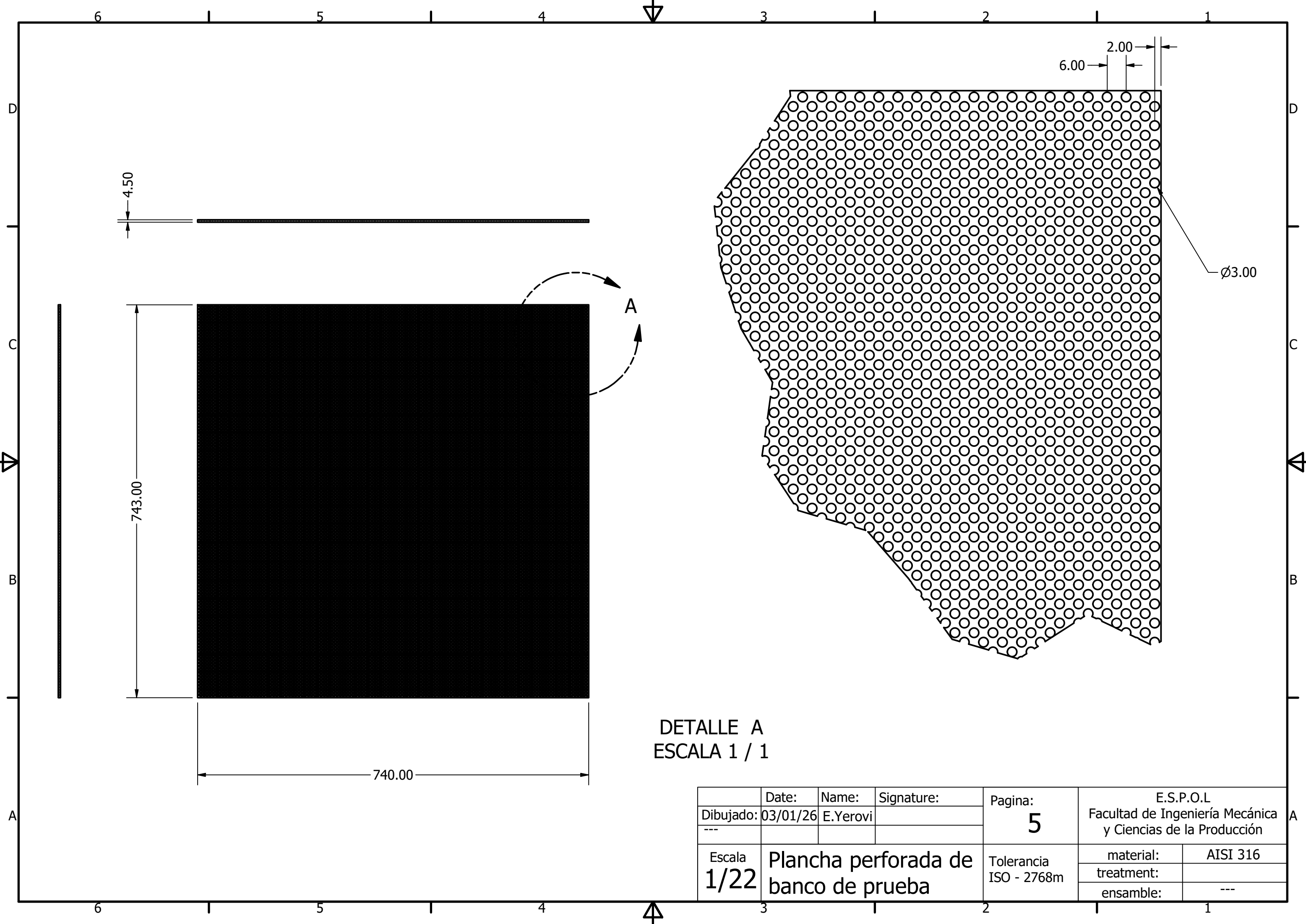
Mantenimiento	Date:	Name:	Signature:	Pagina: 3	E.S.P.O.L Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción	
Dibujado:	03/01/26	E.Yerovi				
---				Tolerancia ISO - 2768m	material:	---
Esca	1/22	Estructura banco de prueba de bombas			treatment:	
					ensamble:	---



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	Tubería de entrada de flujo a banco de pruebas	Tubería de PVC de 2 pulgadas cédula 40 de 350 mm
2	2	Válvula globo 2 in banco de pruebas	PVC de 2 pulgadas cédula 40 - 100 mm de longitud
3	1	Tubería de ingreso a bomba 15 cm	Tee de 1 1/2 in y dos tuberías de 180 mm - cédula 40
4	1	Tubería de ingreso a bomba 19 cm	codo de 1 1/2 in y dos tuberías de 130 mm - cédula 40
5	1	bomba centrífuga de 14 cm (menor diámetro)	Bomba centrífuga de sistema original
6	1	bomba centrífuga de 19 cm (mayor diámetro)	Bomba centrífuga de sistema original
7	1	conexion tubería 14 - 19	Tubería de PVC con codo de 1 1/2 in y tubería de 100 mm
8	5	Válvula globo 1 1/2 in	PVC de 1 1/2 pulgadas cédula 40 - 100 mm de longitud
9	1	tubería de salida - sistema línea de bomba 19 cm	Tubería de PVC a la salida de bomba, de 650 mm - 1 1/2 in Cédula 40
10	1	tuberia de salida - sistema de línea de bomba 14 cm	Tubería de PVC a la salida de bomba, de 650 mm - 1 1/2 in Cédula 40
11	2	Flujómetro electromagnético digital 4 - 20 mA	Flujómetro electromagnético genérico 4 - 20 mA
12	1	Tubería de descarga - línea de bomba 14 cm	Con dos tuberías de 700 mm y 1100 mm respectivamente y un codo 45° - cédula 40 1 1/2 in
13	1	Tubería de descarga - línea de bomba 19 cm	Con dos tuberías de 700 mm y 1100 mm respectivamente y un codo 45° - cédula 40 1 1/2 in

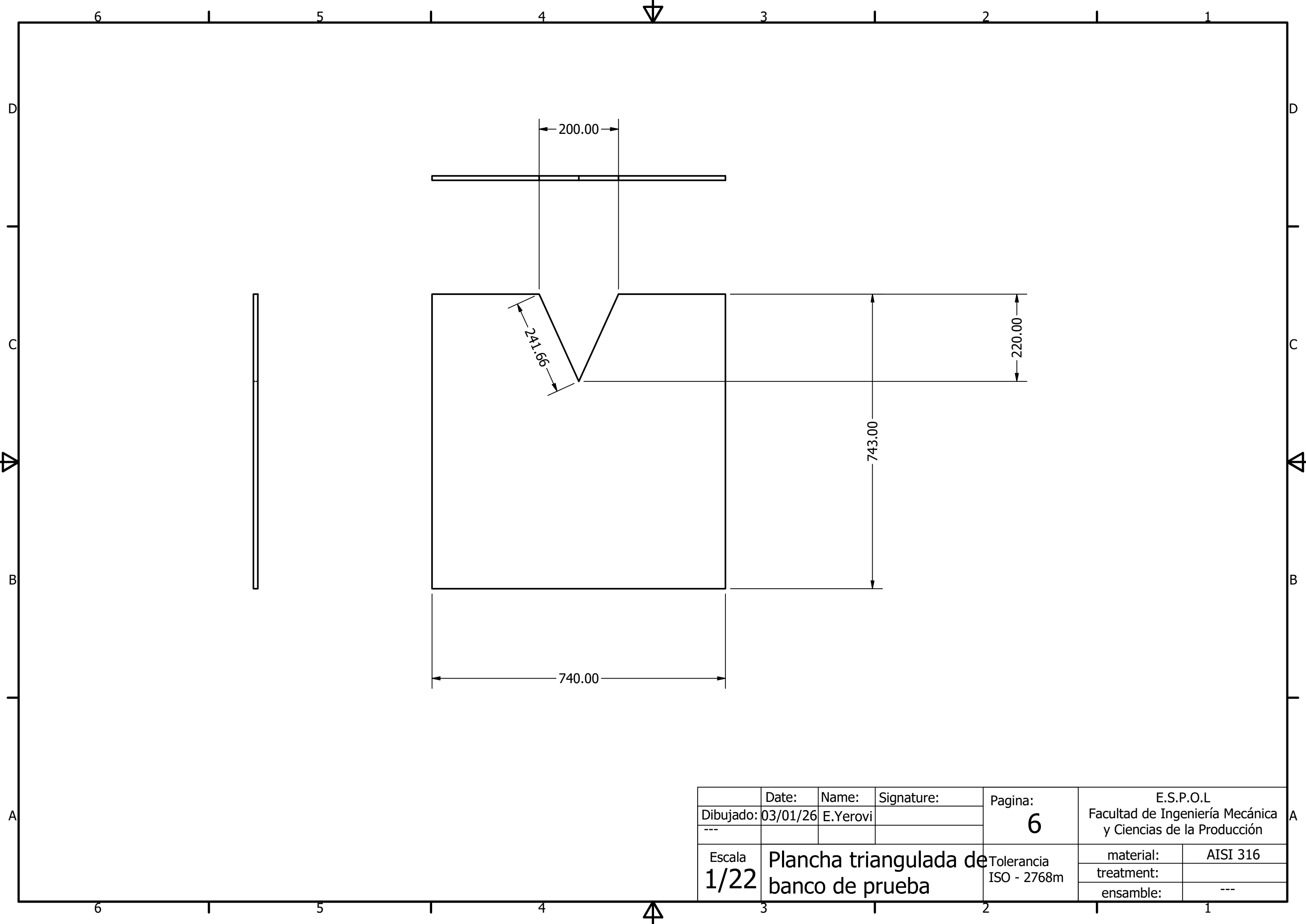
Mantenimiento	Date:	Name:	Signature:	Pagina:	E.S.P.O.L Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
Dibujado:	03/01/26	E.Yerovi			

Escala	Sistema de tuberías		Tolerancia	material: ---	
1/22	banco de pruebas		ISO - 2768m		
				ensamble: ---	

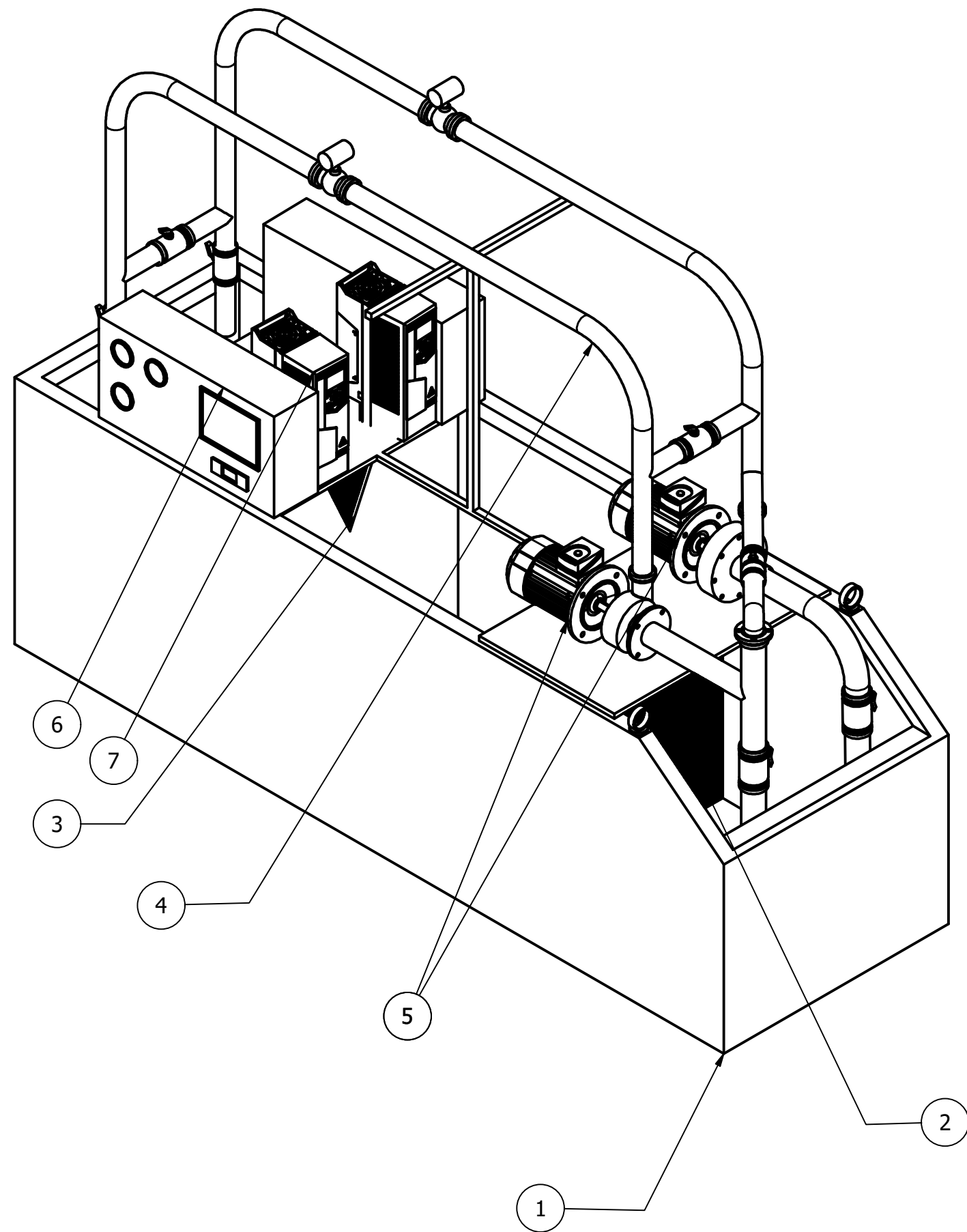


DETALLE A
ESCALA 1 / 1

	Date:	Name:	Signature:	Pagina:	E.S.P.O.L	
Dibujado:	03/01/26	E.Yerovi		5	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción	
---					material:	AISI 316
Escala	Plancha perforada de banco de prueba			Tolerancia ISO - 2768m	treatment:	
1/22					ensamble:	---



	Date:	Name:	Signature:	Pagina:	E.S.P.O.L	
Dibujado:	03/01/26	E.Yerovi		6	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción	
---					material:	AISI 316
Escala	Plancha triangulada de			Tolerancia		
1/22	banco de prueba			ISO - 2768m	treatment:	
					ensamble:	---



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Estructura de banco de pruebas	
2	3	Plancha de acero 4.5 mm perforada	
3	1	Plancha de acero con división triangullar de 4.5 mm	
4	1	Sistema de tuberías - Banco de pruebas	
5	2	Motor Siemens - 3 HP	
6	2	Tablero de contro con lectores de medición (3 presostatos y un tacómetro)	
7	2	Variador de frecuencia ABB -ACS580	

Date:	Name:	Signature:	Pagina:	E.S.P.O.L	
Dibujado: 03/01/26	E.Yerovi		7	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción	
---				material:	---
Escala	Sistema de tuberías banco de pruebas		Tolerancia ISO - 2768m	treatment:	---
1/22				ensamble:	---

Programa de Mantenimiento - Banco de Pruebas para Bombas Centrífugas Gilkes GH-90

Equipo	Código	Ubicación	Criticidad	Periodos	Tareas principales recomendadas
Motor trifásico 3HP	ME-01	Plancha de acero soporte para motor - bomba	A	Trimestral	1.-Inspección termográfica en arranque y operación. 2.-Limpieza exterior de la carcasa. 3.-Análisis de vibraciones.
Motor trifásico 3HP	ME-02	Plancha de acero soporte para motor - bomba	A	Trimestral	1.-Inspección termográfica en arranque y operación. 2.-Limpieza exterior de la carcasa. 3.-Análisis de vibraciones.
Bomba centrífuga 14 cm	BC-01	Plancha de acero soporte para motor - bomba	A	Mensual	1.-Balanceo dinámico. 2.-Inspección visual interna de la carcasa y voluta. 3.-Limpiezas y purgas del sistema. 4.-Inspección visual externa general.
Bomba centrífuga 19 cm	BC-02	Plancha de acero soporte para motor - bomba	A	Mensual	1.-Balanceo dinámico. 2.-Inspección visual interna de la carcasa y voluta. 3.-Limpiezas y purgas del sistema. 4.-Inspección visual externa general.
Válvula de 2 pulgadas	VAL-01	Ingreso sistema de tuberías	C	Semestral	1.-Purga general del sistema de tuberías. 2.-Revisión del estado de la válvula ante posibles atoramientos.
Válvula de 2 pulgadas	VAL-02	Ingreso sistema de tuberías	C	Semestral	1.-Purga general del sistema de tuberías. 2.-Revisión del estado de la válvula ante posibles atoramientos.
Válvula de 1 1/2 pulgadas	VAL-03	Conexión entre bombas	C	Semestral	1.-Purga general del sistema de tuberías. 2.-Revisión del estado de la válvula ante posibles atoramientos.
Válvula de 1 1/2 pulgadas	VAL-04	Conexión entre bombas	C	Semestral	1.-Purga general del sistema de tuberías. 2.-Revisión del estado de la válvula ante posibles atoramientos.
Válvula de 1 1/2 pulgadas	VAL-05	Salida sistema de tuberías	C	Semestral	1.-Purga general del sistema de tuberías. 2.-Revisión del estado de la válvula ante posibles atoramientos.
Válvula de 1 1/2 pulgadas	VAL-06	Salida sistema de tuberías	C	Semestral	1.-Purga general del sistema de tuberías. 2.-Revisión del estado de la válvula ante posibles atoramientos.
Válvula de 1 1/2 pulgadas	VAL-07	Salida sistema de tuberías	C	Semestral	1.-Purga general del sistema de tuberías. 2.-Revisión del estado de la válvula ante posibles atoramientos.
Sensor FUTEK	TOR-01	Conexión eje bomba - motor	A	Trimestral	1.-Tareas de limpieza y calibración.
Transductor de presión	TP-01	Ingreso sistema bomba 19 cm	B	Semestral	1.-Tareas de limpieza y calibración.
Transductor de presión	TP-02	Salida bomba 19 cm	B	Semestral	1.-Tareas de limpieza y calibración.
Transductor de presión	TP-03	Salida bomba 14 cm	B	Semestral	1.-Tareas de limpieza y calibración.
Flujómetro digital	FT-01	Parte superior media sistema de tuberías	A	Trimestral	1.-Tareas de limpieza y calibración.
Flujómetro digital	FT-02	Parte superior media sistema de tuberías	A	Trimestral	1.-Tareas de limpieza y calibración.
FB 420 2.0 Shaft Speed	TCM-01	Conexión eje bomba - motor	A	Trimestral	1.-Tareas de limpieza y calibración.
ACS580-01-07A2	VF-01	Plancha soporte sistema de instrumentación	A	Trimestral	1.-Tareas de limpieza. 2.-Revisión del estado de las conexiones eléctricas.
ACS580-01-05A6	VF-02	Plancha soporte sistema de instrumentación	A	Trimestral	1.-Tareas de limpieza. 2.-Revisión del estado de las conexiones eléctricas.
Estructura banco de pruebas	BAN-01	Cuerpo exterior del banco de pruebas	C	Anual	1.-Inspección visual

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción Guía operacional para prácticas – Banco de Prueba de bombas Centrífugas Gilkes GH90

OBJETIVOS:

Comprender los estándares operativos para dos bombas homólogas de un circuito cerrado cuando trabajan en serie, paralelo o de forma individual generando las siguientes curvas de comportamiento para el sistema:

- Curva H-Q
- Curva n-Q
- Curva P-Q
- Curva NPSHr vs Q (curva de cavitación).

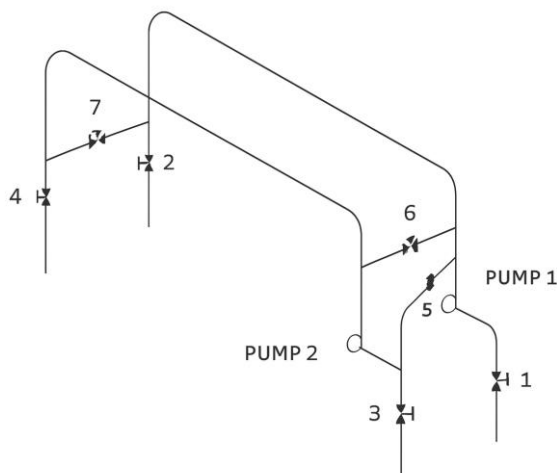
DESCRIPCIÓN DEL BANCO EXPERIMENTAL:

El banco de prueba de bombas Gilkes GH-90 actualmente cuenta con un sistema de variador de frecuencias para cada una de las bombas (N-1 y N-2) que le permite regular la cantidad de potencia entregada desde el motor al eje, a su vez, el equipo cuenta con dos flujómetros digitales que permiten observar el caudal y el consumo total generado durante la ejecución de la práctica

La bomba N-1 sitúa su rango operacional desde los 0 a 3000 r.p.m. y la bomba N-2 tiene la capacidad de trabajar tanto de bomba como de turbina, mientras que su rango operacional va desde los 0 a 3500 r.p.m.

Procedimiento experimental:

- 1) Siguiendo lo dado por el manual, recordar que, según la configuración deseada, se muestran a continuación:

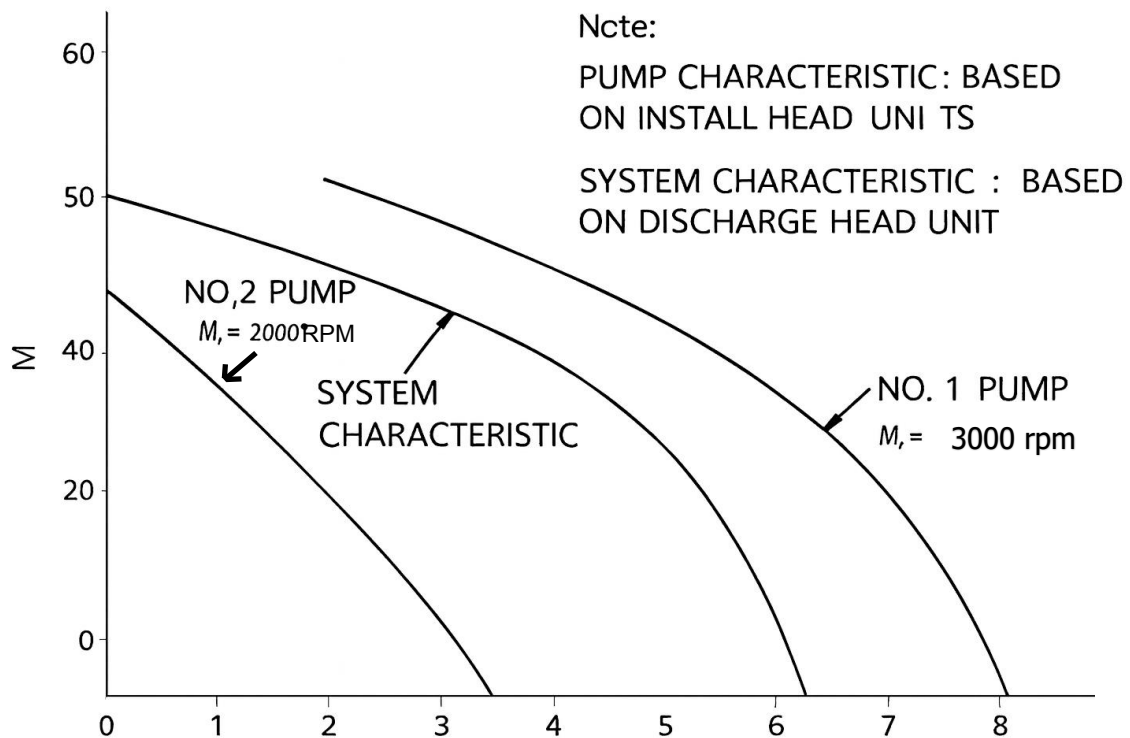


- 2) Si se desea operar exclusivamente con la bomba N-1, se deben abrir las válvulas 1 y 2

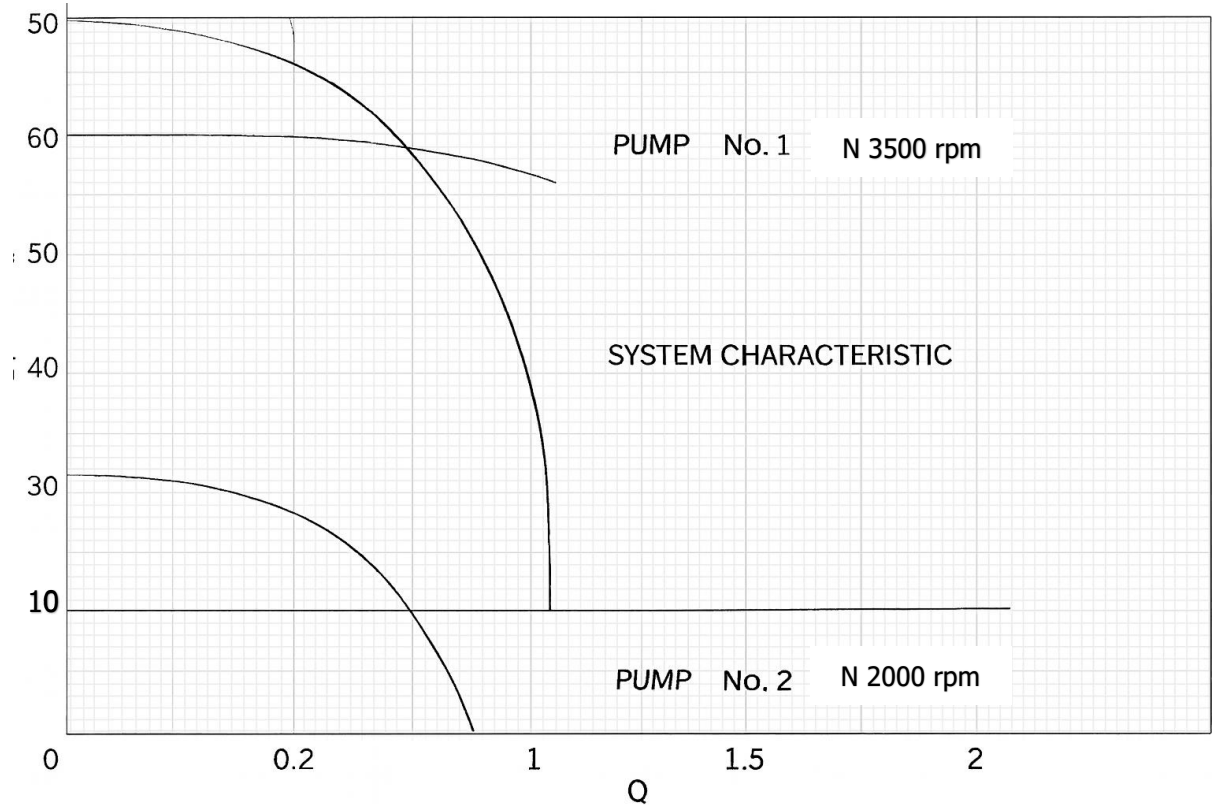
- 3) Caso contrario, si se desea operar exclusivamente con la bomba N-2, se deben abrir las válvulas 3 y 4
- 4) Si se desea activar exclusivamente la operación en paralelo para la generación de curvas y no para el caso de práctica de bombas homólogas, se deben abrir las válvulas 1, 2, 3 y 7
- 5) En el caso particular que se desee operar bajo el rango de operación en serie, se deben abrir las válvulas 2, 3, 6 y 7.
- 6) Como se mencionó anteriormente, la bomba 2 tiene la posibilidad de actuar como turbina en su forma de trabajo dual, por lo que, si se desea ver la operación de flujo interior a la turbina, se deben abrir las válvulas 1, 3 y 7.
- 7) Si se desea revisar el comportamiento de flujo exterior de la turbina, se deben abrir las válvulas 1, 4 y 5.

A continuación, se muestran las curvas esperadas en el sistema:

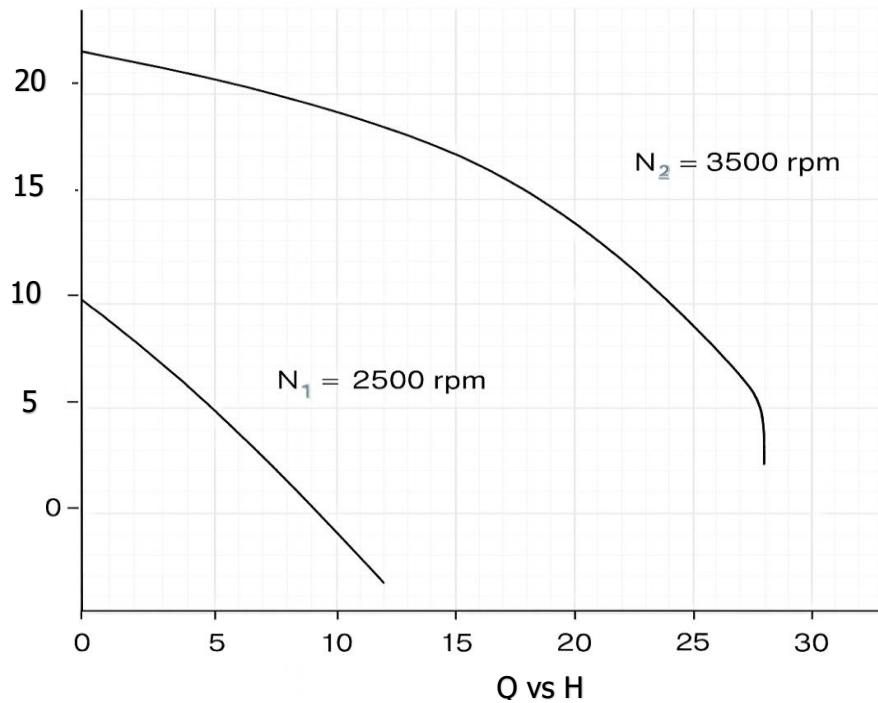
Curva esperada en la operación en paralelo:



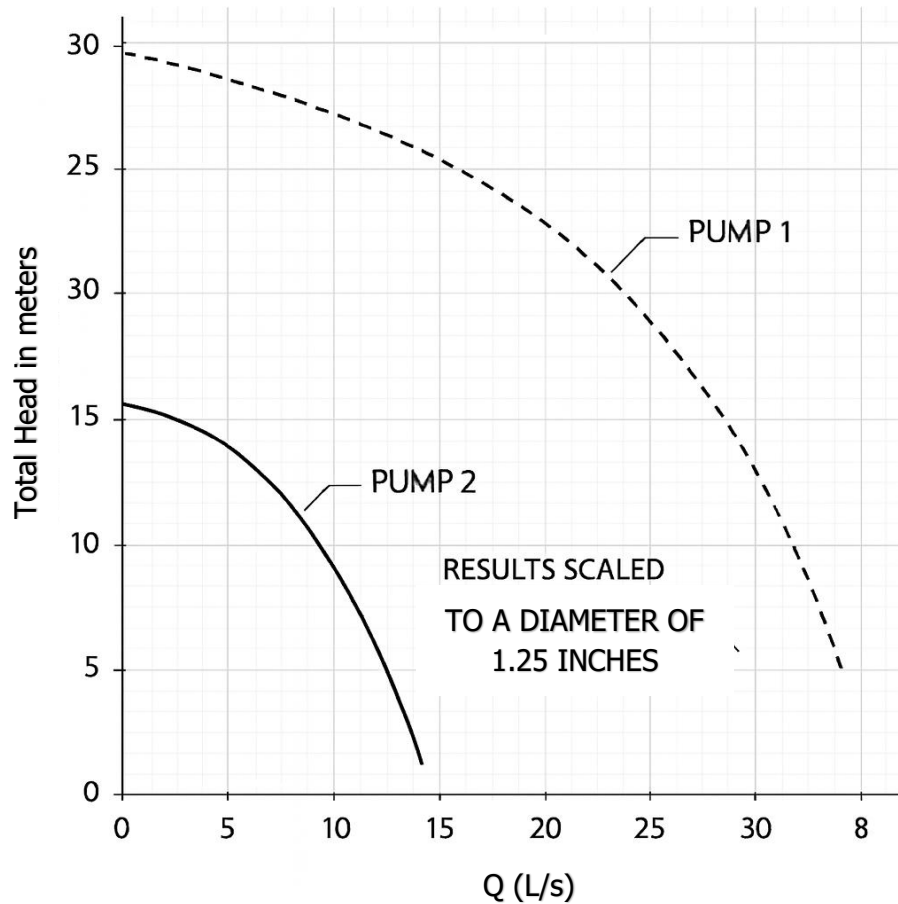
Curvas esperadas en la operación en serie:



Curva H - Q para bomba N-1:



Curvas H – Q para ambas bombas a 3000 RPM:

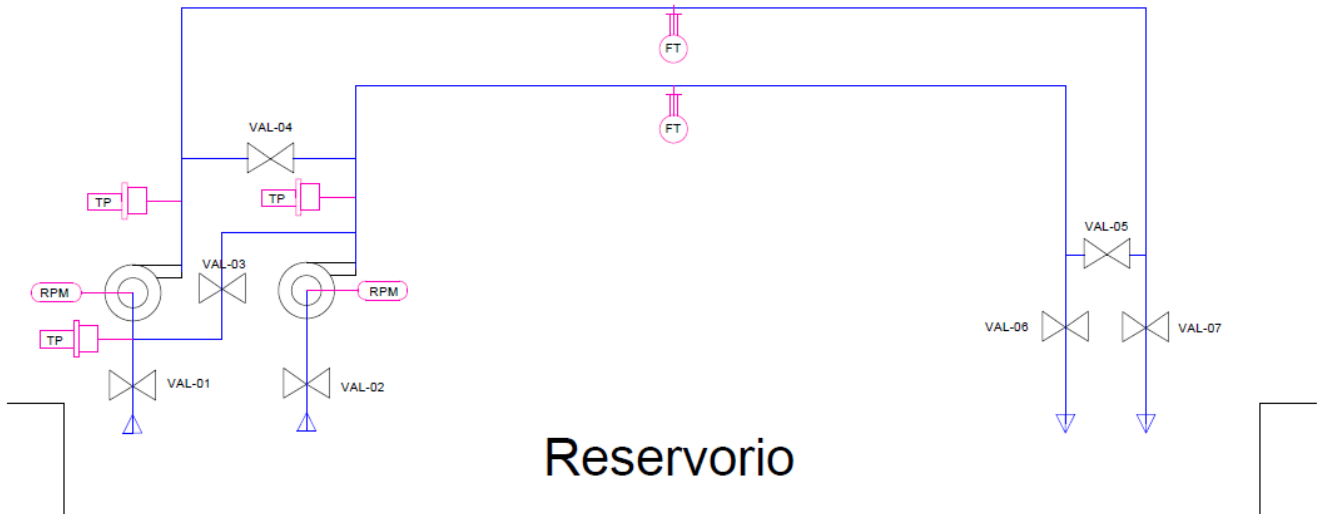


Todas las curvas presentadas son aquellas que destacan por ser las características del sistema, en un proceso de balanceo y de pruebas, estas curvas permitirán calibrar equipos de bombeo, que son críticos durante la operación y la ejecución de prácticas.

El manual del sistema recomienda que, periódicamente, se realicen las pruebas correspondientes para evitar inconsistencias o datos aberrantes, conocidos también como outliers.

Un elemento importante para conocer la operatividad esperada del sistema es su diagrama P&ID, que permite comprender todos los elementos involucrados en el sistema, este diagrama se detalla a continuación:



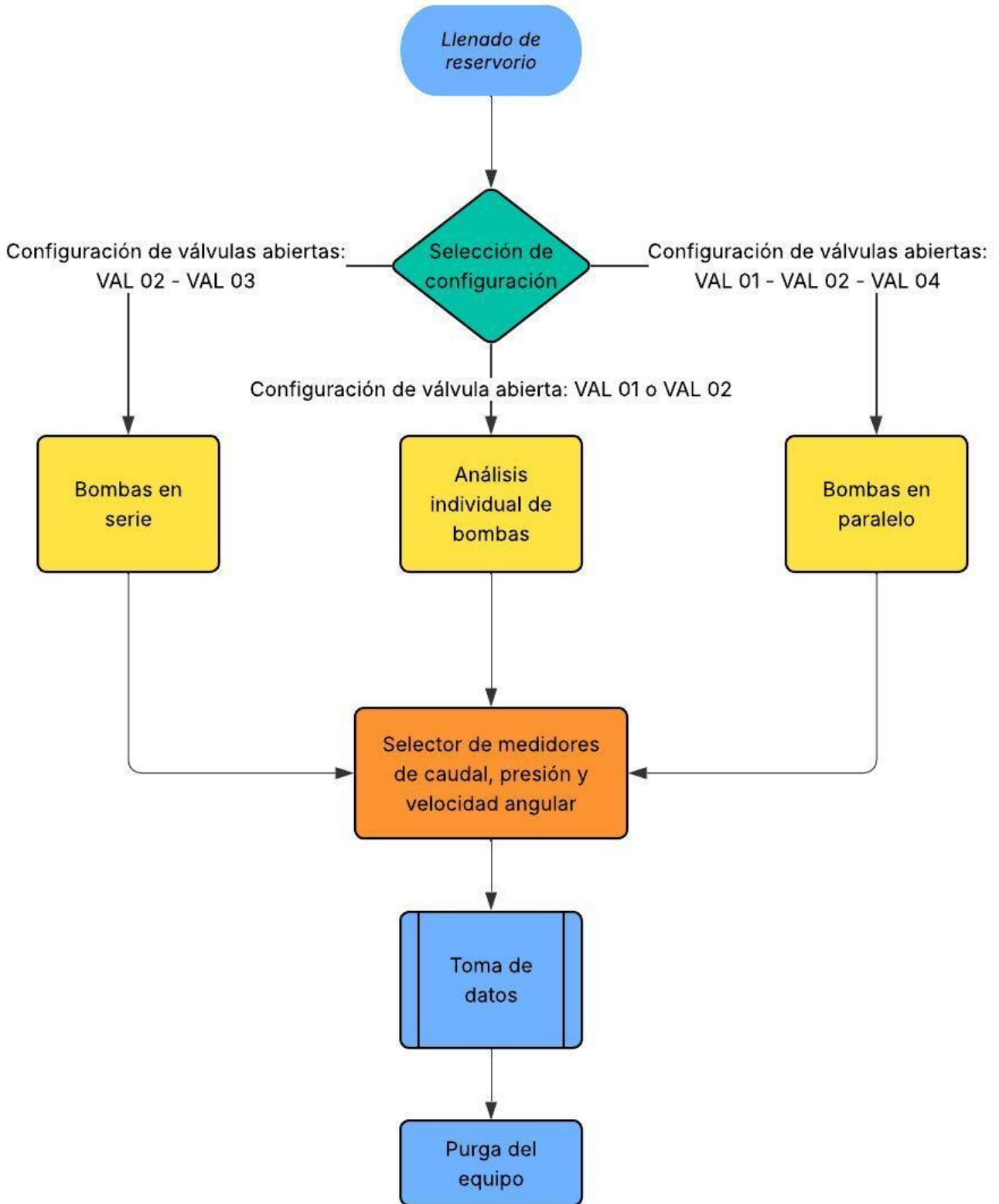


Simbología		
	Flujómetro	
	Tacómetro	
	Transductor de presión	Línea de agua
	Válvula de paso	
	Bomba centrífuga	Instrumentación

A su vez, para una comprensión más didáctica del comportamiento del sistema y como dirigir la ejecución de las prácticas, se adjunta diagrama de flujo de actividades del banco de prueba de bombas.

E





Informe de análisis de tensión



Archivo analizado:	estructura banco de pruebas.ipt
Versión de Autodesk Inventor:	2023 (Build 270158000, 158)
Fecha de creación:	03/01/2026, 13:23
Autor del estudio:	E. Yerovi
Resumen:	

Análisis estático:1

Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	03/01/2026, 13:17
Estado de modelo	[Principal]
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No

iProperties

Resumen

Autor E. Yerovi

Proyecto

Nº de pieza	estructura banco de pruebas
Diseñador	E. Yerovi
Coste	0,00 €
Fecha de creación	01/01/2026

Estado

Estado del diseño Trabajo en curso

Propiedades físicas

Material	Acero inoxidable
Densidad	8 g/cm ³
Masa	748,291 kg
Área	15,386 m ²
Volumen	0,0935363 m ³
Centro de gravedad	x=-1,27021 m y=0,460428 m z=0 m

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
---	-----

Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	Sí

Material(es)

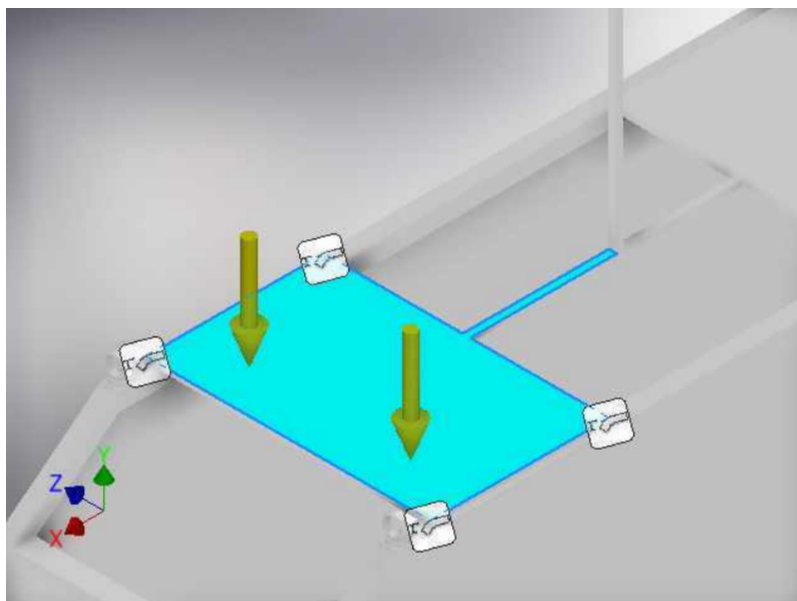
Nombre	Acero inoxidable	
General	Densidad de masa	8 g/cm ³
	Límite de elasticidad	250 MPa
	Resistencia máxima a tracción	540 MPa
Tensión	Módulo de Young	193 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,3 su
	Módulo cortante	74,2308 GPa
Nombre(s) de pieza	estructura banco de pruebas.ipt	

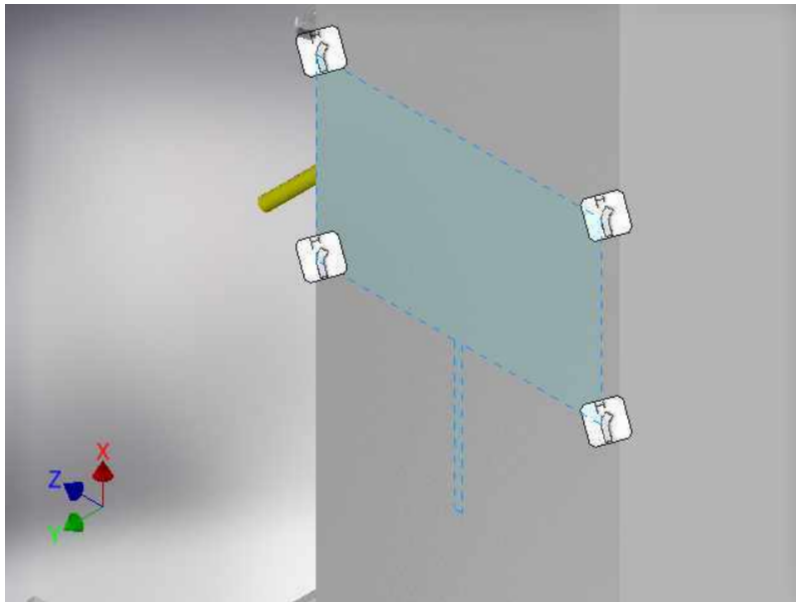
Condiciones de funcionamiento

Fuerza remota: 1

Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	294,000 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	-294,000 N
Vector Z	0,000 N
Punto remoto X	-0,500 m
Punto remoto Y	0,800 m
Punto remoto Z	0,210 m

Cara(s) seleccionada(s)

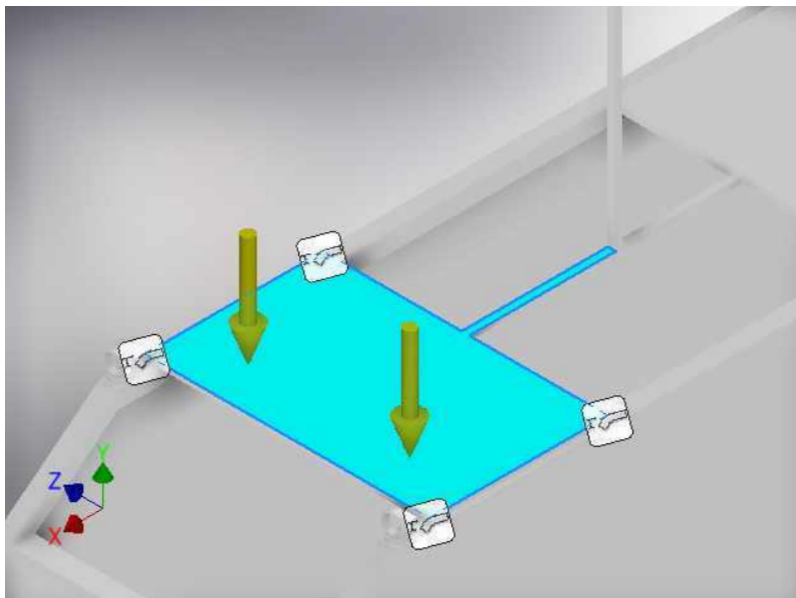


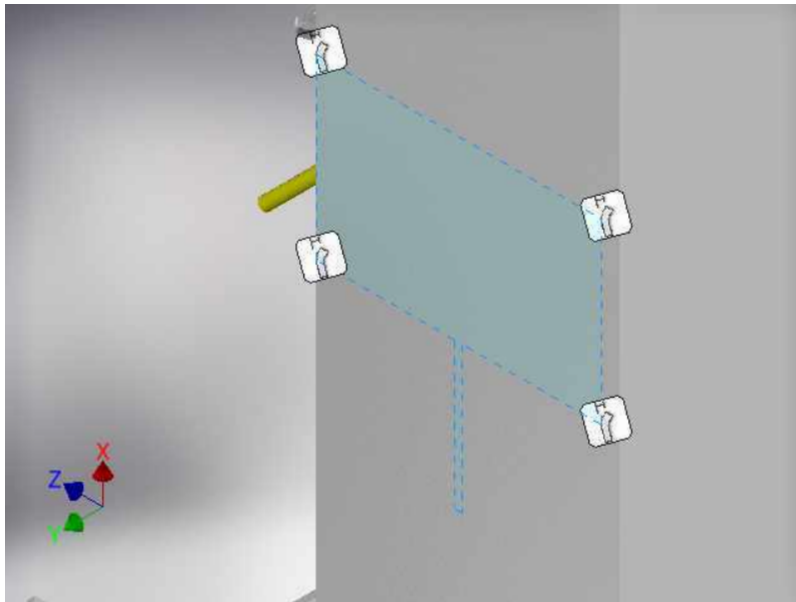


Fuerza remota:2

Tipo de carga	Fuerza remota
Magnitud	294,000 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	-294,000 N
Vector Z	0,000 N
Punto remoto X	-0,500 m
Punto remoto Y	0,800 m
Punto remoto Z	-0,210 m

Cara(s) seleccionada(s)

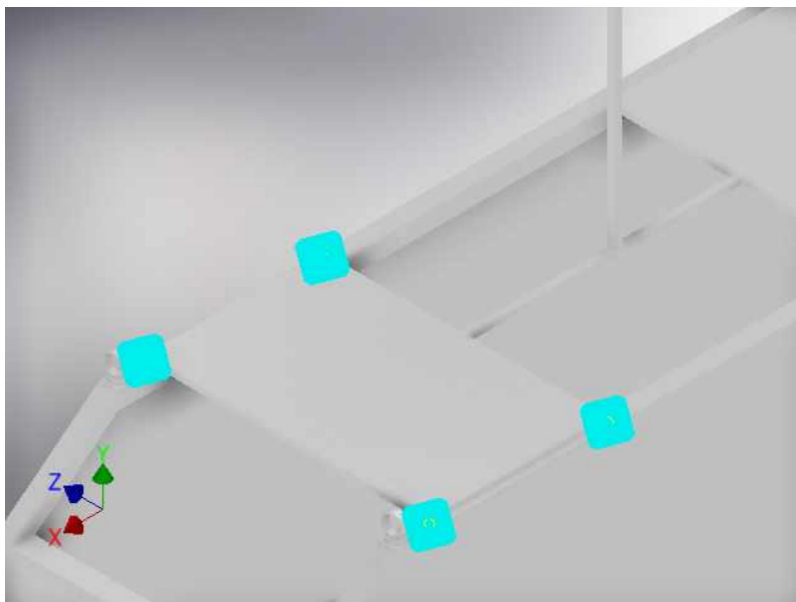


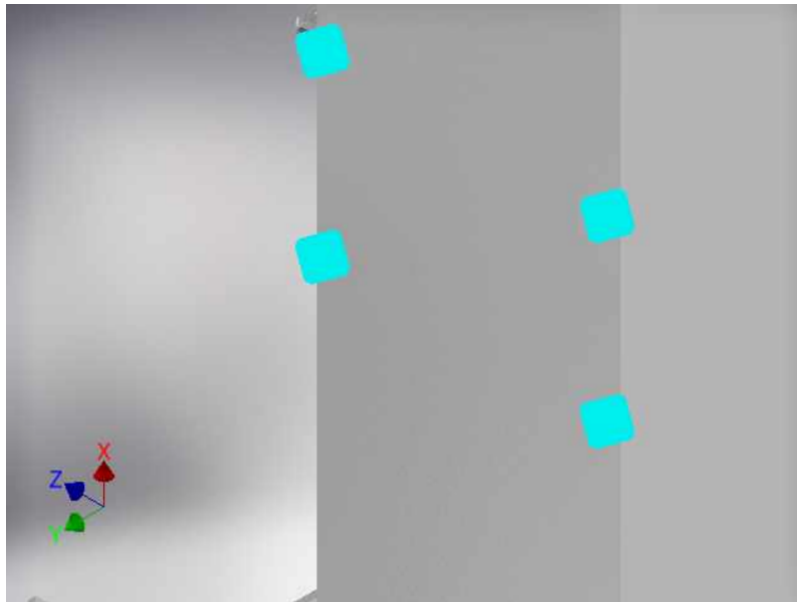


Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

Cara(s) seleccionada(s)





Contactos (Bloqueado)

Nombre	Nombre(s) de pieza
Bloqueado:1	estructura banco de pruebas.ipt
Bloqueado:2	estructura banco de pruebas.ipt

Resultados

Fuerza y pares de reacción en restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	588 N	0 N	71,4339 N m	0 N m
		588 N		0 N m
		0 N		71,4339 N m

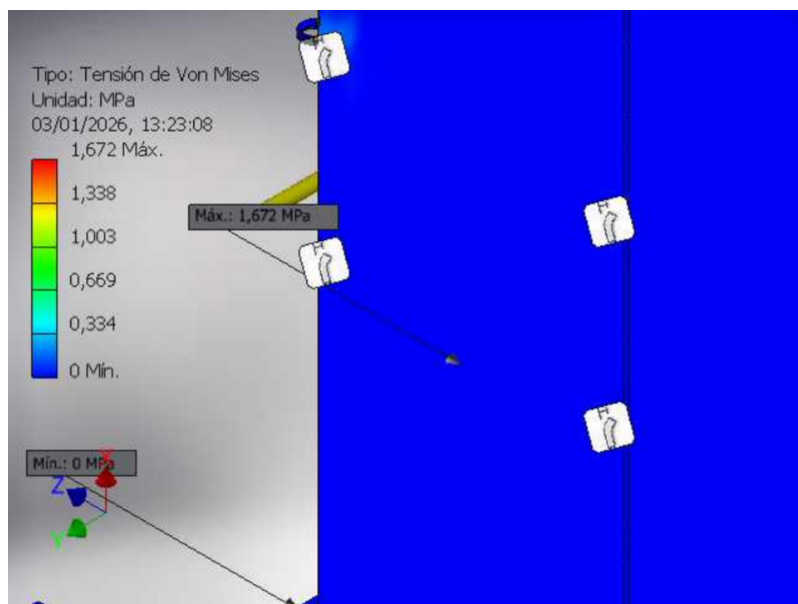
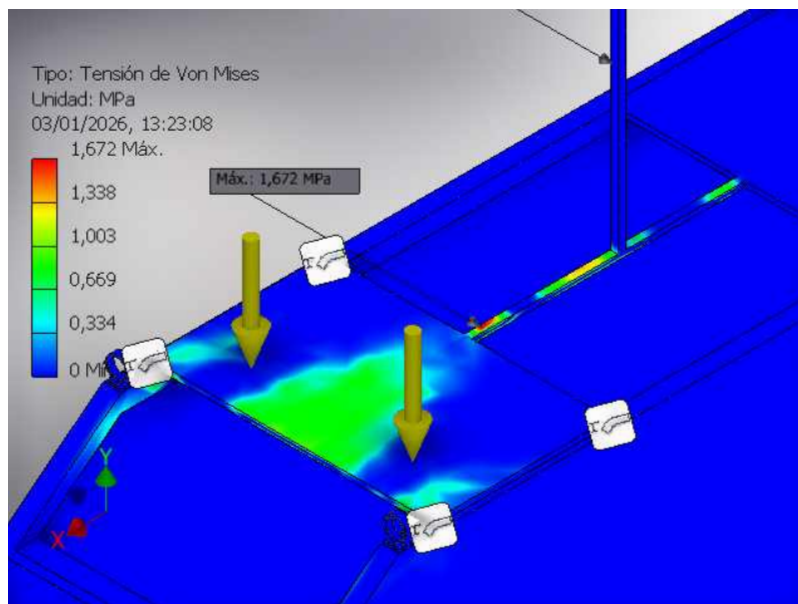
Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	93536300 mm ³	
Masa	748,291 kg	
Tensión de Von Mises	0,0000232545 MPa	1,67197 MPa
Primera tensión principal	-0,503395 MPa	1,80098 MPa
Tercera tensión principal	-1,8898 MPa	0,223758 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0358773 mm
Coefficiente de seguridad	15 su	15 su
Tensión XX	-1,87196 MPa	1,78816 MPa
Tensión XY	-0,299327 MPa	0,423305 MPa
Tensión XZ	-0,303657 MPa	0,305855 MPa
Tensión YY	-0,789669 MPa	0,683168 MPa
Tensión YZ	-0,420253 MPa	0,374948 MPa
Tensión ZZ	-1,25745 MPa	0,954479 MPa
Desplazamiento X	-0,02452 mm	0,00110241 mm
Desplazamiento Y	-0,0281912 mm	0,0264375 mm
Desplazamiento Z	-0,00827743 mm	0,00867741 mm

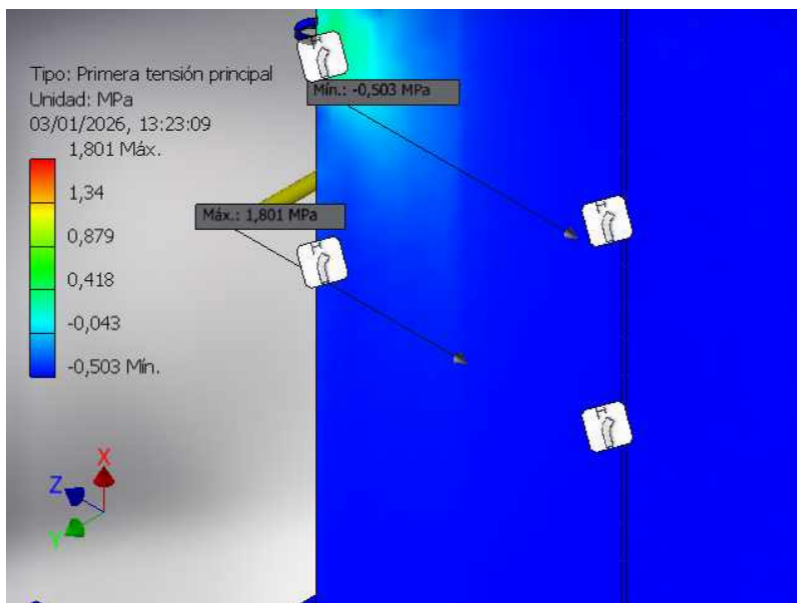
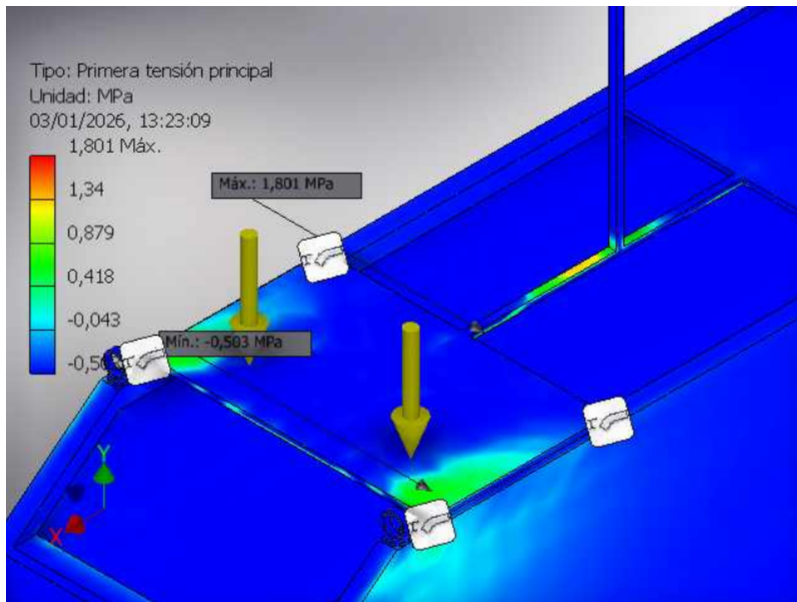
Deformación equivalente	0,00000000108197 su	0,00000781449 su
Primera deformación principal	-0,000000229102 su	0,00000891341 su
Tercera deformación principal	-0,00000907914 su	0,0000000113906 su
Deformación XX	-0,00000895903 su	0,00000884281 su
Deformación XY	-0,00000201619 su	0,00000285127 su
Deformación XZ	-0,00000204536 su	0,00000206016 su
Deformación YY	-0,00000289282 su	0,00000337936 su
Deformación YZ	-0,00000283072 su	0,00000252556 su
Deformación ZZ	-0,00000612217 su	0,0000049552 su
Presión de contacto	0 MPa	0,674303 MPa
Presión de contacto X	-0,359721 MPa	0,404573 MPa
Presión de contacto Y	-0,528178 MPa	0,483378 MPa
Presión de contacto Z	-0,500369 MPa	0,452382 MPa

Figuras

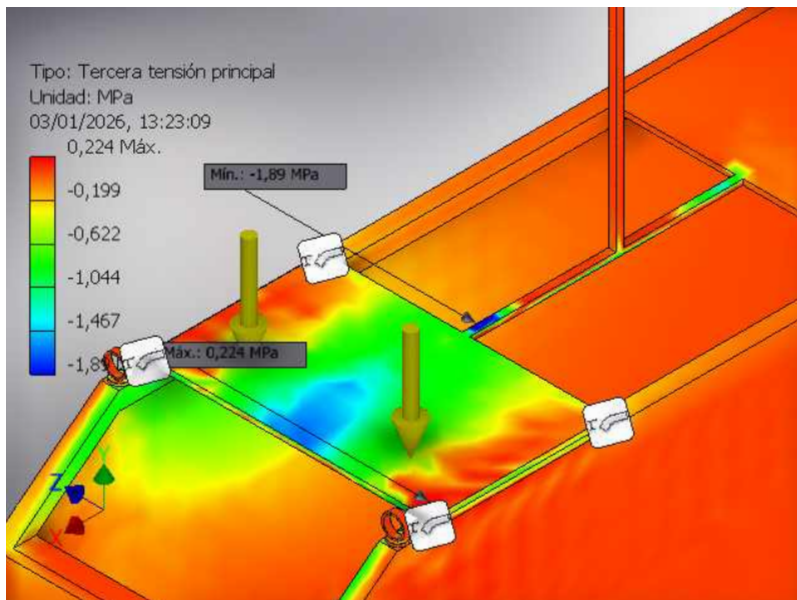
Tensión de Von Mises

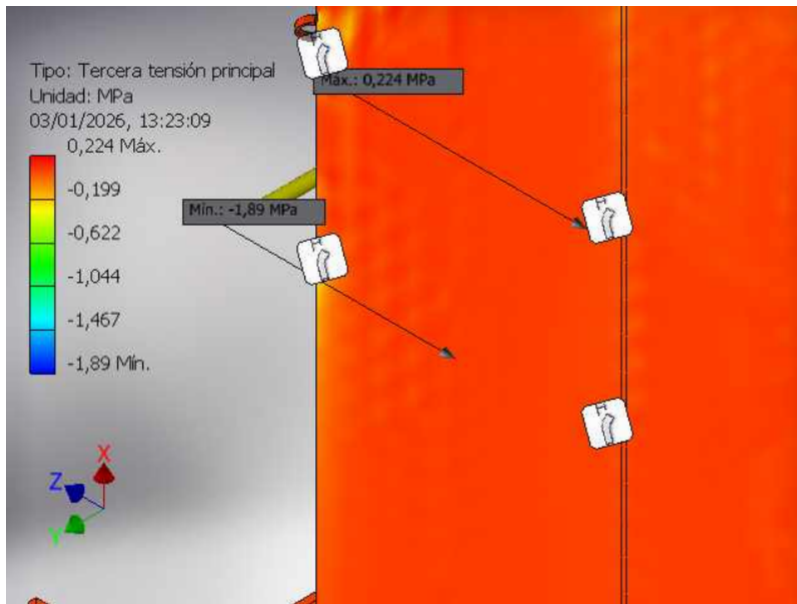


Primera tensión principal

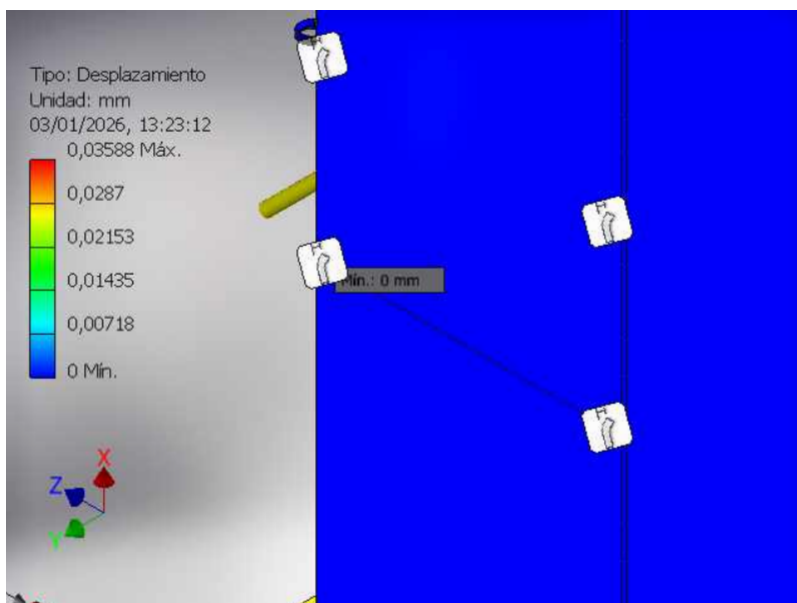
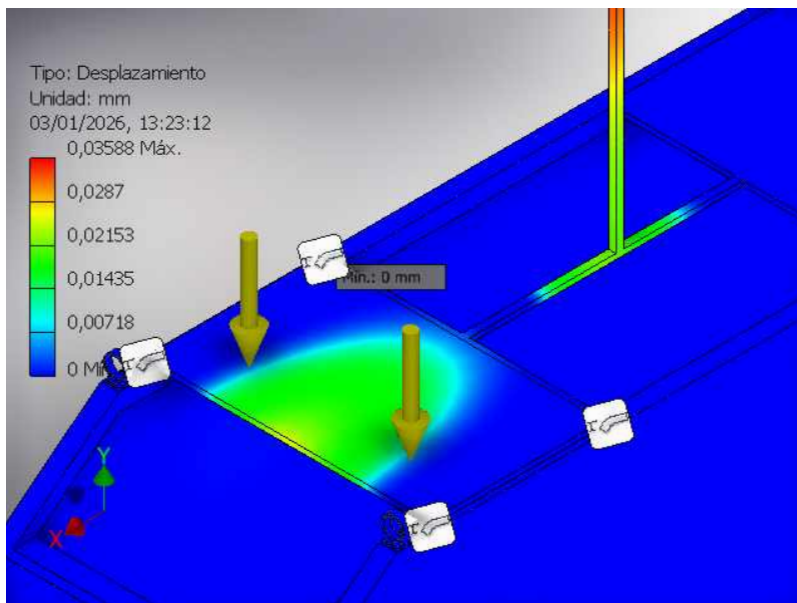


Tercera tensión principal

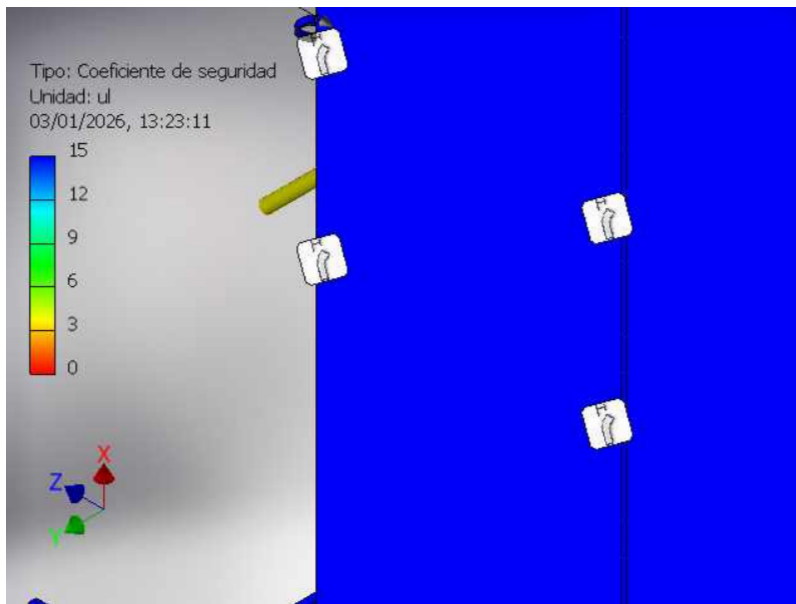
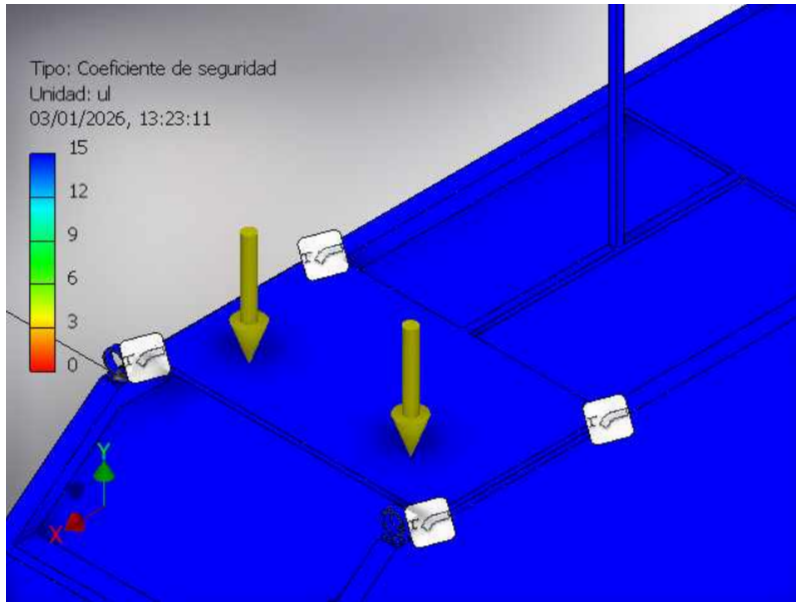




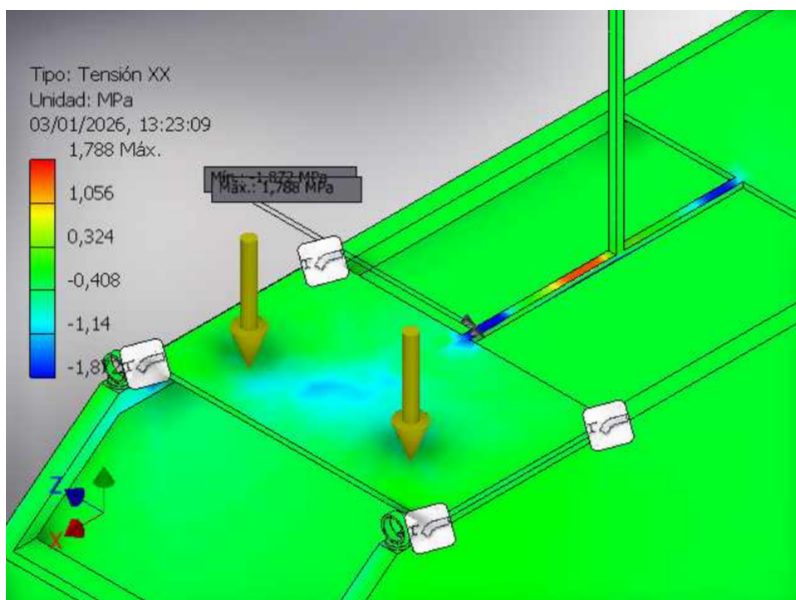
Desplazamiento

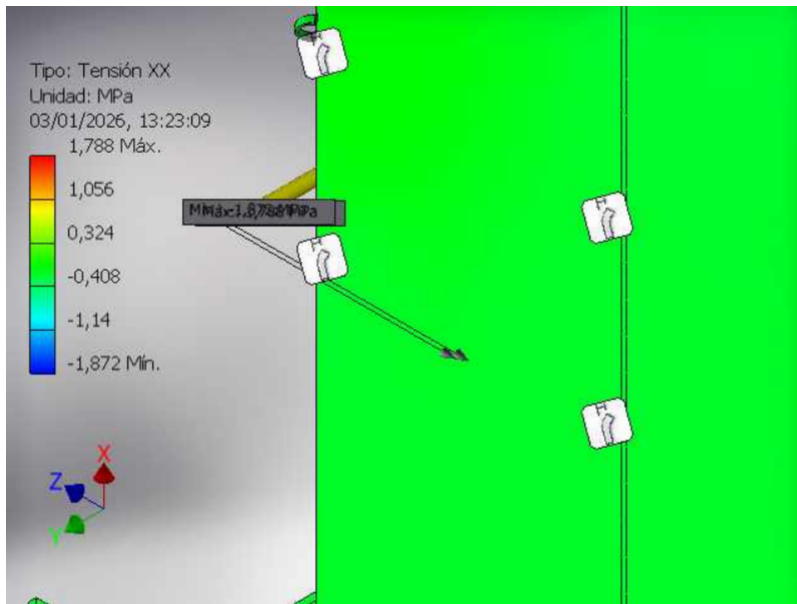


Coeficiente de seguridad

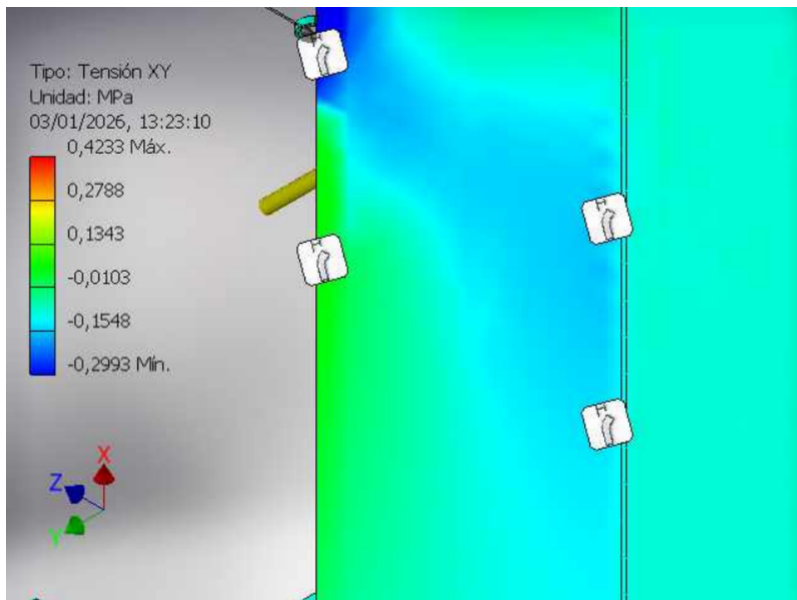
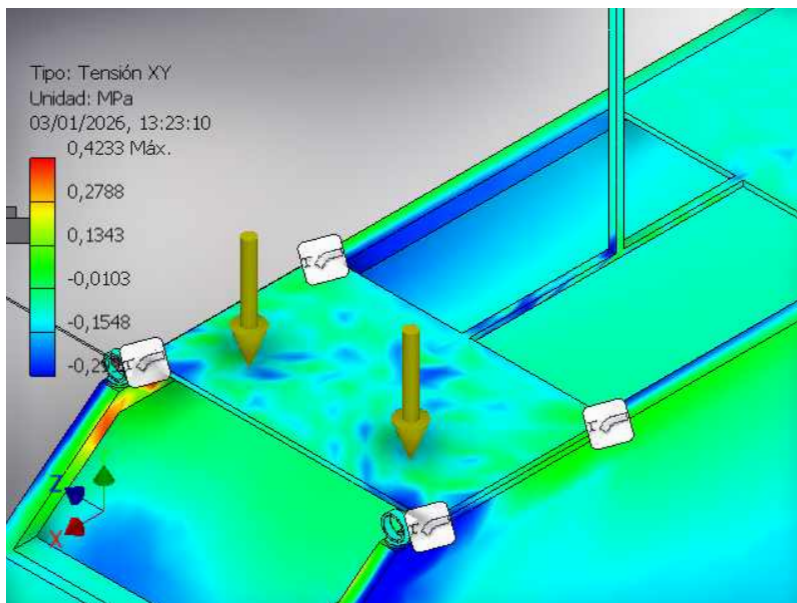


Tensión XX

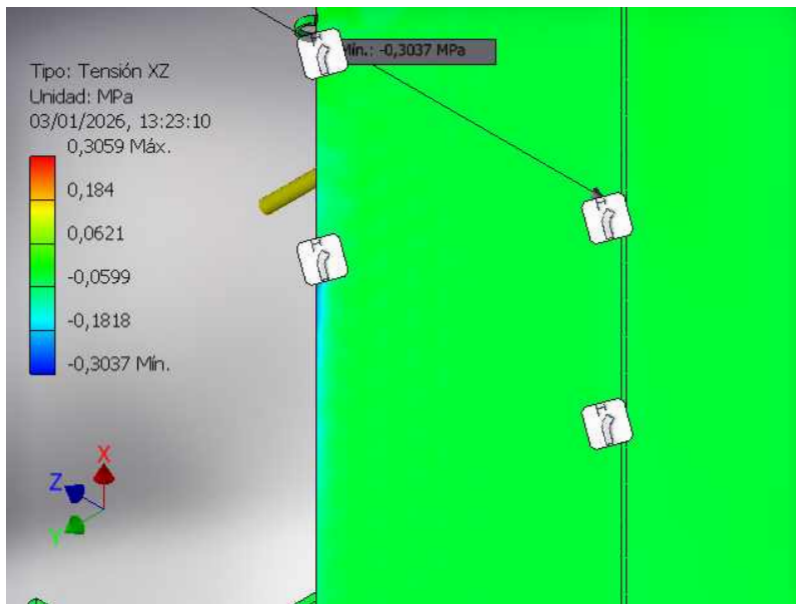
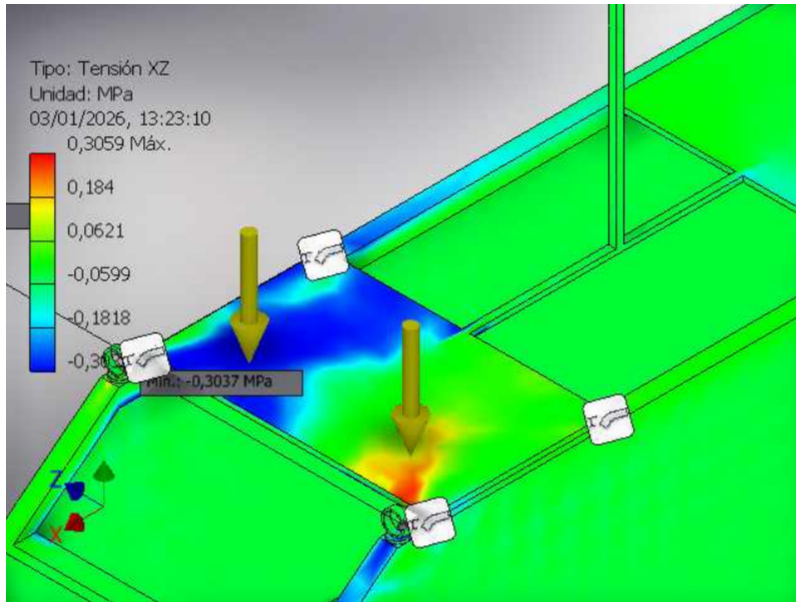




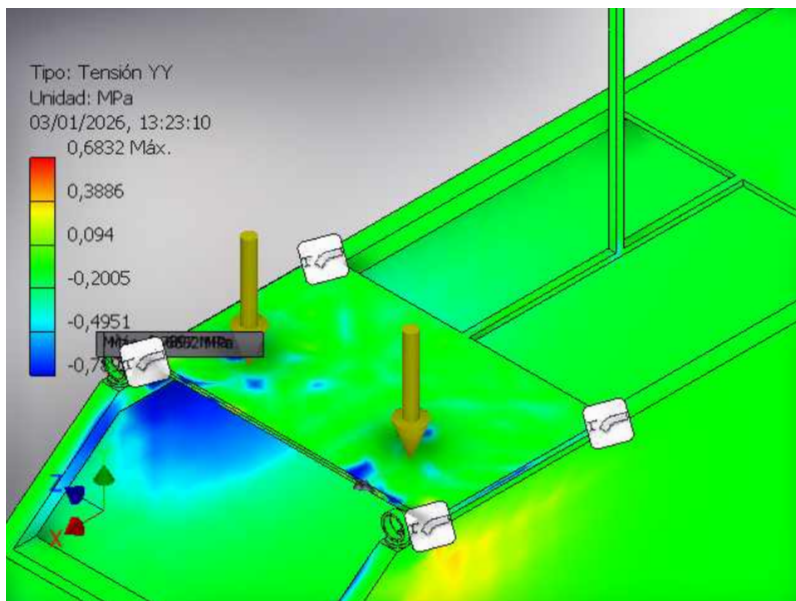
Tensión XY

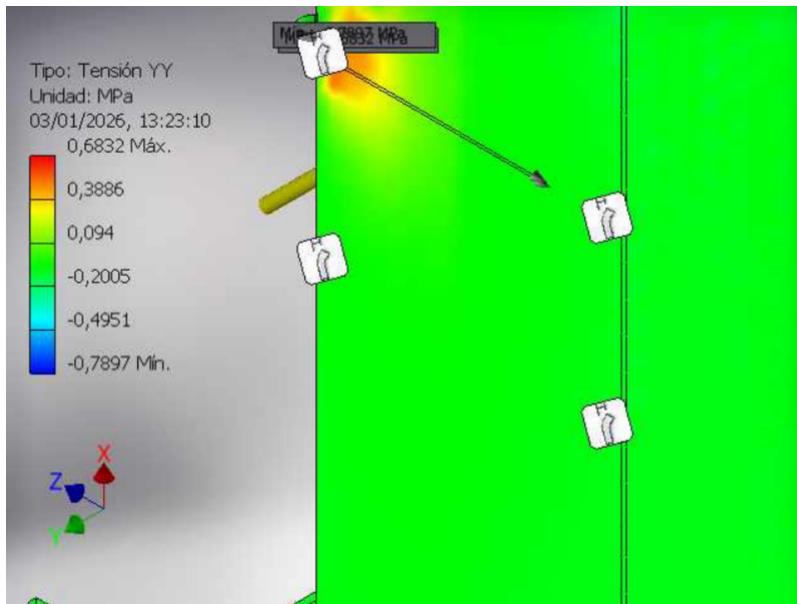


Tensión XZ

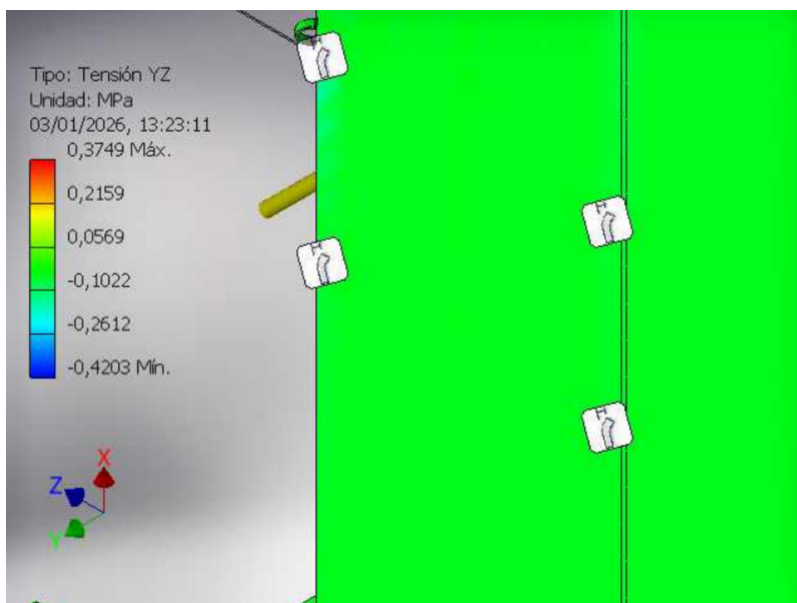
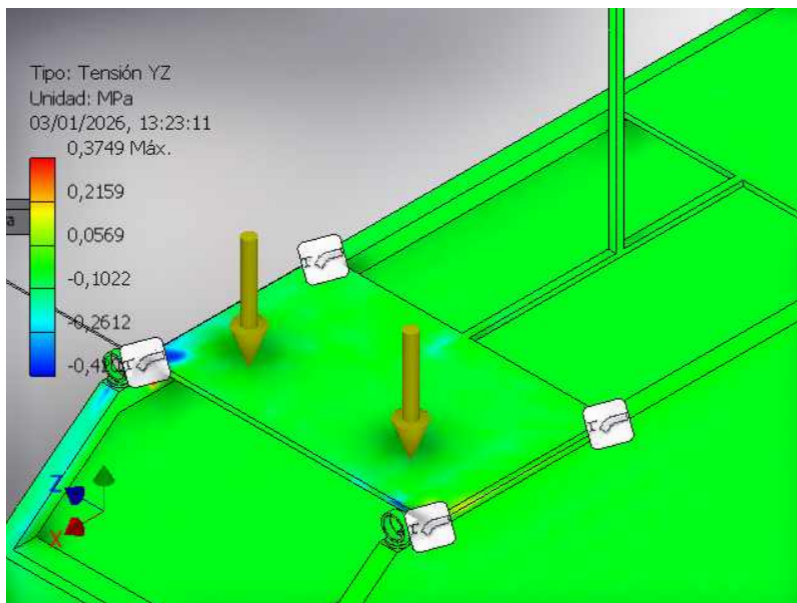


Tensión YY

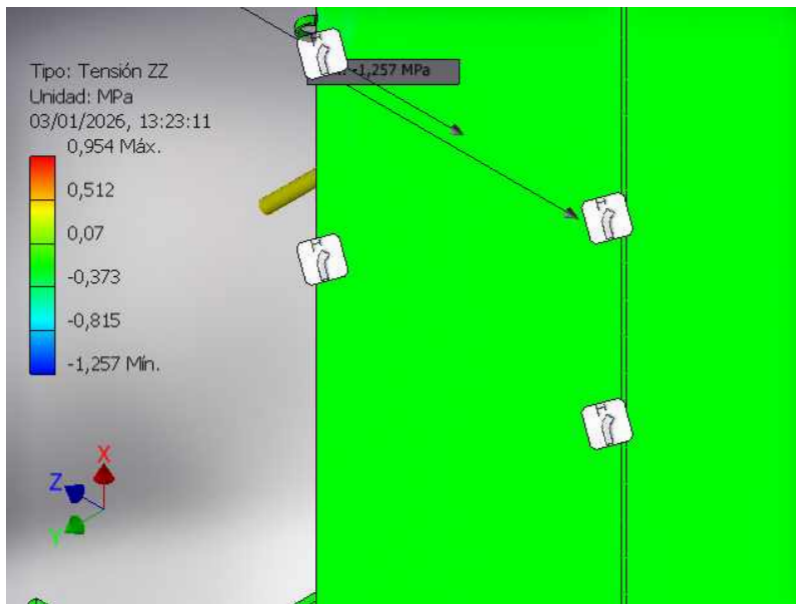
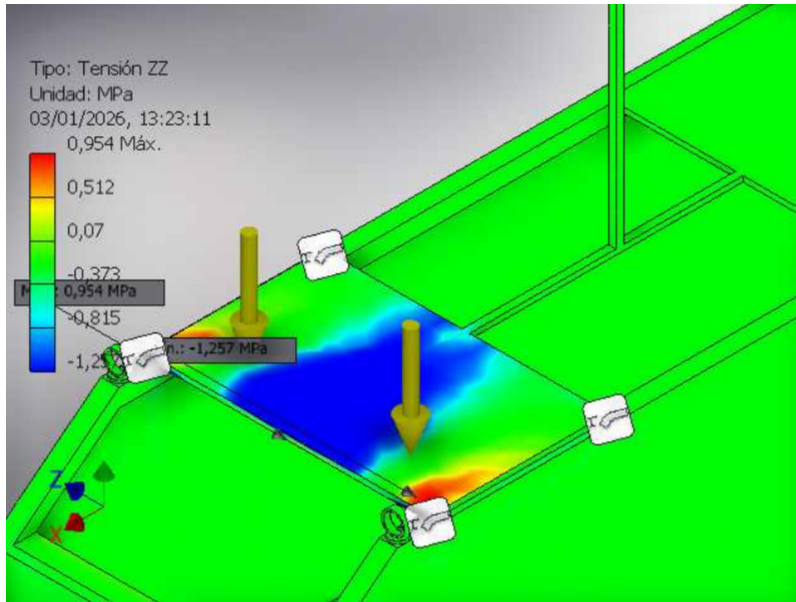




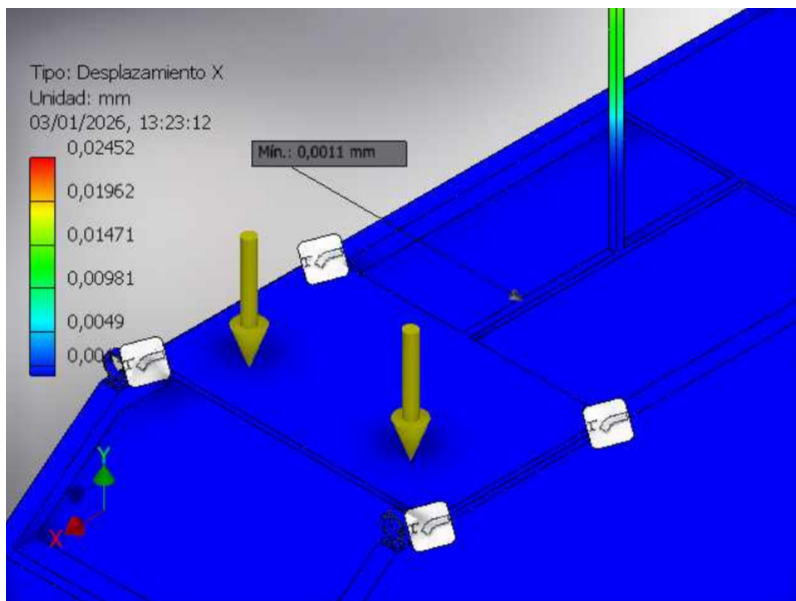
Tensión YZ

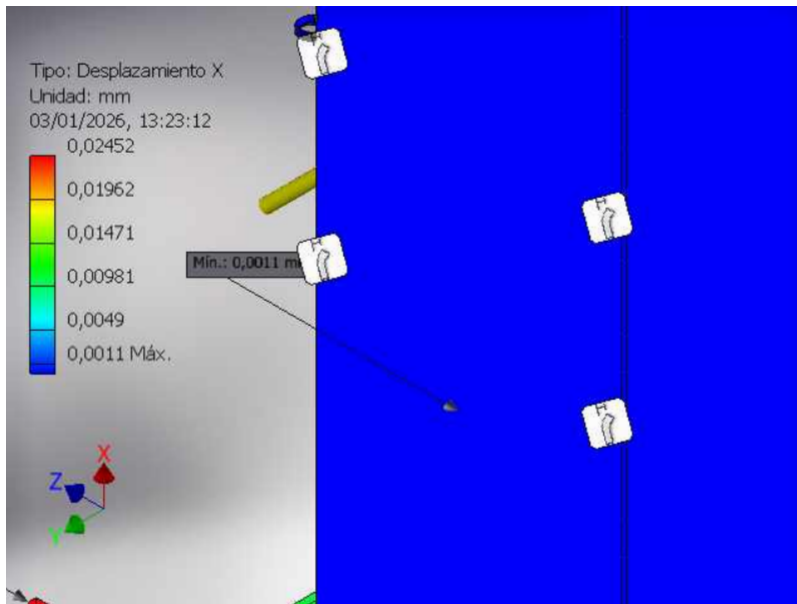


Tensión ZZ

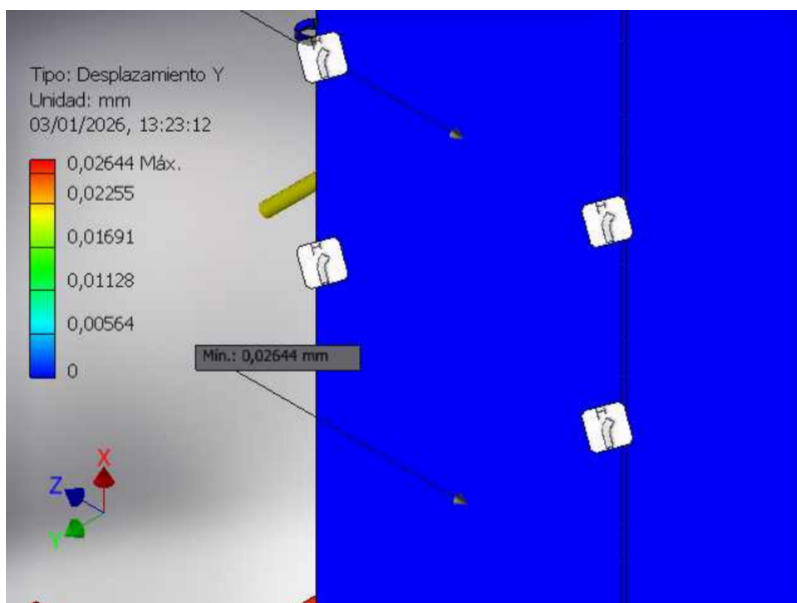
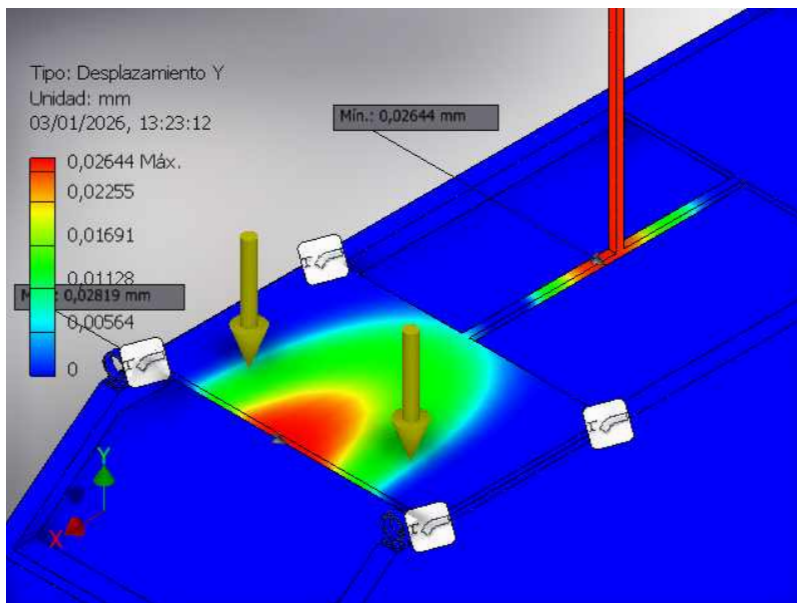


Desplazamiento X

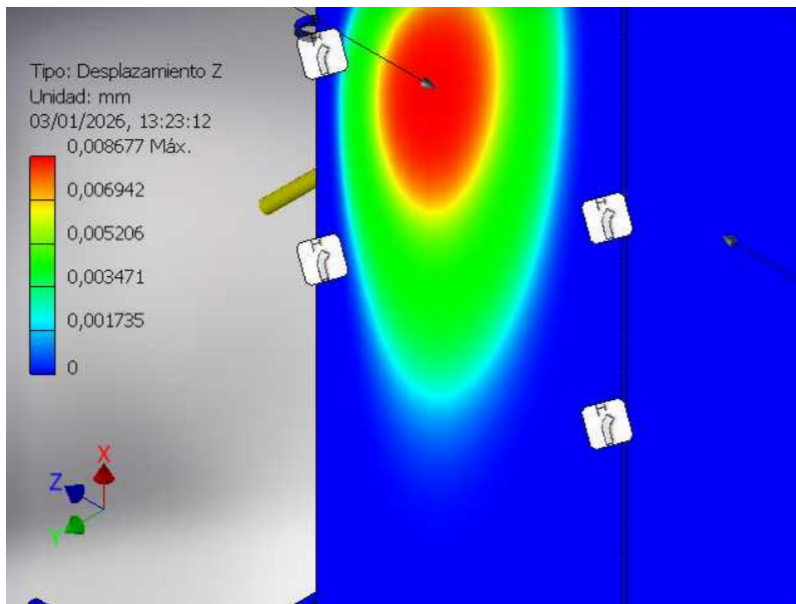
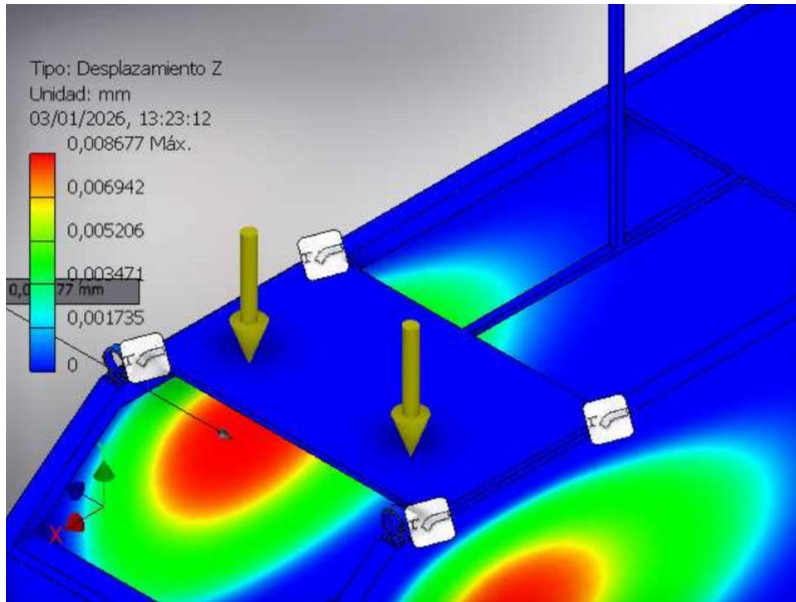




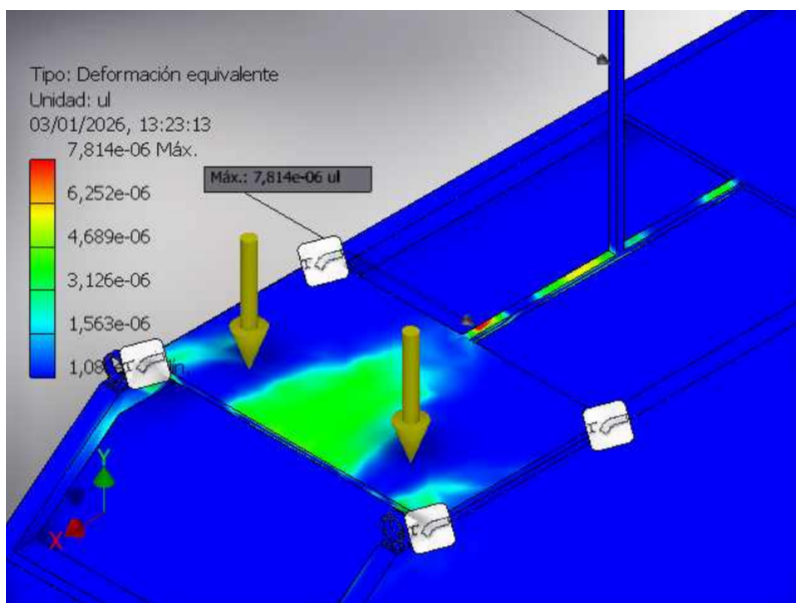
Desplazamiento Y

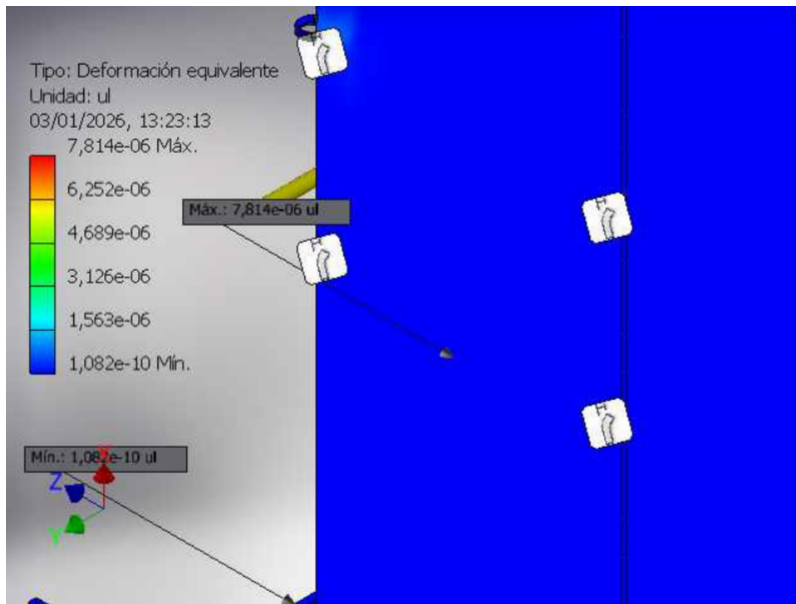


Desplazamiento Z

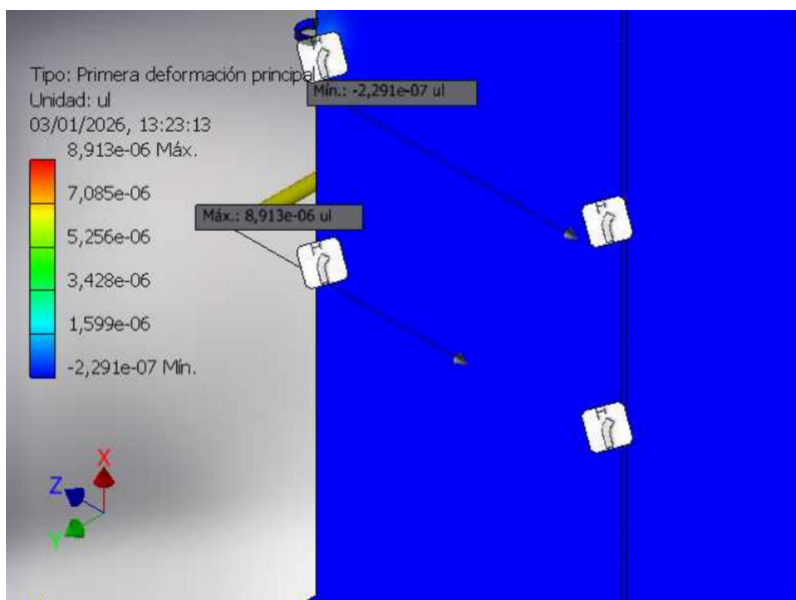
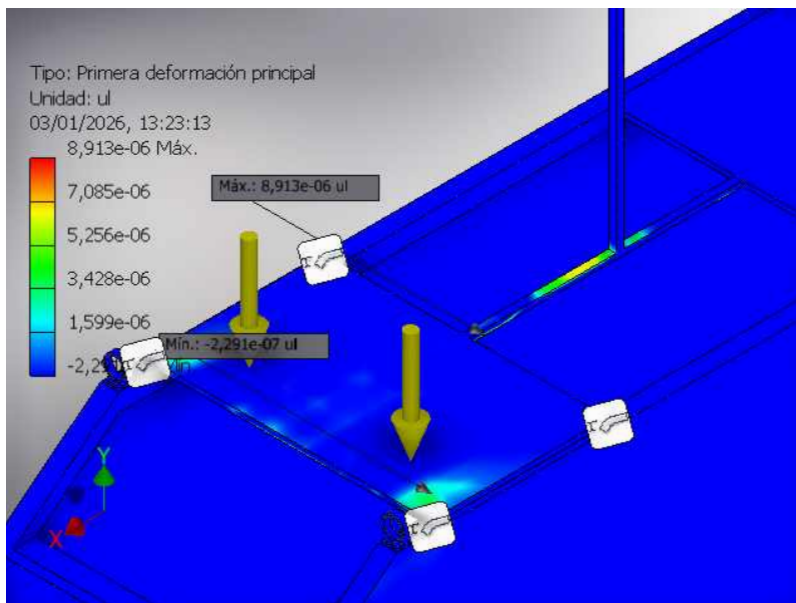


Deformacion equivalente

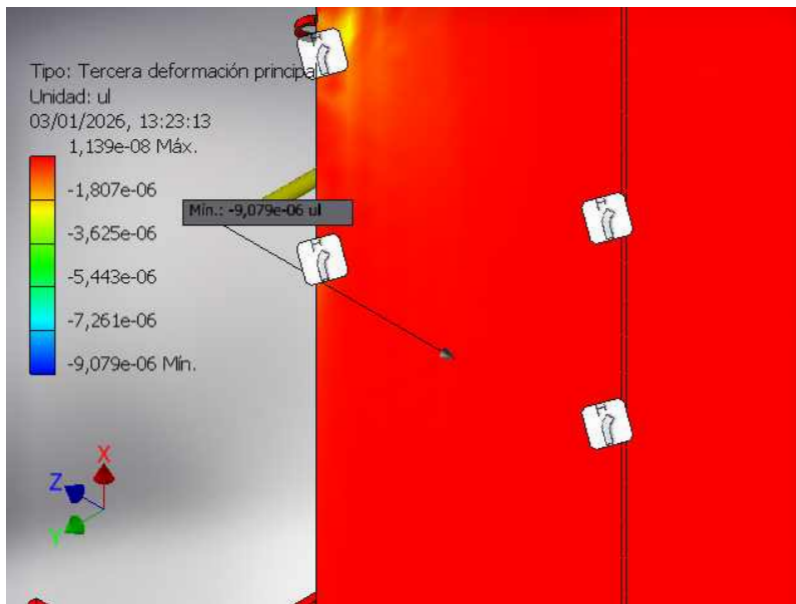
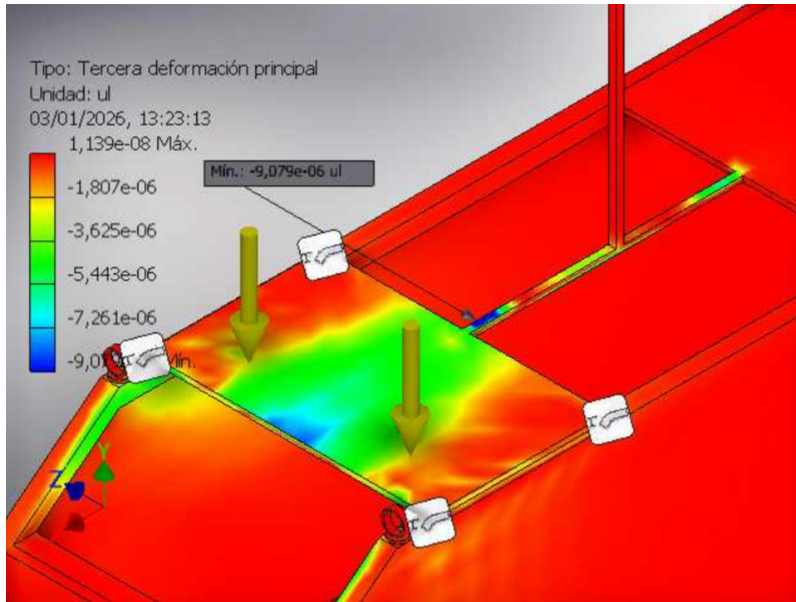




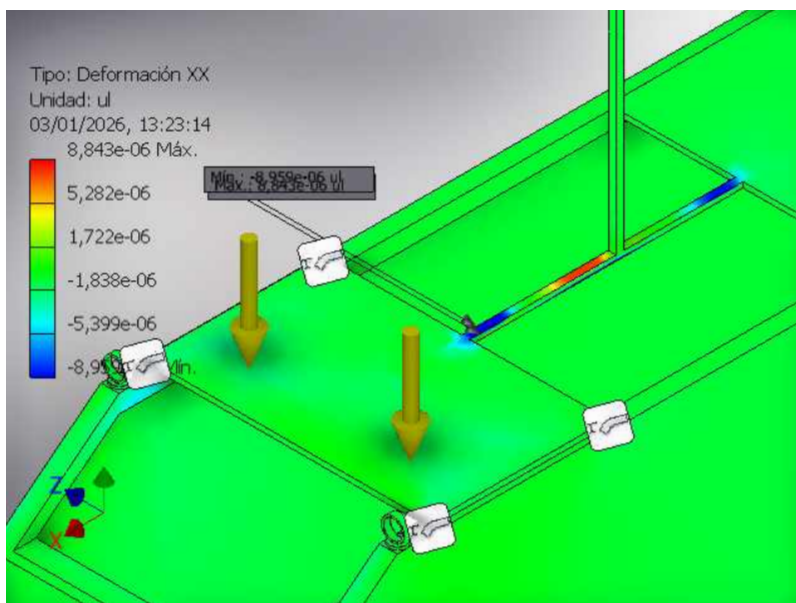
Primera deformación principal

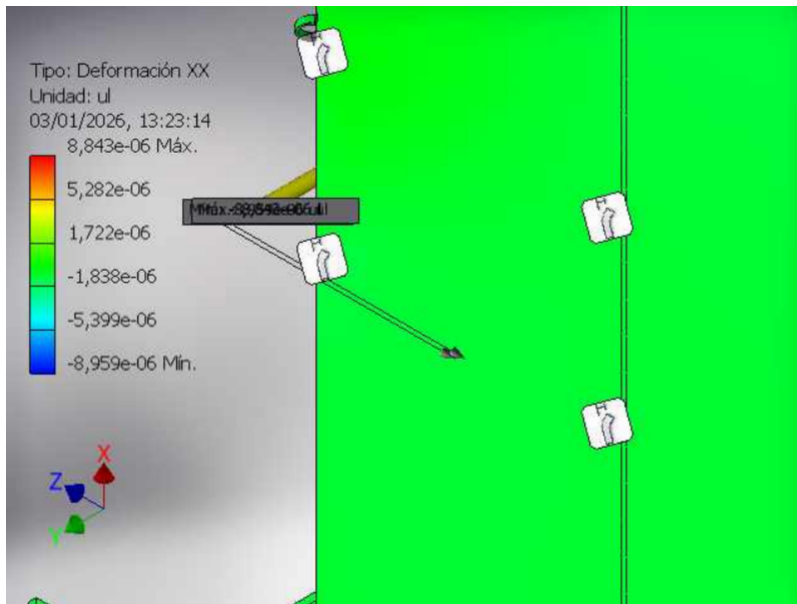


Tercera deformación principal

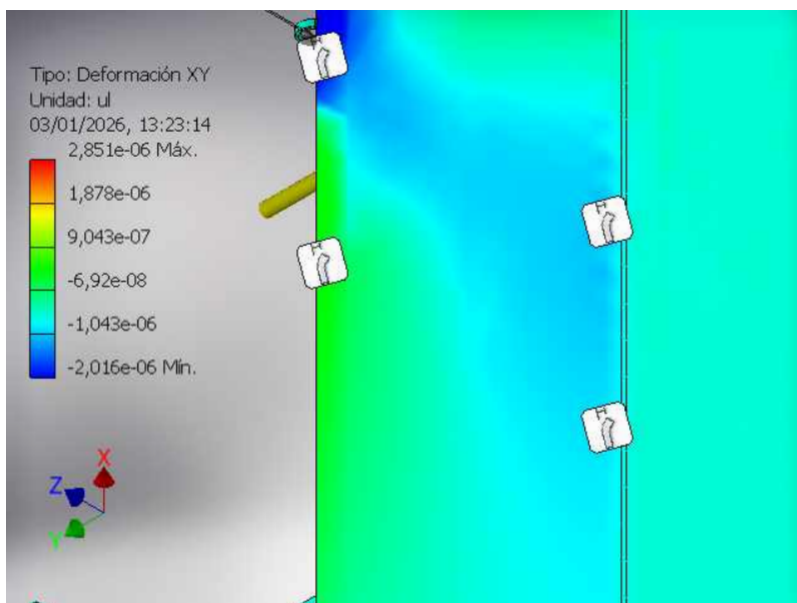
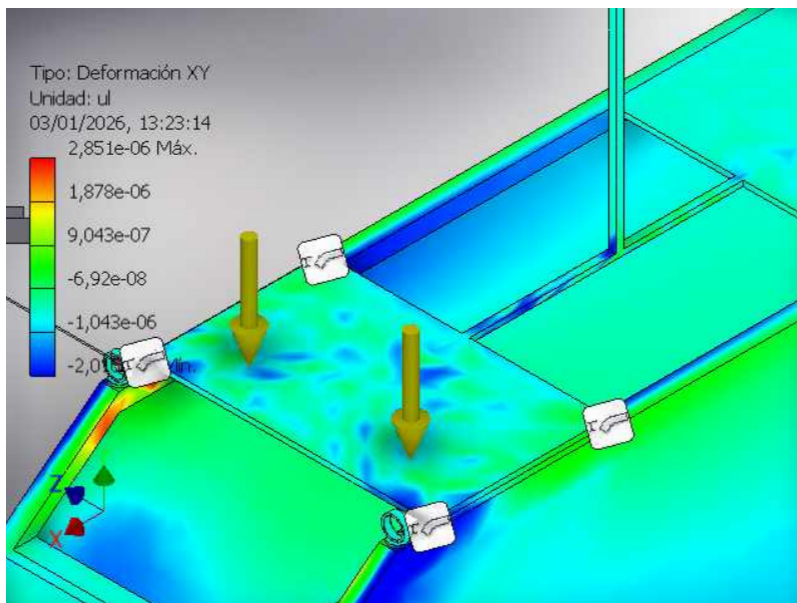


Deformación XX

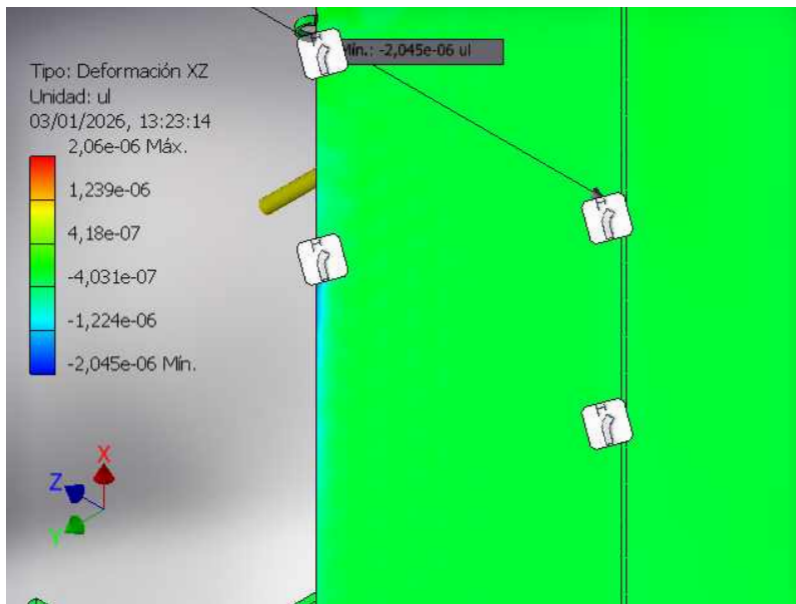
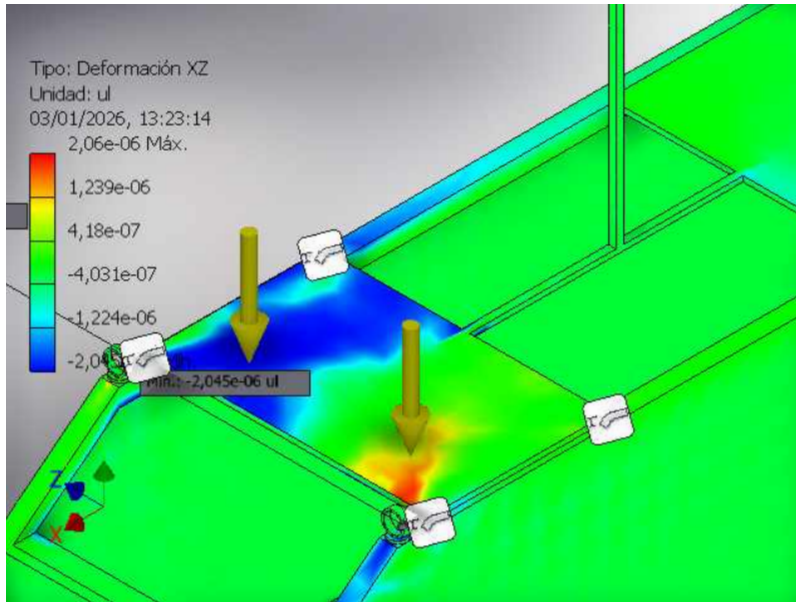




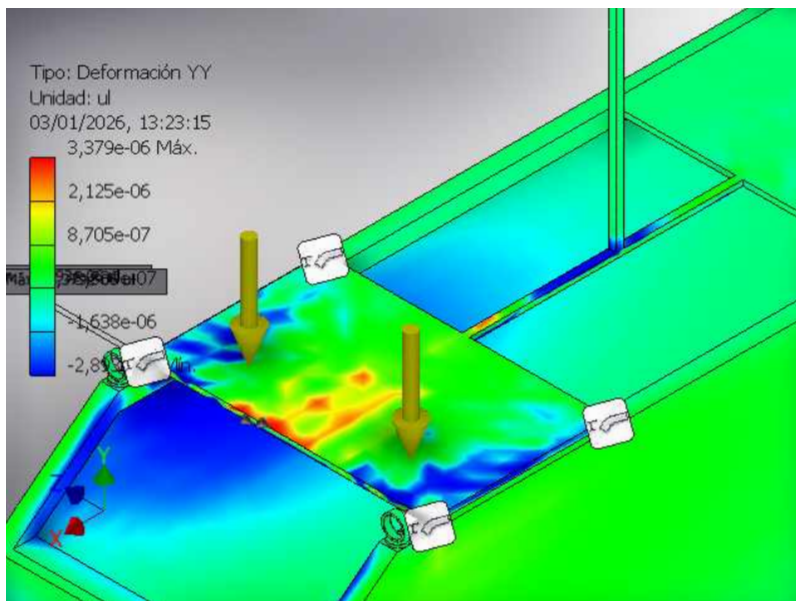
Deformación XY

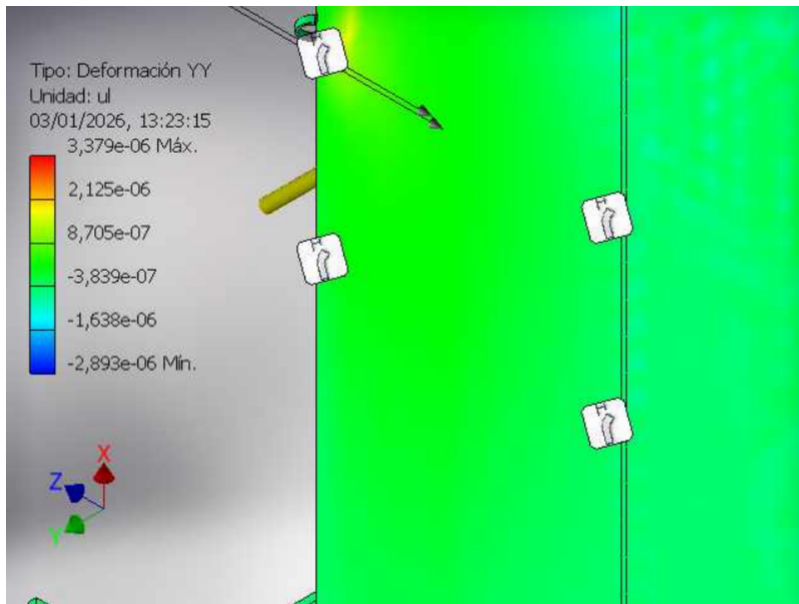


Deformación XZ

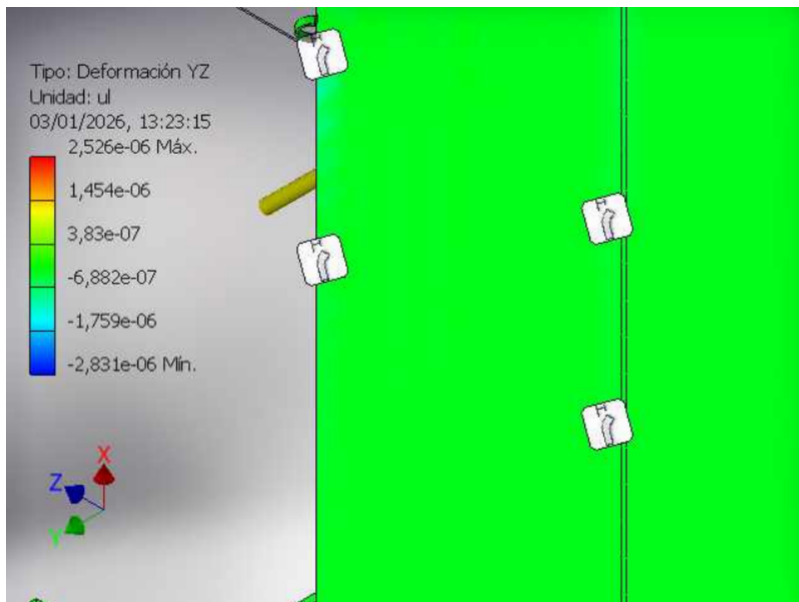
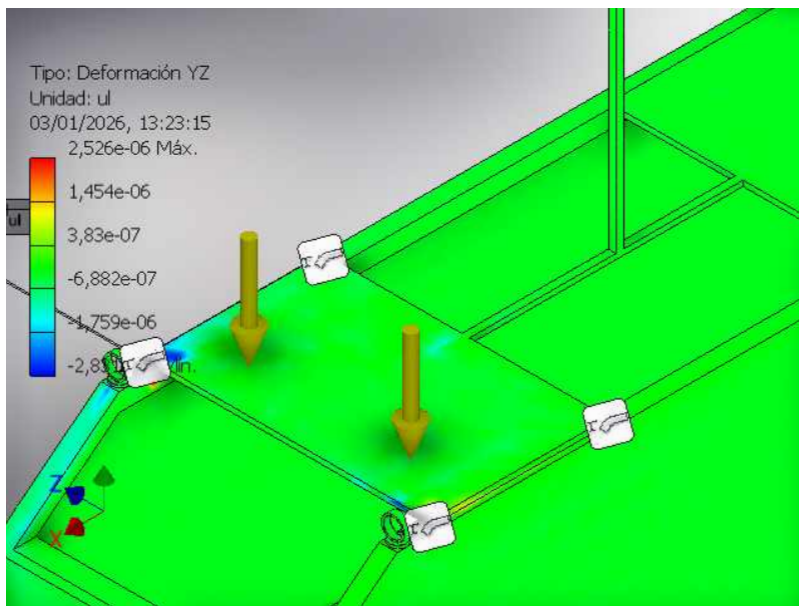


Deformación YY

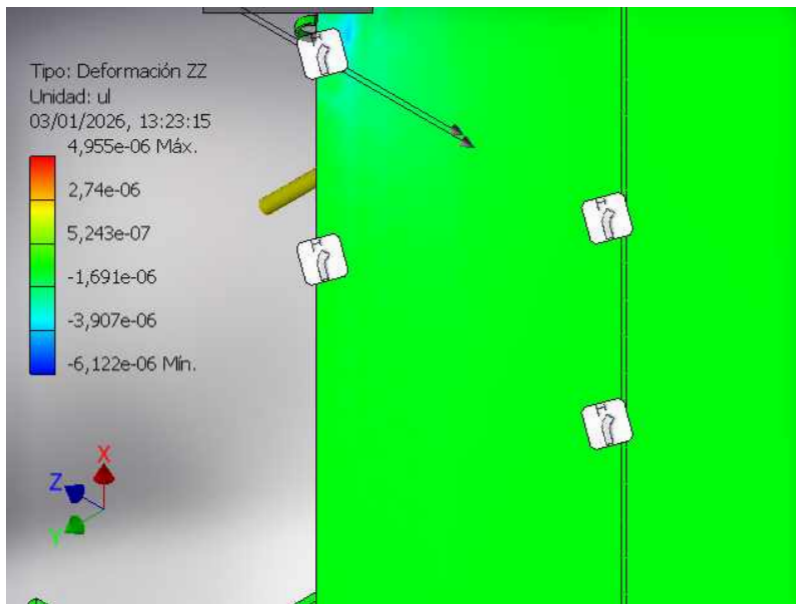
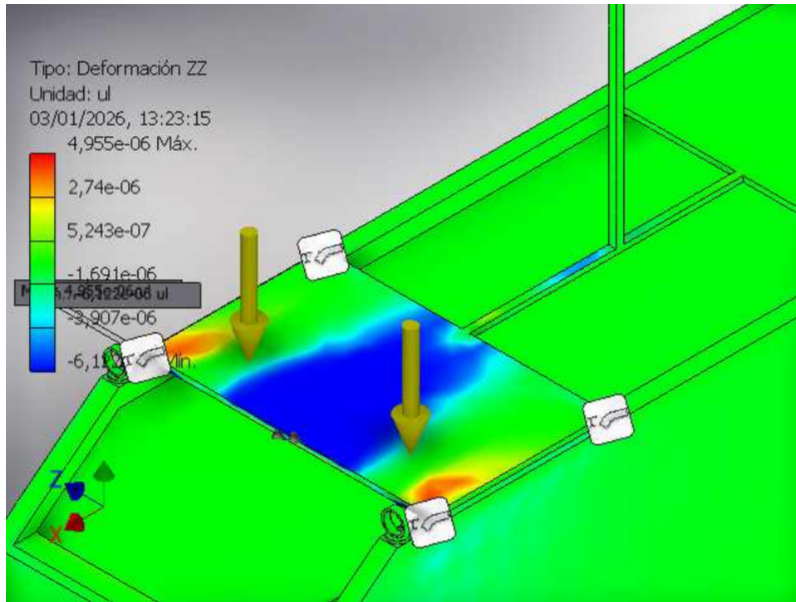




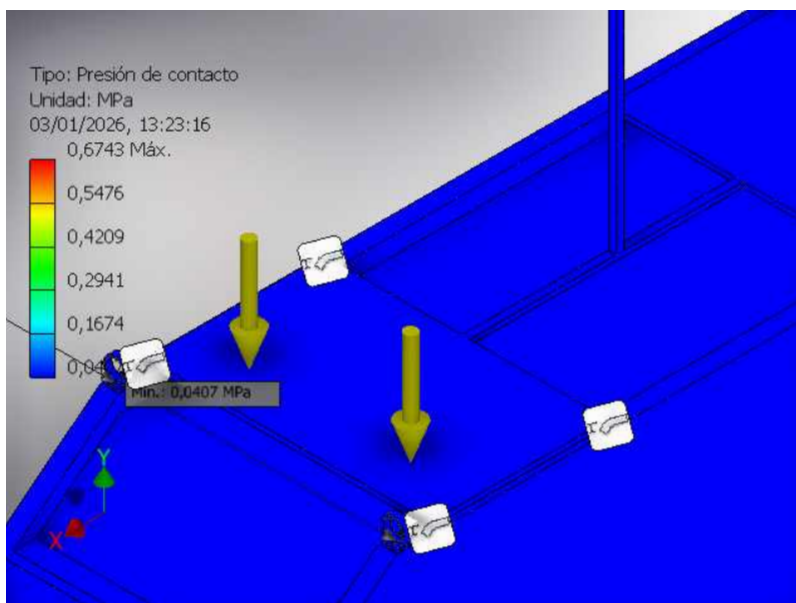
Deformacion YZ

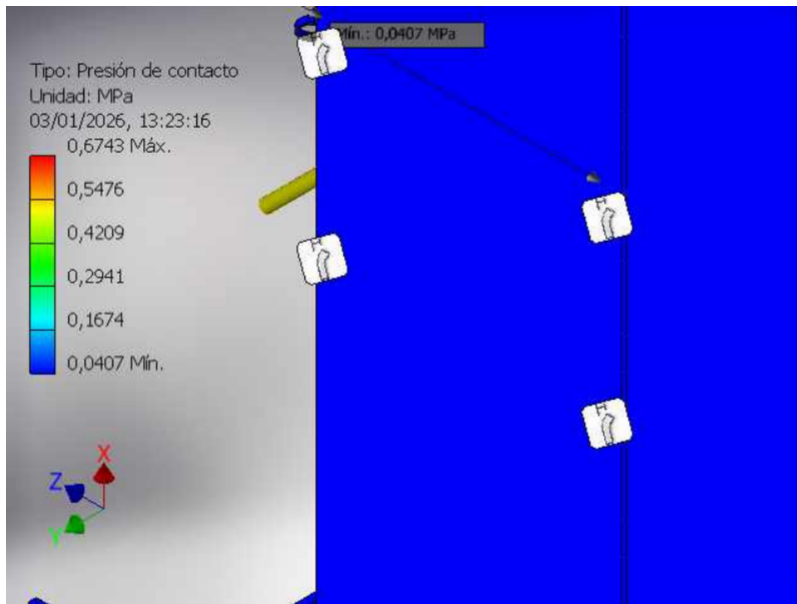


Deformación ZZ

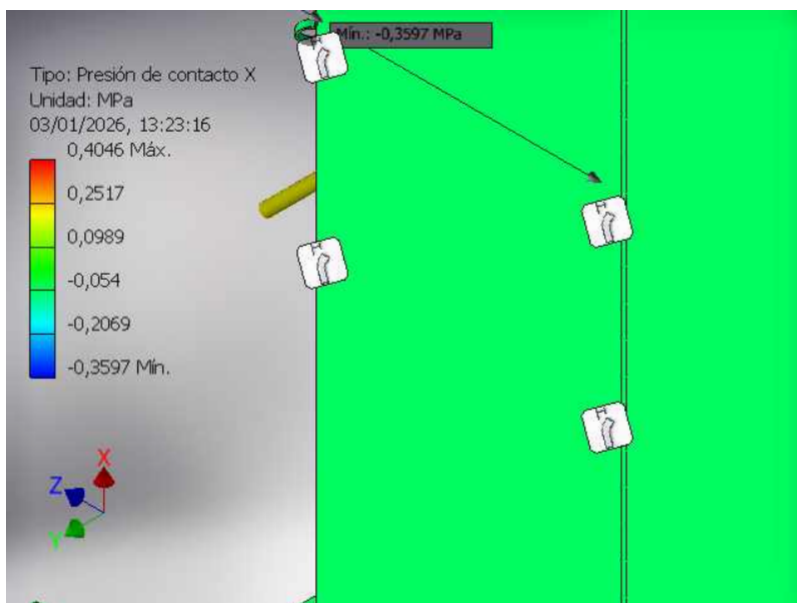
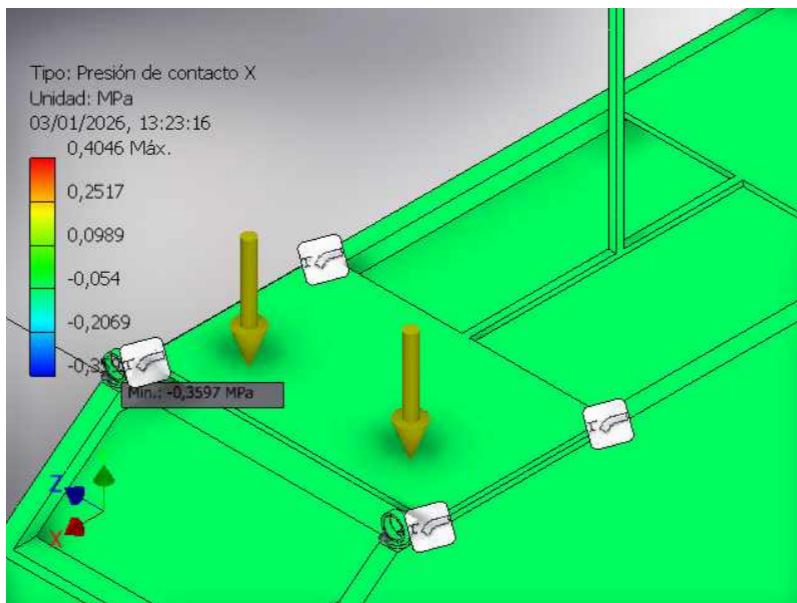


Presión de contacto

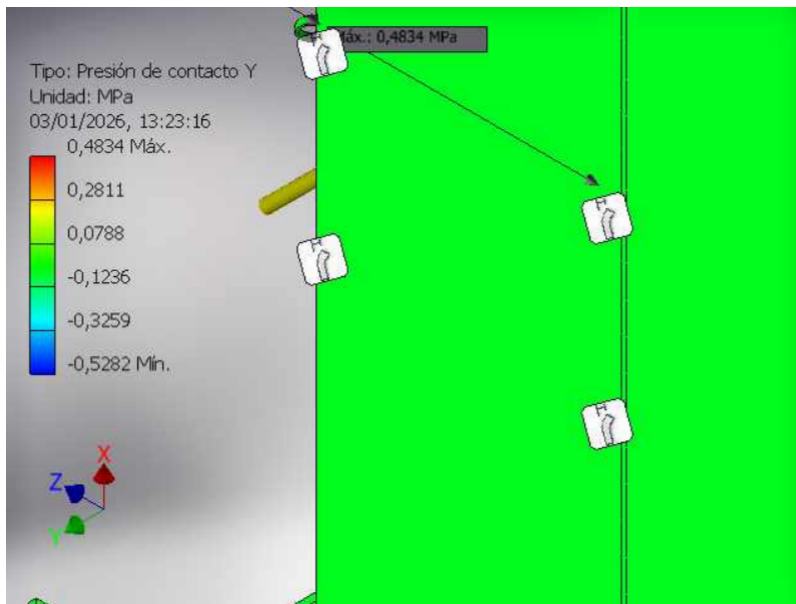
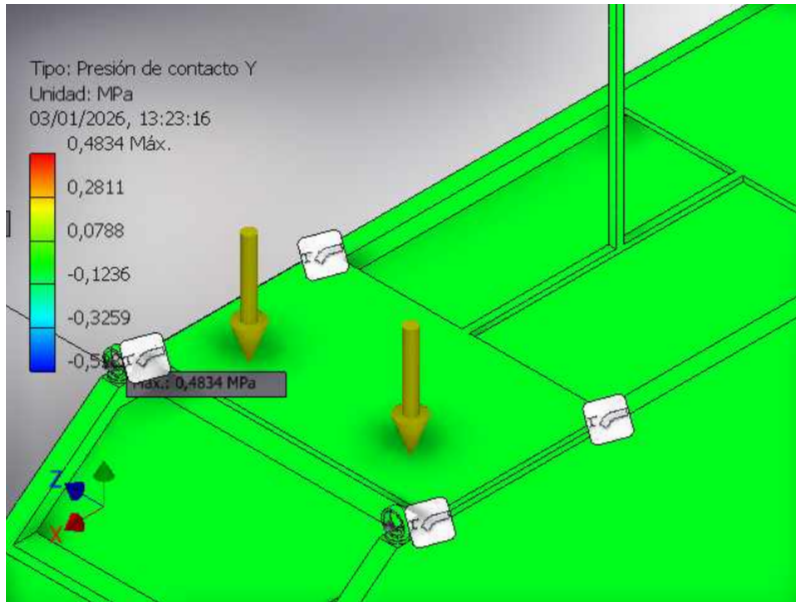




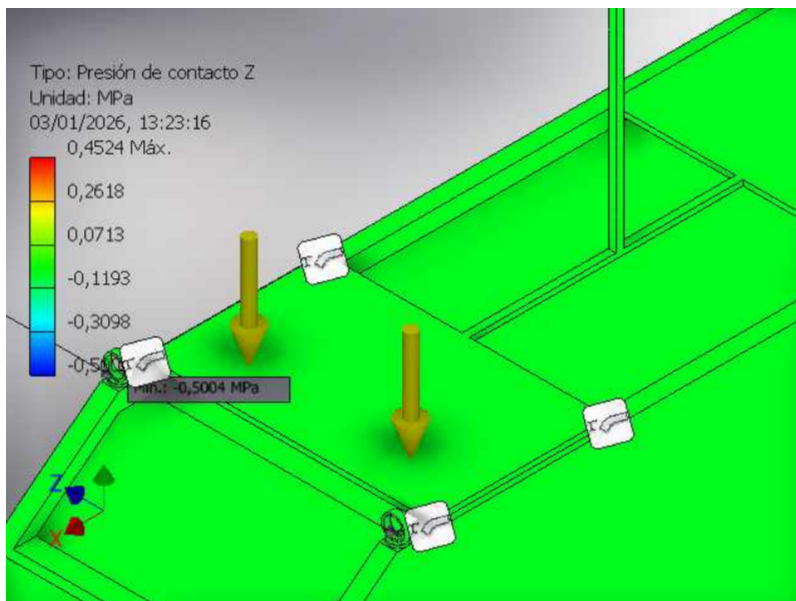
Presión de contacto X

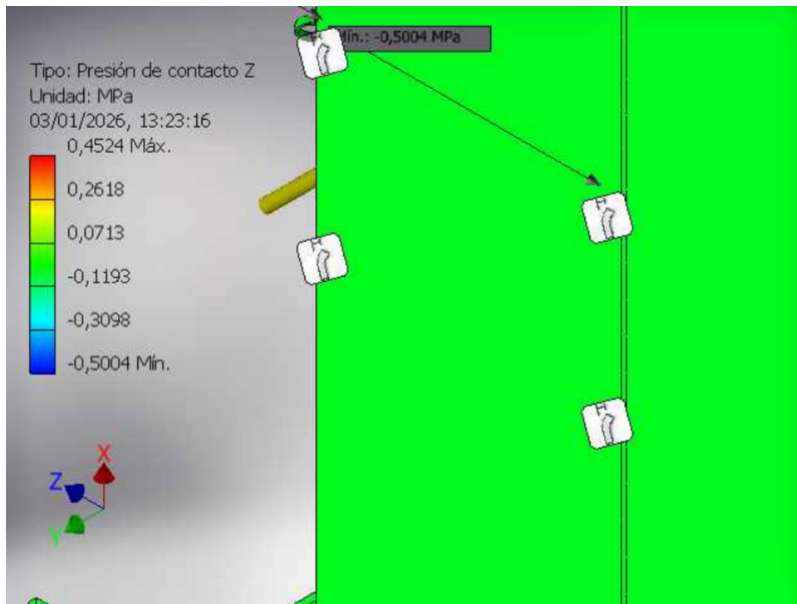


Presión de contacto Y



Presión de contacto Z





C:\Users\Esteban\Documents\Inventor\Proyecto de práctica\estructura banco de pruebas.ipt

Materia Integradora de Ingeniería Mecánica MECG1066, I Término 2025
Registro de Entrevistas con Contactos Externos

Paralelo: 4

Profesor del Paralelo: Emérita Delgado Plaza

Profesor TUTOR / TUTORES: Ph.D. Mario Botiño Arca.

Proyecto: Rediseño de un banco de muclas de bombas centrifugas

Reunión No.	Fecha	Estudiante	Nombre del Contacto	Email / teléfono de Contacto
1	10/11/2025	Esteban Yerovi	Camilo Ramirez	+593 98 353 9107
Descripción del Contacto: <u>Técnicas de laboratorias -LOPV.</u>				
Comentarios: <u>Retrolomontación de guías operativas - entornos para equipos de laboratorias</u>				
Reunión No.	Fecha	Estudiante	Nombre del Contacto	Email / teléfono de Contacto
2	17/11/2025	Esteban Yerovi	Julio Chirra	+593 95 963 3951
Descripción del Contacto: <u>Técnicas mecánicas/eléctricas -LOPV.</u>				
Comentarios: <u>Guía para levantamiento de diagramas eléctricos.</u>				
Reunión No.	Fecha	Estudiante	Nombre del Contacto	Email / teléfono de Contacto
Descripción del Contacto:				
Comentarios:				
Reunión No.	Fecha	Estudiante	Nombre del Contacto	Email / teléfono de Contacto
Descripción del Contacto:				
Comentarios:				
Reunión No.	Fecha	Estudiante	Nombre del Contacto	Email / teléfono de Contacto
Descripción del Contacto:				
Comentarios:				