

Diseño y desarrollo de sistema de entrenamiento de control de procesos basado en Industry 4.0.

Design and development of a process control training based on Industry 4.0.

Osbaldo Ysaac García Ramos* (1).

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

osbaldo.gr@tuxtla.tecnm.mx.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos (2). Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx.

Alexis de Jesús Flores García (3). Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, alexis.fg@tuxtla.tecnm.mx.

Joel Gómez Pérez (4). Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, joel.gp@tuxtla.tecnm.mx.

José Ángel Zepeda Hernández (5). Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, jose.zh@tuxtla.tecnm.mx.

Álvaro Hernández Sol (6). Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, alvaro.hs@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en octubre 26, 2023; aceptado en noviembre 13, 2023.

Resumen.

En el presente artículo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema de control de procesos que considera cuatro variables importantes de la industria: flujo, presión, nivel y temperatura. Para su implementación se aplicó diseño de P&ID, diseño mecánico, diseño eléctrico, diseño de la red Profinet y IO link, que permiten tener los dibujos, planos y arquitecturas para su adecuada construcción. El sistema cuenta desde un depósito de provisionamiento de líquido, bombas centrifugas de impulsión, tuberías, conexiones hidráulicas de sensores, válvulas proporcionales y tanques, instrumentación electrónica y dispositivos de control que permiten representar procesos muy parecidos a los que se encuentran en diversas industrias. Así también se desarrolló el sistema de control basado en un PLC de nueva generación y un maestro IO link para la instrumentación del sistema mediante profinet, base fundamental de la industria 4.0.

Palabras claves: Diseño eléctrico, diseño mecánico, Eplan, P&ID, flujo volumétrico, SolidWorks.

Abstract.

This article presents the design and development of a process control system that considers four important variables of the industry: flow, pressure, level and temperature. For its implementation, P&ID design, mechanical design, electrical design, Profinet network design and IO link were applied, which allow us to have the drawings, plans and architectures for its proper construction. The system has a liquid supply tank, centrifugal drive pumps, pipes, hydraulic connections of sensors, proportional valves and tanks, electronic instrumentation and control devices that allow representing processes very similar to those found in various industries. Thus, the control system was also developed

based on a new generation PLC and master IO link for the instrumentation of the system through Profinet, the fundamental basis of Industry 4.0.

Keywords: Electrical design, Eplan, P&ID, Mechanical design, SolidWorks, volumetric flow.

1. Introducción.

La automatización de procesos industriales es uno de los objetivos fundamentales dentro de las empresas que hoy en día están en la incesante tarea de la búsqueda de competitividad y actualización en una generación de constante crecimiento tecnológico. La automatización de un proceso industrial es el manejo de información en tiempo real, que está constituido por un conjunto de máquinas y de equipos industriales, que incorporan así mismo un grupo de elementos y dispositivos tecnológicos que dan paso al control automatizado para una ejecución óptima de procesos, mismo que fueron diseñados según criterios de ingeniería y normativas correspondientes. (Moreno, 1999).

En el concepto de automatización lleva implícita la supresión total o parcial de la intervención humana en la ejecución de diversas tareas industriales. Se aplica la automatización tanto a las tareas más sencillas, como lo es la regulación de velocidad de un motor trifásico mediante un variador de frecuencias o la regulación de presión de agua mediante electroválvulas. (Moreno, 1999)

La automatización es en esencia, la convergencia de tres tecnologías: mecánica, electrónica e informática. Estas tecnologías de automatización se centran en el conocimiento de los dispositivos tecnológicos utilizados en la implementación de la automatización, tales como transductores, preaccionadores, dispositivos funcionales de aplicación específica y dispositivos lógicos de control. (Nieto, 2006)

La automatización en la industria hoy en día transita hacia una evolución y por lo tanto también la economía global transita hacia una nueva fase que se caracteriza por la digitalización y la conectividad, esta es la industria 4.0 también llamada la Cuarta Revolución Industrial sobre la producción manufacturera, el trabajo, las cadenas globales de valor y el comercio según (Basco. Ana et al., 2018).

En el desarrollo de este sistema de entrenamiento se construye un circuito cerrado de tuberías de PVC y depósitos de agua, en el cual fluirá agua. Se podrá monitorear cuatro variables típicas de la ingeniería de procesos: flujo, presión, nivel y temperatura. Para la regulación de flujo, el nivel y la presión se dispone de un circuito con dos depósitos transparentes. Como actuadores se usan electroválvulas de control y una bomba de agua trifásica que estará conectado a un variador de frecuencia para ajustar su velocidad.

Se implementa protocolos de comunicación Profinet y IO-Link, los cuales son protocolos industriales que ayudan a obtener datos en tiempo real, la comunicación Profinet ofrece una comunicación rápida y precisa, y IO-Link permite comunicarse con sensores que tienen la interfaz IO-Link para la adquisición de datos de manera fácil y rápida.

2. Métodos.

Sistema de tanques acoplados.

Un sistema de tanque es esencialmente un sistema de almacenamiento y transporte de líquidos. Además de cumplir con la función de almacenamiento, debe haber interrelación entre las variables, es decir, el nivel del primer tanque afecta al del segundo; el nivel de éste afecta a los otros que estén interconectados o acoplados por medio de tubería a este. (Alexandro Jaffet Cribas, pág. 10).

Una representación de este tipo de sistema se muestra en la figura 1. Las variables de dicho sistema se detallan en la tabla 1, al igual que su significado.

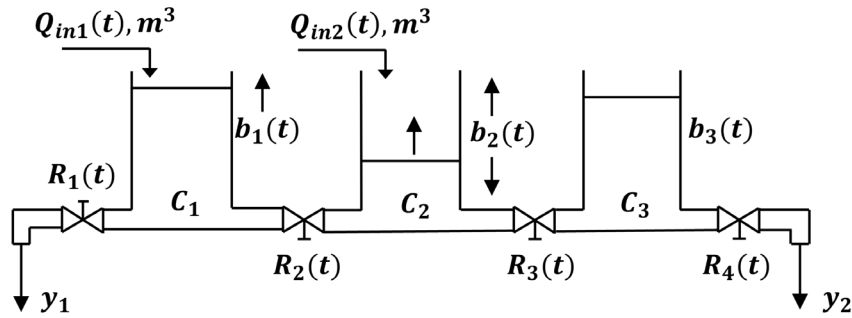


Figura 1. Tanques en serie.

Tabla 1. Variables de un sistema de tanques en serie.

Variable	Significado
Q_{in1}, Q_{in2}	Caudal de entrada del sistema
R_1, R_2, R_3, R_4	Resistencia del fluido causado por las válvulas
C_1, C_2, C_3	Capacitancia del fluido
b_1, b_2, b_3	Diferencia de altura
y_1, y_2	Caudal de entrada

Diseño de diagramas de tuberías e Instrumentación P&ID.

Como primer paso para el desarrollo de cualquier ingeniería de procesos se tiene que comenzar a través del diagrama de tuberías e instrumentación o también llamado P&ID, este es vital en etapa de diseño y de operaciones toda planta industrial. El P&ID (Process and Instrumentation Diagram) es la representación gráfica y esquemática de cada uno de los equipos, tuberías, válvulas, controles y demás componentes asociados al flujo de un proceso. Muestra la secuencia física de estos equipos y cómo se conectan. Este diagrama PID está compuesto por diversos tipos de líneas, círculos y símbolos para identificar a cada componente y a las distintas interconexiones dentro de un proceso.

El P&ID es una herramienta imprescindible de la ingeniería de procesos. A través de este es posible obtener una visión integral y clara de cada proceso en la planta industrial y de la interconexión que existe entre la instrumentación. Este panorama tan completo ayuda a analizar y a dirigir la ejecución de un proyecto industrial, a modelarlo y tener esta herramienta permite su adecuada implementación en el diseño mecánico y su implementación física. Alvinox (2023).

Utilizando el software LucidChart el cual es una herramienta de diagramación basada en la web se desarrolló el P&ID del sistema, LucidChart. (2023).

En la figura 2 se muestra el desarrollo de la instrumentación del sistema que se basa en normativa ANSI ISA 5.1.

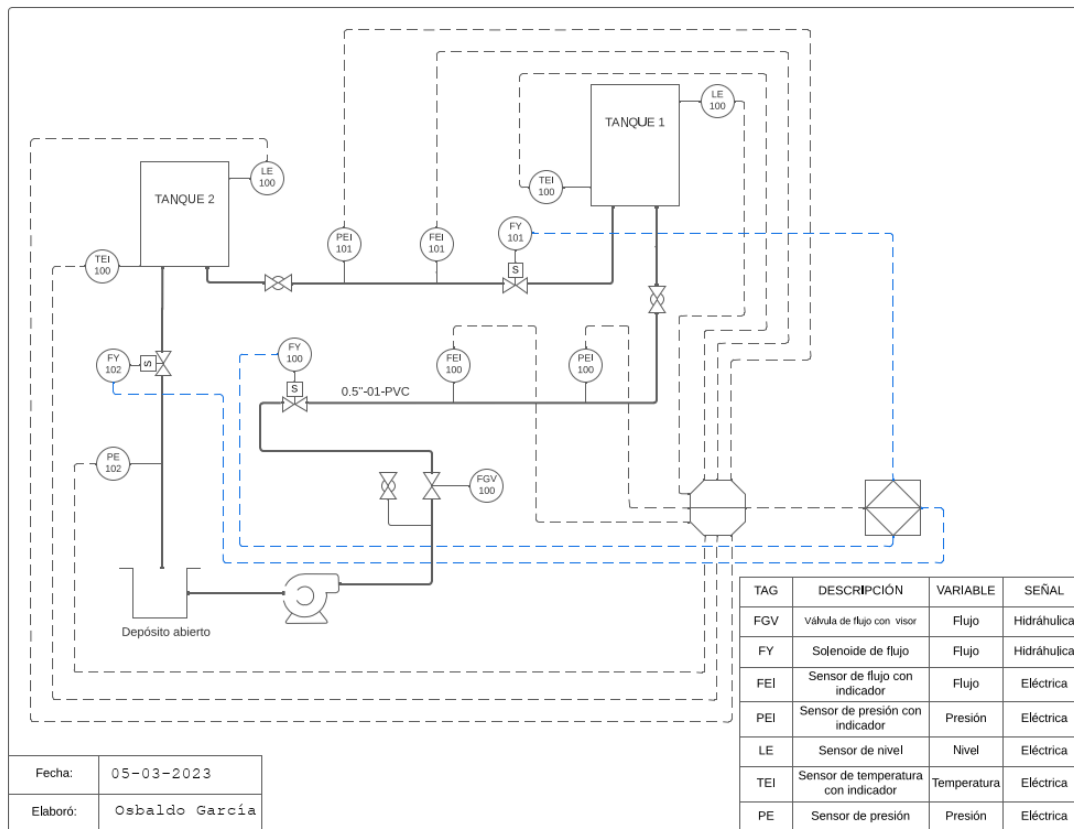


Figura 2. Diseño P&ID del sistema de control de procesos basado en normativa ANSI ISA 5.1.

Diseño mecánico del sistema de control de procesos.

Basado en el P&ID del sistema de realiza el diseño mecánico utilizando el software de SolidWorks. El cual es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D, SolidWorks (2023).

Para el diseño del sistema se propone un depósito de agua de succión, 2 tanques conectados en serie, 1 bomba de agua con alimentación trifásica, válvulas proporcionales y sensores de nivel, presión, flujo y temperatura. En la figura 3 se muestra una vista dimétrica de la parte de la estructura principal del sistema de control de procesos.

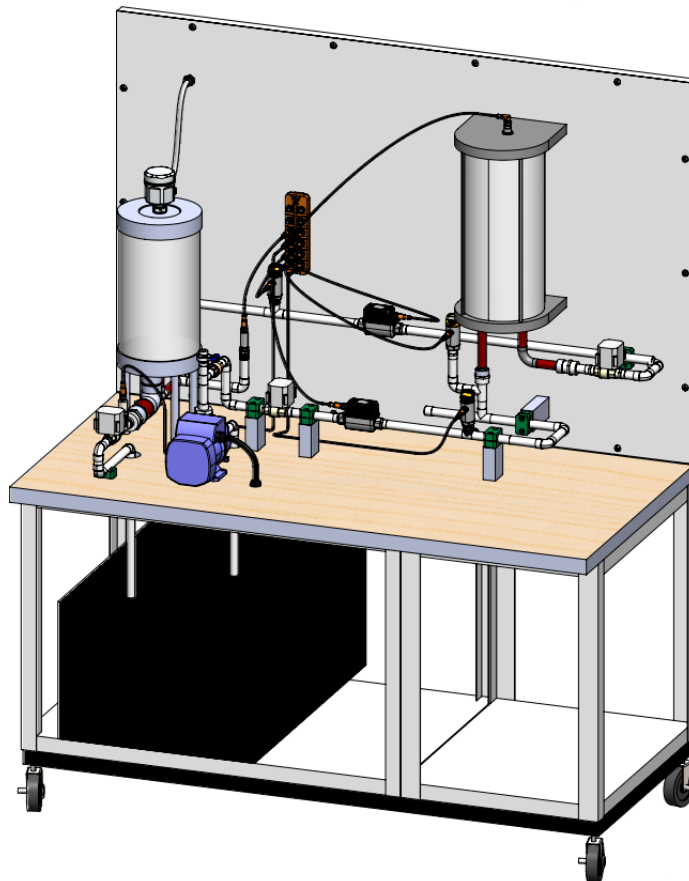


Figura 3. Diseño del sistema de control de procesos, en vista dimétrica.

En la figura anterior se muestra una vista general del diseño del sistema de control de procesos. Los dos tanques están conectados en serie como se ha mencionado anteriormente y la disposición de cada uno de los sensores y del maestro IO-Link. Se muestra también la conexión de los sensores y de la bomba trifásica, que está alimentado desde el tablero eléctrico.

En la parte inferior se muestra el depósito de agua en color negro, que es el depósito de succión de la bomba y a su vez es el depósito de descarga del sistema, por lo que el agua estará funcionando de manera cíclica si la bomba se encuentra en funcionamiento, tal y como se muestra en la figura 4 la cual es una imagen renderizada obtenida de SolidWorks.

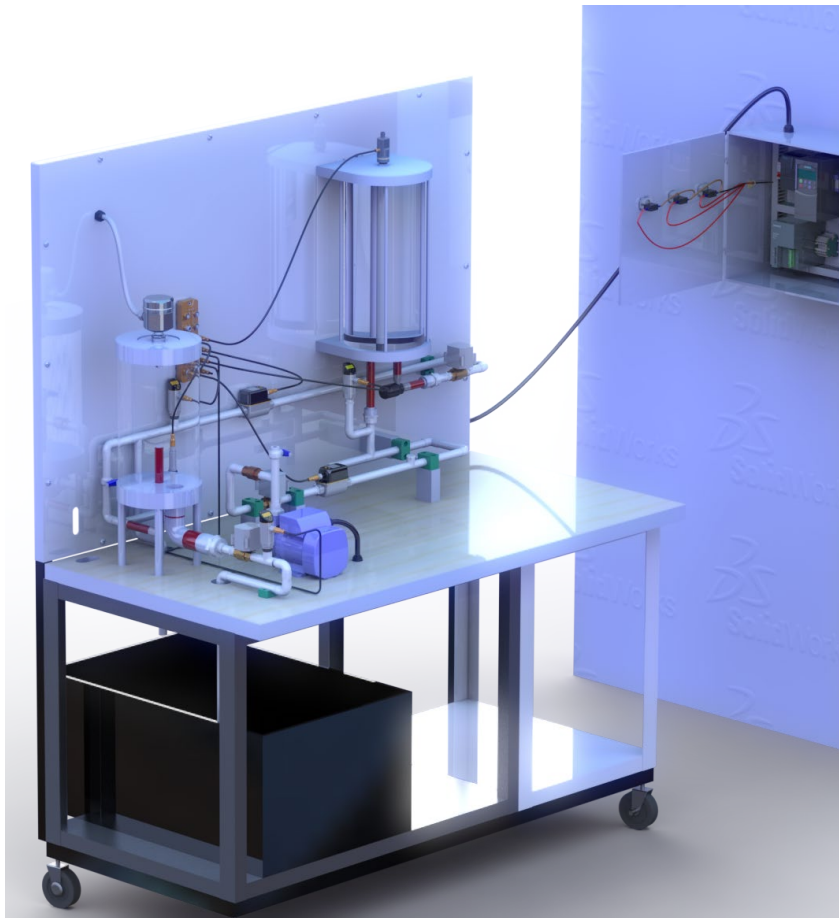


Figura 4. Vista isométrica renderizada sistema de control de procesos.

En las figuras del 5 a la 6 se muestran los planos 2D del diseño del sistema generados en SolidWorks. Se muestran distintas vistas a fin de observar a detalle las partes que constituyen el sistema, que mediante globos enumera cada uno de los elementos y que están referenciados a una tabla. La tabla muestra el número de elemento, su descripción y la cantidad existente de ese elemento el sistema.

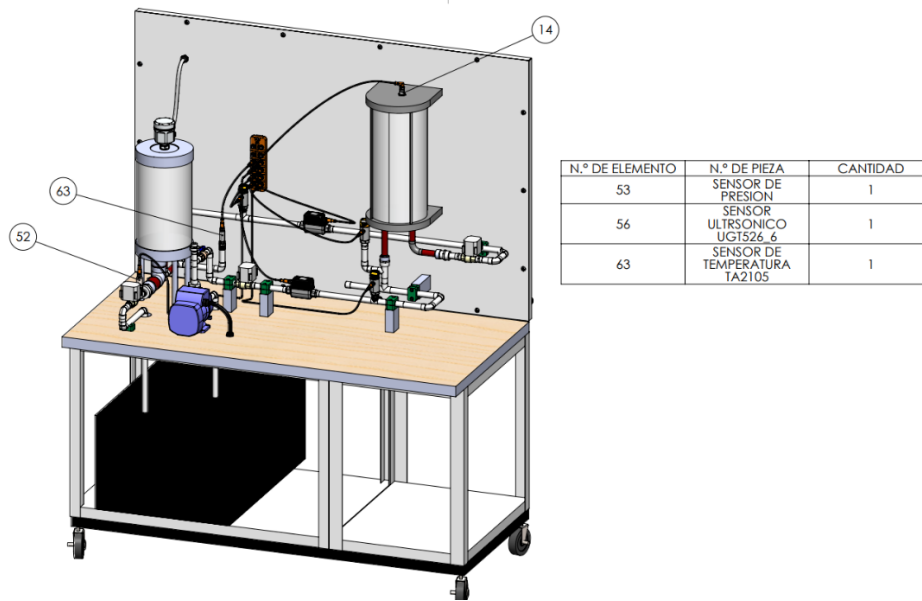


Figura 5. Plano de vista dimétrica del sistema de control de procesos.

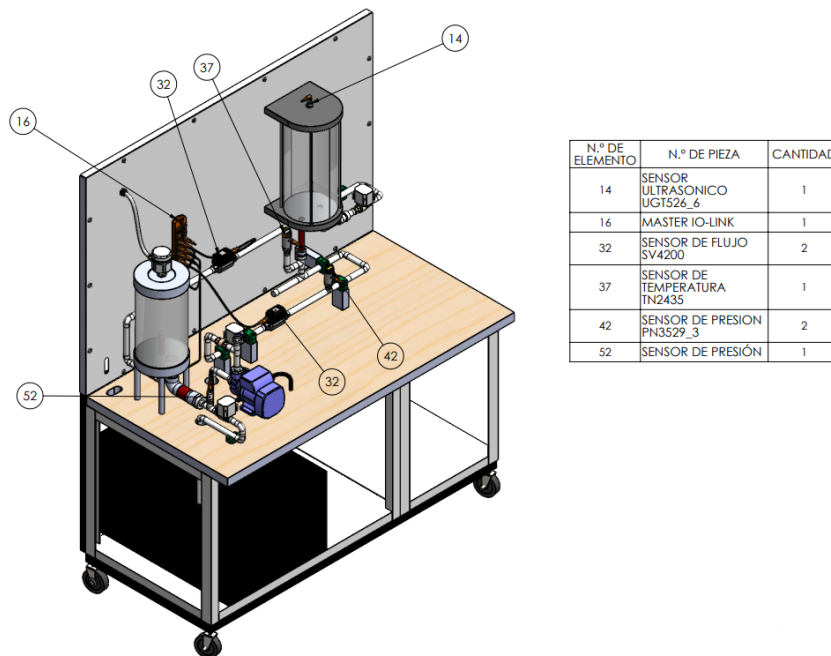


Figura 6. Vista isométrica del sistema de control de procesos

Se diseñó de igual manera el tablero eléctrico para el sistema, en el cual se alojan los equipos de alimentación, control y protección. En la figura 7, se muestra el diseño del tablero, con cada uno de los elementos que lo conforman.

Diseño eléctrico del sistema de control de procesos.

Se realizó el diseño eléctrico de los diagramas de conexión mediante el software Eplan que permite desarrollar y planear proyectos en los campos de la ingeniería eléctrica, de automatización y mecatrónica, EPLAN. (2023). A través de él se desarrollaron los esquemas eléctricos, diagramas de cableado de la parte de potencia y control, como se muestra en la figura 8.

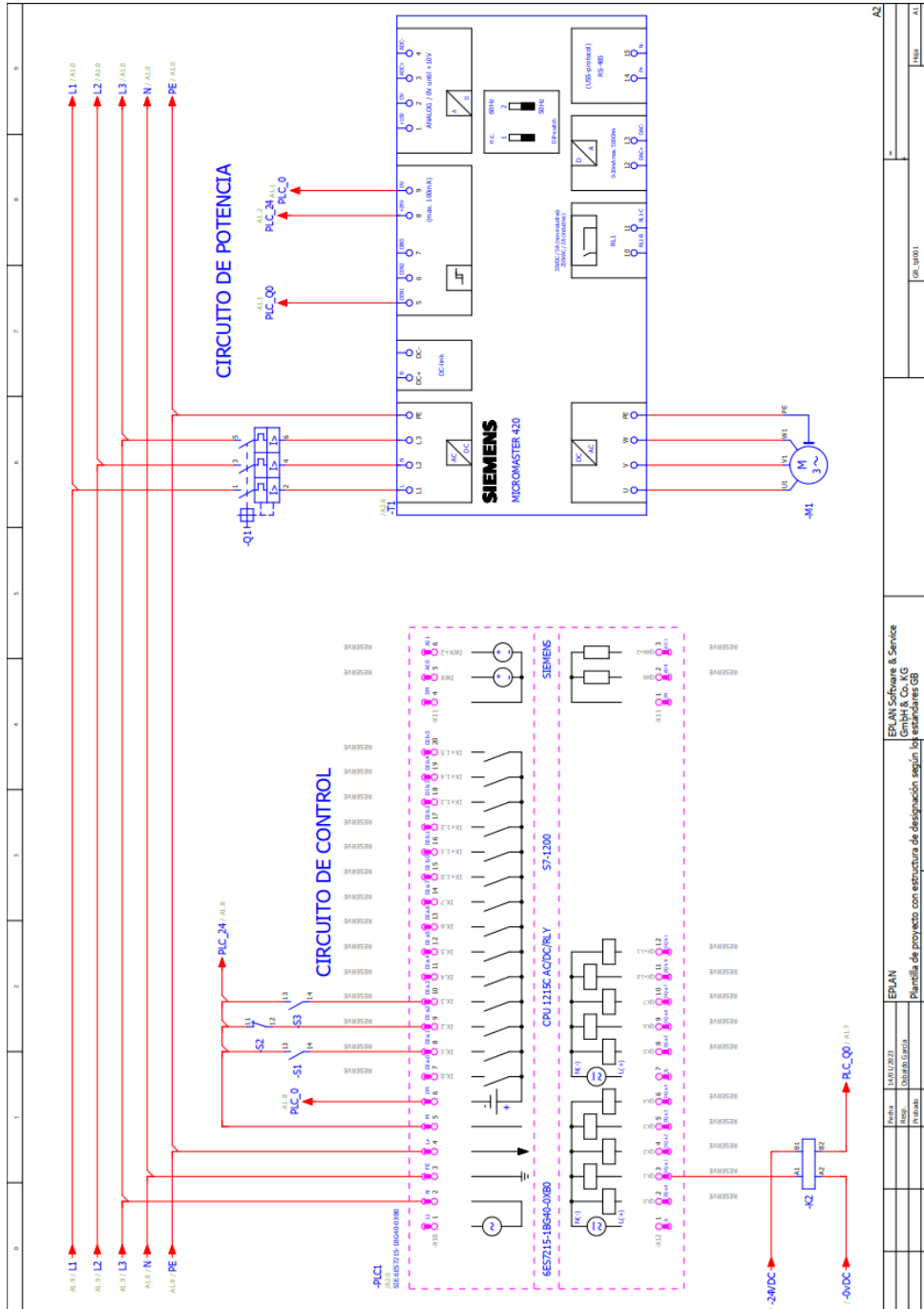


Figura 8. Vista 2D del diagrama eléctrico del sistema.

Diseño de la Red profinet y IO Link.

En la figura 9 se muestra la red comunicación Profinet, en donde se establece la conexión del PLC al ordenador mediante Ethernet TCP/IP. Así mismo el PLC está comunicado con un maestro IOL-Link mediante bus Profinet, que a su vez tiene salidas a los sensores de interfaz IO-Link, que monitorearán el proceso.

IO-Link es un sistema de comunicación punto a punto independiente para conectar sensores y actuadores a un sistema de automatización, IFM. (2023).

En el mismo bus de Profinet es posible conectar una PC para para el monitoreo de magnitudes del sistema de control de proceso, esto gracias a que el maestro IO-Link tiene conexiones de comunicación Profinet.

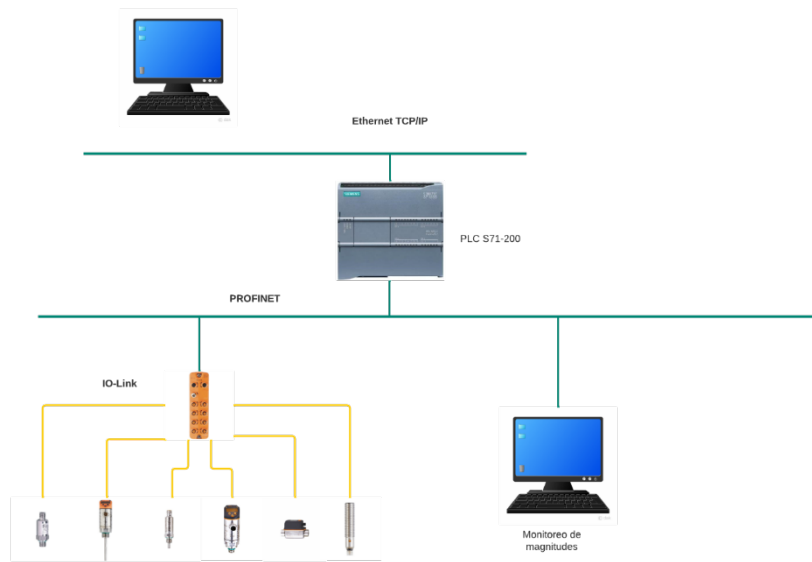


Figura 9. Red de comunicación Profinet del sistema de control de procesos.

3. Desarrollo.

Teniendo los diseños P&ID, eléctrico y mecánico, se empezó con la construcción física del sistema de control de proceso. Se inicio con el acondicionamiento de la base, que es la estructura que soporta todos los componentes, haciendo adecuaciones necesarias.



Figura 10. Acondicionamiento de la estructura del sistema.

Para la realización de la construcción física del sistema de control de proceso, se inició con el acondicionamiento de la mesa de trabajo, que es la estructura base del sistema de control, haciendo adecuaciones necesarias. En la figura 11 se hace el reacondicionamiento de uno de los tanques (tanque 1), que antes fue utilizado en un proyecto similar al que se presenta en este informe. En este tanque se instala el sensor ultrasónico UGT526, para monitorear el nivel de dicho tanque.



Figura 11. Reacondicionamiento e instalación de sensor ultrasónico en el tanque 1.

Posteriormente se hizo la instalación de la base del tanque 2, y se fijó el tanque 1 (figura 12), siguiendo el diseño 3D que se implementó en la etapa de diseño en SolidWorks.

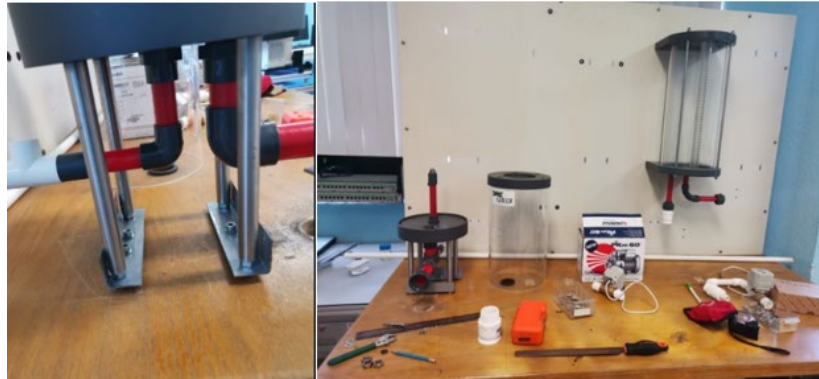


Figura 12. Montaje de tanques 1 y 2.

El siguiente paso fue montar la bomba centrífuga sobre la base de madera y fijarla. Posteriormente se inició con las conexiones de tubería, tanto en la parte de succión y en la salida de la bomba, conectando así la primera válvula proporcional. Esta construcción se aprecia en la figura 13.



Figura 13. Montaje de bomba y conexión de tubería de succión y salida.

En la figura 14, se tiene el sistema de tuberías terminado, retornando la salida del sistema al depósito de donde se succiona el agua, también se agregó el sensor de horquilla vibrante al tanque 2, en la que fue necesario diseñar e imprimir una base en 3D para poder montarlo a dicho tanque.



Figura 14. Instalación de sensores y salida del sistema de tubería.

Posteriormente se empotró el gabinete a la pared, en donde se alojaria el tablero eléctrico. En la figura 15 se muestra el proceso del armado del tablero y de la configuración según el diseño 3D implementado.



Figura 15. Instalación del gabinete y armado del tablero eléctrico.

El siguiente paso fue conectar las electroválvulas a la fuente de alimentación de 24VDC y a las salidas analógicas del PLC. También se conectaron los sensores al maestro IO-Link, misma que fue alimentada a la fuente de voltaje del tablero. Del mismo modo se hizo la instalación y conexión de los botones de arranque, paro y paro de emergencia.

En la figura 16 se muestra el resultado de la construcción física del sistema de control de procesos, que consistió en la conexión de tuberías PVC, instalación de sensores, electroválvulas y la bomba de agua. En la figura se muestra los dos tanques de agua, que están en serie, y cada una de ellas cuenta con un sensor de nivel en la parte superior. En la entrada del primer tanque se encuentra un sensor de flujo, uno de presión y uno de temperatura; la línea de tubería que conecta ambos tanques se encuentran un sensor de flujo, de presión y temperatura. En la salida del tanque se encuentra un sensor de presión, que medirá la presión de la salida del sistema. En la figura 16 se muestra las conexiones de los sensores de nivel, flujo, presión y temperatura al maestro IO-Link. También se puede apreciar la conexión del cable de comunicación Profinet (cable verde), el cual envía las señales al PLC. Las electroválvulas y el maestro IO-Link se conectaron a una fuente de 24V instalado en el tablero eléctrico.



Figura 16. Sistema de control de procesos.

Conclusiones.

El desarrollo de este sistema permitió aplicar las 4 herramientas fundamentales en la implementación de un proyecto mecatrónico (diseño P&ID, diseño mecánico, diseño eléctrico e integración de tecnología) comprobando con ello que es posible desarrollar tecnología siguiendo normativa y buenas prácticas ingenieriles. En este documento se presentó el proceso de diseño e implementación de un sistema de entrenamiento de control de procesos de las cuatro variables fundamentales de un proceso industrial presión, flujo, temperatura y nivel, en donde fue muy importante desde el uso de herramientas de corte, la selección adecuada de los sensores, diseño de tuberías, conexiones de sensores, tipos de señal de sensores y actuadores, adecuada selección de los

dispositivos de control de las bombas centrifugas y elección adecuada del controlador lógico programable de nueva generación, todo ello permitió generar una tecnología que podrá ser utilizada para el entrenamiento de las nuevas tendencias tecnológicas de la industria.

El sistema desarrollado es una muestra de las nuevas tecnologías que existen hoy en día y de las nuevas aplicaciones de la Industria 4.0. Todo esto ayudará al docente y estudiante en el Laboratorio Industry 4.0 ifm/TecNM a aplicar técnicas de control automático de procesos y que abre un amplio panorama a diferentes sistemas de control que tengan como fin ser más eficientes, seguro y con mejor desempeño, estudiando técnicas de modelado, adquisición y análisis de datos, diagnósticos y corrección de fallas.

Referencias bibliográficas.

- Alexandro Jaffet Cribas, L. E. (2023).** Sistema de Control de Llenado y Nivel de Tanques en Plantas de Tratamiento de Agua. San Pedro Sula.
- Alvinox (2023).** P&ID Usos, aplicaciones y beneficios para el diseño de plantas industriales. Alvinox. <https://www.alvinox.com/que-es-un-p-id-usos-aplicaciones/>.
- Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero, P. (2018).** Industria 4.0: fabricando el futuro. <https://doi.org/10.18235/0001229>.
- EPLAN. (2023).** EPLAN – efficient engineering. Recuperado 01 de Agosto de 2023 <https://www.eplan.com.mx/>.
- IFM. (2023).** Ifm electronic. Recuperado 10 de Junio de 2023 <https://www.ifm.com/mx/es>.
- LucidChart. (2023).** LucidChart. Recuperado 5 de mayo de 2023 <https://www.lucidchart.com/>.
- Moreno, E. G. (1999).** Automatización de procesos industriales. Valencia : Universitat Politècnica de València.
- Nieto, C. (2006).** Manufactura y automatización. Bogotá.
- SolidWorks. (2023).** Qué es y para qué sirve Solidworks. Recuperado 01 de Agosto de 2023, <https://solidbi.es/solidworks/>.

Información de los autores.



Osbaldo Ysaac García Ramos, Ingeniero en Electrónica, es Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tiene Cursos especialización en Mecatrónica en Universidad de Esslingen Alemania, en la empresa Emco Salzburgo Austria, en la empresa Festo Estados Unidos y Festo México. Es académico de tiempo completo del Departamento de Eléctrica-Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tiene 18 años de experiencia docente. Ha desarrollado proyectos de investigación siendo responsable técnico de desarrollo de proyectos financiados por CONACyT y empresas privadas. Cuenta con la certificación de Diseñador mecánico CSWA, CSWP, CSWP

Avanzado por la empresa SolidWorks. Obtuvo premio de desempeño a la excelencia EGEL 2018 en Ingeniería Mecatrónica y es Miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas del Estado de Chiapas. Con campos de interés en: Automatización de procesos, Industry 4.0, Tecnologías CAD-CAM-CAE, Instrumentación y control.



Aldo Esteban Aguilar Castillejos obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ing. Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) en el 2011 y el título de Ingeniero en Electrónica en el mismo Instituto, con especialidad en Instrumentación y Control. Cuenta con la certificación CSWA, CSWP, CSWP Avanzado de SolidWorks; así como un Diplomado en el motor de desarrollo de videojuegos UNREAL, Diplomado en Microsoft Teams y Diplomado en competencias para la enseñanza de las ciencias. Acreedor al premio de desempeño a la excelencia EGEL 2018 y Miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas del Estado de Chiapas. Ha participado en el desarrollo de proyectos de investigación (PEI Conacyt) para empresas privadas, desarrollo de patentes con desarrollos tecnológicos en el Estado de Chiapas y fue parte del cuerpo de investigación de la Universidad del Valle de México Campus Tuxtla hasta el 2022. Actualmente es parte del cuerpo académico en formación “Sistemas de control inteligentes” del I.T.T.G. con desarrollos de proyectos financiados por CONACyT y el TecNM. Con campos de interés en: dispositivos opto-mecatrónicos, manufactura, sensores de fibra óptica, instrumentación y control.



Alexis de Jesús Flores García es Ingeniero en Electrónica con especialidad en instrumentación y control por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), graduado en 2010; obtuvo el grado de maestro en Ciencias en Optomecatrónica por el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. (CIO), graduado en 2014. Cuenta con Diplomado en Microsoft Teams, ha colaborado como profesor en el área de Ciencias Básicas y en el departamento de educación a distancia del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 2014. Actualmente es docente y auxiliar de laboratorio $\frac{3}{4}$ de tiempo desde 2020 en el departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).



Joel Gómez Pérez es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), graduado en 2005; Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), graduado en 2013. Ha colaborado con diversas universidades; entre ellas la Universidad del Valle de México, Universidad Politécnica de Chiapas (UPCH) en el área de Ingeniería Mecatrónica, Biomédica, Energía; entre otros. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 2010. Es profesor con perfil deseable PRODEP desde 2017 y jefe de laboratorio de Física en el departamento de Ciencias Básicas.



José Ángel Zepeda Hernández es Ingeniero Industrial en Eléctrica y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez e investigador desde 1999, Imparte cátedra en el área de Ingeniería Electrónica y la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el ITTG, donde imparte las asignaturas de Diseño con Transistores y Electrónica Básica respectivamente. Líder del cuerpo académico en formación “Sistemas de control inteligentes”.



Álvaro Hernández Sol es Ingeniero en electrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y es investigador desde 1997. Certificado en SolidWorks Associate. Jefe de proyectos de investigación de ingeniería electrónica desde el 2001. Fundo y asesora el “Club de robótica del ITTG”. Colabora en la línea de investigación de “Robótica” de Ingeniería electrónica. Dirige el área de trabajo en “Robótica” y es parte del cuerpo académico “sistemas de control inteligentes”. Ha realizado investigaciones en el área de los sistemas alternativos de comunicación y en sistemas robóticos, Así como en sistemas traductores de lenguaje.