

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Sistema de agua de circuito cerrado didáctico

Trabajo de graduación presentado por Diego Fernando Rivera Escobar
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2020

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Sistema de agua de circuito cerrado didáctico

Trabajo de graduación presentado por Diego Fernando Rivera Escobar
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

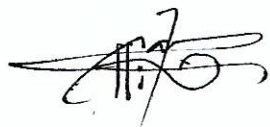
2020

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Gerardo Martínez

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Gerardo Martínez

(f) 
Msc. Carlos Esquit

(f) 
MAEB. Otto Girón

Fecha de aprobación: Guatemala, 17 de Junio de 2020.

Lista de figuras	VIII
Lista de cuadros	IX
Resumen	XII
Abstract	XIV
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Proyecto de instrumentación electrónica	3
2.2. Dispositivos didácticos de automatización industrial	4
2.2.1. Sistemas de aprendizaje de automatización industrial en Guatemala	5
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
6.1. Instrumentación y control de procesos	13
6.1.1. Nivel 1 y 2	13
6.1.2. Protocolo HART	15
6.2. Efecto Coriolis	16
6.2.1. Medición de caudal utilizando el efecto Coriolis	16
6.2.2. Datos técnicos del sensor de flujo másico de efecto Coriolis	17
6.3. Medición ultrasónica	19
6.3.1. Datos técnicos del sensor ultrasónico Tough Sonic	19
6.4. Teoría de selección y cálculo de tuberías	20
6.4.1. Clase de las tuberías	21

6.4.2.	Influencia de las características de las tuberías en los caudales resultantes	21
6.4.3.	Datos técnicos de la bomba centrífuga trifásica de 1/2 Hp	22
6.4.4.	Datos técnicos de la válvula solenoide de acción directa	22
6.4.5.	Datos técnicos del sensor de temperatura PT100	23
6.5.	Datos técnicos del motor agitador	25
7.	Instrumentación	27
7.1.	Determinación del espacio de trabajo y rasgos generales del proyecto	27
7.2.	Selección del equipo	29
7.2.1.	Bomba centrífuga trifásica de 1/2 Hp	30
7.2.2.	Sensor de temperatura PT100	30
7.2.3.	Sensor ultrasónico Tough Sonic	31
8.	Diseño de tuberías y tanque de suministro	33
9.	Diseño de tanque agitador	37
9.1.	Parámetros de diseño	37
9.1.1.	Dimensiones generales	38
9.1.2.	Cálculo de potencia del agitador	39
9.1.3.	Selección del motor	42
10.	Diseño de armazón	45
11.	Potencia	49
11.0.1.	Cálculo de tracks	51
12.	Imágenes de los prototipos realizados	53
13.	Costos	57
14.	Interfaz y conexión con el usuario	59
15.	Aporte didáctico	61
15.0.1.	Tipos de instrumentos y características de desempeño	61
15.0.2.	Elementos de conversión de variables y sensores	62
15.0.3.	Medición de temperatura, nivel, presión y flujo	62
15.0.4.	Redes y sistemas digitales modernos	62
16.	Conclusiones	63
17.	Recomendaciones	65
18.	Bibliografía	67
19.	Anexos	69
19.1.	Anexos	69
19.2.	Planos	69

Lista de figuras

1.	Captura de pantalla del proyecto de instrumentación electrónica 2º semestre 2018 Universidad del Valle de Guatemala	3
2.	Imagen demostrativa del equipo didáctico proporcionado por FESTO [1]	4
3.	Dispositivos didácticos.	5
4.	Capacitación de automatización industrial en INTEK [3]	6
5.	Niveles jerárquicos de la automatización industrial [6]	14
6.	Descripción de la transmisión de datos en el protocolo HART [7]	16
7.	Medición del caudal utilizando el sensor de flujo másico de efecto coriolis [9]	17
8.	Sensor de flujo másico de efecto Coriolis Micro Motion R025S113NCAMEZYZZ [9]	18
9.	Conexión de RTD a 2 cables.[15]	24
10.	Conexión de RTD a 3 cables. [15]	24
11.	Conexión de RTD a 4 cables.[15]	24
12.	Diagrama P&D, obtenido del <i>Manual de Ensamblaje del Sistema Didáctico de Recirculación de Agua</i> . Para la descripción de la nomenclatura utilizada en el diagrama consultar la sección de anexos página 69, Tabla 9	28
13.	Bomba aqua pro QB-60 1/2 Hp [14]	30
14.	Sistema de control de presión.	36

15.	Dimensiones iniciales del tanque agitador	38
16.	Proporciones típicas de tanque agitador	38
17.	Patrón de flujo con agitador no centrado	39
18.	Número de potencia N_p en función del número de Reynolds Re para turbinas e impulsores de alta eficiencia.	41
19.	Valores de las constantes K_L y K_T para tanques	43
20.	Especificaciones generales del motor seleccionado para el tanque agitador. Datasheet completo en el área de anexos	43
21.	Diseño final del tanque agitador, formato de explosión	44
22.	Viga doblemente empotrada con carga puntual en $L/2$	46
23.	Simulación que demuestra los puntos más propensos a desface de vigas debido a las cargas del sistema.	47
24.	Simulación que demuestra los puntos más propensos a corte de vigas debido a las cargas del sistema.	48
25.	Diagrama de la placa diseñada para funcionar como interfaz usuario y prototipo.	50
27.	Diagramas de conexión de sensores, fuente de voltaje de 24V y fuente de voltaje 110Vac.	50
26.	Diagrama de accionamiento, salidas digitales a 24V.	51
28.	Descripción de señales y leyenda de placa.	51
29.	Diseño 3D del prototipo 1	54
30.	Diseño 3D del prototipo 1	55
31.	Diseño 3D del prototipo 1	56
32.	Diseño del módulo analógico utilizado	60

Lista de cuadros

1.	Rendimiento sensor de coriolis	18
2.	Señales de sensores y actuadores	29
3.	Tabla de iteraciones de velocidades en tubería	35
4.	Dimensiones iniciales del tanque agitador	37
5.	Peso de los elementos utilizados en kg.	45
6.	Potencia requerida por componente	49
7.	Precio de los elementos utilizados.	58
8.	Inventario de sensores y actuadores, laboratorio J305	69
9.	Descripción de la nomenclatura utilizada en el diagrama P&D	69

De la necesidad de crear un mecanismo que ayude a los estudiantes a familiarizarse con dispositivos de calidad industrial, nace la realización y diseño de este proyecto. Siendo un dispositivo didáctico de recirculación de agua, este diseño se realizó pensando en los beneficios de conocer a profundidad el funcionamiento de diferentes sensores y actuadores industriales y además, disminuyendo el tiempo necesario para la construcción de múltiples armazones para ser implementados.

Se partió de los elementos disponibles en la UVG de índole industrial para empezar con el proyecto. Uno de los dispositivos de mayor importancia es el *Sensor de flujo másico de efecto Coriolis* que, además de ser utilizado para definir el espacio de trabajo, fue determinante para el cálculo de tuberías, caudales y presiones en la parte hidráulica del proyecto.

Con tres salidas digitales, una salida y tres entradas analógicas, el diseño del sistema de recirculación ofrece una exploración a fondo de parte de los estudiantes utilizando el dispositivo con respecto a los elementos industriales colocados.

Después de dos iteraciones en cálculos de presión y velocidad del agua en el artefacto, se decidió utilizar una tubería de 1" de presión máxima de 160psi. Se encontró que el caudal máximo que se puede medir en el sensor de flujo másico de efecto coriolis es de 35L/s. La presión máxima suministrada por la bomba es de 120psi. Se colocó un sistema de alivio de presión manual justo después del sensor de caudal por seguridad.

Se calcularon los volúmenes de dos tanques para el dispositivo. El *tanque 1* cuenta como tanque de suministro principal y es el que recibe la recirculación de agua del sistema de alivio de presión y del *tanque 2*, este tiene una capacidad de 42.4L. El *tanque 2* tiene una capacidad de 35.3L, en este tanque, un sensor de posición y temperatura se encargan de percibir la cantidad de agua y temperatura de la misma. Además un mezclador industrial y un calentador de agua realizan dichos cambios en las propiedades del agua suministrada al tanque.

La estructura diseñada para el dispositivo es constituida por una viga tipo L de 1". El sensor de flujo másico de efecto coriolis cuenta con una precisión en la lectura de $\pm 0.5\%$ del flujo másico y del flujo volumétrico. El sensor de posición ultrasónico cuenta con una

resolución digital de $0.086mm$ y una repetibilidad de $\pm 0.2\%$ del rango a temperatura constante. El sensor de temperatura PT100 puede medir temperaturas de $-50C$ a $400C$ con una precisión en la lectura de $\pm 0.2\%$ a una resistencia de 100Ω a $0C$.

From the necessity of creating a mechanism that helps students to familiarize with industrial quality equipment, the design of this project is born. Being a didactic water re-circulation device, this design was performed thinking in the benefits to know in depth the performance of different sensors and actuators, and to minimize the assembling time needed to create multiple mechanisms for these to be implemented.

The design started from the available elements located in the UVG of industrial quality. One of the most crucial elements is the *Coriolis Sensor* that, besides the area of implementation, was determinant on the selection of piping, nominal water flow, and pressures in the hydraulics part of the project.

With three digital outputs, one analog output, and three analog inputs, the design of the water re-circulation device offers an in depth exploration of the devices implemented for the users.

After two iterations on calculations of pressure and water velocity in the device, a 1" pipe with maximum pressure of 160psi was determined for the project. A manual pressure relief system was placed in the main piping system as a precaution to ensure safety. This is placed right after the *coriolis fluid mass sensor*.

Two tank volumes were calculated for the device. The *tank 1* is used as a main supply tank and is the one who receives the water from the re-circulated water from the pressure relief system and from the *tank 2*, this has a total capacity of 42.2L. The *tank 2* has a capacity of 35.3L, in this tank a position sensor and a temperature sensor are in charge of perceiving the quantity and temperature of the water placed in the tank. Besides that, an industrial water mixer and a water heater perform their activity changing the properties of the water contained.

The designed structure for the device is constituted of an 1" L frame. The Coriolis Effect Mass Flow Sensor has a precision of $\pm 0.5\%$ on the reading of mass flow and volume flow. The position ultrasonic sensor has a digital resolution of 0.0086mm and a repeatability of $\pm 0.2\%$ of the range measured at a constant temperature. The temperature sensor PT100 can measure in a range from $-50C$ to $400C$ with a precision in reading of $\pm 0.2\%$ and a

resistance of 100Ω at $0C$.

Un sistema de agua de circuito cerrado está diseñado para suministrar agua caliente o fría a un proceso específico, ya sea para intercambio de calor o movimiento de efectores hidráulicos y, después, devolver el agua al punto de origen para repetir el proceso. En pocas palabras, son grandes ciclos de agua. Estos sistemas se utilizan normalmente en aplicaciones de calefacción, ventilación, aire acondicionado e hidráulica. Sin embargo, este proyecto está enfocado en el aprendizaje y uso correcto del sistema del lado estudiantil del curso de instrumentación electrónica.

La idea inicial del proyecto nace de uno de los proyectos realizados en el curso de *Instrumentación Industrial*. Este consistía en un sistema de recirculación de agua con un set específico de entradas y salidas analógicas, así como entradas y salidas digitales, señales que debían ser recibidas por el PLC y analizadas para el correcto funcionamiento del sistema. Para dicho proyecto, los estudiantes debieron comprar y realizar de forma burda una estructura que cumpliera con los requerimientos planteados por el profesor. Por lo tanto, se pretende diseñar un prototipo con actuadores y sensores industriales que beneficien el aprendizaje de los estudiantes en el manejo de dichos elementos, familiarizándolos y ahorrando tiempo gastado en una implementación rústica de actuadores que no se encuentran en el campo.

El proyecto planteado se divide en tres partes, los recipientes y tuberías que distribuyen el agua; los actuadores que realizan alguna acción en calentar, enfriar o dejar pasar el agua de un lado a otro (entre otras cosas); y los sensores que determinan el estado, no solo del líquido contenido, si no del sistema en sí. Es importante que todos estos módulos por los que se separó el proyecto den un aporte didáctico a los estudiantes a utilizar el equipo, por lo que se plantea especificar su uso y familiarizar equipo de calibre industrial a personas que están teniendo una primera impresión del tema.

Finalmente, el diseño de un sistema de recirculación de agua didáctico no solo pretende realizar un modelo 3D de la implementación proyectada, tiene como objetivo la creación de manuales de ensamblaje, de operación y eléctrico donde se describan los procesos planteados y ayuden a un estudiante del curso de instrumentación electrónica a familiarizarse con productos encontrados en la industria actualmente.

2.1. Proyecto de instrumentación electrónica

El curso de instrumentación industrial cuenta con un proyecto de dos partes, en el cual se utilizan múltiples sensores y actuadores para controlar el flujo de agua entre dos tanques. Entre bombas, sensores de posición digitales e indicadores led, el proyecto hace que los estudiantes creen modos de operación para el funcionamiento del sistema. Estos modos son creados con lenguaje LADDER en un panel de control donde se localiza un PLC con módulos de entradas y salidas analógicas para controlar el dispositivo.

En el pènsum actual, este proyecto debe ser construido completamente por los estudiantes.

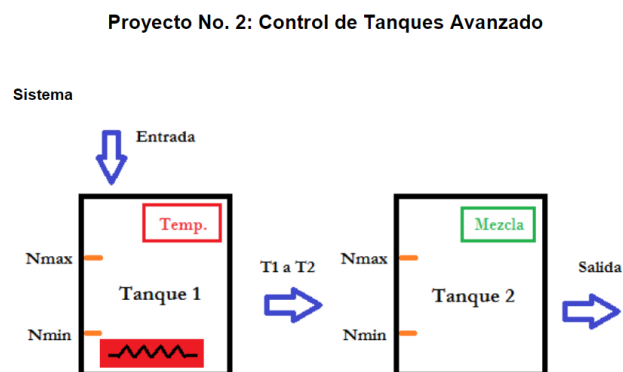


Figura 1: Captura de pantalla del proyecto de instrumentación electrónica 2º semestre 2018
Universidad del Valle de Guatemala



Figura 2: Imagen demostrativa del equipo didáctico proporcionado por FESTO [1]

2.2. Dispositivos didácticos de automatización industrial

En el mundo existen múltiples compañías que se dedican a distribuir equipo de aprendizaje relacionados al tema de la automatización industrial. Dichas compañías cuentan con múltiples equipos diferentes dedicados a temas específicos de la automatización, desde sistemas hidráulicos y neumáticos hasta sistemas que realizan ciertas operaciones químicas en diferentes sustancias.

FESTO es una empresa que se dedica no solo a manufacturar y distribuir dichos elementos didácticos de formación, si no que ofrecen una gama de capacitaciones especializadas a las empresas que lo requieran. Cuentan con opciones de diplomados con validez a nivel mundial y seminarios acerca de programación de PLC, mecatrónica, hidráulica, etc. Con una sede en México, FESTO ha logrado mantenerse dentro de los proveedores de dispositivos y maquinaria didácticos más grandes de América Latina.

Otra empresa que se caracteriza por tener muy buenos dispositivos para enseñanza de sistemas industriales es SMC. A diferencia de FESTO, SMC se dedica única y exclusivamente al material de entrenamiento para la industria. Como ejemplo de los dispositivos que ambas empresas proveen, podemos encontrar el Hidro Trainer de SMC (Figura 3a) y la mesa de trabajo Swing de FESTO (Figura 3b).



(a) Equipo didáctico de tecnología hidráulica Hidro Trainer de la compañía SMC [1] (b) Mesa de trabajo Swing para dos personas de la compañía FESTO [1]

Figura 3: Dispositivos didácticos.

Comúnmente, los instrumentos que ofrecen dichas empresas ofrecen un panel de trabajo con componentes como actuadores y sensores además de un manual de usuario y un disco con la información técnica de las máquinas. Es determinante el enfoque de la tecnología específica, por ejemplo, si se habla del Hidro Trainer - 200 proporcionado por SMC training, se especifica la tecnología, que en este caso es hidráulica, y las habilidades que se desarrollan utilizando el producto. Análisis, resolución de problemas, diseño, documentación, instalación y ensamblaje y operación.

Además de productos especiales, tanto FESTO como SMC training ofrecen equipos modulares de celdas flexibles de automatización que habilitan la intercomunicación entre diferentes disciplinas para que se puedan adaptar a los diferentes requerimientos de centros de aprendizaje y compañías. Desde la configuración simple de una de las estaciones (trabajando completamente independiente) hasta una compleja configuración de ocho o diez estaciones, las posibilidades interminables.

Para obtener más información sobre estas empresas y su trabajo es posible encontrarla en las referencias [1] y [2]

2.2.1. Sistemas de aprendizaje de automatización industrial en Guatemala

En Guatemala existen empresas dedicadas a la asesoría ingenieril y la capacitación tanto preventiva como correctiva para la industria. Dichas empresas, con la ayuda de sistemas didácticos, muestran a sus clientes la correcta implementación de aparatos industriales, así como la calibración, mantenimiento y funcionamiento de los mismos. Unas de las empresas más importantes en Guatemala actualmente son INTEK [3], Autsa [4] e Intecap [5].



Figura 4: Capacitación de automatización industrial en INTEK [3]

El proyecto que se está realizando trata de imitar las capacidades educacionales de los dispositivos de estas empresas enfocándose en los objetivos de aprendizaje del curso de instrumentación electrónica en la universidad.

Justificación

El mundo laboral se está haciendo cada vez más competitivo, las empresas grandes tratan de buscar gente con experiencia y un conocimiento fehaciente de los dispositivos utilizados en la industria. La mecatrónica y la electrónica se hace cada vez más presente en una Guatemala que poco a poco se hace más industrializada. Este proyecto pretende ayudar a estudiantes que están teniendo por primera vez un acercamiento con dispositivos industriales, facilita la familiarización y exhorta a la implementación y aprendizaje de los mismos.

El curso actual de instrumentación electrónica, que sería donde se implementaría este sistema, trata de ejemplificar el uso de aparatos industriales constantemente pero resulta una pérdida de tiempo y recursos humanos el tener que construir y cablear los instrumentos a utilizar en las prácticas para poder enseñar a los alumnos cada semana. Este sistema de agua de circuito cerrado didáctico pretende acercar a los alumnos sin necesidad de utilizar tiempo en construir y ensamblar los aparatos industriales. Por otro lado, ayuda a que los alumnos se enfoquen en las características intrínsecas de los instrumentos y exhorta a aprender sobre su uso correcto.

4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de reciclado de agua con instrumentos industriales para la ayuda en el aprendizaje a estudiantes del curso Instrumentación Industrial.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar el equipo necesario para la implementación de tanques recirculadores de agua.
- Diseñar e implementar el sistema utilizando equipo de índole industrial.
- Generar un modelo 3D del sistema a implementar
- Generar un manual de seguimiento de pasos para la implementación y correcta aplicación del proyecto.
- Definir el impacto didáctico que el diseño tendrá en el programa del curso de instrumentación electrónica.

Este proyecto busca enriquecer el conocimiento de los estudiantes del curso de Instrumentación Electrónica de la Universidad del Valle de Guatemala acerca de los diferentes dispositivos industriales que se pueden encontrar en el área de la hidráulica en el campo de trabajo.

Se diseñó un sistema de recirculación de agua que utiliza una bomba centrífuga que bombea agua hacia un sensor de coriolis y después, gracias a la actuación de dos válvulas solenóide, se transportan a un tanque donde se mide la cantidad de agua y la temperatura, se calienta y se mezcla. El sistema cuenta con una capacidad de volumen máxima de $75L$ y un caudal máximo suministrado por la bomba centrífuga de $35L/min$. Teniendo tres entradas analógicas, una salida analógica y tres salidas digitales, el proyecto busca acercar al usuario a dispositivos industriales tales como válvulas solenóide, calentadores de agua, bombas centrífugas y medidores de flujo másico utilizando el efecto coriolis.

Se buscaron elementos que se utilizaran en la industria y por lo tanto, que tuvieran un rango de sensibilidad y repetibilidad comúnmente visualizado en el campo. El sensor de flujo másico de efecto coriolis cuenta con una precisión en la lectura de $\pm 0.5\%$ del flujo másico y del flujo volumétrico. El sensor de posición ultrasónico cuenta con una resolución digital de $0.086mm$ y una repetibilidad de $\pm 0.2\%$ del rango a temperatura constante. El sensor de temperatura PT100 puede medir temperaturas de $-50C$ a $400C$ con una precisión en la lectura de $\pm 0.2\%$ a una resistencia de 100Ω $0C$.

Se realizaron dos manuales, un manual de usuario y un manual de ensamblaje. El manual de ensamblaje detalla la interconexión del proyecto así como la conexión recomendada hacia el PLC para el correcto funcionamiento del mismo, además se muestran los planos y direcciones para armar el prototipo. El manual de usuario explica el correcto funcionamiento de los sensores y actuadores, también detalla buenas prácticas al utilizarlos y precauciones a tomar antes de empezar a trabajar con el dispositivo.

6.1. Instrumentación y control de procesos

La automatización industrial referente a la manufactura y fabricación de procesos se divide normalmente en cinco niveles jerárquicos definidos por el estándar ISA-95/IEC 62264 (mostrado en la Figura 1). El nivel 0, que se refiere al proceso de producción o campo; el nivel 1, que se refiere a los sensores y actuadores; el nivel 2, referente al monitoreo, supervisión y control; el nivel 3, que se dedica al control de las operaciones y la manufacturación; y el nivel 4, que se refiere a la logística empresarial y la planeación de la manufactura.[6]

6.1.1. Nivel 1 y 2

La forma de comunicación entre los niveles varía considerablemente. Los niveles 1 y 2 son comúnmente conectados con cables de punto a punto con una corriente en lazo de 4-20 mA o por los conocidos fieldbuses (Modbus, Profibus, etc.). Conexiones de Ethernet (como el Profinet) y seriales también son utilizadas comúnmente. Los fieldbuses estandarizan la forma de comunicación con un esclavo, pues se necesitan archivos de configuración llamados GSD. Estos archivos especifican la velocidad de transmisión y el tamaño de los buffers de data necesarios. Además, estos archivos también pueden dar un indicio acerca de la interpretación de los datos. [6]

El monitoreo de procesos y equipo de automatización es una precondition necesaria para mantener la producción de procesos viva y en condiciones lo más cercano a las óptimas para lograr las metas a pequeña, mediana y gran escala. Se tiene que garantizar los datos proveídos a:

- La aplicación correcta
- En la calidad correcta

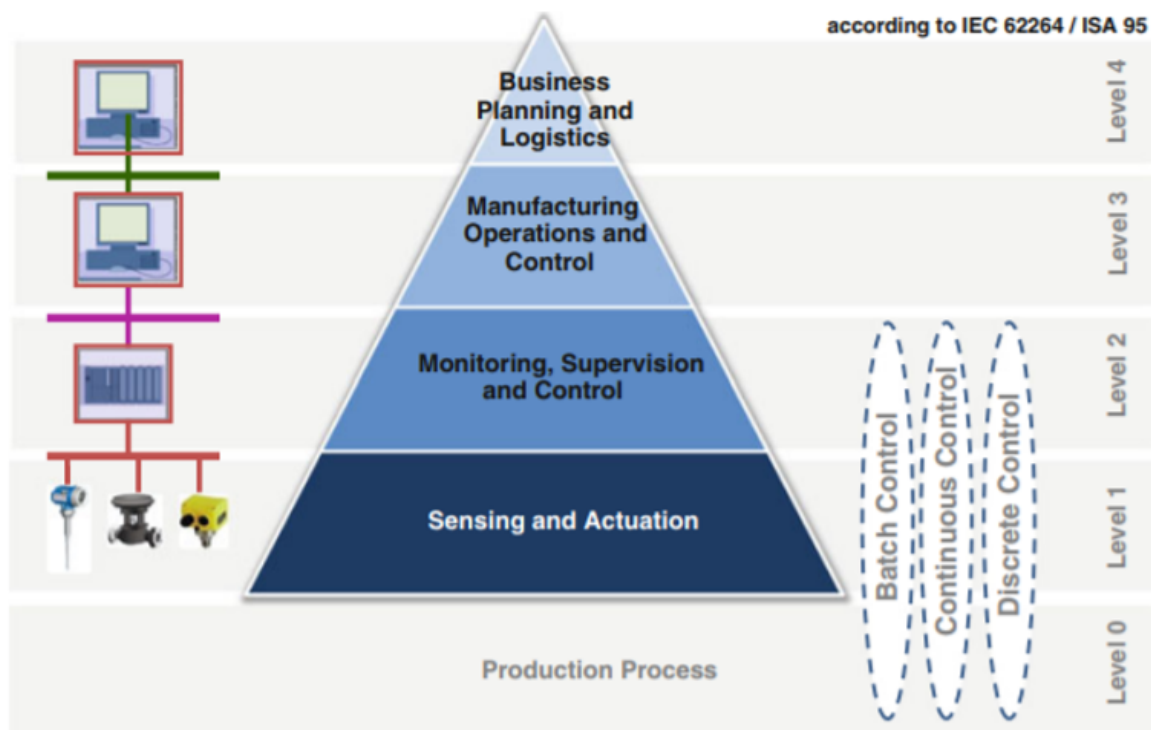


Figura 5: Niveles jerárquicos de la automatización industrial [6]

- En el tiempo correcto

Diferentes aplicaciones agregan requerimientos específicos acerca de la obtención de los datos. Específicamente para el control en un lazo cerrado, los datos deben ser obtenidos de una manera cíclica. Estos tiempos deben darse en un rango agradable para las restricciones de tiempo del proceso controlado. Para este mismo propósito, en los Sistemas de Control Distribuido (DCS por sus siglas en inglés), los datos pueden ser obtenidos directamente desde las tarjetas de entradas y salidas del DCS mientras se acceden a los dispositivos en el campo con señales soportadas y estandarizadas (por ejemplo, una señal de 4-20 mA analógica), u obtenidos directamente de los componentes de entrada y salida remotos por comunicación digital, siempre y cuando se sigan las limitaciones apropiadas de tiempo.[6]

El acceso a los valores de procesos utilizando dispositivos a través de comunicación con un bus de campo, es realizada mayormente en una forma tipo “polling”. La transmisión de datos a través de protocolos digitales permite la asociación de la información del estado (relacionado al proceso o a los dispositivos) del valor del proceso. Por ejemplo, con Profibus, PA, los valores analógicos de comunicación son típicamente transmitidos como un valor de punto flotante, asociado con un estado de 8 bits en una única estructura de datos cada vez que se transmite.[6]

Considerando este último ejemplo de Profibus PA, el estado del Byte contiene información general acerca del estatus del dispositivo, límites cruzados por los valores medidos por el proceso, la vialidad del valor del proceso medido, así como la información para indicar demanda de mantenimiento. En casos que se indique una falla, información adicional puede ser obtenida del dispositivo en campo por ciclos individuales de requerimientos al mismo.

Esta construcción de datos permite la implementación de diferentes tipos de aplicaciones:

- El valor del proceso, vialidad y límites para el control de la aplicación.
- Información útil para la supervisión de aplicaciones.
- Información del estatus de un dispositivo necesitado para aplicaciones de mantenimiento.
- Las aplicaciones de manejo de producto pueden operar en datos más condensados, representativos de los resultados de producción.

Considerando este último ejemplo de Profibus PA, el estado del Byte contiene información general acerca del estatus del dispositivo, límites cruzados por los valores medidos por el proceso, la vialidad del valor del proceso medido, así como la información para indicar demanda de mantenimiento. En casos que se indique una falla, información adicional puede ser obtenida del dispositivo en campo por ciclos individuales de requerimientos al mismo. Esta construcción de datos permite la implementación de diferentes tipos de aplicaciones:

- El valor del proceso, vialidad y límites para el control de la aplicación.
- Información útil para la supervisión de aplicaciones.
- Información del estatus de un dispositivo necesitado para aplicaciones de mantenimiento.
- Las aplicaciones de manejo de producto pueden operar en datos más condensados, representativos de los resultados de producción.

6.1.2. Protocolo HART

En la actualidad existen diferentes marcas y medios de comunicación de los instrumentos de campo con los sistemas de control, con el fin de garantizar fiabilidad en los . Dentro de los protocolos de comunicación para dichos instrumentos se mantiene bien posicionado el tan conocido Hart, el cual se basa en el principio de modulación de frecuencia (MDF). Con esto logra superponer una señal digital en los dos hilos que alimentan el instrumento con 24V DC, y sobre los cuáles se desplaza una señal que varía de 4 a 20 mA.

La señal digital de este protocolo transmite los datos del dispositivo de campo hacia el sistema de control y viceversa. Con el fin de no afectar los valores de la señal de corriente, la transmisión se realiza bajo la normativa Bell 202, que consiste en asignar una frecuencia específica para el valor cero (0) y para el valor uno (1). Para el caso del valor cero, su frecuencia asignada es 2200 Hz, mientras que para el valor uno, su frecuencia es 1200 Hz.[7]

Dentro de las ventajas que posee se encuentra el ahorro en su capa física, debido a que usa el mismo cableado de la señal de alimentación del instrumento. Asimismo, permite conectar dos maestros a las vez sin afectar el envío de los datos. Para el personal de instrumentación que realiza mantenimiento en esta rama es relevante estos puntos, dada la oportunidad de poder conectar comunicadores de campo y realizar configuraciones de los instrumentos en el sitio de manera más fácil, práctica, amigable. [7]

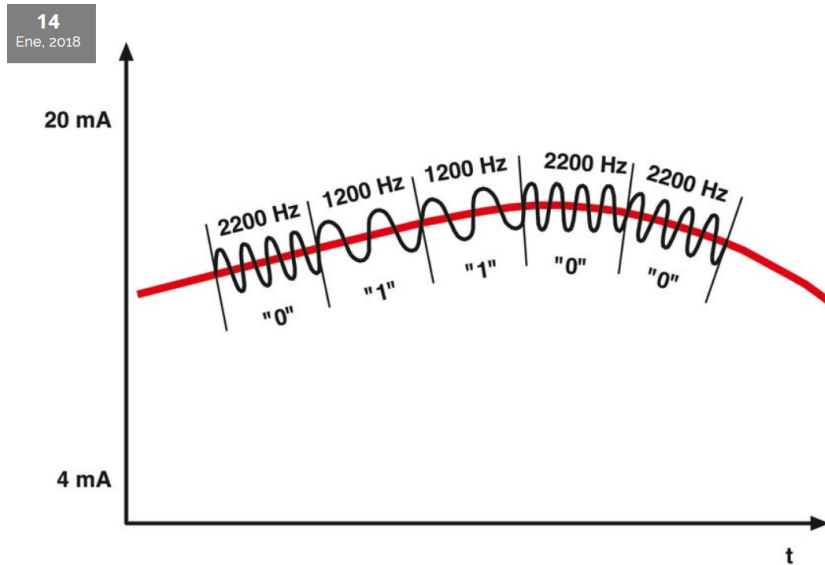


Figura 6: Descripción de la transmisión de datos en el protocolo HART [7]

6.2. Efecto Coriolis

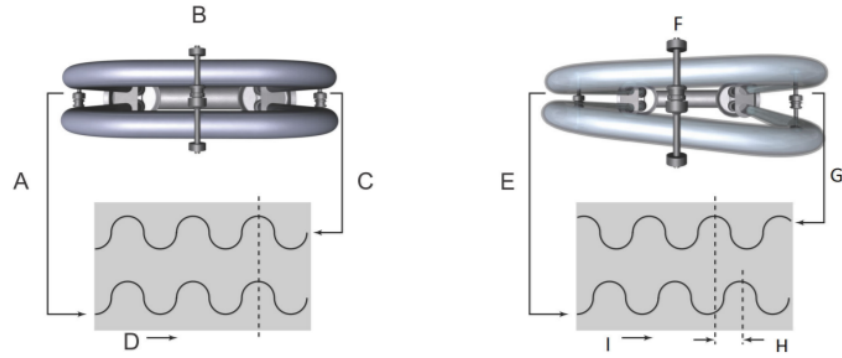
Una masa m que es estacionaria en un sistema de rotación Ω a una distancia \mathbf{R} del centro de rotación, parece, a un observador que sea parte del sistema de rotación, que está afectada por una fuerza de fricción $\mathbf{C} = m(\Omega \times (\Omega \times \mathbf{R}))$, llamada también fuerza centrífuga. Si la partícula no es estacionaria, pero se mueve (V_r) relativa al sistema de rotación, parece que está afectada por una fuerza de fricción adicional $\mathbf{F} = m\Omega \times V_r$, llamada la fuerza de Coriolis. [8]

El producto cruz (\times) indica que \mathbf{F} es perpendicular no solo al eje rotacional sino también al movimiento relativo. Un elemento en movimiento es entonces trasladado por un paso circular, “círculo de inercia”. En contraste a la “inercia normal”, que resiste los cambios en un cuerpo en movimiento, la fuerza del efecto Coriolis resiste desplazamientos al tratar de regresar el movimiento al origen. [8]

6.2.1. Medición de caudal utilizando el efecto Coriolis

Como aplicación práctica del efecto Coriolis, el principio operativo del medidor de Coriolis para caudal másico implica inducir a vibración el tubo de caudal por donde pasa el líquido. La vibración, aunque no es completamente circular, brinda un marco de referencia rotativo que permite que ocurra el efecto Coriolis. Mientras que los métodos específicos varían de acuerdo con el diseño del medidor de caudal, los sensores supervisan y analizan los cambios de frecuencia, desplazamiento de fase y amplitud de los tubos de caudal vibrantes. Los cambios observados representan el caudal másico y la densidad del fluido.[9]

Los tubos de medición son forzados a oscilar, produciendo así una onda senoidal. En caudal cero, los dos tubos vibran en fase entre sí.[9] Cuando se introduce el caudal, las fuerzas Coriolis hacen que los tubos se tuerzan, produciendo un desplazamiento de fase.



- A. Desplazamiento del pickoff de entrada
- B. Sin caudal
- C. Desplazamiento del pickoff de salida
- D. Tiempo
- E. Desplazamiento del pickoff de entrada
- F. Con caudal
- G. Desplazamiento del pickoff de salida
- H. Diferencia de tiempo
- I. Tiempo

Figura 7: Medición del caudal utilizando el sensor de flujo másico de efecto coriolis [9]

Se mide la diferencia de tiempo entre las ondas y es directamente proporcional al caudal másico.

6.2.2. Datos técnicos del sensor de flujo másico de efecto Coriolis

- Nombre completo, *Sensor de Coriolis Micro Motion R025S113NCAMEZYZZ*.
- Peso del sensor de 10lb (4.5kg), hecho de acero inoxidable.
- Brida de cuello de soldadura ASME B16.5 (hasta la clase CL600).
- Flujo permisible para el correcto funcionamiento de 6gal/min a 12gal/min. (22.71L/min a 45L/min)
- Transmisor de modelo 2700 de Micro Motion con entradas/salidas configurables.
- Interface de transmisión tipo 4-20mA, HART y MODBUS.

Especificaciones de rendimiento

Precisión en la lectura del flujo másico	$\pm 0.5\%$
Repetibilidad en la lectura del flujo másico	$\pm 0.25\%$
Precisión en la lectura del flujo volumétrico	$\pm 0.5\%$
Repetibilidad en la lectura del flujo volumétrico	$\pm 0.25\%$

Cuadro 1: Especificaciones de la precisión y repetibilidad del sensor de coriolis según la hoja de datos del mismo. Para mayor información, referirse al manual del fabricante, cita: [9]



Figura 8: Sensor de flujo másico de efecto Coriolis Micro Motion R025S113NCAMEZYZZ [9]

6.3. Medición ultrasónica

Muchos instrumentos de medición de distancia utilizan un método de sensado llamado Sensado Ultrasónico para realizar mediciones de distancia. El instrumento normalmente cuenta con un emisor de ondas de sonido a frecuencias muy altas (tanto que el oído humano no es capaz de escuchar) y un transductor, que recibe las ondas y calcula la distancia medida. En algunos casos, el transductor puede hacer ambas tareas.[10]

Al recibir las ondas de sonido después de ser emitidas y que hayan rebotado en el objeto que se quiere medir, el sensor determina la distancia midiendo los lapsos de tiempo entre la onda emitida y la onda recibida [10]. Ya que el método de sensado es utilizando ondas de sonido, estos tipos de sensores no dependen de características específicas en el color del objeto, a diferencia de otros métodos de medición de distancia basados en luz [10]. De lo contrario, si el objeto está hecho de un material que absorba el sonido o tenga una forma en la cual refleje las ondas de sonido fuera del campo de operación del instrumento de medición, la lectura de distancia puede no ser fidedigna.

Para medir la distancia se utiliza la siguiente fórmula.

$$D = \frac{1}{2}T * C$$

Donde D es la distancia, T es el tiempo y C es la velocidad del sonido. Este último dato puede variar dependiendo de la temperatura del medio donde esté viajando pero a 20°C(68°F), la velocidad del sonido es de 343 $\frac{m}{s}$. [10]

6.3.1. Datos técnicos del sensor ultrasónico Tough Sonic

- Nombre completo, *ToughSonic 3 Ultrasonic Sensor TSPC-30S2-485*.
- Rango óptimo 61 cm (24 pulg.), rango máximo 91 cm (36 pulg.).
- Banda muerta en distancias menores a 4.5 cm (1.75 pulg.).
- Resolución digital: 0.086 mm (0.0034 pulg.); analógica: 4099 steps (0-10 VDC), 3279 steps (4-20 mA).
- Repetibilidad nominal de 0.2% del rango a temperatura constante. Afectada por distancia y ambiente.
- Interface de transmisión tipo lazo de corriente de 4-20mA, voltaje 0-10 VDC.
- Protocolo Modbus, 9600 a 115200 baudios.

Para más información en el sensor ultrasónico Tough Sonic referirse a la hoja de datos del fabricante, cita [11]

6.4. Teoría de selección y cálculo de tuberías

Consideremos un tubo de corriente estrecho, de forma que se pueda considerar uniforme la velocidad en cualquier sección del tubo perpendicular al flujo. En el interior del tubo la velocidad del flujo es paralela a la línea de corriente en cada punto, pudiendo ser estas velocidades distintas en cada punto. [12]

Sea v_1 la velocidad de la partícula en el punto 1 y v_2 la velocidad en la partícula en el punto 2, con A_1 y A_2 las secciones transversales de los tubos, perpendiculares a las líneas de corriente. Si el tubo es estrecho, v_1 y v_2 son uniformes en A_1 y A_2 respectivamente.[12]

En un intervalo de tiempo dt , un elemento del fluido recorrerá una distancia $v dt$, por lo que en el tiempo dt pasará por A_1 la masa del fluido

$$dm_1 = \rho_1 * A_1 * v_1 dt$$

Donde ρ_1 es la densidad del fluido al pasar por la sección 1. El flujo de masa o *caudal másico* se define como la masa que atraviesa una sección en la unidad de tiempo y viene dado por

$$Q_m = \frac{dm_1}{dt} = \rho_1 A_1 v_1$$

donde se considera implícitamente que en este intervalo infinitesimal de tiempo ni A ni v varían apreciablemente en el recorrido del fluido $v dt$. El caudal másico a través de la sección A_1 es $\rho_1 A_1 v_1$ y a través de la sección A_2 es $\rho_2 A_2 v_2$. [12]

Como las partículas del flujo no pueden atravesar las paredes del tubo de flujo debe cumplirse que, si el régimen es permanente (o estacionario) y no hay fuentes ni sumideros de partículas, ambos caudales másicos han de ser iguales

$$Q_m = \rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \Rightarrow Q_m = \rho A v = cte$$

y análogicamente para cualquier otra sección A perpendicular al tubo de flujo, por lo que esta ley de conservación de la masa o *ecuación de continuidad* se puede escribir simplemente como

$$\rho A v = cte$$

a través de cualquier sección del tubo de flujo perpendicular al mismo en régimen estacionario.

Para el caso particular de flujo incompresible ρ no depende del punto y esta ecuación de continuidad puede describirse como

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \Rightarrow Q = A v = cte \tag{1}$$

donde Q es el *Caudal* o volumen que atraviesa la sección en la unidad de tiempo. [12] $Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}$

6.4.1. Clase de las tuberías

Los fabricantes de tuberías de materiales homogéneos adoptan valores de rotura para la presión interna y para la tensión de tracción, lo que posibilita la determinación del espesor, considerando previamente los correspondientes “Coeficientes de Seguridad”. Como a cada espesor le corresponde una solicitación admisible, ofrecen al mercado una serie estandarizada de tuberías aptas para resistir, en condiciones de régimen permanente, una determinada serie de presiones fijadas de antemano, estas presiones definen las denominadas “Clases” de las tuberías. [13]

En general, los fabricantes ofertan series de tuberías discriminadas por diámetro y clases, siendo estas acotadas por un número entero que representa el máximo de las presiones admisibles en atmósferas que puede resistir en condiciones de trabajo en régimen permanente o estático. [13]

Cada fabricante se caracteriza por la serie de diámetros y clases, por ejemplo el PVC, en clases 4; 6 y 10, el Fibrocemento en clases 3; 5; 7,5; 10; 12; 14 y 18, el PRFV en clases 2,5; 3; 6; 10 y 16, etc. “Tuberías estándar”, constituyen las series que publican en sus catálogos los fabricantes discriminadas en diámetro y clases. “Tuberías especiales”, son las que se fabrican para solicitaciones especiales y no están consideradas en los catálogos.

6.4.2. Influencia de las características de las tuberías en los caudales resultantes

El caudal transportado en las tuberías depende fuertemente de:

1. La **rugosidad** de las paredes internas de la tubería a través del coeficiente "f.^{en} escurrimientos a presión o el coeficiente "n.^{en} escurrimientos a superficie libre.
2. la **sección transversal mojada** ocupada por el fluido del escurrimiento, la cual es directamente proporcional al diámetro interno de la tubería.
3. El **desnivel hidráulico** disponible para el escurrimiento (la pérdida de carga disponible para escurrimientos a presión o la pendiente longitudinal de la tubería para escurrimientos a superficie libre).[13]

De todo lo expuesto, se desprende que las características de las tuberías tendrán un papel esencial en el caudal resultante tanto en escurrimientos a presión como a superficie libre. De donde aparecen las condiciones a tener en cuenta al comparar tuberías de diferentes tecnologías:

1. Las tuberías ofrecidas en el mercado presentan diferentes condiciones de rugosidad (aún las tuberías de un mismo material pero fabricadas con diferente tecnología). Por lo tanto, las pérdidas de energía que sufrirá el fluido a lo largo del escurrimiento dentro de cada tubería será distinta, y así también lo será el caudal resultante (el caudal será menor cuanto mayor sea la rugosidad de las paredes). Además, hay que tener en cuenta que algunos materiales que no ofrecen buenas condiciones de rugosidad pueden mejorar

notablemente este aspecto mediante el revestimiento interno de las tuberías (para las que habrá que calcular e incluir el correspondiente sobrecosto).

2. Las tuberías se venden de acuerdo a su diámetro nominal, cuya definición depende de cada fabricante. Para algunos materiales el diámetro nominal es el diámetro interno de la tubería, para otros, generalmente los extrusivos, es el diámetro externo (por lo que el diámetro interno dependerá del espesor de las paredes, el cual a su vez varía con la resistencia ofrecida por la tubería a la presión interna) y para otros materiales el diámetro nominal no coincide ni con el interno ni con el externo. Como el caudal es altamente dependiente del diámetro interno de la tubería, hay que tener especial cuidado con la comparación de tuberías que posean el mismo diámetro nominal (de venta) ya que éstas no ofrecerán las mismas condiciones de escurrimiento (pudiendo llegar a obtenerse diferencias más que apreciables).
3. Otro aspecto a no despreciar es que dadas la rugosidad y diámetro interno ofrecido por cada tecnología, para obtener un caudal determinado será importante, en el caso de escurrimientos a superficie libre, la pendiente de colocación de las tuberías. Así, una tubería que ofrezca buenas condiciones para el escurrimiento necesitará menor pendiente longitudinal para lograr el caudal especificado y, por lo tanto, significará un menor costo en trabajos de excavación y relleno de las zanjas.[13]

6.4.3. Datos técnicos de la bomba centrífuga trifásica de 1/2 Hp

- Nombre completo, *Bomba aqua pro QB-60 1/2 Hp*.
- Bomba centrífuga de 1/2 Hp.
- Q Máx: $35L/min$.
- H Máx: 15m.
- Voltaje de funcionamiento: 110V.
- RPM: 3450.
- Peso: $4.67kg$.

Para más información en la bomba, ver página web del fabricante, cita [14]

6.4.4. Datos técnicos de la válvula solenoide de acción directa

- Nombre completo, *Direct acting SS316 24VDC stainless steel water solenoid valve*.
- Presión máxima 0.1 - 10 bar. ($1.45038 - 145.038psi$)
- Tubería original de 1".
- Voltaje de funcionamiento: 24VDC.

- Material: acero inoxidable.
- Funcionamiento con aire, agua gas y aceites ligeros.
- Potencia: 12W.

Para más información contactar la hoja de datos de la válvula Direct acting SS316 24VDC stainless steel water solenoid valve en los anexos.

6.4.5. Datos técnicos del sensor de temperatura PT100

¿Qué conforma una RTD? Una RTD es un dispositivo que contiene una resistencia eléctrica (referido como un elemento de sensado o bulbo) que cambia el valor de su resistencia dependiente a su temperatura. Este cambio de resistencia con temperatura puede ser medido y utilizado para determinar la temperatura de un proceso o material. [15]

La toma de datos de temperatura RTD puede mostrarse comúnmente en dos estilos básicos, **alambre enrollado** y **film**.

Los elementos de **Alambre enrollado** contienen una cantidad de alambre de muy bajo calibre (normalmente .0005 a .0015 pulgadas de diámetro) que puede estar enrollado en una bobina y empacado dentro de un mandril cerámico, o enrollado alrededor de un empaque de cerámico y empaquetado con un material insulante. [15]

El sensado de estilo film está compuesto por elementos recubiertos por un sustrato de metal que tiene un patrón de resistencia cortado. Este patrón actúa como un conductor largo, plano y delgado, el cual provee la resistencia eléctrica. El cable de plomo está junto con el recubrimiento de sustrato metálico y se sujetan en un solo lugar utilizando una cama de vidrio o epoxi.[15]

Circuito de medición Además del elemento de sensado que ha sido previamente discutido, el circuito de medición consiste de una combinación de cables de plomo, conectores, terminales e instrumentación de medición o control.[15] La forma de cómo funciona el circuito de medición es dependiente de muchos factores incluyendo:

- Temperatura en el área de sensado así como las condiciones del ambiente esperadas a existir entre el sensor y la instrumentación.
- La distancia entre el sensor y la instrumentación.
- El tipo de interconexiones que prefiera el usuario.

Las RTDs se consiguen con 2, 3, o 4 cables por elemento.

- La topología de **2 cables** es la **menos precisa** de los 3 tipos de interconexiones ofrecidas pues no hay forma de eliminar la resistencia del cable de plomo del elemento de sensado. Las RTDs de 2 cables son utilizadas comúnmente con un cableado corto o cuando la precisión no debe de ser exacta.

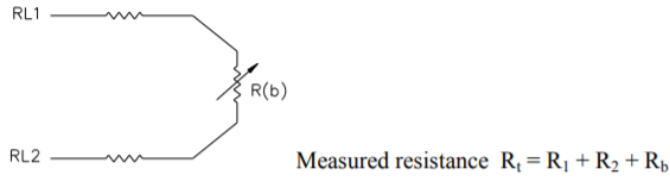


Figura 9: Conexión de RTD a 2 cables.[15]

- La topología de **3 cables** es comúnmente utilizada en aplicaciones industriales donde el tercer cable provee un método para remover la resistencia promedio dada por el cable del sensor. Cuando existen largas distancias entre el sensor y el instrumento de medición, se pueden hacer ahorros significantes al utilizar una topología de tres cables en vez de una de cuatro.[15]

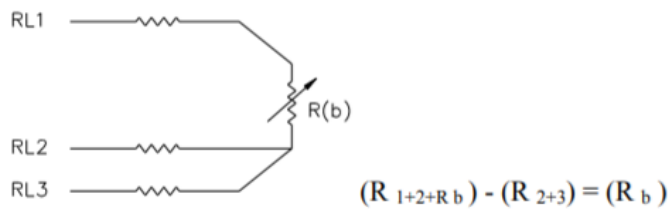


Figura 10: Conexión de RTD a 3 cables. [15]

El circuito de 3 cables funciona midiendo la resistencia entre RL1 y RL2 (R_{1+2}) y restando la resistencia entre RL2 y RL3 (R_{2+3}) lo que resulta nada más con la resistencia del bulbo RTD (R_b). Este método asume que los cables RL1, RL2 y RL3 comparten el mismo valor de resistencia.

- La topología de **4 cables** es utilizada primordialmente en un laboratorio, donde se necesita una precisión mayor. En una RTD de conectada con 4 cables, la resistencia de los cables puede ser determinada y removida del cálculo del sensor.

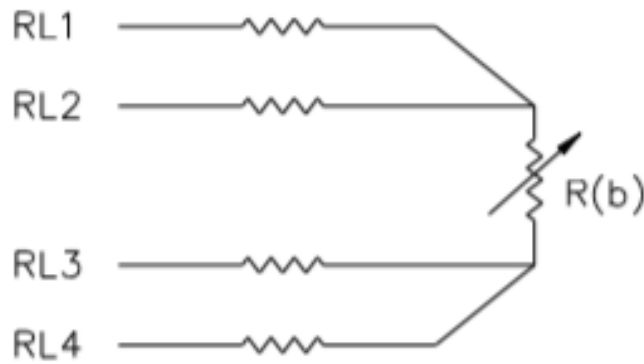


Figura 11: Conexión de RTD a 4 cables.[15]

A esta conexión de 4 cables se le conoce como un puente de 4 cables completo (true 4-wire bridge), que funciona utilizando los cables RL1 y RL4 para darle poder al circuito y los cables RL2 y RL3 para leer el valor adquirido. Este puente completo compensa para cualquier diferencia entre resistencias de los cables.

Las especificaciones de la RTD a utilizar son las siguientes:

- Nombre completo, *Sensor de temperatura RTD PT100 7MC7511-1CA01-0AA1-Z*.
- Tuerca de ensamblaje G 1/2".
- Longitud de introducción 80 - 100 mm.
- Rango -50...400°C.
- 4 hilos.

Para mayor información contactar la hoja de datos del sensor de temperatura 7MC7511-1CA01-0AA1-Z en los anexos.

6.5. Datos técnicos del motor agitador

Existen tres tipos de agitadores básicos que están relacionados con modelos de flujo fundamentales, los **agitadores de flujo axial, radial y de paso cerrado**.

Los **agitadores de flujo axial** permiten un flujo desprendido de las placas del impulsor a 45° aproximadamente, lo que permite recirculación del agua que se está mezclando. Este tipo de flujo presenta un número de Reynolds de entre 200 a 600 y se transforma en un flujo radial cuando este número se hace más pequeño. Este tipo de agitadores incluyen a todos los que tienen actuadores que forman un ángulo menor de 90° con el plano perpendicular al eje.

Los **agitadores de flujo radial** incluyen palas o aspas paralelas al eje del motor. Son los agitadores más pequeños y cuando presentan aspas múltiples se denominan turbinas, los más grandes, de velocidades bajas y máximo 5 aspas, se denominan agitadores de palas o paletas. Estos agitadores generan un flujo radial para cualquier número de Reynolds y proporcionan alta velocidad tangencial. Presentan baja capacidad de impulsión.

- Nombre completo, *Qianson DC 12V-36V 24V 3500-9000RPM 775 Motor Ball Bearing Large Torque High Power Low Noise DC Stirring Motor*.
- Cuenta con 2 agujeros de montaje M4
- Longitud de introducción 80 - 100 mm.
- Voltaje admisible 24V, corriente 0.16A.
- 4 hilos.

7.1. Determinación del espacio de trabajo y rasgos generales del proyecto

Ya que este proyecto está destinado a ser utilizado en una de las nuevas clases construidas específicamente para el departamento de electrónica y mecatrónica en el CIT (Centro de Investigación y Tecnología) de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG,) lo primero que se realizó fue verificar el espacio de trabajo donde se implementará. Según planos preliminares de la clase obtenidos por el ingeniero Luis Montenegro, se cuenta con un área máxima de $1.25m \times 1.25m$ y una altura de $3m$.

Se pretendió trabajar con instrumentación completamente industrial para que los estudiantes se familiaricen con este tipo de productos, por lo tanto se seleccionó un tema específico que abarque una gran gama actuadores y sensores de índole industrial. Teniendo como referencia el proyecto 1 del curso de *Instrumentación Industrial*, se seleccionó el tema de la hidráulica. Además, la universidad cuenta con un instrumento de medición de flujo volumétrico y másico de agua donado por USAID que requiere su pronta implementación. El *Sensor de flujo másico de efecto Coriolis Micro Motion r025s113ncamezyzz* actúa como factor determinante en el diseño del proyecto.

Además, en el departamento de electrónica existen diferentes sensores y actuadores que no tienen un uso práctico, que pueden ser implementados en este proyecto, se realizó un inventario con todos los dispositivos a utilizar (Tabla 8 página 69) para tener una idea inicial con la cual iniciar el diseño del dispositivo a implementar. Para tener una cantidad aceptable de sensores y actuadores del cual partir para diseñar el proyecto.

Teniendo en cuenta estas últimas consideraciones, se determinó la cantidad de entradas analógicas y digitales que serán utilizadas en el dispositivo. Como idea inicial, se plantea el

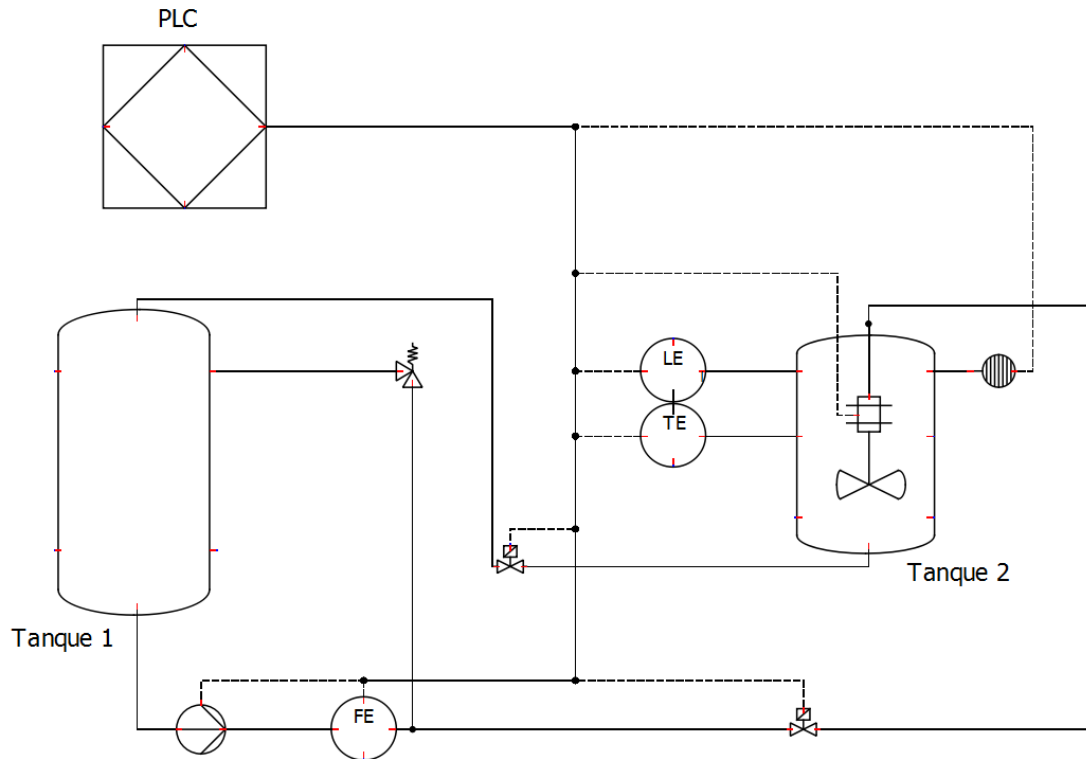


Figura 12: Diagrama P&D, obtenido del *Manual de Ensamblaje del Sistema Didáctico de Recirculación de Agua*. Para la descripción de la nomenclatura utilizada en el diagrama consultar la sección de anexos página 69, Tabla 9

transporte de agua por tuberías desde un tanque a otro donde se pueda utilizar el *flujómetro másico*. Para plantear la idea de una manera más sencilla, se realizó un diagrama P&D del producto final del dispositivo. Se puede observar en la Figura 12 la distribución de actuadores y sensores a utilizar así como los tanques donde se depositará el agua utilizada.

El diagrama P&D muestra dos tanques donde se depositará el agua, el *tanque 1* es el depósito principal de agua, pretende ser el tanque más grande y el depósito del cual se obtiene el flujo de agua principal bombeado por la *bomba centrífuga* que alimenta el resto del dispositivo.

En el *tanque 2* se realiza la medición de diferentes propiedades del agua después de ser bombeada previamente. Utilizando un *sensor de temperatura* y un *sensor de distancia* (propiedades descritas en las páginas 19 y 19 respectivamente) es posible conocer los valores de la temperatura y la cantidad de agua contenida en el tanque. Estos valores cuentan como entradas analógicas al PLC que utilizarán los estudiantes para observar dichas señales.

En el *tanque 2* también se colocan dos actuadores, el *calentador de agua* y el *mezclador* serán salidas digitales que podrán ser activadas por el usuario final.

La *bomba centrífuga* es la encargada de circular el agua por las tuberías principales del dispositivo, regulada por una *válvula reguladora de presión*, esta bomba pretende alimentar el *tanque 2* donde los sensores y actuadores de dicho tanque pueden determinar las

características del agua.

Para determinar la correcta circulación de agua se implementaron dos electroválvulas, una antes y una después del *tanque 2*. Estas válvulas, accionadas por solenoide, también serán salidas analógicas del proyecto.

El *flujómetro másico* se colocó justo después de la bomba centrífuga para medir el caudal que esta despidе. La implementación de este sensor es crucial para el departamento de electrónica y mecatrónica de la universidad. Muchas de las decisiones en el diseño del dispositivo se tomaron alrededor de este sensor, decisiones que fueron determinantes en cuanto a tamaño de tanques, potencia y cantidad de agua a utilizar.

En la siguiente tabla se especifican los tipos de señales que cada sensor y actuador utilizado en el proyecto representan para el usuario final utilizando el PLC.

Componente	Entrada analógica	Salida analógica	Salida digital
Válvulas solenoide			x
Calentador de agua			x
Agitador de agua			x
Bomba centrífuga (variador de frecuencia)		x	
Sensor de flujo másico	x		
Sensor de posición	x		
Sensor de temperatura	x		

Cuadro 2: Tipo de señal de los sensores y actuadores utilizados.

Dada esta información, se decidió diseñar una estructura de metal que cumpla con los requerimientos de tamaño, soporte y fácil acceso al usuario. Además, se adaptaron dos módulos de conexiones que sirven como comunicación entre el PLC utilizado por el usuario y el dispositivo diseñado. El diseño utiliza módulos prefabricados por FESTO.

Se habla de la selección de todos estos dispositivos y su correcta aplicación en el diseño en los siguientes capítulos.

7.2. Selección del equipo

Uno de los elementos que más influye al diseño es el sensor de flujo másico de efecto Coriolis *Micro Motion r025s113ncamezyzz*, sensor indispensable y obligatorio en la implementación. Dentro de las especificaciones técnicas para la correcta implementación del sensor (que pueden observarse en la sección 6.2.2, página 17), se observó que es necesario tener un flujo de *6gal/min* a *12gal/min* (*22.71L/min* a *45L/min*) para tener una lectura correcta del caudal y densidad del flujo que lo atraviesa. Fue entonces necesaria la implementación de una bomba centrífuga trifásica de 1/2 Hp.

7.2.1. Bomba centrífuga trifásica de 1/2 Hp

Además de las convenientes especificaciones de rendimiento de la bomba (especificaciones encontradas en la pág. 22, 6.4.3) como un caudal máximo de $35L/min$ y su fácil adquisición en la ciudad de Guatemala, una de las razones principales por la cual se escogió fue la implementación de un variador de frecuencia para controlar el caudal que la bomba expulsará.

Para conocer la conexión correcta de la bomba centrífuga dentro del proyecto y cómo conectara con el variador de frecuencia encontrado en los tableros proporcionados por el departamento de electrónica de la UVG referirse al manual de usuario e instalación.



Figura 13: Bomba agua pro QB-60 1/2 Hp [14]

7.2.2. Sensor de temperatura PT100

Teniendo un calentador de agua por resistencia en el *tanque 2*, la temperatura del agua suministrada puede ser de $32C$ a $100C$, por lo tanto, resulta conveniente la implementación del sensor de temperatura *PT100 7MC7511-1CA01-0AA1-Z E00+Y15+Y44*. Los dispositivos RTD tienen una resistencia que cambia con la temperatura en una manera lineal. El valor de la resistencia cambia cuando la temperatura cambia y se le suministra una corriente constante al sensor, el cambio de voltaje medido a través de la resistencia puede ser utilizado para determinar una nueva resistencia y por lo tanto, la temperatura.

Las RTDs vienen en una variedad de tipos, con el tipo más común siendo la PT100. Esta está hecha de una platina que ha sido calibrada a tener 100 ohms en $0C$.

En la aplicación actual, necesitamos saber la temperatura del material dentro del tanque, por lo que utilizamos un sensor RTD que nos dará el valor correcto y le enviará la señal al PLC. El controlador de temperatura mandará una señal en forma de voltaje (0 - 10V DC). Asumiendo un rango de escala del sensor de $0-100^{\circ}C = 0$ a 10V DC y de acuerdo con la señal mostrada, el PLC muestra un valor considerado de 0 a 27648.

Dentro de las especificaciones de dicho sensor, el fabricante expresa que se comunica de manera analógica en un ciclo de corriente de 4 a $20mA$ y puede expresar una lectura de -50 a $400C$. Dicho sensor se posiciona al lado del *tanque 2* para obtener una lectura coherente del líquido suministrado.

En este caso, además de ser conveniente por su alto rango de medición de temperatura, el sensor cuenta con una rosca de 1/2" y una longitud de inserción de 100mm, lo que facilita su acceso a la hora de realizar mantenimiento y colocación inicial en el tanque.

7.2.3. Sensor ultrasónico Tough Sonic

Después de seleccionar los tanques (sección 8, página 33) se decidió utilizar, para el *tanque 2*, un diámetro interno de 30 cm y una altura de 50 cm. De esta forma, el tanque puede ser capaz de contener 35.3L de agua para poder medir temperatura y cantidad. Teniendo un rango óptimo de 61cm y una banda muerta en distancias menores a 4.5cm, el sensor es más que capaz de medir la cantidad correcta de agua dentro del *tanque 2* de 45.5cm en adelante, o de 32.16L.

Teniendo una rosca de 30mm, el sensor es conveniente en su instalación e implementación en el proyecto. Cabe mencionar que el posicionamiento del sensor en el tanque no es trivial pues se requiere estar por lo menos 3cm alejado de las paredes adyacentes para poder tener una lectura correcta en todo momento.

Diseño de tuberías y tanque de suministro

Lo primero que se realizó fue estandarizar la tubería a utilizar para el correcto funcionamiento del sensor de flujo, ya que la implementación de este sensor es crucial para el desarrollo del proyecto.

Para decidir el diámetro correcto de la tubería a utilizar es necesario considerar el caudal al que viajará el agua dentro de la tubería. Utilizando la fórmula 1 de la página 20 en la sección de antecedentes, podemos observar que

$$Q = vA$$

Donde Q es el flujo volumétrico de agua en la tubería, v es la velocidad del agua y A es el área transversal por donde pasa el agua

Ya que para que exista una correcta lectura del flujómetro másico, debemos tener un caudal de $22.71L/min$ a $45L/min$ y la bomba que se seleccionó tiene un caudal máximo de $35L/min$, se realizaron las operaciones siguientes tomando en cuenta este último valor.

Muchos sistemas prácticos de tuberías incluyen el uso de una bomba de agua que debe mover un fluido de un tanque a otro. Tomando los puntos 1 y 2 en las superficies de agua libres de los tanques, la ecuación de la energía despejada para la cabeza requerida de la bomba es de

$$h_{pump,u} = (z_2 - z_1) + h_L$$

Lo que quiere decir que la columna de agua útil de bomba es igual a la diferencia en elevación entre ambos reservorios más la pérdida de columna. Ya que conocemos la cabeza de agua requerida por la bomba, la potencia mecánica que necesita ser distribuida por la bomba al fluido y el poder eléctrico consumido por el motor de la bomba a un flujo específico es determinado por

$$\dot{W}_{pump,shaft} = \frac{\rho \dot{V} g h_{pump,u}}{\eta_{pump}}$$

$$\dot{W}_{elect} = \frac{\rho \dot{V} g h_{pump,u}}{\eta_{pump-motor}}$$

Donde $\eta_{pump-motor}$ es la eficiencia de la combinación bomba motor, el cual es el producto de la eficiencia de la bomba y de el motor que la mueve. La eficiencia es definida como la relación de la energía mecánica neta suministrada al fluido por la bomba y la energía eléctrica consumida por el motor y normalmente está entre 50 y 85 por ciento.

La pérdida de cabeza de un sistema de tubería incrementa (normalmente de manera cuadrática) con el flujo. La *curva de la demanda* determina la cabeza requerida en función de un flujo específico. La cabeza suministrada por la bomba no es constante tampoco. Tanto la cabeza como la eficiencia de la bomba varían con el flujo

Definimos esta diferencia como *Altura geométrica* (H_g) es la suma de a altura de impulsión y la altura de la aspiración.

$$H_m = H_g + \Delta H$$

Las pérdidas de carga suceden cuando existe un cambio abrupto en el movimiento de fluido o cuando el fluido se encuentra con válvulas o dispositivos que reducen el diámetro de la tubería considerablemente. A menor caudal, más pérdida de carga si la tubería tiene muchos giros. A mayor caudal y dependiendo del diámetro de la tubería, puede que las pérdidas de carga sean insignificantes. Para encontrar un valor nominal de las pérdidas de carga continuas se recomienda utilizar la expresión universal de Darcy-Weisbach:

$$J = \frac{\Delta H_c}{L} = \frac{f}{DI} \times \frac{v^2}{2g}$$

Donde J es la pérdida de carga continua por unidad de longitud en m/m, v es la velocidad de circulación del agua en m/s, ΔH_c es la pérdida de carga continua en m, L longitud del tramo en m, DI diámetro interior del tubo en m, g aceleración de la gravedad en m/s^2 y f es el coeficiente de pérdida de carga por unidad de longitud (o coeficiente de fricción).

Para la succión, se tiene una medición de 0.46 m tomando en cuenta el nivel del agua en la parte más superior del tanque. Para la altura de impulsión se tiene un valor de 1.35 m. Dichos datos nos dan una altura geométrica H_g de 1.81m.

Dado que las tuberías de PVC son completamente lisas, el cálculo de coeficiente de pérdidas de carga o de energía por unidad de longitud (f) que aparece en la fórmula se puede obtener con la tabla de Pérdidas de Carga para tubos PVC encontrado en la documentación adjunta. Para esta ocasión, tomando en cuenta cambios de ángulo de los codos de 90° y una tubería de 1" de diámetro nominal, tenemos para los accesorios un valor teórico de 0.9. Teniendo 4 codos en el área de succión y 6 codos más una válvula y el sensor de coriolis en el lado de la altura. La longitud total de la tubería es de 2.56m. Finalmente la suma de todas las pérdidas por tubería y codos o adversidades es de 10.56m.

$$H_m = 0.46 + 1.35 + 10.56$$

$$H_m = 12.37 \text{ mca}$$

Dentro de las especificaciones generales del sensor de flujo másico de efecto coriolis podemos observar los diferentes acoples seleccionados por el fabricante para ser utilizados en el campo. En la primera iteración del cálculo se decidió por utilizar un acople *ASME B16.5* de 1/2", determinando así una tubería de 1/2" de pvc para el sistema hidráulico. En la siguiente tabla podemos observar que para un diámetro de 1/2" la velocidad del agua en la tubería a un caudal de 35L/min (caudal máximo suministrado por la bomba centrífuga), es de 4.048m/s.

Q (l/min)	Q (m ³ /s)	D (in)	D (m)	V (m/s)
35	0.00058333	1/2	0.0127	4.60489223
35	0.00058333	1	0.0254	1.15122306
35	0.00058333	2	0.0508	0.28780576

Cuadro 3: Determinación de velocidades en diferentes diámetros de tuberías comerciales a un caudal de 35L/min

Como se puede observar en la Tabla 3 la velocidad máxima para un diámetro de 1" es de 1.15m/s, velocidad admisible para la presión obtenida en el cálculo de metros por columna de agua. 1 mca equivale a 1.42 PSI, por lo que la presión máxima para la tubería de 1.^a una velocidad de 1.151 m/s con la bomba seleccionada a un flujo constante de 35L/min es de 17.58PSI.

Por consiguiente se escogió la tubería de 1" y el acople *Brida Welding Neck ANSI/ASME B16.5 Class 300* para el *flujómetro másico*.

Ya que tenemos un flujo volumétrico de agua máximo de 35L dado por la bomba centrífuga, escogemos un tanque de suministro de 42.4L y el tanque donde se realizarán los cambios de propiedades al agua transportada de 35.3L.

Para terminar con el sistema hidráulico, se instaló un sistema de alivio de presión para normalizar la presión máxima establecida en el circuito. Esta presión máxima determinada por la válvula de alivio de presión es de 15psi para el circuito completo. Como la presión máxima de la bomba es de 21psi, se regula la misma utilizando la válvula de alivio de presión. La tubería utilizada tiene una resistencia a la presión de 16psi, la válvula de alivio de presión se instaló justo después del sensor de flujo para asegurar que exista un flujo perenne.

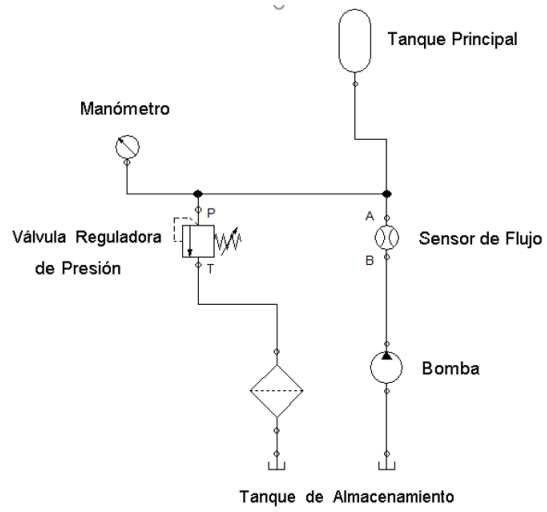


Figura 14: Sistema de control de presión.

Diseño de tanque agitador

Se desarrolla una propuesta de diseño del agitador tomando en cuenta los siguientes datos.

Fluido a agitar	Agua H ₂ O
Densidad del fluido	1000 kg/m ³
Viscosidad del fluido	1000 Pa s
Presión de operación	1 bar
Temperatura de trabajo	20 a 100°C
Diámetro del tanque	30 cm
Altura del tanque	50 cm
Fondo	Plano
Altura de llenado	40 cm
Volumen de llenado	28 litros

Cuadro 4: Dimensiones iniciales del tanque agitador

9.1. Parámetros de diseño

Se define utilizar un impulsor de turbina de tipo Disco Rusthon (flujo radial) para productos poco viscosos y para velocidades medias. La fabricación de este tipo de impulsor resulta ser económica y viable para el proyecto.

Para la utilización de este impulsor, se seleccionan velocidades de 50 a 150 rpm por lo que se selecciona un motor de 50 rpm como velocidad nominal esto simplifica los cálculos y asegura agitación.

Las variables para tomar en cuenta en el diseño del agitador han sido tomadas del libro

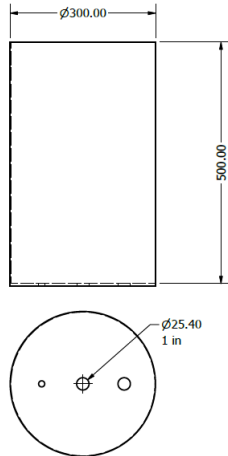


Figura 15: Dimensiones iniciales del tanque agitador

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{H}{D_t} = 1 \quad \frac{j}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

Figura 16: Proporciones típicas de tanque agitador

de Operaciones unitarias en ingeniería química 7ma edición. Warren L. McCabe. Dichas dimensiones afectan la velocidad de circulación del líquido, los patrones de velocidad y el consumo de potencia.

Las proporciones típicas son

9.1.1. Dimensiones generales

Ya definido el impulsor a utilizar y considerando los datos iniciales, se plantean las dimensiones generales finales del tanque diseñado.

Para el tanque: $H = 35 \text{ cm}$ $D_t = 35 \text{ cm}$

Distancia a fondo a base del impulsor (E)

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$E = \frac{D_t}{3} = 12 \text{ cm}$$

Diámetro del impulsor (Da)

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$D_a = \frac{D_t}{3} = 12 \text{ cm}$$

Largo de paleta (L)

$$L = \frac{D_a}{4} = 3 \text{ cm}$$

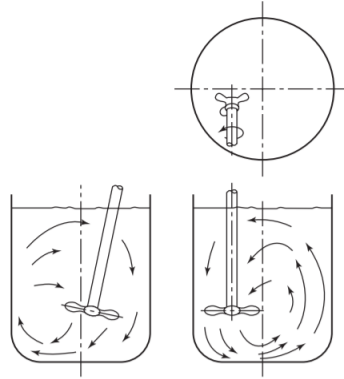


Figura 17: Patrón de flujo con agitador no centrado

Ancho de paleta (W)

$$W = \frac{Da}{5} = 2.4cm$$

Para que el proceso de agitación sea eficaz, el volumen del flujo agitado debe de ser capaz de llegar alrededor de todo el estanque. La velocidad de circulación, aunque importante, no es la única variable a tomar en cuenta pues la turbulencia creada por las corrientes expulsadas por el impulsor deben estar adecuadamente dirigidas y lograr generar grandes gradientes de velocidad en el fluido. El flujo tangencial sigue una trayectoria circular alrededor del eje y crea un vórtice en el líquido. Esta fuerza tangencial generalmente empuja las partículas más grandes depositadas en el fluido y las lleva hacia las paredes del tanque, creando así que estas se caigan al fondo del mismo y se acumulen en la parte central generando la acción completamente opuesta a mezcla, la concentración. El flujo circulatorio y el vórtice puede prevenirse. En tanques de pequeño tamaño, se coloca el impulsor separado del centro del tanque, como se indica en la siguiente figura.

9.1.2. Cálculo de potencia del agitador

Todos los parámetros descritos en los cálculos anteriores, turbulencia, viscosidad y velocidad de agitación consumen energía y por lo tanto es de gran importancia conocer la potencia consumida para cumplir con el objetivo del tanque.

Se puede conocer esta potencia conociendo, por medio de gráficas, el número de Reynolds y el número de potencia del tanque. Estos gráficos dependen de las características geométricas del agitador.

Valores adimensionales

Número de Reynolds (Re) Es un parámetro adimensional que describe si el flujo de un fluido es laminar o turbulento. Relaciona densidad, viscosidad, velocidad y la dimensión típica de un flujo.

$$Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu}, \text{ Donde}$$

N = velocidad de rotación (rps)
 d = Diámetro del agitador (m)
 ρ = densidad del fluido (kg/m^3)
 μ = viscosidad (Pa s)

A bajos números de Reynolds ($Re < 10$), el flujo viscoso prevalece en el tanque, y a $Re > 104$ el flujo es turbulento en todas partes. Régimen laminar: $Re < 10$ Régimen transitorio: $300 < Re < 10000$ Régimen turbulento: $Re > 10000$

Número de potencia N_p , análogo al factor de fricción. Proporcional a la relación entre la fuerza de arrastre que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza inercial. Esta última está asociada con el flujo de cantidad de movimiento correspondiente al movimiento global del fluido.

$$N_p = \frac{P}{N^3 d^5 \rho}, \text{ Donde,}$$

N = velocidad de rotación (rps)
 d = Diámetro del agitador (m)
 ρ = densidad del fluido (kg/m^3)
 P = Potencia del agitador (watts)

En la Figura 18 se muestran las gráficas típicas del N_p en función del Re para tanques con deflectores ajustados con impulsores localizados alejados del centro. A altos números de Reynolds, los niveles fuera de la curva a un número de potencia de 5.8, están de acuerdo con los valores antes calculados. El número de potencia para los cinco impulsores es constante cuando $Re > 10^4$, y varía inversamente con el número de Reynolds cuando $Re < 10$. Ya que nuestro número de Reynolds $> 10^4$, el valor utilizado para N_p será de 5.8.

Cálculo de potencia consumida

Primero se calcula el número de Reynolds utilizando las ecuaciones previamente mencionadas.

Densidad del agua $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

Viscosidad $\mu = 0.00105 \text{ kg}/\text{ms}$

Revoluciones por segundo (N) = 59 rpm = 0.83 rps

Diámetro del agitador (d) = 0.12 m

Reemplazando

$$Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu} \Rightarrow Re = \frac{0.83 \times (0.12)^2 \times 1000}{0.00105} = 1.138 \times 10^4$$

Arreglando la ecuación para la potencia necesitada se obtiene

$$P = N_p n^3 D_a^5 \rho$$

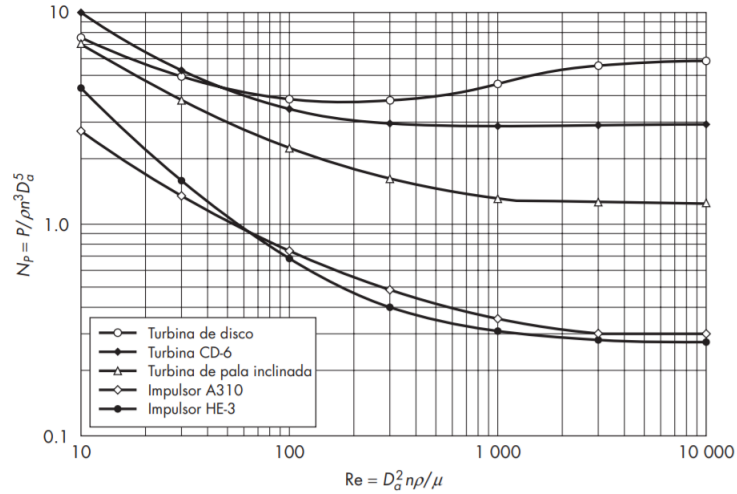


Figura 18: Número de potencia N_p en función del número de Reynolds Re para turbinas e impulsores de alta eficiencia.

En tanques para números de Reynolds $>10^4$, el número de potencia es independiente del número de Reynolds y la viscosidad ya no influye. En este intervalo, el flujo es totalmente turbulento y la ecuación se transforma en

$$N_P = K_T$$

de la cual

$$P = K_T n^3 D_a^5 \rho$$

Obteniendo el valor de la constante K_T de la Figura 19 para un impulsor de disco de seis palas, se utilizará un valor de 5.75.

Ya que $Re > 10^4$, $N_P = K_T$.

$$P = 5.75 \times 0.83^2 \times 0.12^3 \times 1000 = 6.84W$$

9.1.3. Selección del motor

Para la selección del motor para el tanque agitador se toma en cuenta la eficiencia del motor y las pérdidas por fricción, considerando dichos parámetros obtenemos

Eficiencia del motor = 70 % Pérdidas por fricción = 35 %

$$P = \frac{6.84 + 2.394}{0.7} = 13.2W$$

Teniendo en cuenta los siguientes parámetros

- Cumplimiento de la potencia y velocidad requerida para la agitación (50 rpm, 13.2W)
- Fácil montaje en la parte superior de tanque plano
- Fácil conexión para ser controlado

Se selecciona el motor eléctrico de 24V Serie DCK31, tipo 404 867.

Cumpliendo con todos los parámetros descritos y las especificaciones determinadas por las fórmulas y funciones determinadas anteriormente, se realizó el diseño en modelado 3D del tanque.

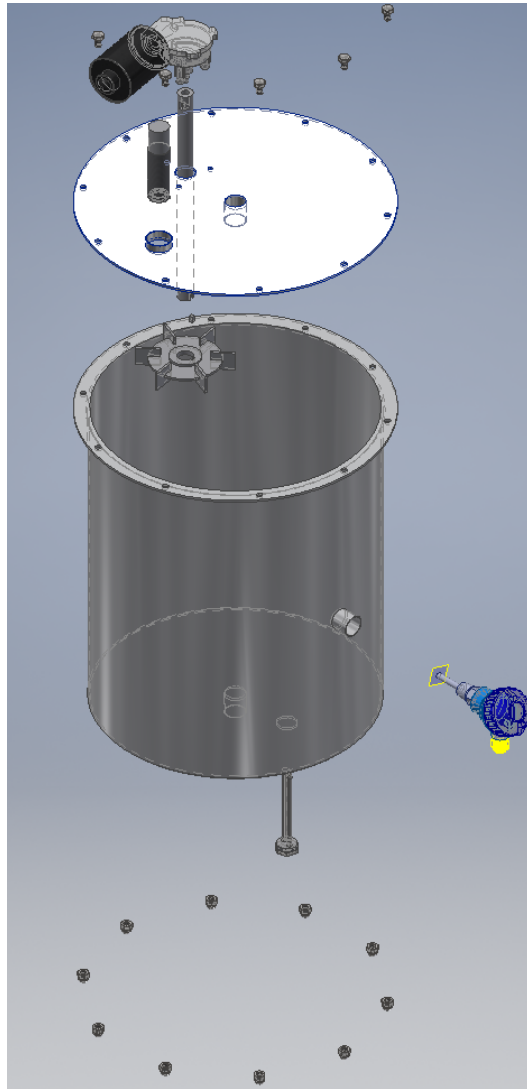


Figura 21: Diseño final del tanque agitador, formato de explosión

Diseño de armazón

Teniendo un diámetro de tuberías establecido, un espacio de trabajo y tamaño de tanques requerido, se decidió realizar un armazón conveniente para el estudiante que ayude a la implementación correcta del circuito cerrado de agua planteado.

El diseño del marco fue realizado tomando en cuenta la recirculación de agua y el uso de la gravedad para movilizar el agua desde el *tanque 2* a el *tanque 1*. Cuenta con una altura de $2.2m$ y un área cuadrada de $1m \times 1m$. Para la fácil colocación de los tanques y sostenimiento concreto de los dispositivos utilizados, se utilizó un *perfil de acero angular* $2'' \times 2'' \times 1/8''$. Teniendo en cuenta los pesos de los dispositivos utilizados en el proyecto, tabla 5, se realizó una simulación que incluye los puntos más frágiles en la armazón del sistema.

	Cantidad	Peso (kg)
Volumen de agua máximo	63L	63
Sensor de flujo másico	1	4.5
Tanques acero inoxidable	2	6
Válvulas solenoides	2	1
Tubería		4
Mezclador	1	4
Bomba centrífuga	1	4.6
Sensor de posición	1	0.5
Total		87.6

Cuadro 5: Peso de los elementos utilizados en kg.

Para averiguar si las vigas seleccionadas son capaces de sostener correctamente el peso de los tanques, es necesario realizar un cálculo estructural de carga puntual en las barras donde está distribuido el peso.

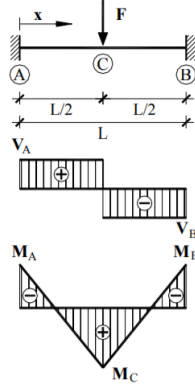


Figura 22: Viga doblemente empotrada con carga puntual en $L/2$

Para asegurarnos que la viga aguantará el peso de la estructura, se realiza una comparación entre el momento nominal de la viga vs el momento de carga. Tomando en cuenta el caso más extremo, las vigas seleccionadas se calculan como vigas doblemente empotradas y con la carga puntual de $1/4$ de $87.6kg$ ($193.1lb$) directamente a la mitad de la viga. Con una longitud L de $3.3ft$ se calcula el momento de carga M_c con la fórmula:

$$M_c = M_{(mx)} = FL/8$$

$$M_{AC} = \frac{\frac{193lb \cdot 32.2ft/s^2}{4} * 3.3ft}{8} = 604.9lb * ft = 0.605KIP * ft$$

Seguido de eso se realizó una comparación entre el momento de carga y el momento nominal de la viga, dado por $M_n = F_y * Z$ donde F_y es el esfuerzo de fluencia con valor de $72,000lb/in^2$ para el perfil angular de 2×2 seleccionado y Z es el módulo de sección plástica con un valor de $0.23in^3$. Estos valores fueron sacados del manual de construcción para aceros del instituto americano de construcción en acero cita 6.2.2. Dando así un momento nominal de $16,560lb * in$ ó $1.38KIP * ft$.

$$M_{max} = \frac{M_c}{M_n} = \frac{0.605}{1.380} = 44\%$$

Sabiendo estos valores, podemos conocer el porcentaje de aplicación que se tiene sobre las vigas. Dividiendo el momento de carga dentro del momento nominal obtenemos que se carga la viga un 44% de su momento nominal. Esto significa que tenemos un margen de 56% de carga admisible para las vigas seleccionadas.

Además se realizó una simulación para encontrar las deflexiones y los puntos críticos en las vigas según el software Inventor. Como se puede observar en la simulación realizada, el desface máximo se da en el área inferior de la armazón propuesta con un valor de $2.6mm$ teniendo una carga total de $87.6kg$ distribuida en las vigas horizontales en la parte media y en la parte inferior. Tener un desface máximo de $2.6mm$ en las vigas de la armazón no significa que el sistema no cumpla con las características para poder ser implementado. Los datos de los pesos son exagerados para poder ser apreciados en la imagen. Además, se

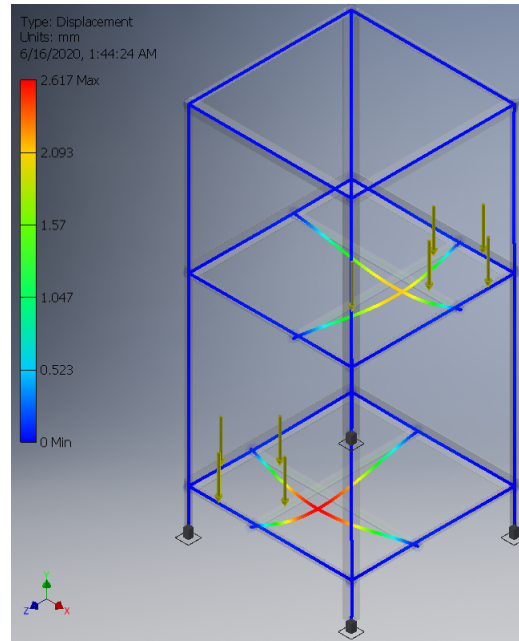


Figura 23: Simulación que demuestra los puntos más propensos a desface de vigas debido a las cargas del sistema.

presenta un esfuerzo cortante máximo de $1.57MPa$ admisible para el proyecto pues el *perfil de acero angular 2" X 2"* puede sustentar un esfuerzo cortante máximo de $200MPa$.

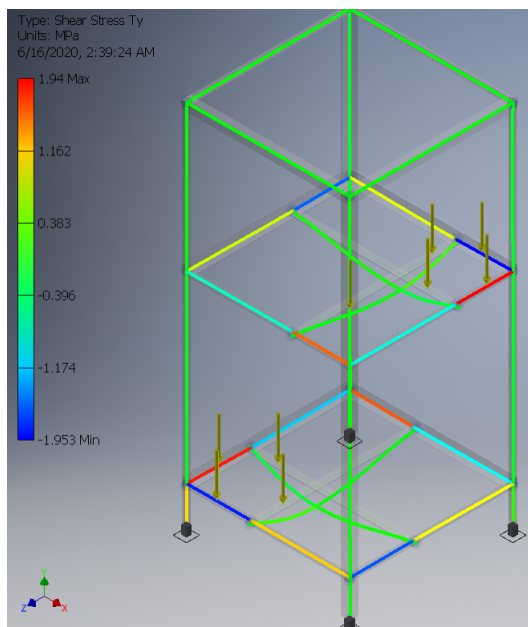


Figura 24: Simulación que demuestra los puntos más propensos a corte de vigas debido a las cargas del sistema.

Potencia

En este capítulo se enumera la corriente de operación máxima requerida por los dispositivos de entrada y salida del prototipo. En la siguiente tabla se puede realizar la comparación entre el voltaje de operación, la corriente necesaria y la potencia de cada uno de los actuadores y sensores a implementar.

	voltaje (V)	Corriente (A)	potencia (watts)
Sensor de flujo de efecto coriolis	24	0.458	11
Sensor de posición Tough Sonic	24	0.45	10.8
Válvula solenóide	24	0.5	12
Válvula solenóide	24	0.5	12
Agitador de agua	24	3	72
Total		5	

Cuadro 6: Potencia requerida por componente

La fuente de voltaje del PLC suministra 4 A de corriente directa a 24V máximo. El PLC y los dispositivos periféricos consumen 570mA constantemente, lo que nos deja con 3.47A para componentes extra. Ya que es recomendable que las fuentes de poder no sobrepasen un 60% de su capacidad máxima, se planteó utilizar una fuente de poder externa para los actuadores del sistema de circulación.

Además de los componentes enlistados en la Tabla 6, la resistencia calentadora de agua trabaja a 110Vac con un consumo de corriente máximo de 4.1A. Según el datasheet de los relés colocados en el panel de trabajo del PLC, estos pueden soportar una corriente de descarga en la bobina de 2.2A máximo, lo que no nos permite accionar la resistencia utilizando dichos dispositivos sin sobrepasarnos de sus características máximas. Por lo tanto se realizó el diseño de una placa en Altium que funcione como interfaz entre el dispositivo

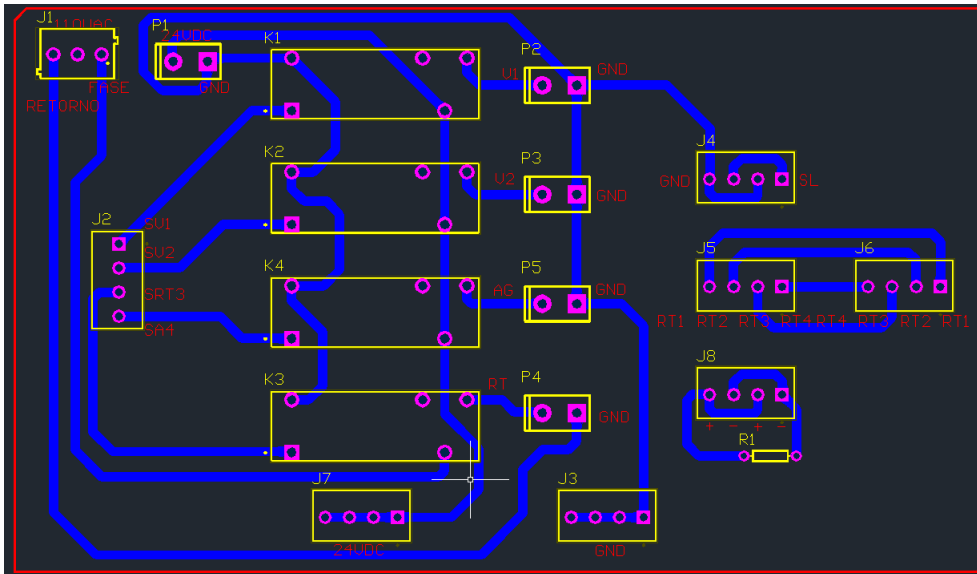


Figura 25: Diagrama de la placa diseñada para funcionar como interfaz usuario y prototipo.

planteado y el PLC que se dedica a accionar cada uno de los actuadores.

Como se puede observar, la placa consiste en una entrada de 110Vac, una entrada de una fuente conmutada de 12V 10A y 4 relés que sirven para el accionamiento de los dispositivos.

La placa realiza la conexión entre los sensores y actuadores a el PLC, incluyendo las salidas digitales que funcionan a 24V y la resistencia de 110Vac, así como la alimentación y sensado del sensor de flujo de efecto coriolis, el sensor de temperatura y el sensor de posición.

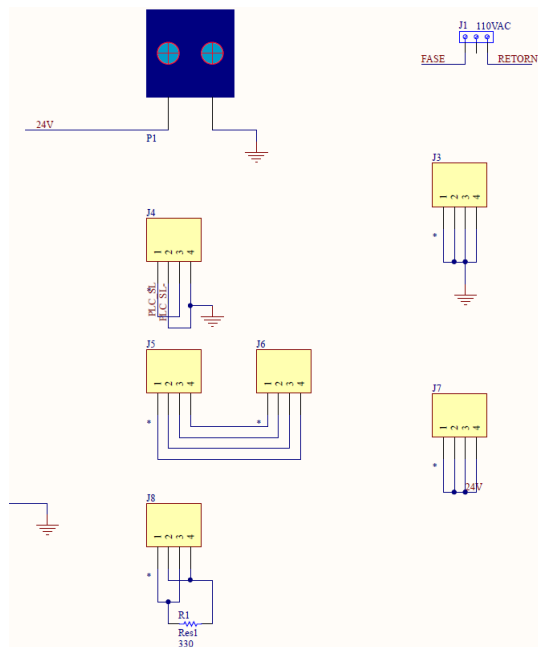


Figura 27: Diagramas de conexión de sensores, fuente de voltaje de 24V y fuente de voltaje 110Vac.

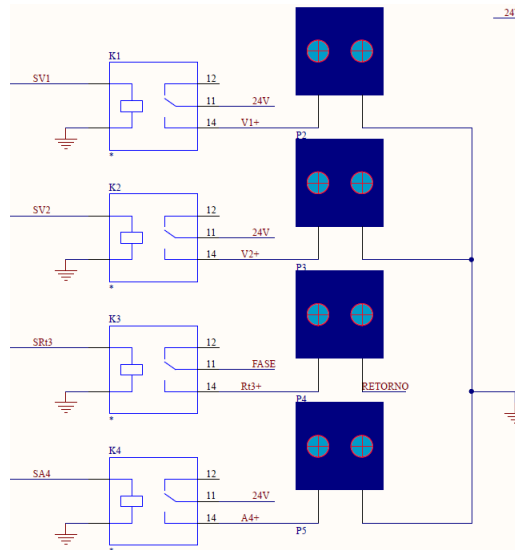


Figura 26: Diagrama de accionamiento, salidas digitales a 24V.

Abreviatura	Significado
SV1	Señal del PLC para válvula solenóide 1
SV2	Señal del PLC para válvula solenóide 1
SRt3	Señal del PLC para resistencia calentadora
SA4	Señal del PLC para motor agitador
V1+	Conexión válvula solenóide 1 +
V2+	Conexión válvula solenóide 2 +
Rt3+	Conexión resistencia calentadora +
A4+	Conexión motor agitador +
PLC SL	Señal del PLC sensor de nivel
PLC FM	Señal del PLC sensor de flujo
SL	Conexión sensor de nivel
FM	Conexión sensor de flujo
PLC RT1, PLC RT2, PLC RT3, PLC RT4	Señal del PLC para sensor de temperatura Rtd
RT1, RT2, RT3, RT4	Conexión sensor de temperatura Rtd

Figura 28: Descripción de señales y leyenda de placa.

11.0.1. Cálculo de tracks

Para calcular el ancho de los tracks para la placa de contactos diseñada en este proyecto se decidieron utilizar los siguientes supuestos.

- Corriente máxima 5 A
- Grosor del cobre 2 oz/ft²
- Temperatura máxima 40°C
- Temperatura ambiente 24°C
- Longitud del track 100mm
- Voltaje máximo 24V

La fórmula utilizada para calcular la corriente que puede pasar por uno de los tracks está publicada en el estandar IPC-2221, sección 6.2. Para track externo:

$$I = 0.048 \times \delta T^{0.44} \times A^{0.725}$$

Donde I es la corriente máxima en A, δT es la diferencia de temperatura entre la temperatura máxima deseada y la temperatura ambiente en °C, y A es el área transversal del track en $mils^2$.

El grosor del track puede ser calculado entonces al despejar la fórmula para saber el área transversal donde la corriente puede pasar sin problema.

$$A[mils^2] = \sqrt[0.725]{\frac{I[A]}{0.048 * \delta T^{0.44}[^{\circ}C]}}$$

Después, se calcula el ancho del área transversal, determinado por el grosor del cobre del track.

$$Ancho = \frac{A[mils^2]}{Grosor[oz] * 1.378[\frac{mils}{oz}]}$$

Al sustituir las fórmulas planteadas con los supuestos descritos anteriormente, determinamos que el grosor necesario para los tracks en un voltaje de 24V es de 48.12 mils y para un voltaje de 110Vac es de 48.13 mils. Redondeando, se selecciona un track con un grosor de **50 mils** para ambos.

Imágenes de los prototipos realizados

En la Figura 29 se puede observar un prototipo tosco y no muy específico, se observan antiguos elementos de aplicación y no se obtienen correctas mediciones de esfuerzos flectores con los elementos utilizados.

En la Figura 31 se observa la utilización del motor planteado, la posición final de las interfaces de usuario y las nuevas posiciones de las válvulas manuales para el deshecho y mantenimiento de los elementos planteados a utilizar.

El sistema completo se puede observar en las siguientes imágenes, se resaltaron las válvulas utilizadas para demostrar el posicionamiento correcto de las *válvulas solenoide* que se colocan en la tubería principal, además, se colocaron dos barras horizontales especiales para el sostenimiento correcto del sensor de flujo másico utilizado en el proyecto. Cabe mencionar que la bomba se conecta justo al lado del tanque inferior para contribuir a los esfuerzos necesarios por la bomba para levantar el agua necesaria para llenar el tanque superior.

Los tanques se realizarán a la medida a base de fibra de vidrio.



Figura 29: Diseño 3D del prototipo 1

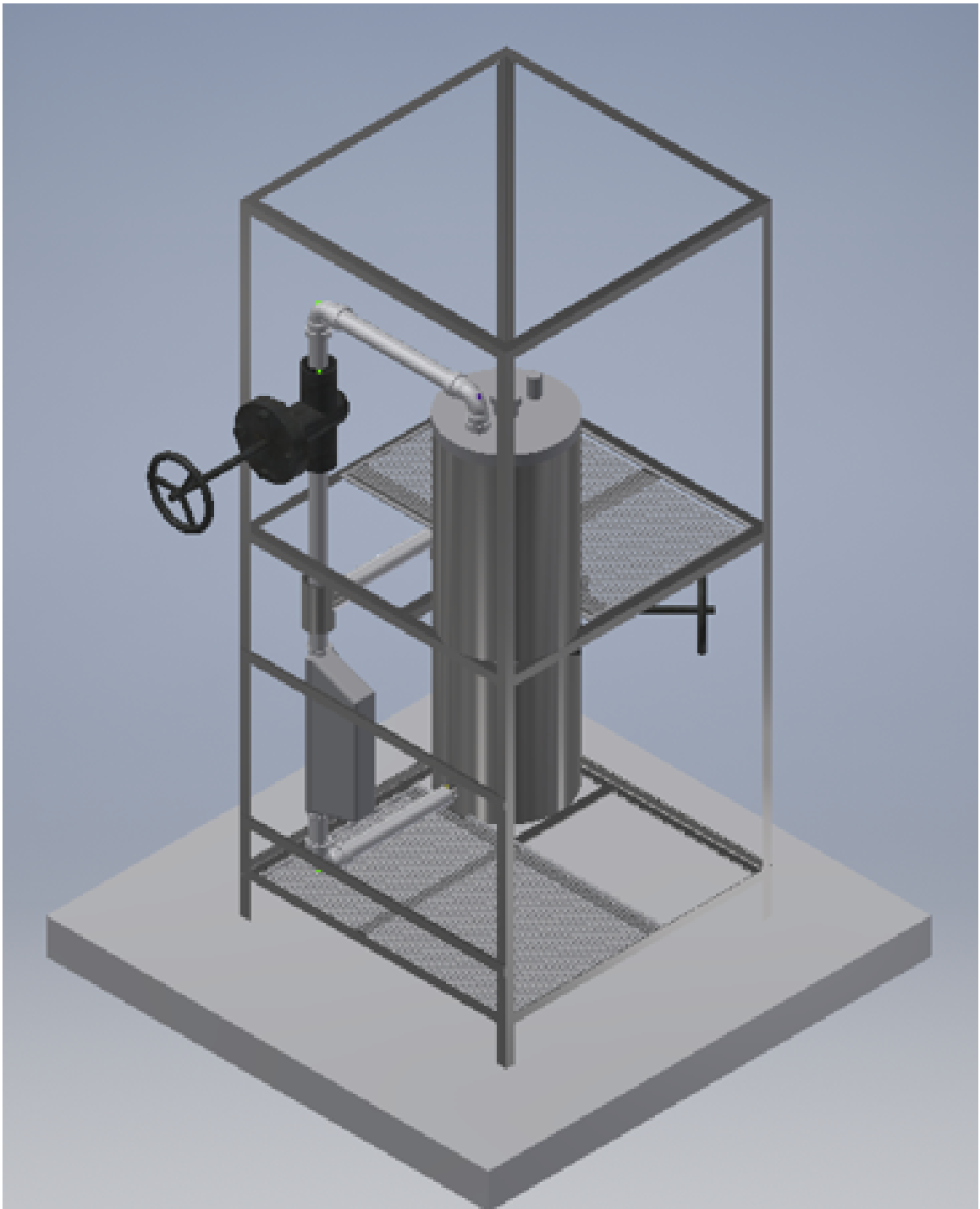


Figura 30: Diseño 3D del prototipo 1

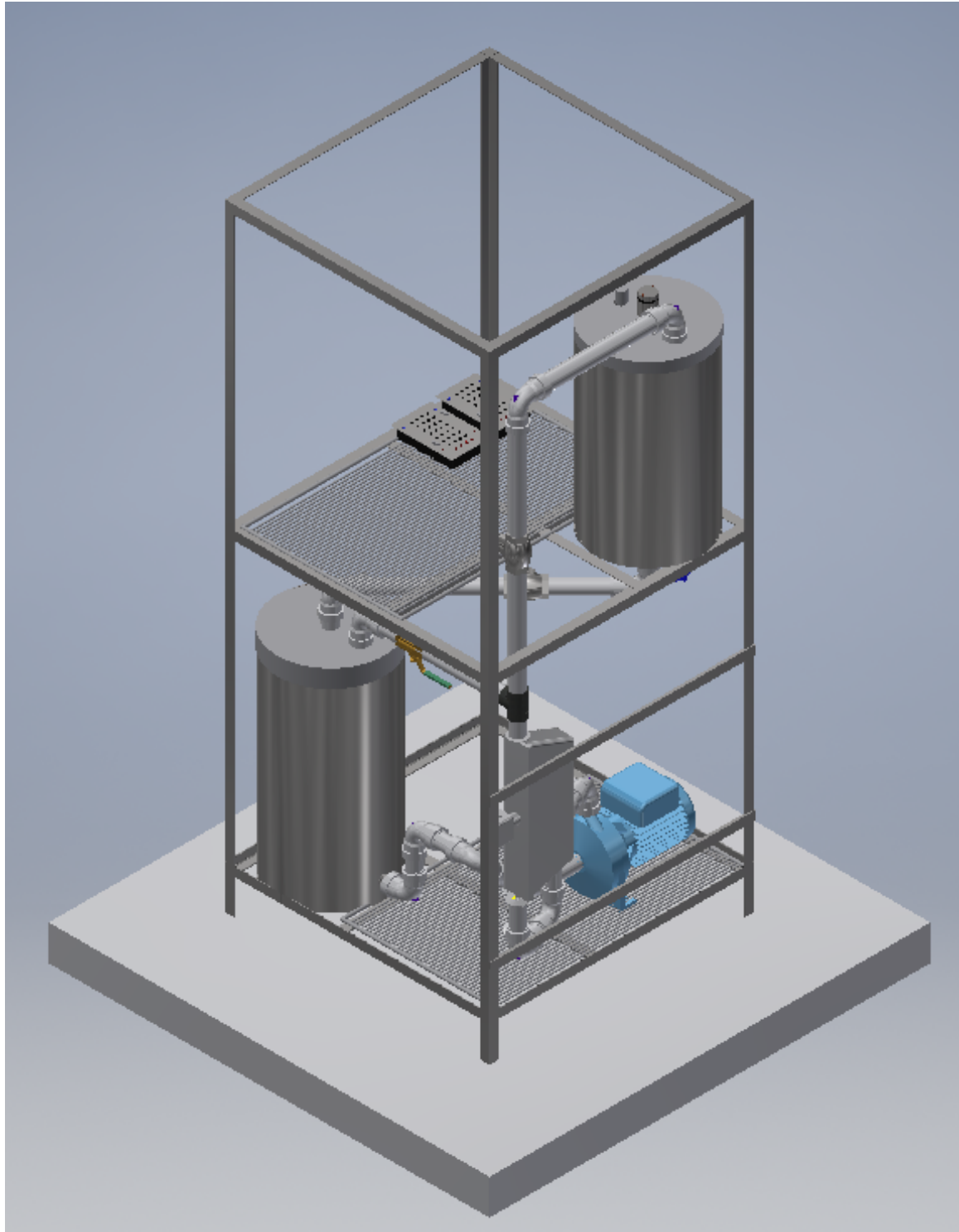


Figura 31: Diseño 3D del prototipo 1

CAPÍTULO 13

Costos

Después de diseñar el prototipo completo, se enumeran las partes independientes del mismo para su fabricación e implementación como material didáctico. Como ya se cuentan con ciertos dispositivos en la universidad, en este capítulo solo se enumeran los materiales que deben ser comprados para terminar de realizar el proyecto.

En este capítulo no se enumeran los costos de fabricación como soldaduras y fabricación de tanques y tubería.

Descripción	cantidad	precio/u	total
Perfil angular 1"X1/8"	17.5 m	Q 69.00 cada 6m	Q207.00
perfil plano	3 m	Q65.00 cada 6m	Q65.00
Modulo AI HART siemens	1	Q2,000.00	Q2,000.00
bomba Centrífuga 1/2 Hp	1	Q 475.00	Q 475.00
sensor ultrasónico tough sonic 3	1	Q50,000.00	Q50,000.00
codo pvc sin rosca	6	Q2.90	Q17.40
Adaptadores macho pvc	5	Q2.25	Q11.25
tubería pvc 160psi 1"	6m	Q26.50	Q26.50
unión Tee pvc sin rosca 1"	1	Q2.90	Q2.90
*Sensor de flujo de efecto Coriolis	1	Q117,000.00	Q117,000.00
Calentador de agua sumergible	1	Q240.00	Q240.00
Motor 24VDC	1	Q147.12	Q147.12
Válvula de alivio de presión	1	Q64.00	Q64.00
Fabricación de tanques en acero inoxidable	2	Q1,000.00	Q2,000.00
Fabricación de eje agitador	1	Q360.00	Q360.00
Tornillos	22	Q1.00	Q20.00
*Total incluyendo sensor de efecto coriolis			Q190,483.22
Total			Q 73,483.22

Cuadro 7: Precio de los elementos utilizados.

CAPÍTULO 14

Interfaz y conexión con el usuario

Aunque esta sección está mejor explicada en el manual adjunto de operación de la máquina, la interfaz de conexiones donde se realiza la interacción con el usuario se diseñó en base a las especificaciones de los sensores y actuadores implementados.



Figura 32: Diseño del módulo analógico utilizado

El curso de Instrumentación Electrónica de la UVG, consiste de tres módulos: Primero se inicia con la presentación de los conceptos fundamentales utilizados para la caracterización y clasificación de los instrumentos de medición. En la segunda parte se discuten las diferentes tecnologías de sensores, y finalmente se presenta la medición de diversas variables físicas comúnmente utilizadas en la industria.

El contenido se reparte entre los temas:

- Introducción, tipos de instrumentos y características de desempeño.
- Elementos de conversión de variables y sensores
- Medición de temperatura, nivel, presión y flujo
- Transmisión de señales
- Redes y sistemas digitales modernos
- Ruido
- Errores y calibración.

El diseño planteado se enfoca en los primeros cinco temas del contenido del curso.

15.0.1. Tipos de instrumentos y características de desempeño

Dadas las características intrínsecas de los sensores utilizados como la resolución y repetibilidad, el estudiante es capaz de comprender e interactuar de primera mano con los

sensores montados en el dispositivo diseñado en esta tesis. El sensor de temperatura y el sensor de posición, ambos presentan un valor analógico en corriente que se debe interpretar y reconocer en los PLCs utilizados por los usuarios. Además, las características de desempeño son importantes en el proyecto pues determinan el funcionamiento correcto del sensor de flujo utilizando el efecto coriolis que tanto se utilizó como punto crucial en el diseño del prototipo.

15.0.2. Elementos de conversión de variables y sensores

Dado que los sensores analógicos utilizados como el sensor de posición y el sensor de temperatura varían el valor de la medición obtenida con respecto a corriente y resistencia respectivamente, es de suma importancia la conversión y correcta interpretación de los datos muestreados por dichos elementos. Obtener el valor correcto de la variable muestreada implica aplicar conceptos de conversión de variables y resolución y rango de aplicación de los sensores.

15.0.3. Medición de temperatura, nivel, presión y flujo

Está de más decir que este proyecto es sumamente útil para cubrir este tema del curso. Utilizando el sensor de flujo másico de efecto coriolis no solo se puede medir el flujo másico. El sensor tiene opciones integradas de medición de temperatura, presión, flujo volumétrico y muchas otras más. Estas se pueden obtener con el correcto manejo de las variables de estado transmitidas por el módulo HART por el cual se comunica, aumentando el aprendizaje de los alumnos no solo en medición de propiedades de la materia si no en señales seriales no aplicadas con anterioridad en el curso.

15.0.4. Redes y sistemas digitales modernos

El sensor de flujo másico de efecto coriolis fue un punto cuspide en la creación y correcta implementación del prototipo diseñado en esta tesis. Para poder aprovechar su desempeño al máximo, se decidió implementar un módulo de comunicación serial HART. Este tipo de comunicación serial es cada vez más utilizada en la industria. Con aplicaciones tanto en sensores de flujo como temperatura, caudal, presión o cualquier otro sensor que se pueda comunicar con dicho protocolo, este permite intercambiar información con múltiples instrumentos de campo sobre un lazo de corriente de $4 - 20mA$.

Aunque en la actualidad existan compañías que se dediquen a material didáctico de automatización, este proyecto se enfoca en la clase de *instrumentación y automatización electrónica* de la Universidad del Valle de Guatemala específicamente. Por lo tanto, se utilizan elementos y actuadores que enriquezcan el conocimiento de instrumentación industrial a los estudiantes de la universidad y además que sean pertinentes para el curso.

Como la presión máxima dada por la bomba centrífuga es de $20MPa$, se utilizó una válvula reguladora de presión entre el sensor de flujo y el *tanque 1* como sistema de alivio a prueba de errores. El diseño de este sistema limita las altas presiones en la tubería creadas por los elementos contenidos en las mismas y prevé cualquier daño al dispositivo por iniciación inesperada de la bomba centrífuga.

Dado que el peso muerto máximo de los elementos en el dispositivo es de $95.6kg$, se utilizó un perfil angular de acero con un esfuerzo cortante máximo de $120MPa$ asegurando una estructura rígida.

Sabiendo el caudal máximo entregado por la bomba centrífuga y la velocidad máxima a la que viajaría el agua por la tubería. El tanque de mezcla se diseña con un diámetro de 30 cm y una altura de 50 cm. Además, se obtiene una velocidad máxima de llenado de 60 s y se determina un flujo óptimo en la tubería seleccionada.

Dada la complicación de la puesta en marcha del sensor de coriolis, la armazón del prototipo y la utilización de la misma para el usuario, se realizaron manuales de usuario y de ensamblaje que especifican la correcta implementación del proyecto diseñado en esta Tesis.

Como uno de los temas más importantes en el diseño del prototipo es la rigidez de la armazón, se recomienda usar soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) para la construcción de la armazón final. Como la estructura de metal no es de un espesor muy grande, esta soldadura resulta una opción viable. Este tipo de soldadura resulta con un acabado de alta calidad y es conocida por su alta seguridad en los esfuerzos cortantes concentrados en las conexiones de las vigas.

Además, es importante que cada uno de los instrumentos utilizados en la fabricación de este equipo sean de índole completamente industrial. Por lo tanto, se recomienda que en lugar de utilizar la tarjeta de Relés planteada en el cuerpo de este documento, se utilicen relés industriales colocados directamente en la estructura donde está instalado el PLC.

Se recomienda también crear una serie de ejercicios de parte de la clase de Instrumentación industrial que incluyan la implementación del sistema de recirculación de agua diseñado en este proyecto. Ya que el diseño está orientado a los estudiantes y su mejora en la comprensión del funcionamiento de dispositivos industriales, es importante que la implementación del prototipo se lleve a cabo en el salón de clases.

- [1] Festo, *Sistemas de aprendizaje*, 2010. dirección: https://www.festo.com/cms/es-mx_mx/9540.htm.
- [2] <https://www.smctraining.com>, *HYDROTRAINER-200*, 2019. dirección: <http://www.smctraining.com/webpage/indexpage/273>.
- [3] INTEK, *Productos*, 2015. dirección: <http://www.intek-ca.com/about.html>.
- [4] A. Guatemala, *Automatización y servicios de ingeniería*, jun. de 2019. dirección: <https://autsa.com/>.
- [5] I. GUATEMALA, *INTECAP / Unidad móvil de automatización industrial*, jul. de 2019. dirección: <https://intecap.edu.gt/intecap-implementa-unidad-movil-para-capacitacion-en-automatizacion-industrial/>.
- [6] T. Bangemann, S. Karnouskos, R. S. Camp, O. Carlsson, M. Riedl, S. McLeod, R. B. Harrison, A. W. Colombo y P. Stluka, “Chapter 2 State of the Art in Industrial Automation”, 2015.
- [7] *HART- DIGITAL TRANSFORMATION FOR ANALOG INSTRUMENTS*, oct. de 2018. dirección: <https://fieldcommgroup.org/technologies/hart>.
- [8] A. Persson, “The Coriolis Effect – a conflict between common sense and mathematics”, Tesis doct. dirección: <http://www.lextalus.com/pdf/The%20Coriolis%20Effect.pdf>.
- [9] M. Motion, *Micro Motion® R-Series Coriolis Flow and Density Meters*, ene. de 2019.
- [10] J. S. Cook, *All About Ultrasonic Sensors and How They Work with Arduino*, abr. de 2019. dirección: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/ultrasonic-sensors-how-they-work-and-how-to-use-them-with-arduino>.
- [11] Senix, *ToughSonic® 3 Level and Distance Sensor*, ago. de 2019.
- [12] A. Martín Domingo, “Apuntes de Mecánica de Fluidos”, 2011. dirección: <http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>.

- [13] L. Pérez, “Criterios de Diseño, Cálculo y Selección de Tuberías en Base al Criterio de las Prestaciones Equivalentes”, mar. de 2007. dirección: http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_criterio_seleccion_tuberias.pdf.
- [14] *BOMBA AQUA PRO QB-60 1/2 HP*, 2012. dirección: <https://hidrobombas.com.gt/producto/bomba-aqua-pro-qb-60-112-hp/>.
- [15] P. Pyromation Inc, *RTD Theory*, 2010. dirección: https://www.pyromation.com/Downloads/Doc/Training_RTDT_Theory.pdf.

19.1. Anexos

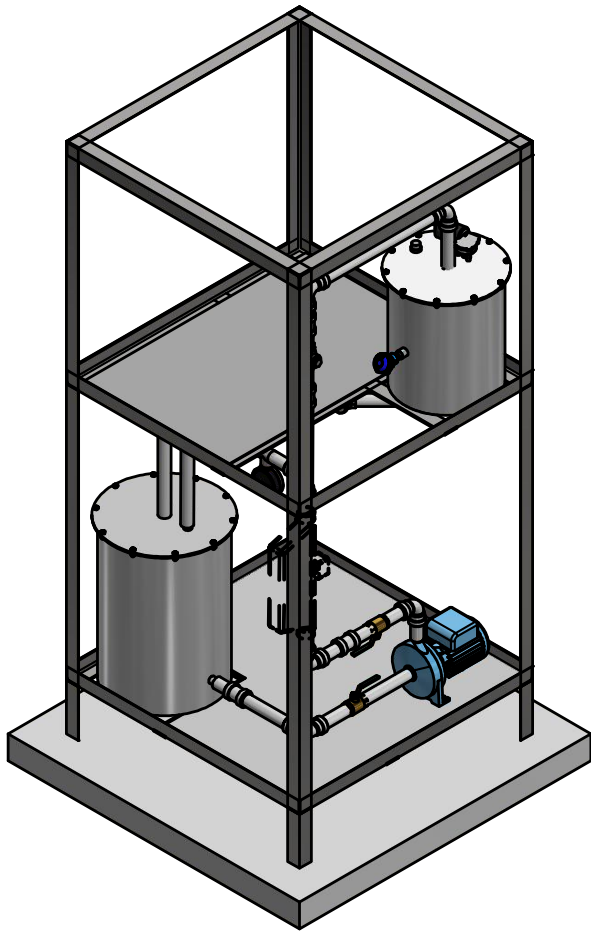
Cantidad	Componente	Marca	Modelo
3	Sensor de Flujo	Cole-Parmer	DDFXD3-A1NA-NN
10	Transimsor de nivel líquido ultrasónico	Flowline/EchoSpan	LU84-5101
10	Indicador digital de temperatura	OMEGA	PRTXB-21/2
3	Sensor de temperatura PT100 analógico	SIEMENS	7MC7511-1CA01-0AA1-Z
3	Sensor de temperatura PT100 analógico	SIEMENS	7mc1006-1da11
6	Sensor de distancia infrarrojo	OMRON	E3Z-R81
6	Reflector de sensor infrarrojo	OMRON	E39-R2
5	Switch de proximidad inductivo	-	-
5	Switch de proximidad capacitivo	OMRON	E2K-X8MF1
2	Sensor de proximidad ultrasónico	OMRON	e4b-t1se4
1	Sensor de presión	OMRON	E8Y-A5Y

Cuadro 8: Inventario de sensores y actuadores, laboratorio J305

Siglas	Descripción
FE	Sensor de coriolis
TE	Sensor de temperatura
LE	Sensor de posición

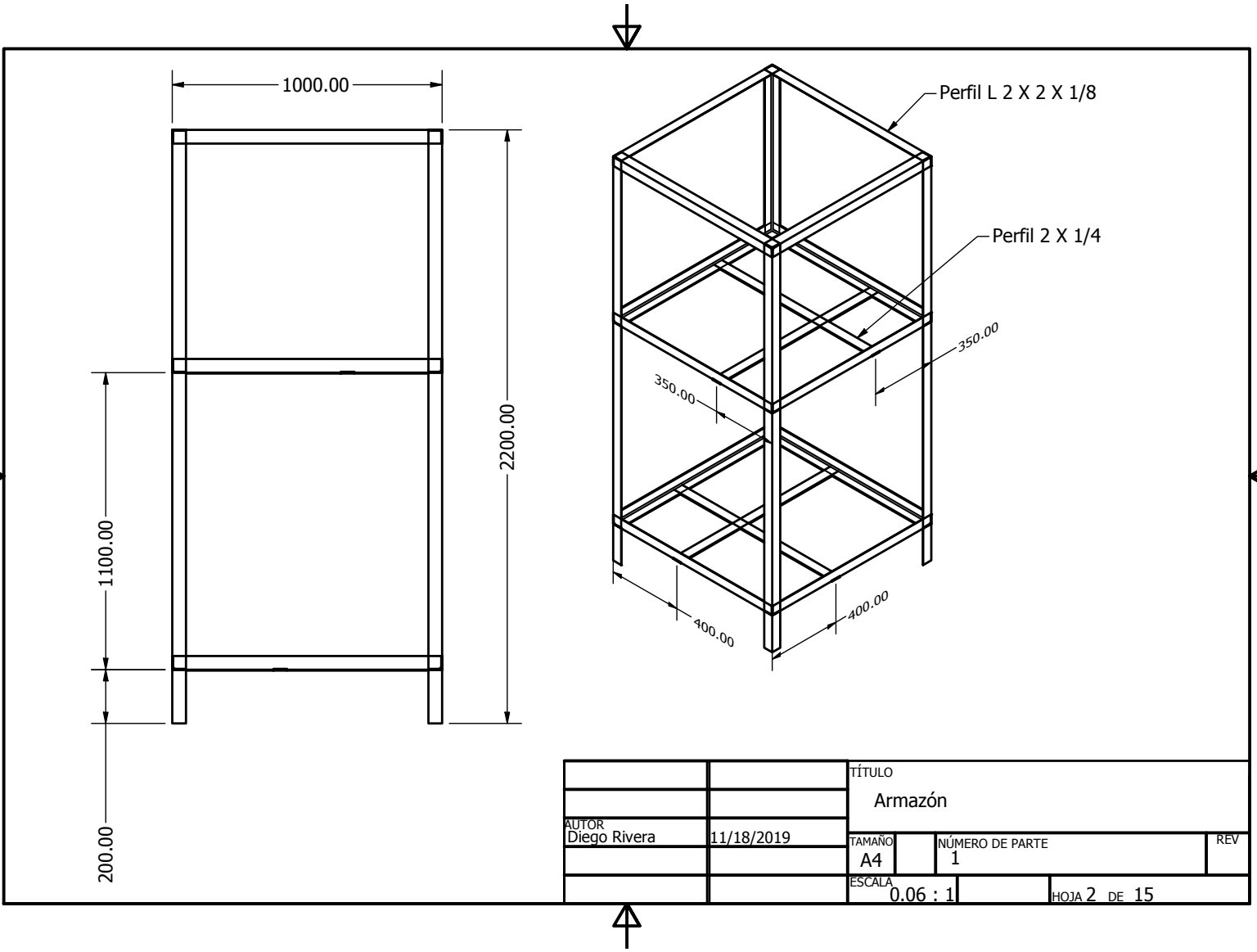
Cuadro 9: Descripción de la nomenclatura utilizada en el diagrama P&D

19.2. Planos



Sistema de recirculación de agua de
circuito cerrado didáctico

Diego Rivera



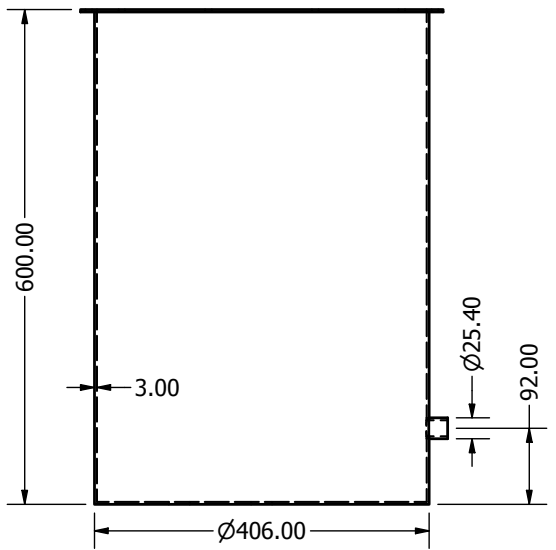
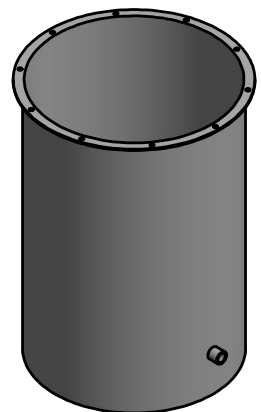
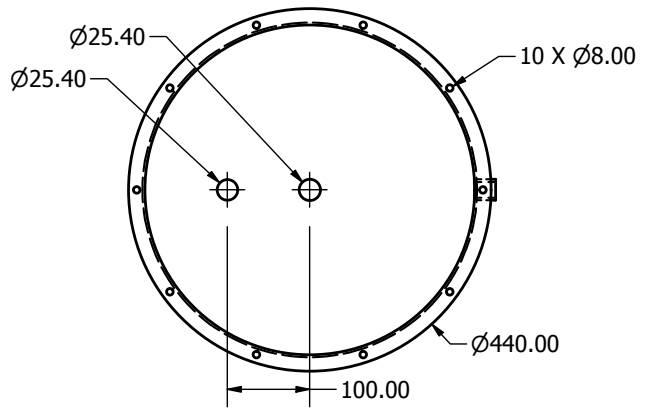


Lámina de acero inoxidable grosor de 3mm

		TÍTULO		
		Tanque de suministro		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	2	
		ESCALA	HOJA 3 DE 15	
		0.15 : 1		



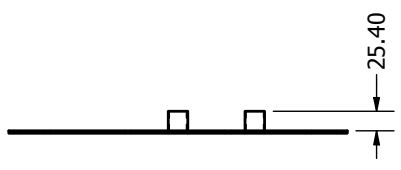
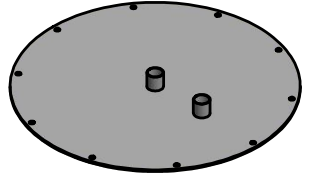
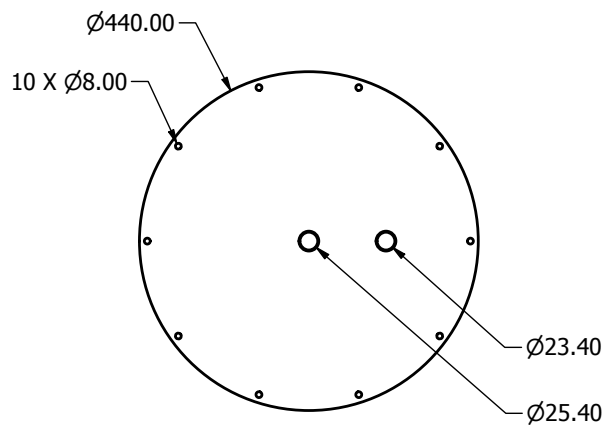


Lámina de acero inoxidable grosor de 3mm

		TÍTULO		
		Tapadera de tanque de suministro		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	3	
		ESCALA	HOJA 4 DE 15	
		0.14 : 1		

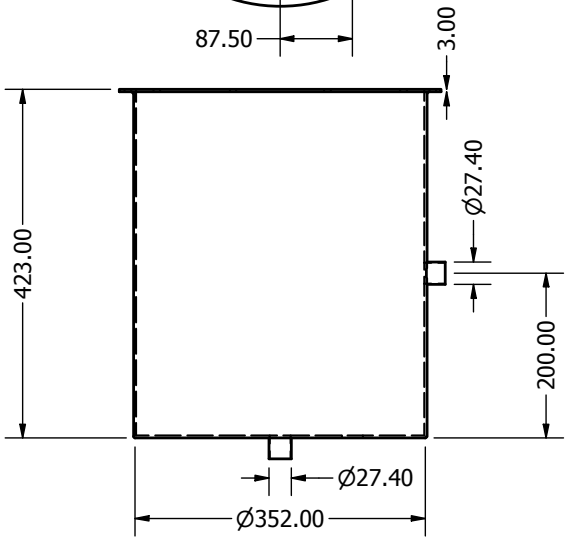
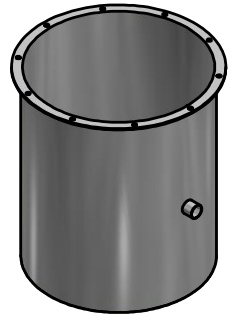
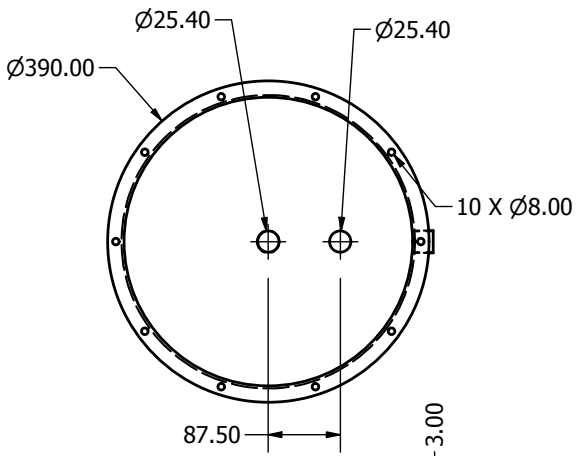
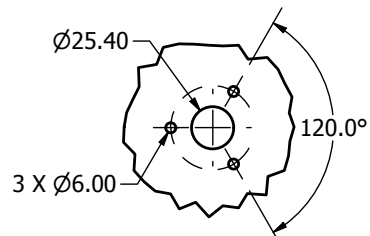
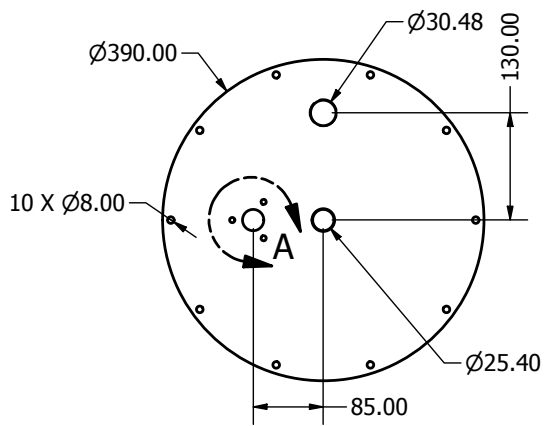


Lámina de acero inoxidable grosor de 3mm

		TÍTULO		
		Tanque agitador		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	4	
		ESCALA	HOJA 5 DE 15	
		0.15 : 1		



DETALLE A
ESCALA 0.30 : 1

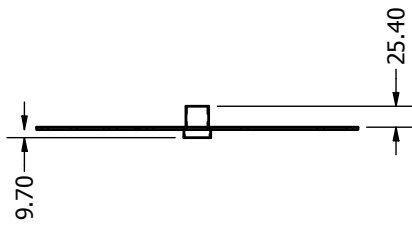


Lámina de acero inoxidable grosor de 3mm

		TÍTULO		
		Tapadera tanque agitador		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	5	
		ESCALA	HOJA 6 DE 15	
		0.15 : 1		

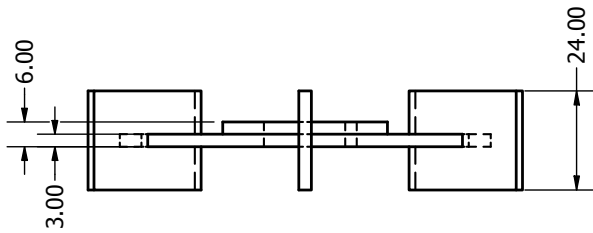
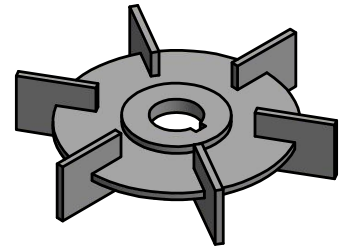
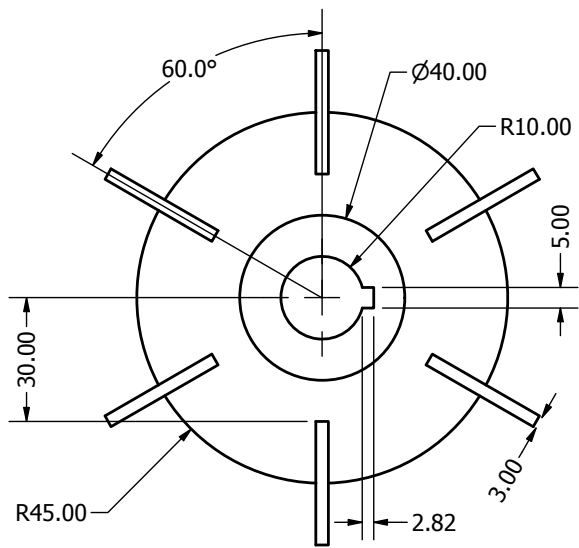
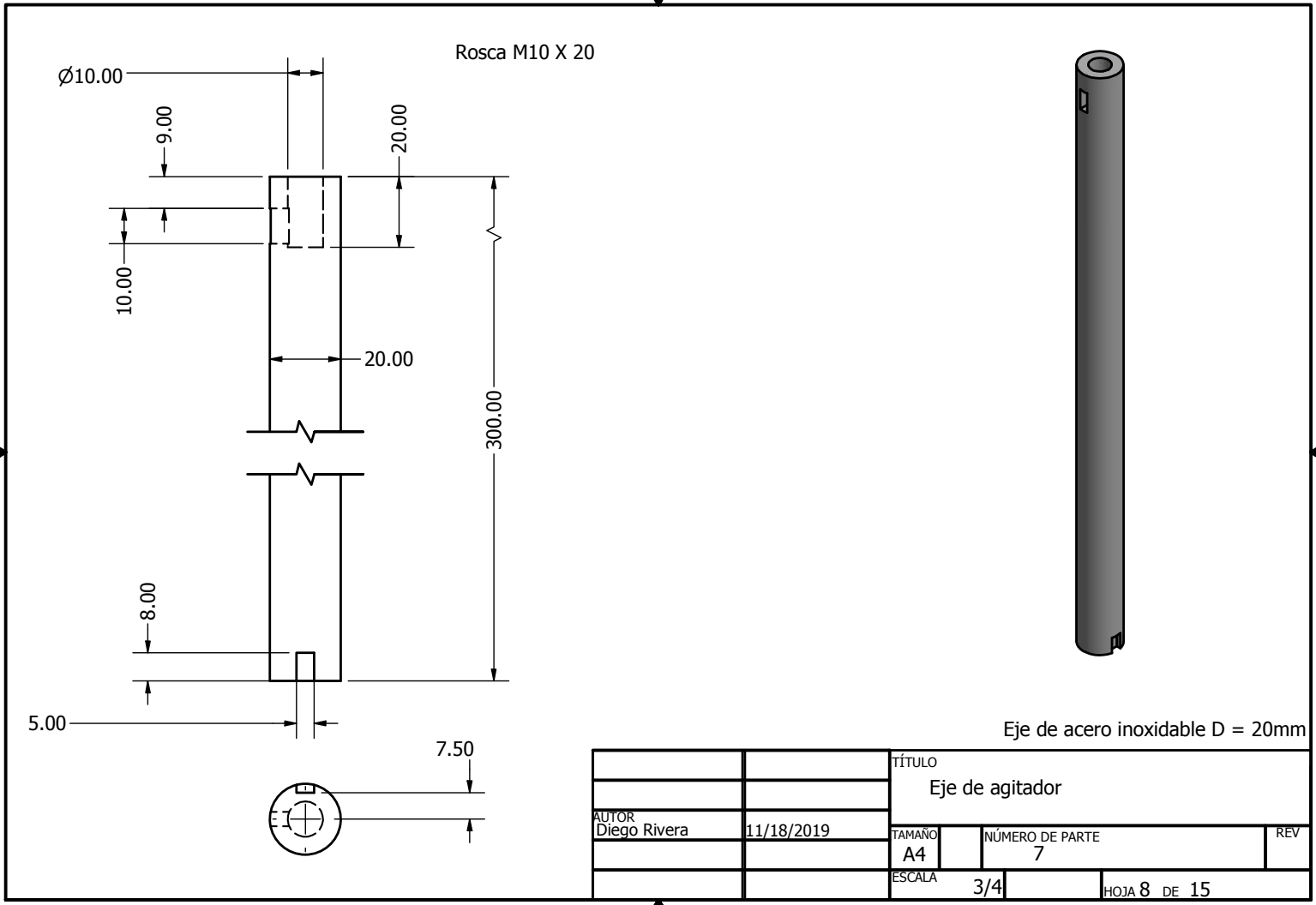


Lámina de acero inoxidable grosor de 3mm

		TÍTULO		
		Actuador de 6 hoja		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	6	
		ESCALA	3/4	HOJA 7 DE 15



Rosca M10 X 20

Ø10.00

9.00

20.00

10.00

20.00

300.00

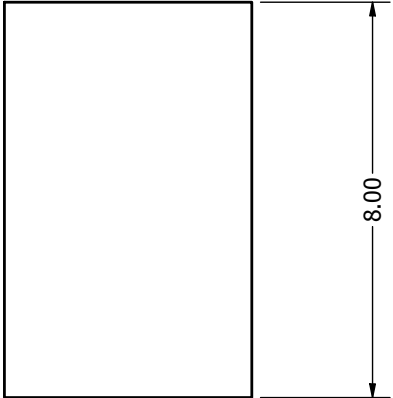
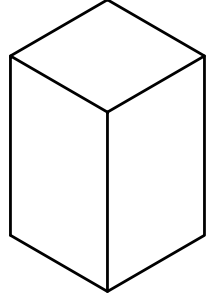
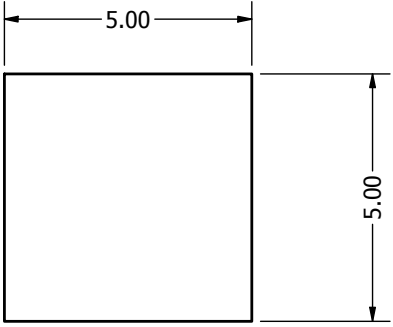
8.00

5.00

7.50

Eje de acero inoxidable D = 20mm

		TÍTULO		
		Eje de agitador		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	7	
		ESCALA	3/4	HOJA 8 DE 15



		TÍTULO		
		Cuña de eje agitador		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	8	
		ESCALA	9 : 1	HOJA 9 DE 15

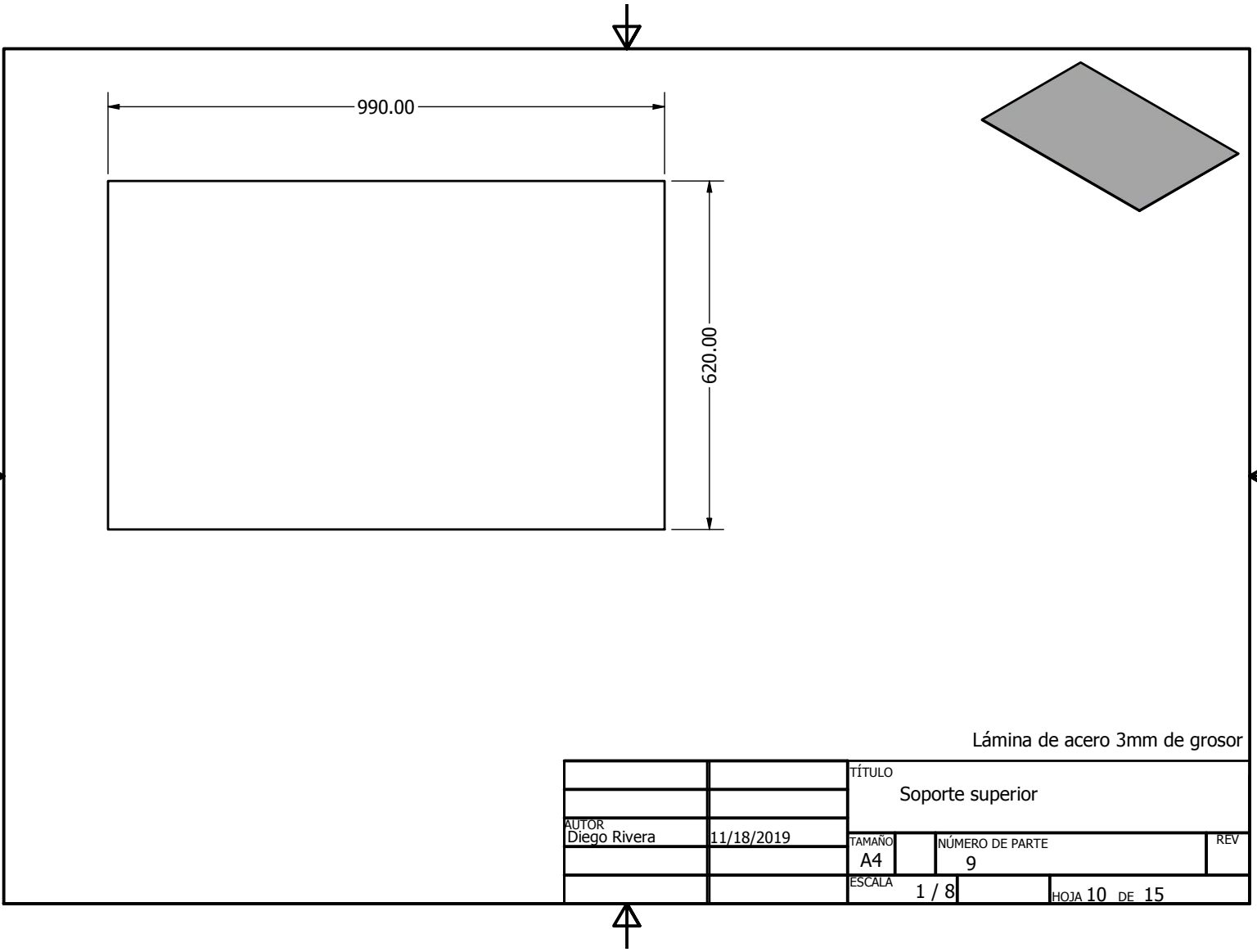


Lámina de acero 3mm de grosor

		TÍTULO		
		Soporte superior		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	9	
		ESCALA	1 / 8	HOJA 10 DE 15

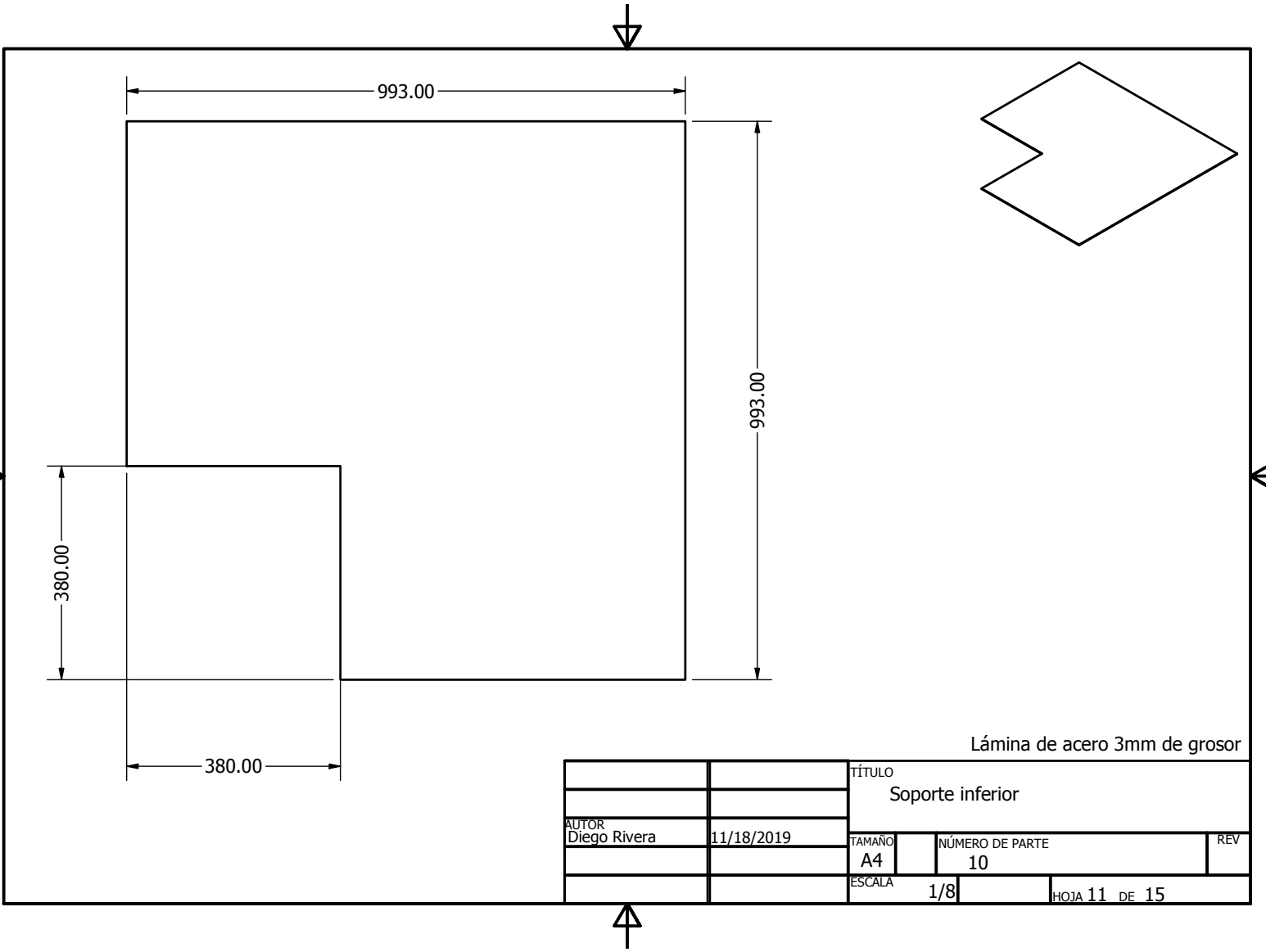
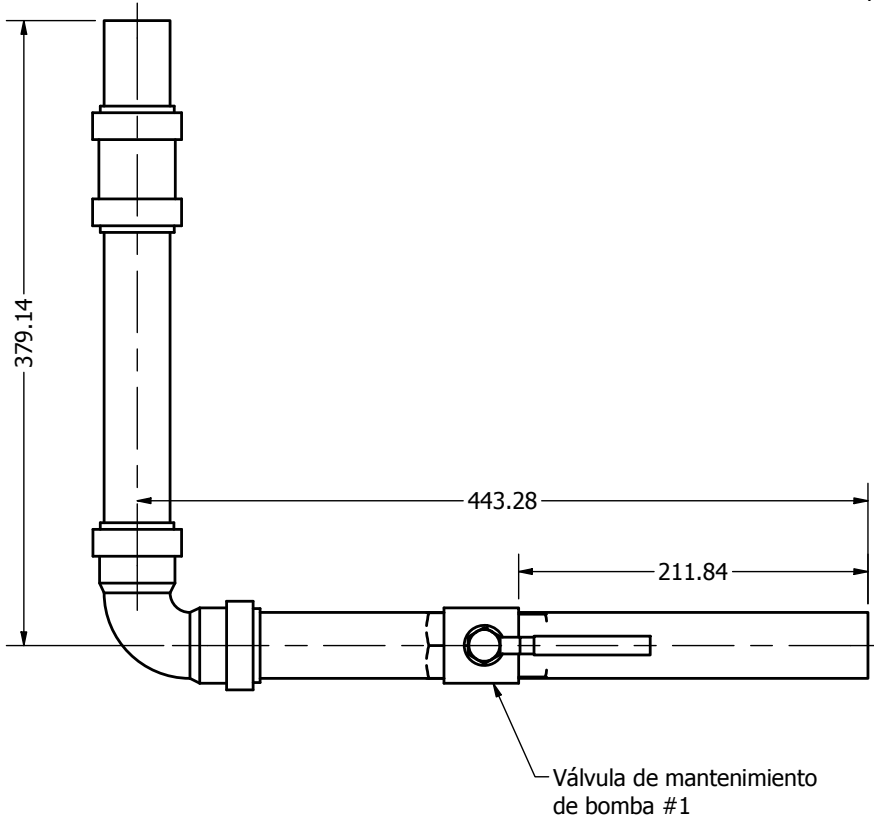


Lámina de acero 3mm de grosor

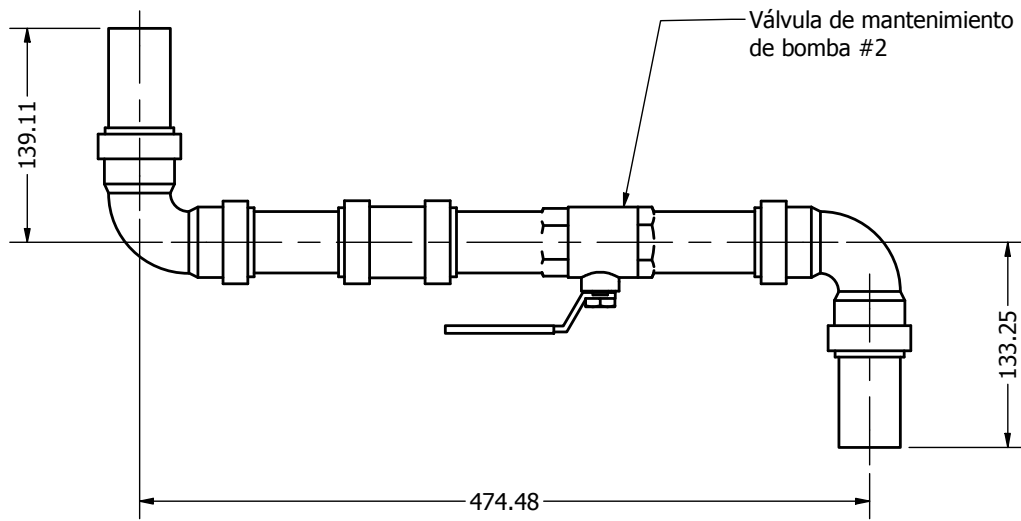
		TÍTULO		
		Soporte inferior		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	10	
		ESCALA	1/8	HOJA 11 DE 15

Toda la tubería con un diámetro de 1 in
Tubería PVC

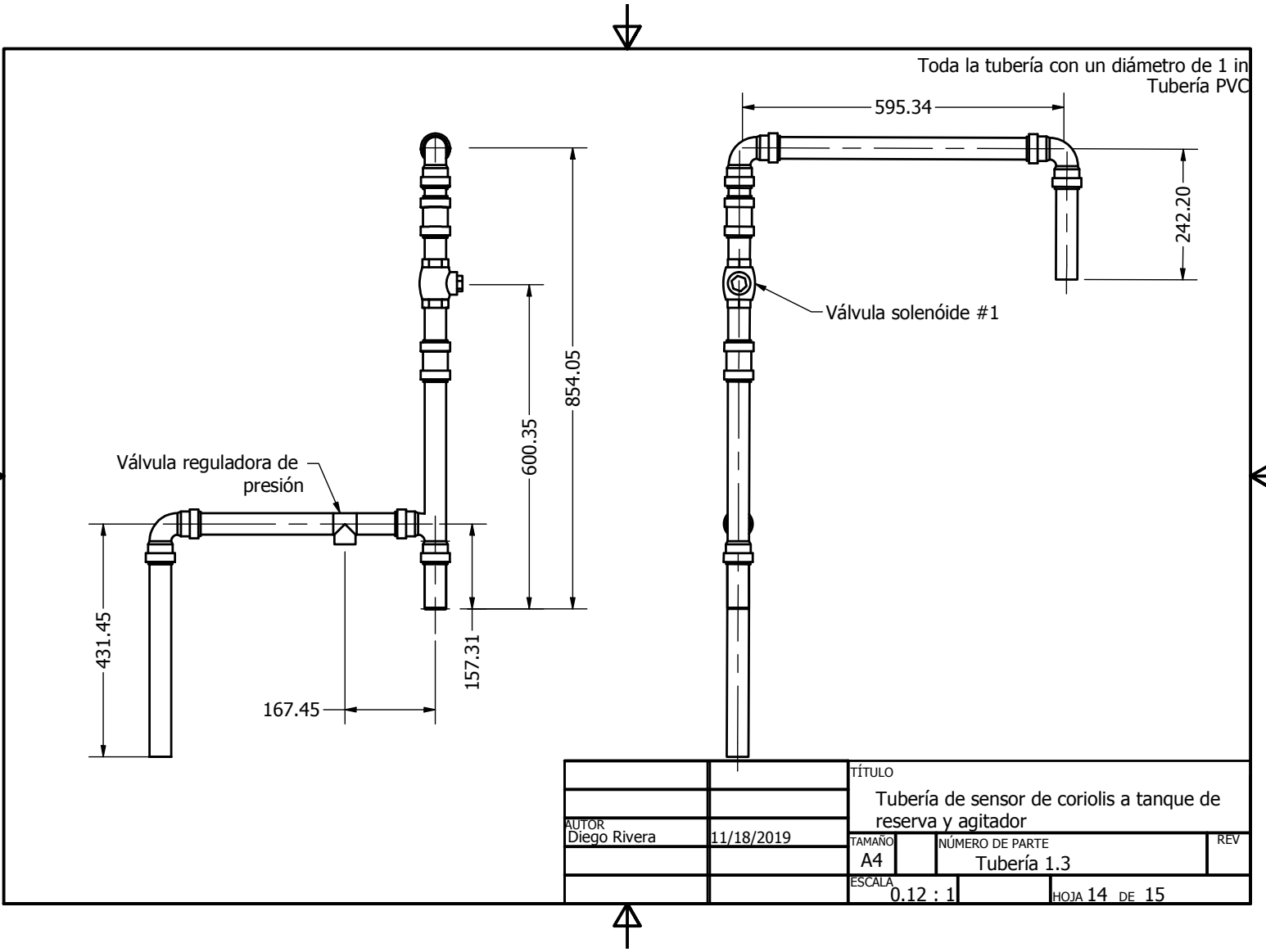


		TÍTULO		
		Tubería tanque de suministro a bomba		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	Tubería 1.1	
		ESCALA	0.3 : 1	HOJA 12 DE 15

Toda la tubería con un diámetro de 1 in
Tubería PVC



		TÍTULO		
		Tubería de bomba a sensor de flujo másico		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	Tubería 1.2	
		ESCALA		HOJA 13 DE 15
		0.28 : 1		



Toda la tubería con un diámetro de 1 in
Tubería PVC

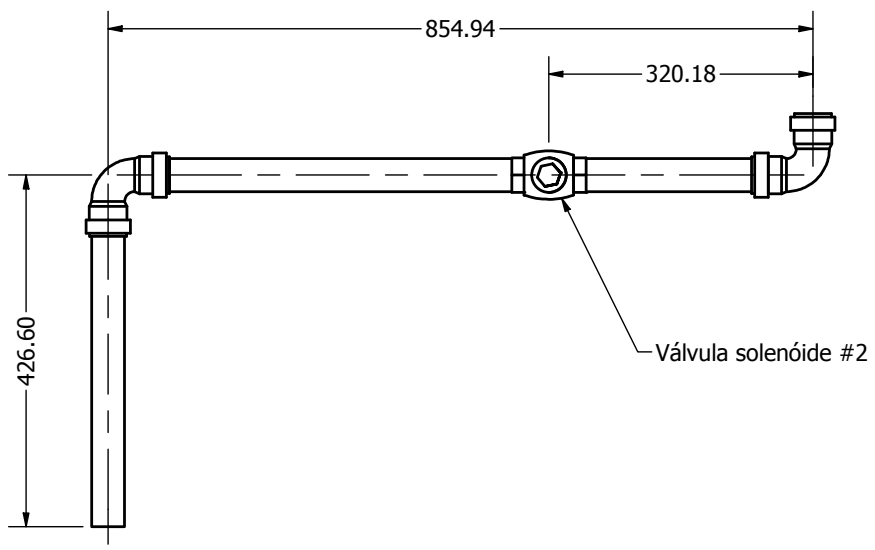
Válvula reguladora de presión

Válvula solenóide #1

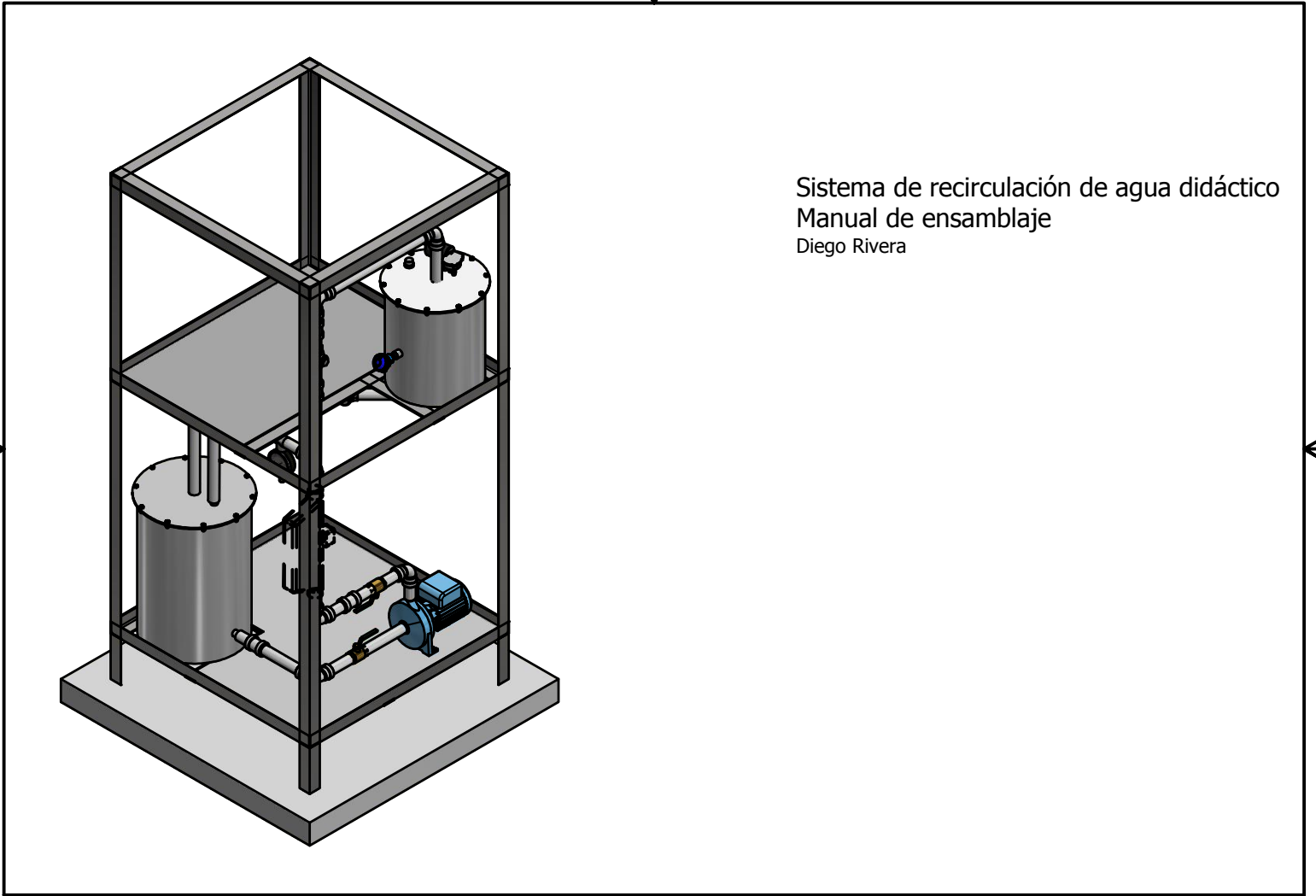
		TÍTULO		
		Tubería de sensor de coriolis a tanque de reserva y agitador		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	Tubería 1.3	
		ESCALA	HOJA 14 DE 15	
		0.12 : 1		



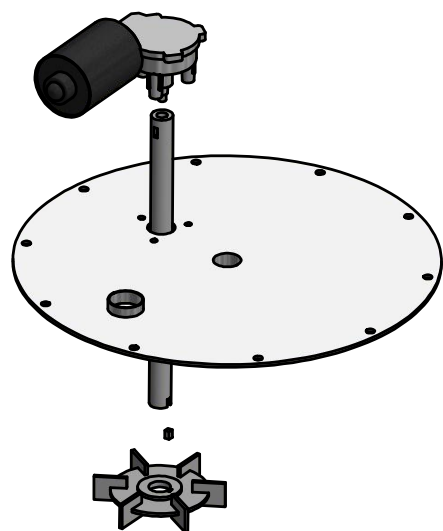
Toda la tubería con un diámetro de 1 in
Tubería PVC



		TÍTULO		
		Tubería de tanque agitador a tanque de suministro		
AUTOR	11/18/2019	TAMAÑO	NÚMERO DE PARTE	REV
Diego Rivera		A4	Tubería 1.4	
		ESCALA	0.15 : 1	HOJA 15 DE 15

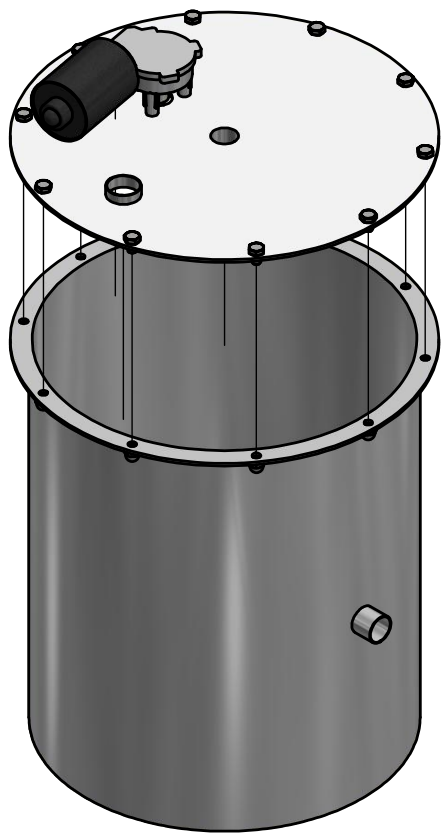


Sistema de recirculación de agua didáctico
Manual de ensamblaje
Diego Rivera



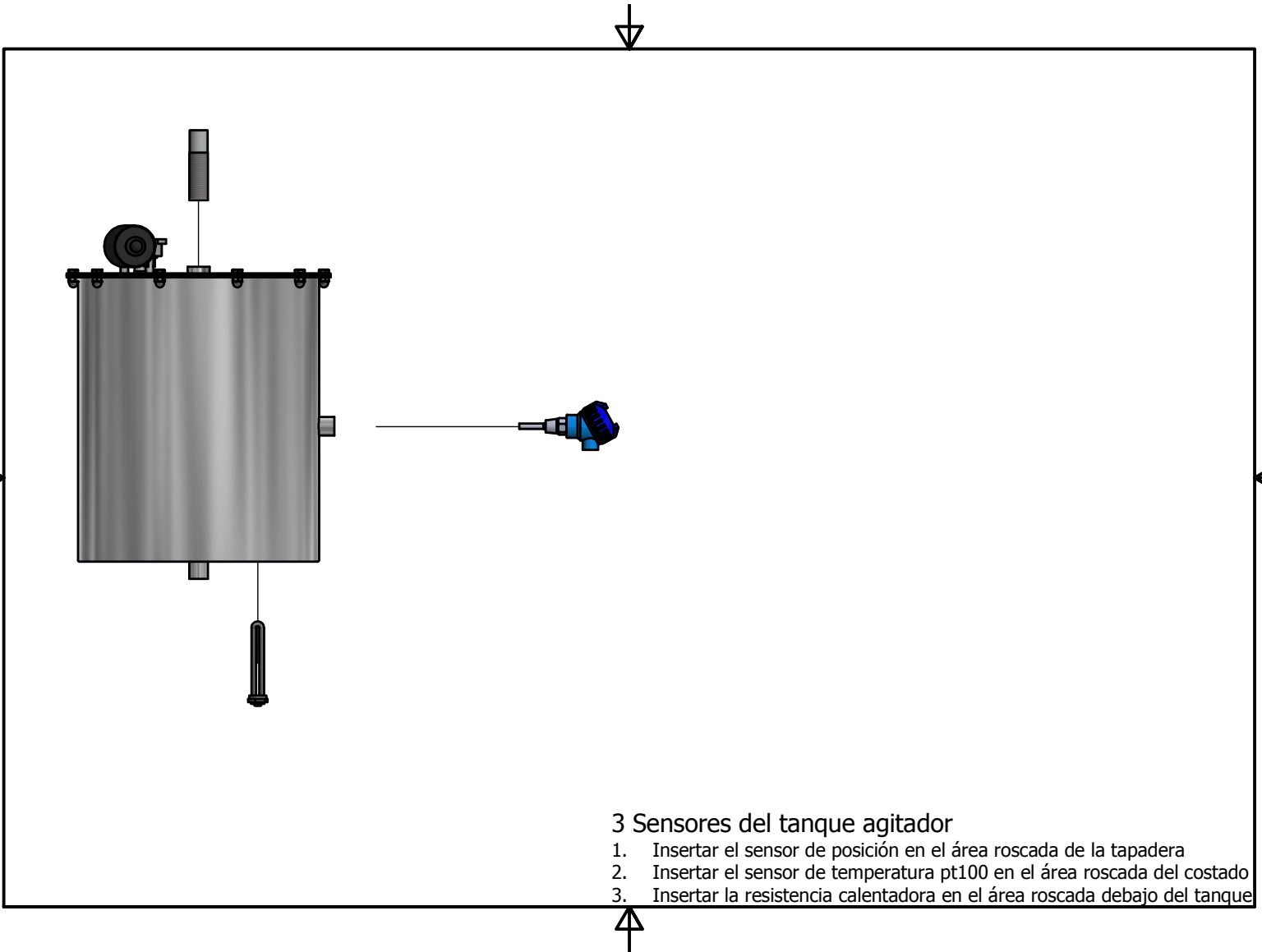
1 Sistema de agitador

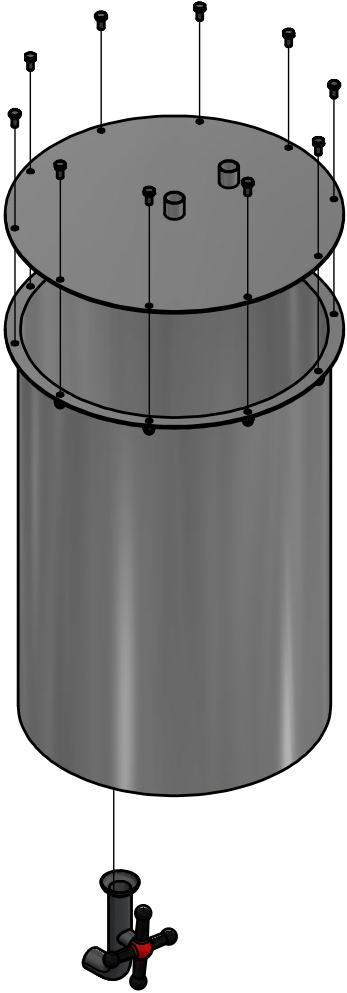
1. Insertar la barra roscada en el eje de salida del motor
2. Asegurarse que el eje sobresalga por la tapadera del tanque agitador
3. Asegurarse que el eje esté colocado en el agujero correcto
4. Insertar el actuador de 6 hojas y la cuña en el eje
5. Atornillar el motor del agitador con tornillos M4 a la tapadera



2 Tanque agitador

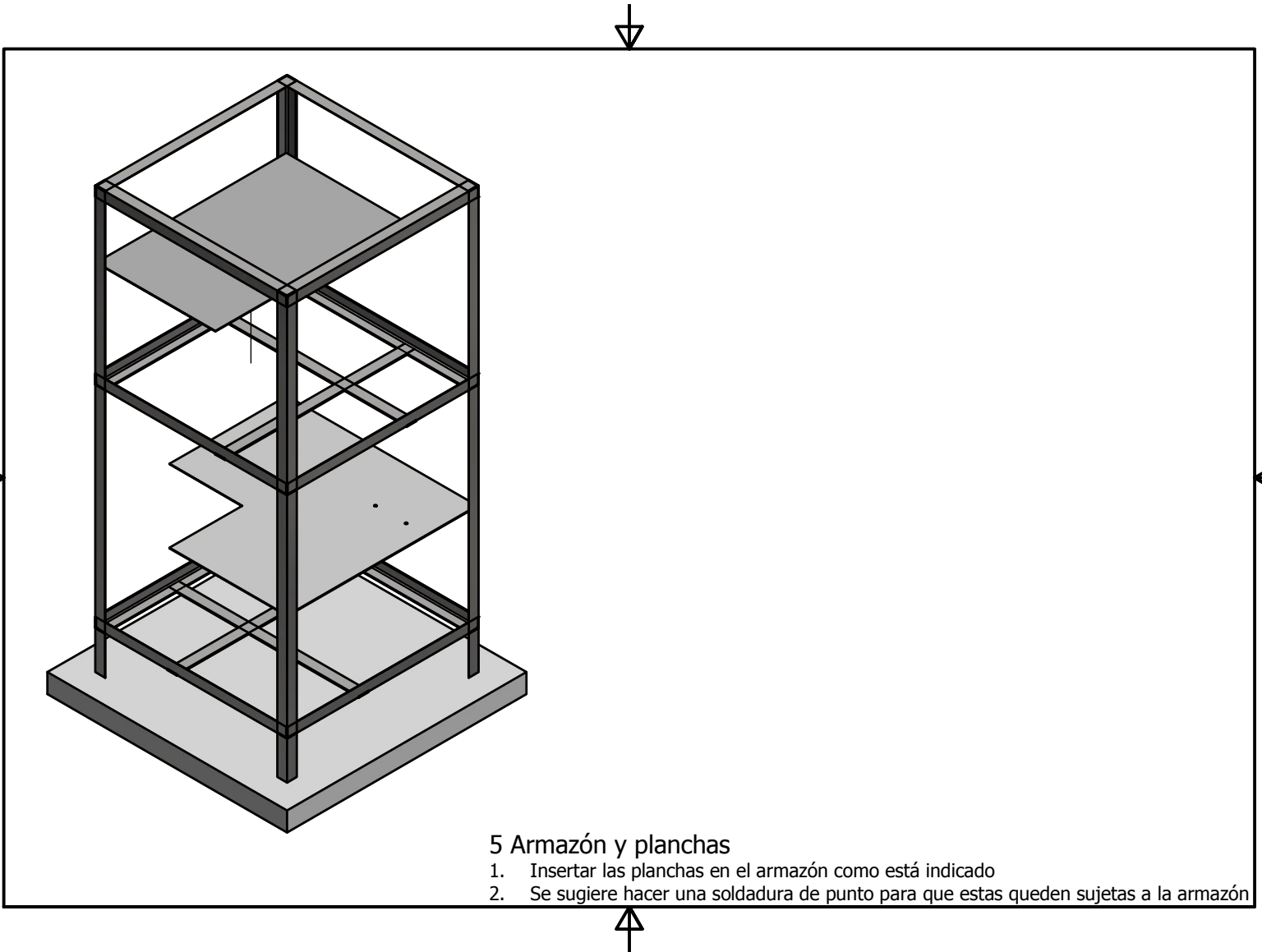
1. Atornillar la tapadera del tanque agitador al tanque con tornillos M8 X10
2. Asegurar los tornillos con tuercas te tapa

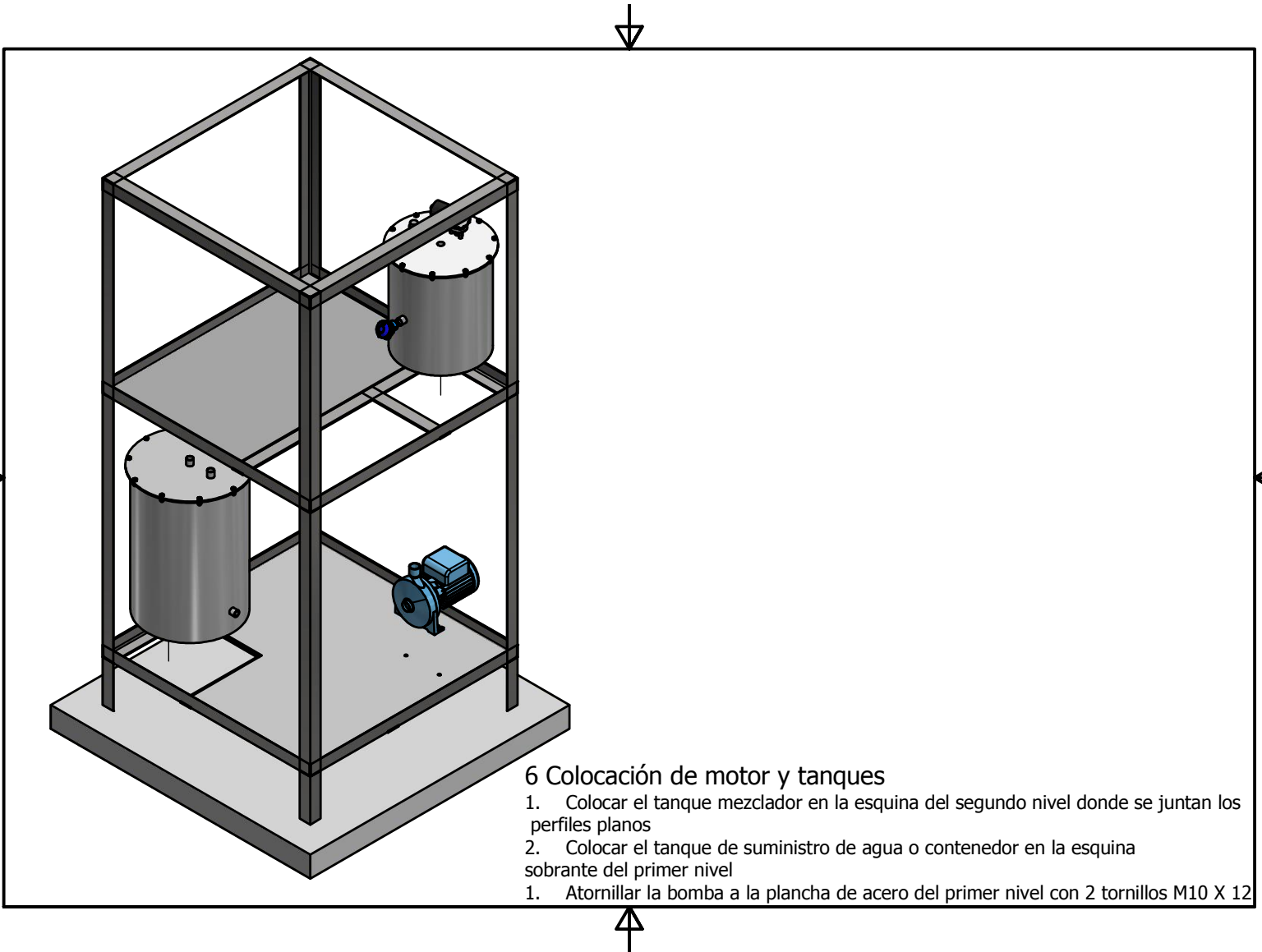


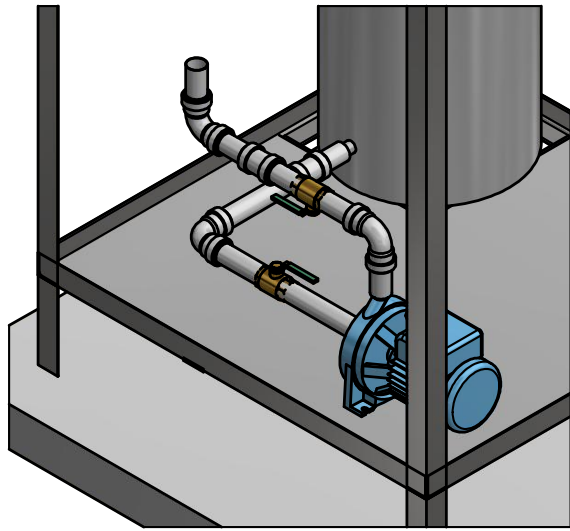


4 Tanque contenedor

1. Atornillar la tapa del tanque con 10 tornillos M8 X 10
2. Asegurarse que la toma de agua desfasada del centro, no concuerde con la rosca del grifo
3. Asegurar los tornillos con tuercas de copa
4. Insertar grifo en el área roscada debajo del tanque

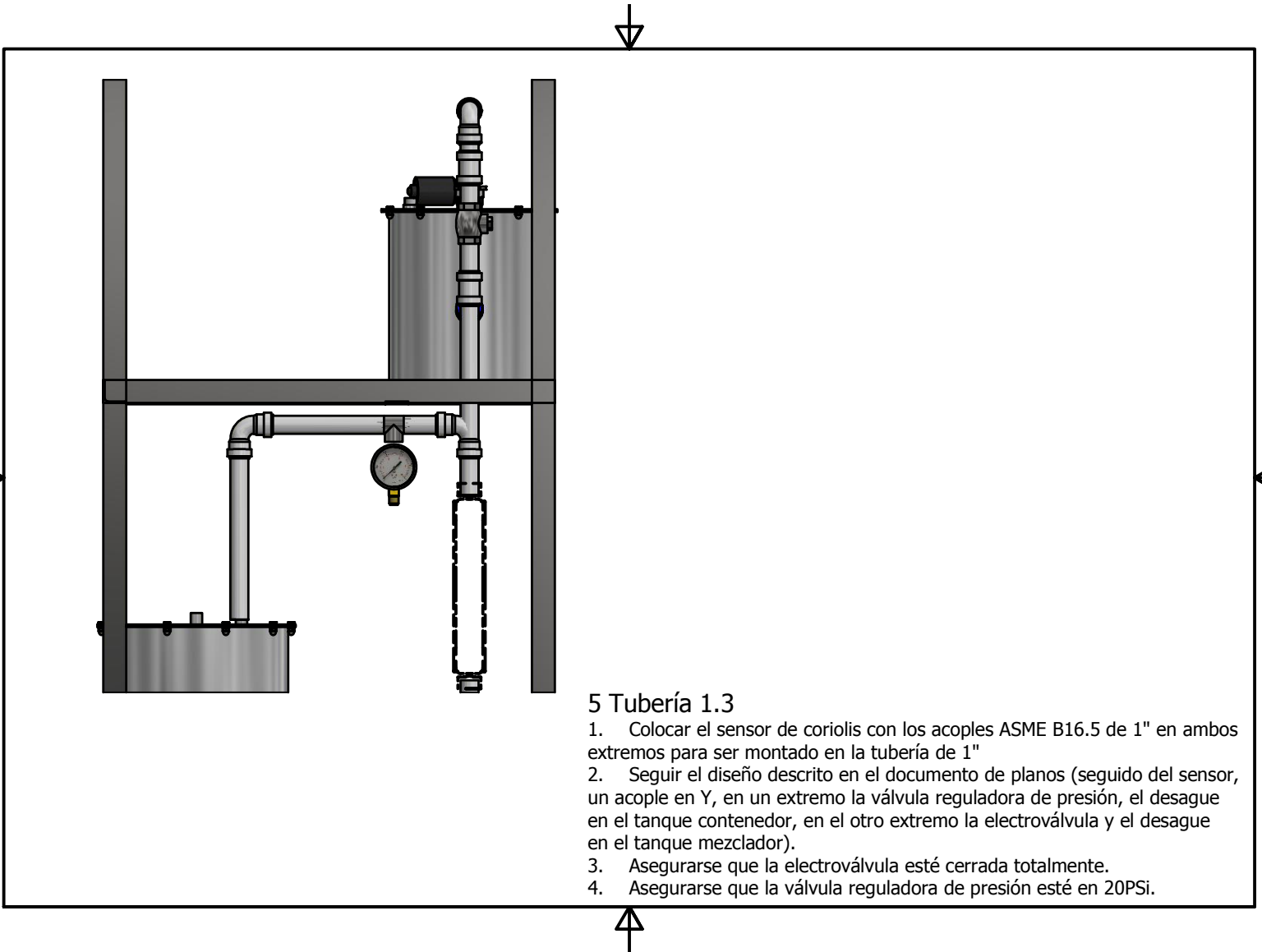


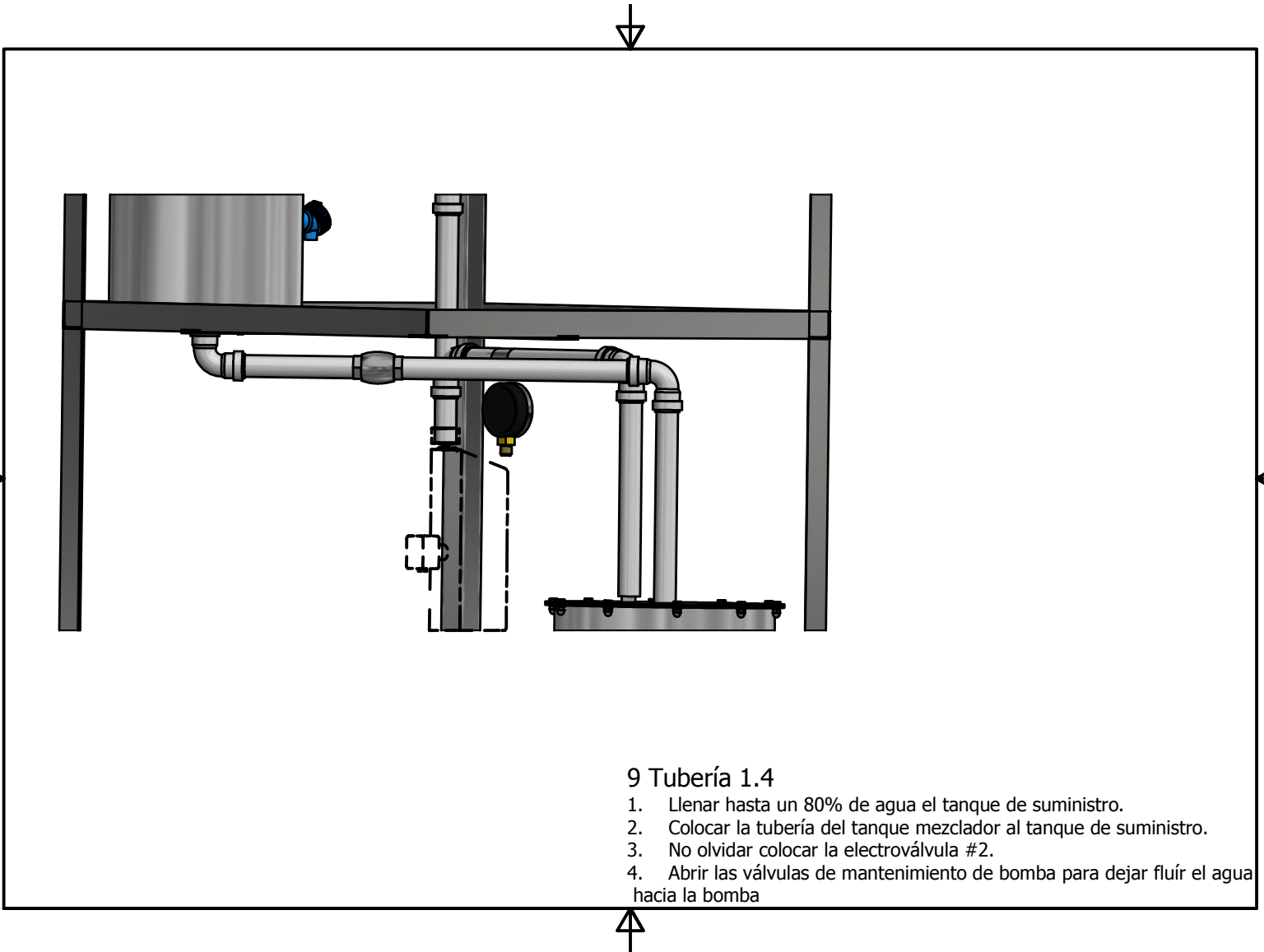


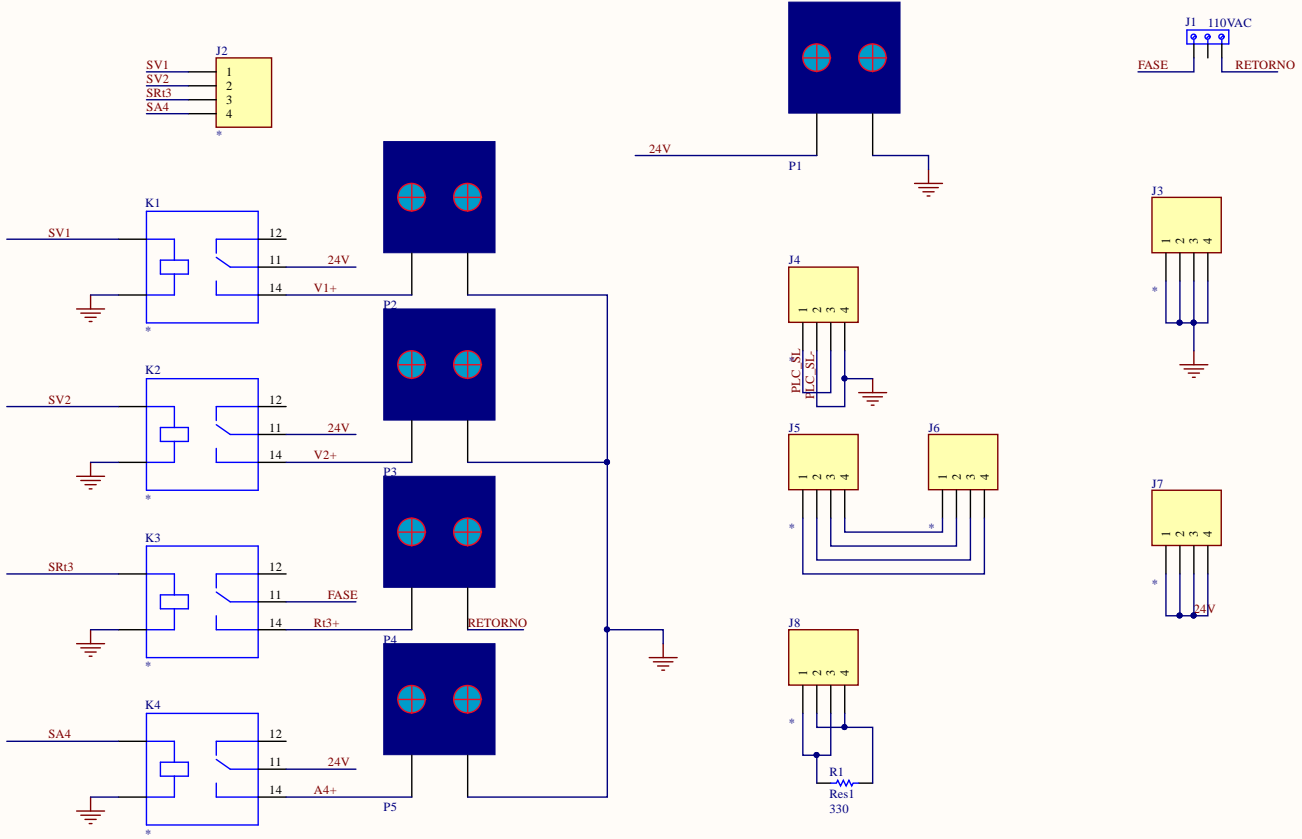


7 Tubería 1.1

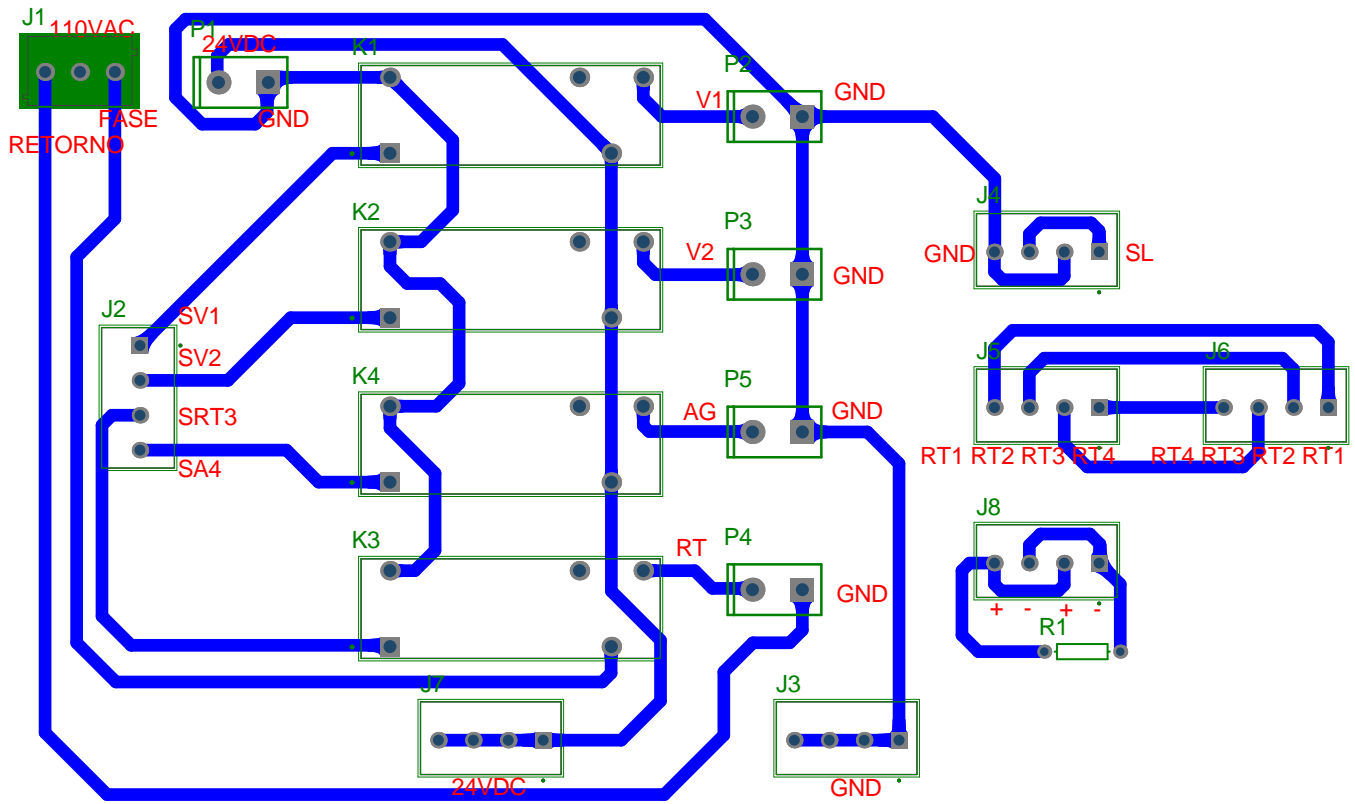
1. Colocar la tubería del tanque de suministro a la bomba como se describe en los planos para la parte tubería 1.1 y 1.2
1. Tomar en cuenta que las válvulas de mantenimiento deben estar cerradas
2. Insertar al final de la tubería 1.2, antes del sensor de efecto coriolis el acople ASME B16.5 de 1" o similar para un correcto montaje







Title		
Size A4	Number	Revision
Date:	15/06/2020	Sheet of
File:	D:\Users\...DiagramaDeConexion.SchDwg Drawn By:	



Bill of Materials

<Parameter Title not found>

Source Data From: PCB_Caja_PLC.PrjPcb
Project: PCB_Caja_PLC.PrjPcb
Variant: None

Creation Date: 15/06/2020 01:24:24
Print Date: 15-Jun-20 1:24:29 AM

Footprint	Comment	LibRef	Designator	Description	Quantity
691103110003	110VAC	691103110003	J1	3 Position Wire to Board Terminal Block Horizontal with Board 0.138 _3.50mm_ Through Hole	1
TE_1776112-4	1776112-4	1776112-4	J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8	Buchanan Series 4 Position AWG 16-28 Black PCB Through Hole Terminal Block	7
RELAY_1-1393223-7	1-1393223-7	1-1393223-7	K1, K2, K3, K4	General Purpose Relay SPDT (1 Form C) 24VDC Coil Through Hole	4
Terminal 2	Terminal Block 2 pins	Terminal 2	P1, P2, P3, P4, P5	Terminal Block 2 pins	5
AXIAL-0.3	Res1	Res1	R1	Resistor	1
					18

Approved	Notes



Universidad del Valle de Guatemala

MANUAL DE USUARIO MÓDULO DIDÁCTICO DE RECIRCULACIÓN DE AGUA

Versión 1

DIEGO FERNANDO, RIVERA ESCOBAR
12-5-2019

Contenido

Descripción del módulo	2
Diagrama de flujo del funcionamiento	3
Diagrama P&ID.....	4
Señales del sistema	4
Señales de entrada	4
Señales de salida	4
Interfaz.....	5
Unidad de conexión analógica y digital	5
Descripción e implementación de sensores	7
Sensor de temperatura (RTD) PT100.....	7
Configuración física.....	7
Configuración de hardware.....	7
Conexión eléctrica	8
Sensor de flujo de efecto Coriolis.....	9
Especificaciones.....	9
Funcionamiento.....	9
Características de instalación y uso	10
Comunicación del Transmisor	10
Funcionamiento Protocolo HART	11
Configuración de Hardware	12
Bomba centrífuga trifásica.....	16
Creación del proyecto en SIMATIC MANAGER.....	16
Configuración interfaz de comunicación en el variador de frecuencia	17
Ajuste de parámetros en el variador de frecuencia	17
Programación básica en el PLC.....	18

Descripción del módulo

El sistema de recirculación de agua consta de tres partes diferentes, los recipientes y tuberías que distribuyen el agua; los actuadores que realizan alguna acción en calentar, enfriar o dejar pasar el agua de un lado a otro (entre otras cosas); y los sensores que determinan el estado, no solo del líquido contenido, si no del sistema en sí. Cada uno de los elementos juegan un rol importante en el aprendizaje del estudiante para poder comprender e implementar correctamente los sensores y actuadores de índole industrial.

El prototipo consta de dos tanques almacenadores de agua. El tanque No. 1 funciona como contenedor general de agua y está colocado en la parte inferior del armazón. El tanque No. 2 se encarga de realizar los cambios físicos y ciertas medidas al agua suministrada por la bomba hidráulica encontrada en la salida del tanque 1. En este lugar se encuentran: el calentador de agua, el motor mezclador, el sensor de temperatura PT100 y el sensor de posición ultrasónico Tough Sonic 3.

En la tubería entre los tanques se encuentran dos electroválvulas que determinan el paso del agua entre ellos. Cada uno de los elementos mencionados aportan dinámica al sistema y permiten que los usuarios utilicen dichos sensores y actuadores para interpretar sus señales y reconocer sus funciones.

Diagrama de flujo del funcionamiento

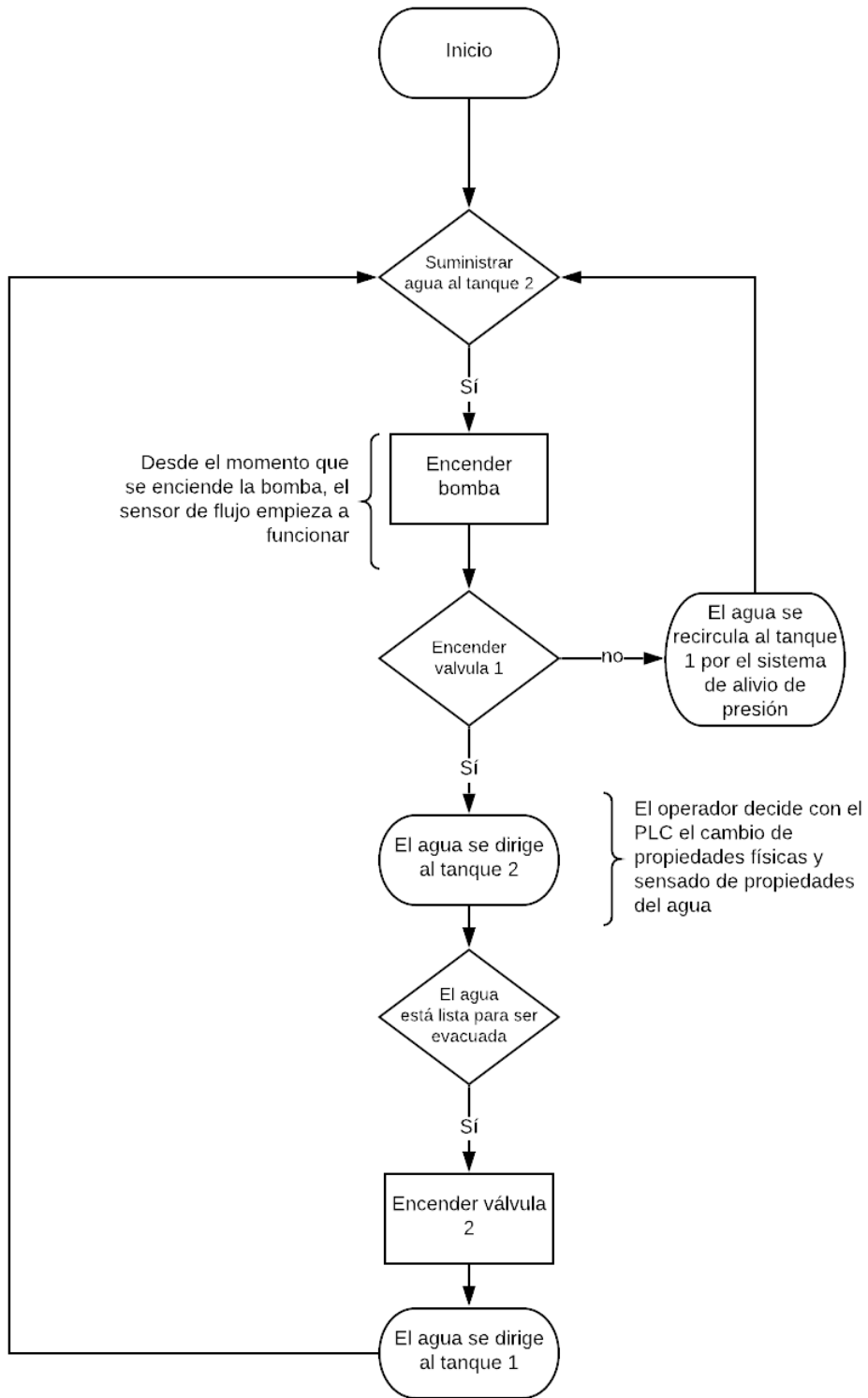
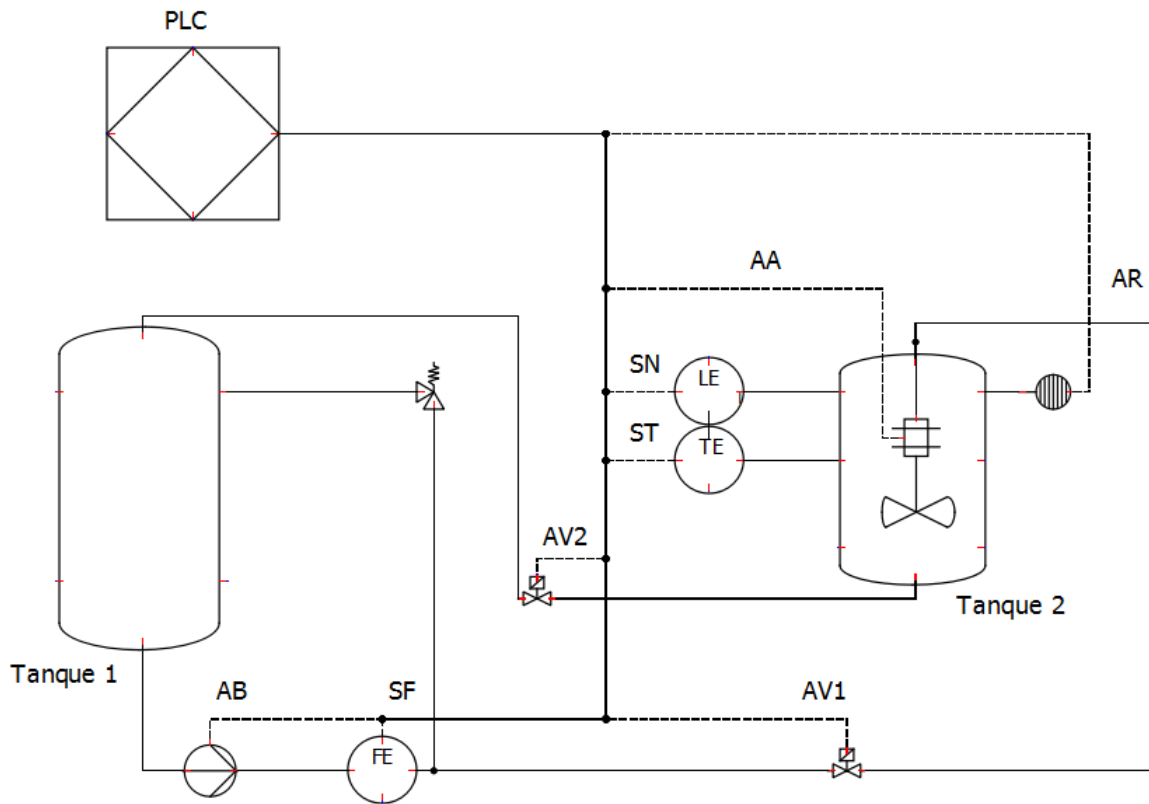


Diagrama P&ID



Señales del sistema

Señales de entrada

Señal	Tipo	Descripción
SN	Analógico	Sensor de nivel
ST	Analógico	Sensor de temperatura
SF	Analógico	Sensor de flujo

Señales de salida

Señal	Tipo	Descripción
AB	Analógico	Bomba centrífuga
AV1	Digital	Válvula solenoide 1
AV2	Digital	Válvula solenoide 2
AR	Digital	Resistencia calentador de agua
AA	Digital	Motor agitador

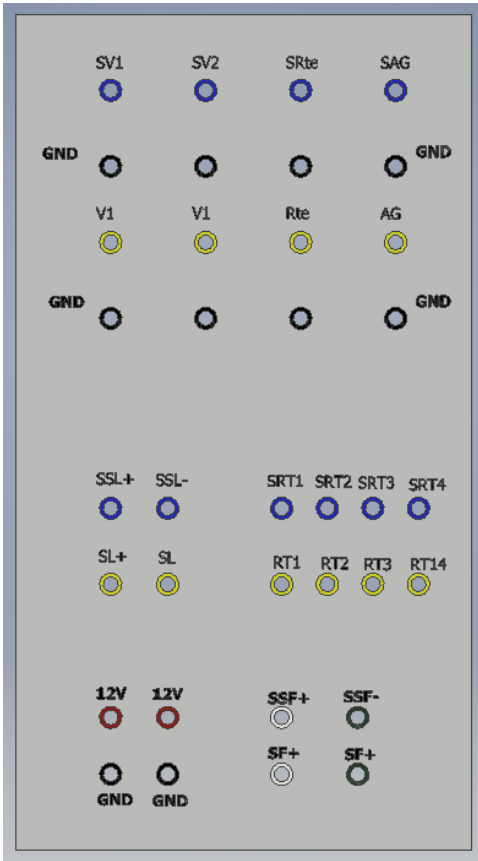
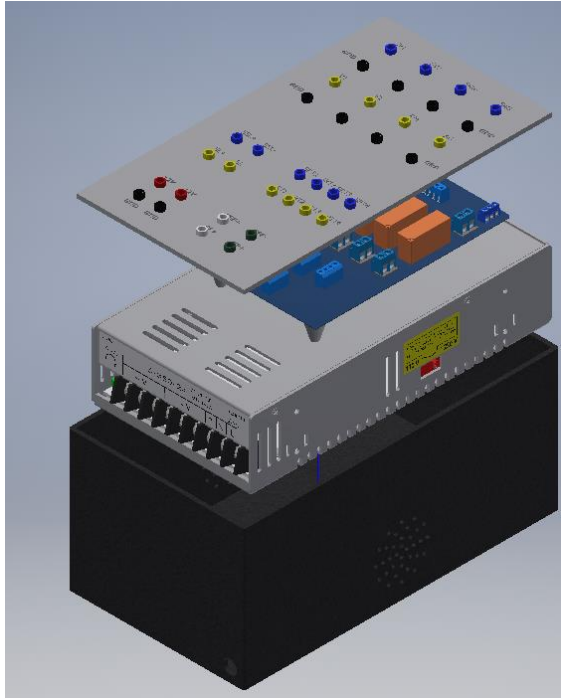
Interfaz

Unidad de conexión analógica y digital

Para las conexiones de las entradas y salidas analógicas del módulo propuesto con el PLC a utilizar en el curso de instrumentación y automatización electrónica. Este módulo sirve como interconexión fácil y rápida entre el usuario y el prototipo. Con la ayuda de conectores de seguridad de 4 mm conseguidos en cualquier electrónica, se puede interconectar el módulo para asegurar un intercambio de señales fácil y rápido.

Características

- Fuente de alimentación de 24V
- 8 entradas formando 4 grupos de canales de entrada analógica (pares)
- 10 canales de salida analógica
- Señal tierra (GND)
- Corriente máxima 5 A
- Grosor del cobre 2 oz/ft²
- Temperatura máxima 40°C
- Temperatura ambiente 24°C
- Longitud del track 100mm
- Voltaje máximo 24V
- Grosor de track 50 mils



Descripción e implementación de sensores

Sensor de temperatura (RTD) PT100

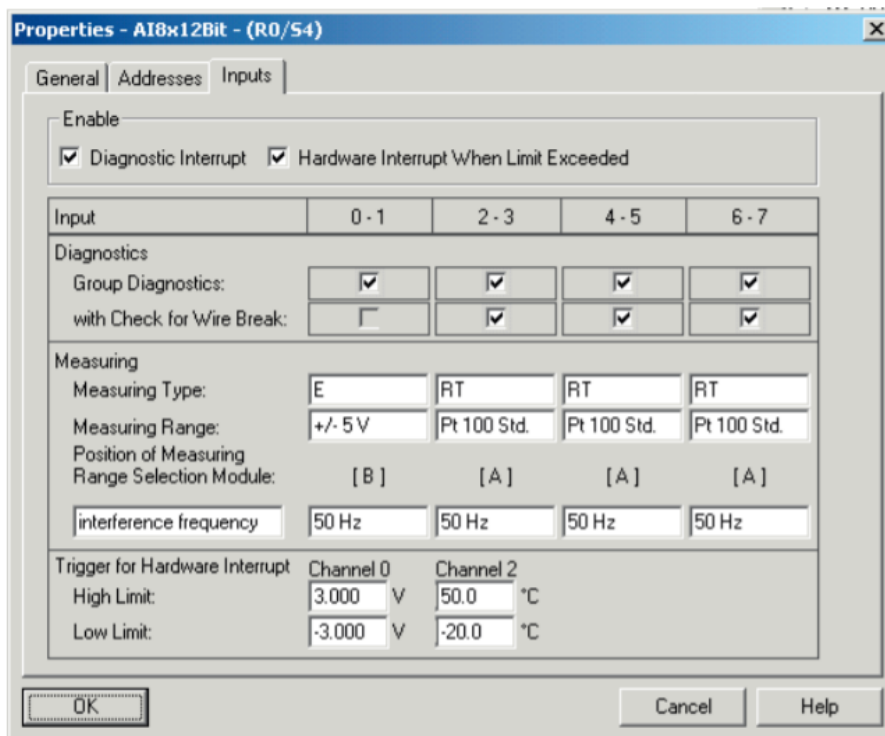
*****La conexión del sensor de temperatura y su uso se tomó directamente de la práctica de laboratorio 7 del curso de Instrumentación Electrónica del Depto. De ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la Universidad del Valle de Guatemala. Todos los derechos reservados.

Configuración física

1. Ya que este módulo posee 8 canales analógicos agrupados en 4 parejas, cada pareja de canales puede configurarse para medir diferentes parámetros. Como se está utilizando una medición de resistencia, se debe seleccionar el canal A.

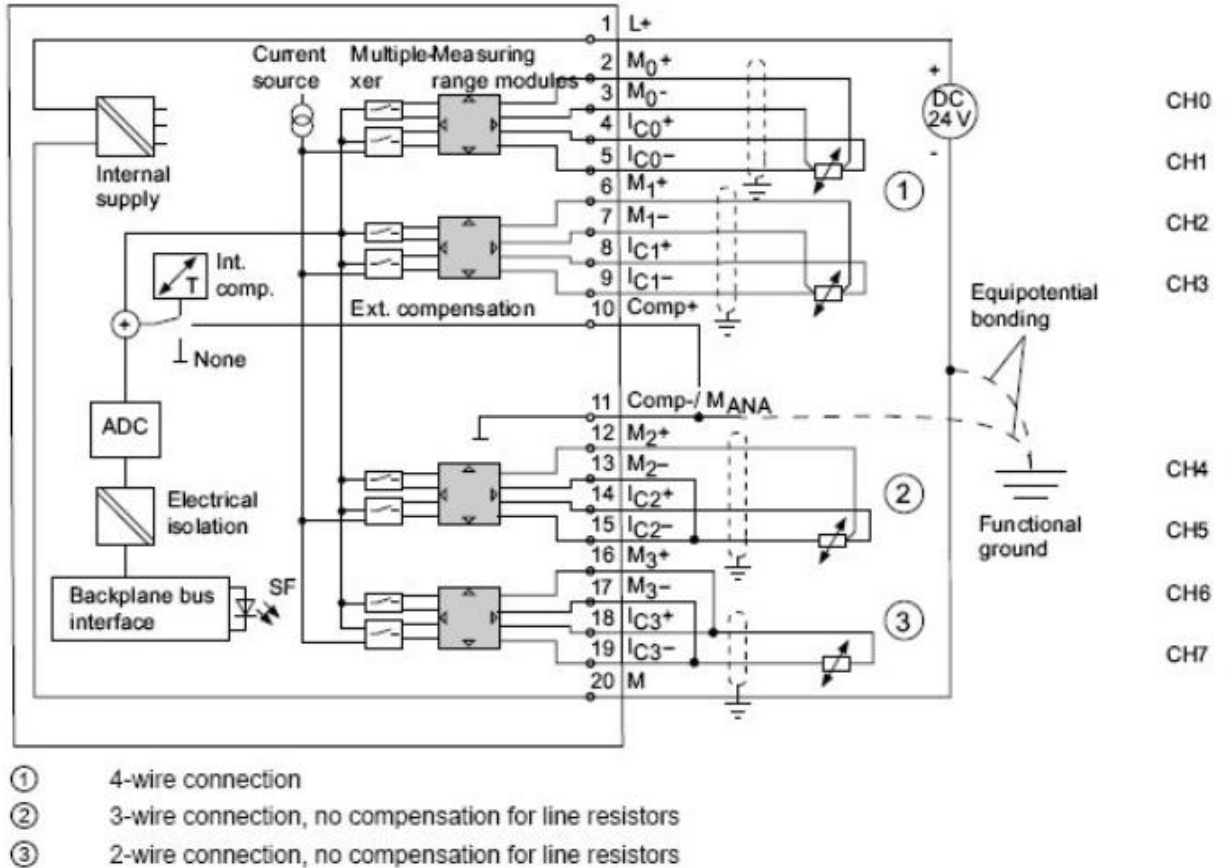
Configuración de hardware

2. Realice la configuración de hardware del módulo SM331 en el editor de hardware de SIMATIC Manager. El tipo de medición deberá indicar RT y en el rango de medición PT100 std. En la siguiente imagen se puede visualizar una configuración de Hardware para todos los canales existentes en el módulo, es necesario que en esta configuración solo se realice la conexión en el canal donde se realizará la conexión física.



Conexión eléctrica

3. Debido al cableado interno del RTD, la conexión que se debe realizar con el módulo SM331 es "2-wire" o dos conductores. En la siguiente imagen se puede observar, etiquetada con el número 3, la conexión adecuada a realizar, donde M+ e I_C+ están en paralelo.



Sensor de flujo de efecto Coriolis

*****Las especificaciones del sensor de flujo de efecto Coriolis y su uso se tomó directamente de la práctica de laboratorio 9 del curso de Instrumentación y Automatización Industrial del Depto. De ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la Universidad del Valle de Guatemala. Todos los derechos reservados.

Especificaciones

Nombre del sensor

Sensor de flujo de efecto Coriolis

Modelo del sensor

r025s113ncamezyzz

Calibración de flujo del sensor y respecto a qué temperatura

Se calibra respecto a 0°C

Calibración de densidad del sensor y respecto a qué temperatura

Se calibra respecto a 25°C

Temperatura máxima y mínima del sensor

-100°C a 150°C (Temperatura del Fluido)

-40°C a 60°C (Temperatura de Operación del sensor)

Modelo del transmisor

1700I12ABMEZZZ

Año de fabricación del transmisor

2017

Voltajes de alimentación del transmisor

18- 100 VDC

85-265 VAC



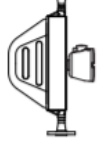
Funcionamiento

El sensor se aprovecha del efecto Coriolis, el cual determina que los elementos que atraviesan un medio en oscilación presentan una curvatura mientras atraviesan el medio. De esta manera se permite el ingreso de fluidos, líquidos o gases, por una tubería conectadas por un oscilador. Al oscilar el fluido se puede calcular la masa del fluido y conociendo las medidas del tubo se puede conocer el caudal. A través de la frecuencia de oscilación también es posible conocer la viscosidad del fluido.

Características de instalación y uso

¿Qué orientación aconseja colocar el sensor y para qué tipo de flujo?

Table 1-3: Recommended sensor orientation

Liquids	
Gases	
Slurries	

¿Qué aconseja para buenas prácticas con el uso del sensor?

- No se necesitan requerimientos especiales de la tubería del sensor Micro Motiron.
- Si el sensor está instalado en una tubería vertical, líquidos y lodos deben viajar hacia arriba por el sensor, los gases pueden viajar de arriba a abajo o de abajo para arriba.
- Los tubos del sensor deben estar llenos de líquido a toda hora
- Para flujo vacilante a través del sensor con una única válvula, se debe instalar la válvula después del sensor.
- Minimizar torsión y momentos en la tubería que sostiene al sensor, no utilizar el sensor para alinear tubería desalineada
- el sensor no requiere de soportes externos. Los acoples en el manual pueden soportar el sensor en cualquier orientación.

¿Qué cables (colores y que señal es cada una) posee el sensor (no el transmisor)?

Cable Rojo - terminal 1 (fuente de alimentación +)

Cable Negro - terminal 2 (fuente de alimentación -)

Cable Blanco - terminal 3 (RS-485/A)

Cable Verde - Terminal 4 (RS-485/B)

Comunicación del Transmisor

¿Qué tipo de comunicación utiliza?

HART, MODBUS

¿Qué nos indica el led del transmisor según el color que muestra?

Table 2-1: Transmitter status reported by status LED

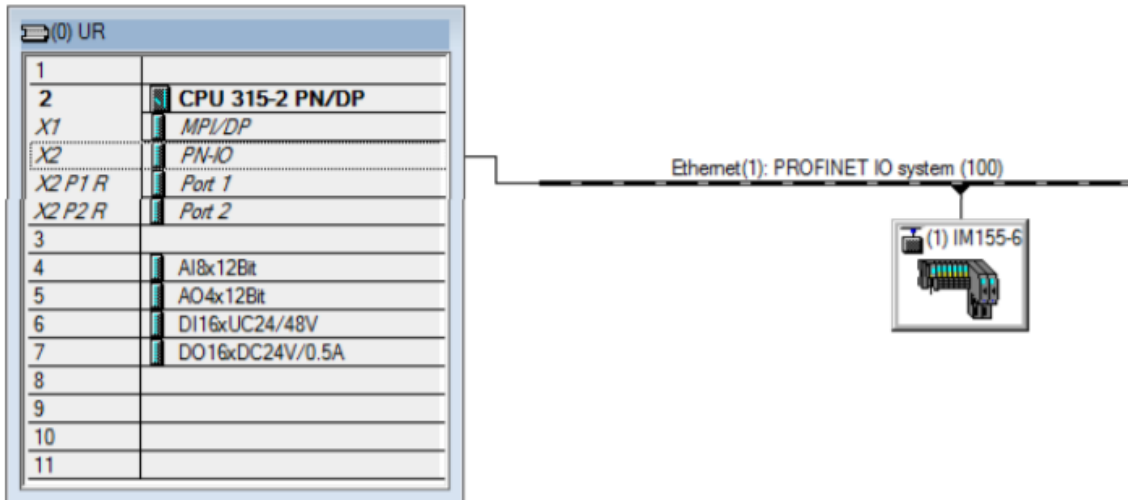
LED state	Description	Recommendation
Green	No alarms are active.	Continue with configuration or process measurement.
Flashing green ⁽¹⁾	No alarms are active. One or more previously active alarms have not been acknowledged.	Continue with configuration or process measurement. If you choose, you can acknowledge the alarms.
Yellow	One or more low-severity alarms are active, and have been acknowledged.	A low-severity alarm condition does not affect measurement accuracy or output behavior. You can continue with configuration or process measurement. If you choose, you can identify and resolve the alarm condition.
Flashing yellow ⁽²⁾	One or more low-severity alarms are active and have not been acknowledged.	A low-severity alarm condition does not affect measurement accuracy or output behavior. You can continue with configuration or process measurement. If you choose, you can identify and resolve the alarm condition. You may also acknowledge the alarm.
Red	One or more high-severity alarms are active, and have been acknowledged.	A high-severity alarm condition affects measurement accuracy and output behavior. Resolve the alarm condition before continuing.
Flashing red ⁽³⁾	One or more high-severity alarms are active and have not been acknowledged.	A high-severity alarm condition affects measurement accuracy and output behavior. Resolve the alarm condition before continuing. You may also acknowledge the alarm.

Funcionamiento Protocolo HART

Este protocolo funciona por medio de una señal analógica de entre 4 mA a 20 mA. Esta señal analógica permite comunicarse de forma serial. La señal analógica lleva internamente otro protocolo en donde se permite una onda de muy baja amplitud a una frecuencia conocida oscilar dentro de esta señal. Si se utilizan dos frecuencias de onda puede implementarse un lenguaje binario que sirve para codificar y transmitir información dentro de la onda analógica.

Configuración de Hardware

Realice la siguiente configuración tomando en cuenta el módulo IM155-6PN-ST-V3.3 con el número de orden **6ES7 155-6AU00-0BNO** que podrá encontrar en el área de módulos con comunicación tipo HART



Slot	Module	Order number	Firmware	MPI address	I address	Q address	Comment
1							
2	CPU 315-2 PN/DP	6ES7 315-2EH14-0AB0	V3.2	2			
X1	MPI/DP			2	2047*		
X2	PN-IO				2046*		
X2 P1 R	Port 1				2045*		
X2 P2 R	Port 2				2044*		
3							
4	AI8x12Bit	6ES7 331-7KF01-0AB0			264...279		
5	AO4x12Bit	6ES7 332-5HD00-0AB0				272...279	
6	DI16xUC24/48V	6ES7 321-1CH00-0AA0			8...9		
7	DO16xDC24V/0.5A	6ES7 322-1BH01-0AA0				12...13	
8							
9							
10							
11							

Slot	Module	Order number	I Address	Q Address	Diagnostic Address	Comment	Access
0	IM155-6PN-ST-V3.3	6ES7 155-6AU00-0BNO			2040*		Full
X1	PN-IO				2039*		Full
X1 P1 R	Port 1 RJ45	6ES7 193-6AR00-0AA0			2042*		Full
X1 P2 R	Port 2 RJ45	6ES7 193-6AR00-0AA0			2041*		Full
1							
2	AI4 x I HART	6ES7 134-6TD00-0CA1	256...263				Full
2.1							
2.2							
2.3							
2.4							
3							

Inserte en el módulo de entradas Analógicas el objeto HART Field Device:

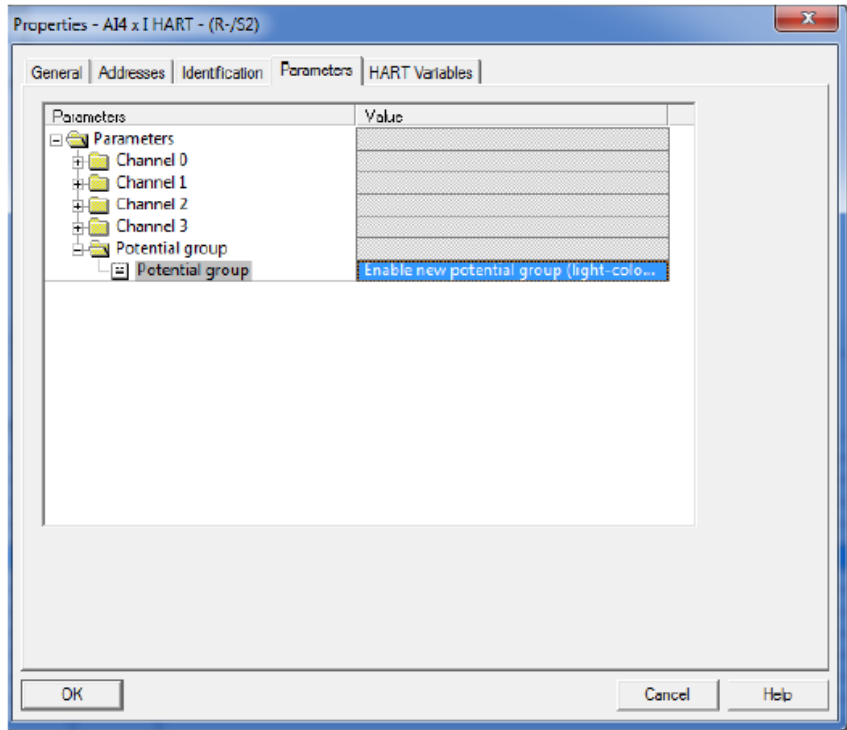
The screenshot illustrates the configuration of a SIMATIC rack. The top part shows a rack with a CPU 315-2 P and various modules. A context menu is open over the rack, with 'Insert Object...' selected. The bottom part shows a detailed view of the 'AI4 x I HART' module, where a 'HART Field Device' is being inserted into slot 2.4.

Slct	Module
1	CPU 315-2 P
X1	MPVDP
X2	PN-IO
X2 P1 R	Port 1
X2 P2 R	Port 2
3	
4	AI4x12Bit
5	AO4x12Bit
6	DI16xUC24/48
7	DO16xDC24V
8	
9	
10	
11	

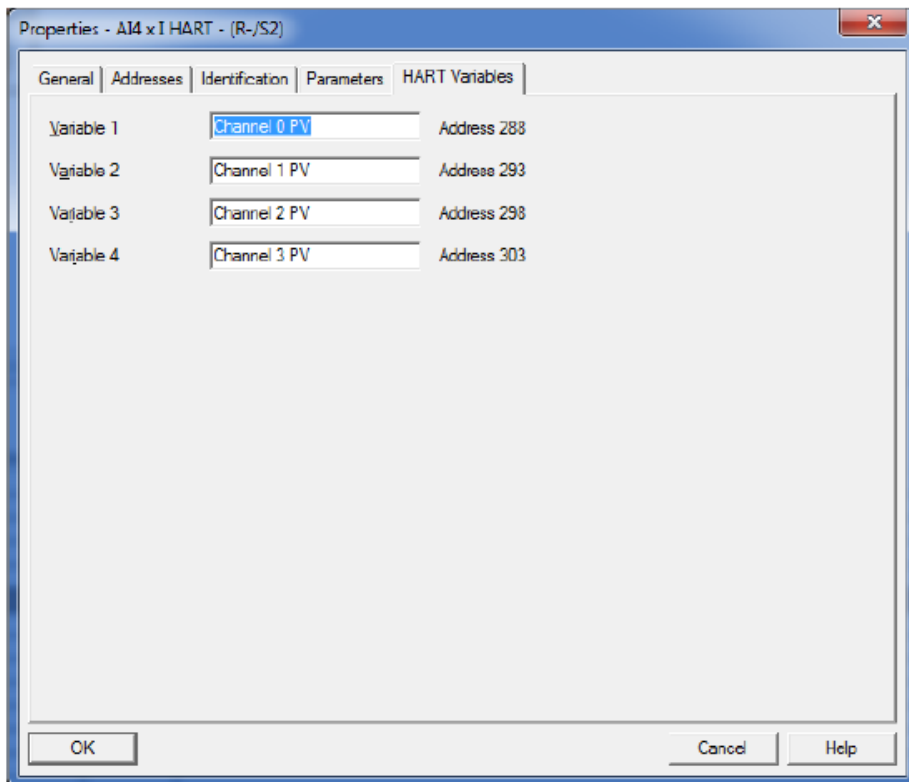
Slct	Module
1	IM155-6PN-ST
X1	PN-IO
X1 P1 R	Port 1 RM5
X1 P2 R	Port 2 RM5
2	AI4 x I HART
2.1	HART Field Device
2.2	HART Field Device
2.3	HART Field Device
2.4	HART Field Device
3	

Slct	Module	Part Number	Address Range	Access
2	AI4 x I HART	6ES7 134-6TD00-0CA1	256...263	Full
2.1	HART Field Device			Full
2.2	HART Field Device			Full
2.3	HART Field Device			Full
2.4	AI4 x I 2-wire 4...20mA HART			
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

Ingrese a las propiedades del módulo de entradas Analógicas, y al submenú de Parámetros. Cambie el "Potential Group" para que este habilitado a luces de colores.



Puede observar los parámetros de cada señal.



Agregue el siguiente modulo (ocupara el tercer espacio en la configuración de la interfaz IM155). Este módulo funciona para ocupar el espacio no utilizado en la interfaz del módulo HART.

2.3		HART Field Device					Full
2.4		HART Field Device					Full
3		Server module V1.1	EES7 193-6PA00-0AA0			2038*	Full
4							

Bomba centrífuga trifásica

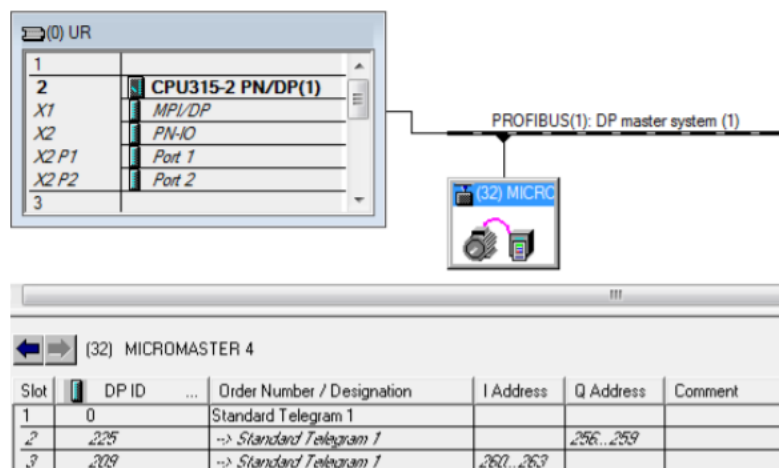
*****La conexión al motor de la bomba se tomó directamente de la práctica de laboratorio 7 del curso de Instrumentación y Automatización Industrial del Depto. De ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la Universidad del Valle de Guatemala. Todos los derechos reservados

El motor trifásico cuenta con tres embobinados de cobre en su estator, cada uno con sus dos extremos disponibles para conexión dentro de la caja de bornes. Para poder identificarlos se sugiere utilizar un multímetro y etiquetar los cables que determinan las bobinas dentro del motor.

Creación del proyecto en SIMATIC MANAGER

- Crear/configurar la conexión con el PLC via Profibus DP (1.5 Mbits/s) en el Hardware Configuration.
 1. Añadir el variador de frecuencia desde el catálogo en el editor de la configuración de hardware. Conectarlo al bus virtual de comunicación.

PROFIBUS DP > SIMOVERT > MICROMASTER 4
 2. Configurar las propiedades del objeto (dirección Profibus = 18 y parámetros de subred: Transmission rate a 1.5 Mbps/s)
 3. Configurar el tamaño del telegrama que transmitirá y recibirá a través del bus de comunicación. (Click izquierdo sobre el componente, doble click sobre el telegrama "Standard Telegram" en el catálogo)
 4. Descargar la nueva configuración de hardware al PLC.



Configuración interfaz de comunicación en el variador de frecuencia

Ajuste la dirección Profibus físicamente en el communications board del variador de frecuencia como se explica a continuación:

The PROFIBUS address can be set to between 1 and 125, as shown in the following table, on DIP switches 1 to 7.

Switch number:	1	2	3	4	5	6	7
Add to address:	1	2	4	8	16	32	64
Example 1: Address = 3 = 1 + 2	on	on	off	off	off	off	off
Example 2: Address = 88 = 8 + 16 + 64	off	off	off	on	on	off	on

Some "addresses" have a special meaning:

Address	Meaning
0	PROFIBUS address is determined by P0918
1..125	Valid PROFIBUS address
126, 127	Invalid PROFIBUS address

Important NOTE

The inverter power supply must be switched off before the DIP switch settings are changed (if the communication board is already mounted on inverter). DIP switch setting changes do not take effect until the PROFIBUS has been restarted cold again. This cold restart must be initiated by switching the power off and then on again, irrespective of whether the board is supplied from the inverter mains supply or its own, separate 24 V connection.

Revise en la configuración de hardware cual es el rango de dirección de memoria asignadas al esclavo para enviar información como una salida periférica "PQ".

Si todo está en orden al finalizar la configuración del PLC y la parametrización del Variador, la luz indicadora debería encender verde continuo.

Ajuste de parámetros en el variador de frecuencia

Reinicie el VFD a su estado original de fábrica:

Reset to Factory default

To reset all parameters to the factory default settings; the following parameters should be set as follows:

Set P0010 = 30

Set P0970 = 1

Note

The reset process takes approximately 10 seconds to complete. Reset to Factory default

Para ajustar los parámetros más importantes del variador de frecuencia es necesario habilitar el modo de “puesta en marcha” o commissioning. Para hacerlo, ajuste el parámetro P0010 al valor 1.

Con el modo de “puesta en marcha” habilitado configure los parámetros de comunicación PROFIBUS del variador de frecuencia (P0700 y P1000). Consulte la descripción de los parámetros en la documentación de los parámetros del variador de frecuencia.

Ajuste los siguientes parámetros en el variador de frecuencia:

Parámetro	Función
P0010	Parámetro de puesta en marcha
P0003	Nivel de acceso de usuario
P0004	Filtro de Parámetro
P0100	Europa/América
P0304	Tensión nominal del motor
P0305	Corriente nominal del motor
P0307	Potencia nominal del motor
P0310	Frecuencia nominal del motor
P0311	Velocidad nominal del motor
P0700	Selección fuente de ordenes
P1000	Selecc. Consigna de frecuencia
P1080	Frecuencia mínima (Hz)
P1082	Frecuencia máxima (Hz)
P1120	Tiempo de aceleración (seg)
P1121	Tiempo de deceleración (seg)
P3900	Fin de la puesta en servicio rápido

Programación básica en el PLC

Declarar las siguientes variables de control del variador de frecuencia

Nombre	Tipo de dato	Descripción
MIN	INT	Valor mínimo de la escala de la barra deslizadora
MAX	INT	Valor máximo de la escala de la barra deslizadora
ACTUAL	INT	Valor actual del cursor de la barra deslizadora

Escriba código fuente para arrancar y parar el motor a una frecuencia específica usando las palabras de CONTROL y la palabra del FREQUENCY SET POINT.

A continuación, se le presenta la palabra de Control para el Variador de Frecuencia

Palabra de Control para el Variador			
bit	Valor	Significado	Observaciones
0	1	ON	Pasa el convertidor al estado "listo para arrancar". Sentido de giro se define en bit 11.
	0	OFF	
1	1	En servicio	0: Inhibición inmediata de pulsos, parada por inercia.
	0	OFF 2	
2	1	En servicio	0 - Parada rápida: parada con el tiempo de desaceleración más corto.
	0	OFF 3	
3	1	Desbloquear servicio	Se habilitan la regulación e impulsos del convertidor.
	0	Bloquear servicio	
4	1	En servicio	0: La salida del gen. de rampa se pone a 0 (frenada lo más rápido posible), convertidor permanece en ON.
	0	Bloquear generador de rampa	
5	1	Desbloquear gen. de rampa	0: Se congela el valor actual de consigna determinada por el generador de rampa.
	0	Parar generador de rampa	
6	1	Desbloquear valor consigna	Se habilita el valor seleccionado a la entrada del generador de rampa.
	0	Bloquear valor consigna	
7	1	Acusar fallo	Se acusa el mensaje de fallo, pasando al convertidor al estado "bloqueo de arranque".
	0	-	
8	1	Mando por impulsos a dchas.	
	0		
9	1	Mando por impulsos a izqdas.	
	0		
10	1	Valores consigna válidos	El maestro transmite valores de consigna válidos.
	0	Valores consigna no válidos	
11	1	Inversión del valor de consigna sin	1: El motor gira a izq. con valor de consigna positiva 0: El motor gira a der. con valor de consigna positiva
	0	inv. val de consigna	
12	1	-	No utilizado.
	0	-	
13	1	Potenciómetro hacia arriba	
	0	-	
14	1	Potenciómetro hacia abajo	
	0	-	
15	1	Mando directo	Seleccionar tipo de mando.
	0	Mando a distancia	

Palabra de Status del Variador			
bit	Valor	Significado	Observaciones
0	1	Listo para servicio	Alimentación de corriente conectada, electrónica inicializada, pulsos bloqueados.
	0	No listo para servicio	
	0	No listo para arrancar	
2	1	Servicio desbloqueado	Véase palabra de mando bit 3
	0	Servicio bloqueado	
3	1	Fallo	Mal funcionamiento del convertidor, fuera de servicio. Después de eliminar la falla y acusar, pasa a bloqueo
	0	-	
4	1	-	Véase palabra de mando bit 1
	0	Comando OFF2 activo	
5	1	-	Véase palabra de mando bit 2
	0	Comando OFF3 activo	
6	1	Bloqueo de arranque	Reconexión sólo mediante OFF-ON
	0	Sin bloqueo de arranque	
7	1	Alarma (aviso)	Aviso véase parámetro de alarmas r2110
	0	-	
8	1	Sin desviación de f (Hz)	Desviación entre el valor y la consigna dentro del margen de tolerancia.
	0	Desviación de f (Hz)	
9	1	Control remoto solicitado	1: Se solicita al maestro que tome el control. 0: El control se realiza localmente
	0	Servicio en unidad	
10	1	f alcanzada	La frecuencia de salida del convertidor es mayor o igual que la frecuencia máxima.
	0	f no alcanzada	
11	1	-	
	0	Alarma: motor al límite de I	
12	1	-	Señal que puede utilizarse para gobernar un freno.
	0	Freno del motor	
13	1	-	Sobrecarga según datos de placa del motor y convertidor.
	0	Sobrecarga del motor	
14	1	Giro a derecha	
	0	Giro a izquierda	
15	1	-	p. ej. Corriente o temperatura
	0	Sobrecarga del convertidor	

OUTPUT WORD 1	CONTROL WORD	PQW256
OUTPUT WORD 2	SET-POINT FREQ. (Hz)	PQW258

El paro/arranque de variador de frecuencia está condicionado al flanco positivo del bit menos significativo de la palabra de CONTROL (0x047E – 0x047F).

En la palabra del FREQUENCY SET POINT, el valor decimal 16,383 corresponde al 100% de la frecuencia máxima configurada en el variador de frecuencia.

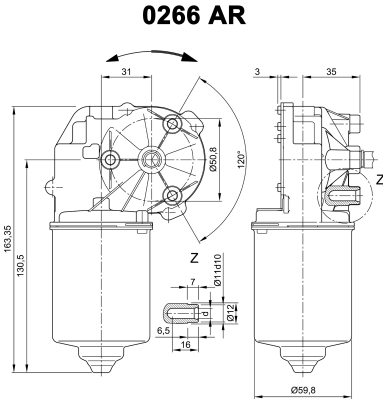
Design Data	
Commutation	Brushed
Direction of rotation	Bi-directional
Bearing type	A: ball - B: sleeve

Performance data		
Rated voltage [V]	U_N	24
Nominal torque [Nm]	M_N	6.00
No-load speed [min^{-1}]	n_0	35.0
Nominal power [W]	P_N	19.2
Nominal current [A]	I_N	3.0
Nominal force [kN]	F_N	0.00
Duty cycle	s1	

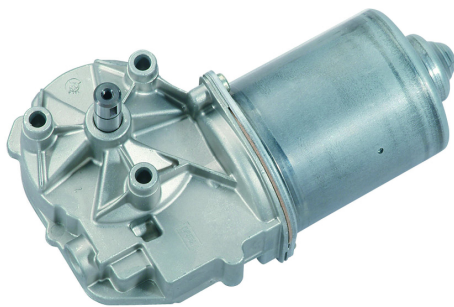
Sensor data	
Pulses	0
Output channels	0

Other data	
Gear ratio	69/1
Gear wheel material	plastic
Suppression components	6 μ H, 1nF
Enclosure class	IP 30
Weight [kg]	1.210

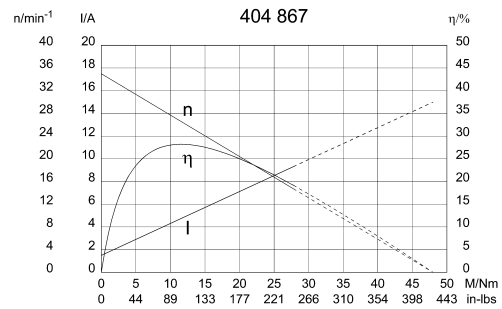
Remarks: d = for thread-forming screw M6 DIN ISO 965-2



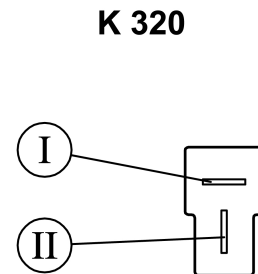
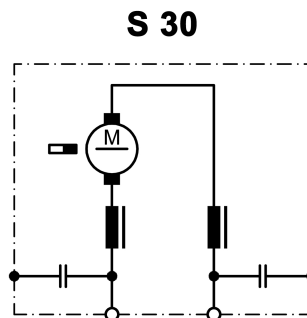
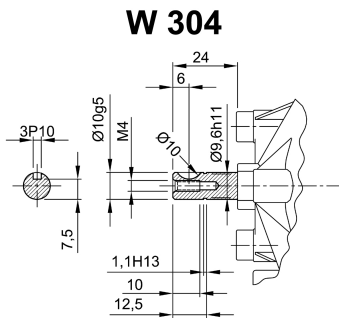
Motor picture



Characteristic curves



Output shaft drawing (W), Wiring diagrams (S) and Connector layout (K)



Flat plug (DIN 46244) 6,3x0,8 mating with receptacle housing part#180907, drwg# C-180907& Receptacles for tabs, conductor cross section 0,5-1,5 sqmm (20-18AWG) part# 925603-x, drwg# 925603 www.tycoelectronics.com

