

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas Carrera de Ingeniería En Mantenimiento Eléctrico

IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID Y POR ESPACIOS DE ESTADOS, INTEGRADOS A UN SISTEMA DINÁMICO REAL

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero
en Mantenimiento Eléctrico

Autor:

Danny Sebastián Bonilla Andrade

Director:

MSc. Eliana Carolina Ormeño Mejía

Ibarra-Ecuador

2021

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.

En cumplimiento del Art. 144 de la ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo de grado a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD	1003873880
APELLIDOS Y NOMBRES	Bonilla Andrade Danny Sebastián
DIRECCIÓN	Cotacachi, calles Alfredo Albuja Galindo y Esmeraldas
EMAIL	dsbonillaa@utn.edu.ec
TELÉFONO MOVIL	0998632991
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID Y POR ESPACIOS DE ESTADOS, INTEGRADOS A UN SISTEMA DINÁMICO REAL.
AUTOR	Bonilla Andrade Danny Sebastián
FECHA	20-09-2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA	Pregrado
TÍTULO POR EL QUE ASPIRA	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
DIRECTOR	MSc. Eliana Ormeño

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autor a terceros, por lo tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por partes de terceros.

Ibarra, a los 20 días del mes de septiembre de 2021

EL AUTOR:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Danny Bonilla', with a horizontal line drawn through the middle of the signature.

.....
Bonilla Andrade Danny Sebastián

1003873880

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Yo, Eliana Ormeño en calidad de tutor del señor estudiante, Bonilla Andrade Danny Sebastián certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado **“IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID Y POR ESPACIOS DE ESTADOS, INTEGRADOS A UN SISTEMA DINÁMICO REAL”**

Para la obtención del título de ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.



Firmado
digitalmente por
ELIANA CAROLINA
ORMEÑO MEJIA
Fecha: 2021.09.20
12:25:06 -05'00'

Ing. Eliana Ormeño Mejía M.Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación se los dedico a mis padres Alfonso Bonilla y María Andrade, por haberme ayudado y alentado en conseguir este logro académico, que sin su sacrificio y apoyo incondicional no lo hubiera logrado.

A mis hermanas, Nadia, Janeth, Mickaela y Abigail, quienes con sus consejos y compañía me permitieron abrir paso ante los obstáculos que se me presentaban, a mi amada Pachita quién me acompañó en la recta final y la más importante de este camino académico lleno de muchos sueños y aspiraciones que con su ayuda me convirtió en un mejor ser humano, a mis amigos Fernando, Sergio, Israel, Jimmy, Mishell, Nina, Genesis y Sarita, mis maestros espirituales Don Lenin y Don Leonardo que sin duda me han despertado la conciencia para compartir los buenos y malos momentos de los que día a día quedan maravillosos recuerdos.

También, a las personas que de una u otra forma estuvieron presentes en mi vida y me ayudaron a sobresalir en momentos difíciles, tomando lo mejor de cada situación y evitando que me meta en problemas.

AGRADECIMIENTOS

Un eterno agradecimiento a mis padres, quienes con su amor, paciencia y dedicación me guiaron por el camino correcto para tomar buenas decisiones motivándome siempre con las palabras correctas para superar cada prueba de vida.

A Waruntzy y mi maestro Lenin Alvear por abrir mi mente y ayudarme a rescatar mi identidad, por los conocimientos que me han sido impartidos y por convertirme en kichwa músico con grandes aportes en el desarrollo comunitario de los pueblos originarios.

A la fundación “Juntos Leemos” y su fundador Diego Vélez quien me ayudó a sostener los gastos económicos de mi trabajo de investigación, por darme la oportunidad de ser maestro de niños, jóvenes y adultos quienes han desarrollado capacidades excepcionales y con los cuales quedo satisfecho como su mentor.

Agradezco a cada uno de mis docentes universitarios, quienes me han formado académicamente para llegar a ser un profesional.

TABLA DE CONTENIDOS

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	I
2CONSTANCIAS	II
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN	1
CONTEXTO.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	4
ALCANCE DEL TRABAJO.....	5
VIABILIDAD DEL TRABAJO.....	5
CAPÍTULO I	6
MARCO TEÓRICO.....	6
1.1 Sistemas de control automáticos.....	6
1.2 Elementos de un sistema de control.....	7
1.3 Representación de los sistemas de control.....	8
1.3.1 Diagrama de bloques.....	8
1.3.2 Elementos de un diagrama de bloques.....	9
1.4 Requisitos de un sistema de control.....	9
1.5 Clasificación de los sistemas de control.....	10
1.5.1 Sistema de control en lazo abierto.....	10
1.5.2 Sistemas de control en lazo cerrado.....	10
1.6 Diseño de los sistemas de control.....	11
1.7 Característica de respuesta de los sistemas de control.....	11
1.7.1 Análisis temporal de respuestas de sistemas de control.....	12
1.7.2 Función de transferencia.....	14

1.7.3	Sistemas de primer orden.....	14
1.7.4	Sistemas de segundo orden.....	14
1.7.5	Sistemas de orden superior.....	16
1.8	Ceros y polos en una función de transferencia.....	17
1.9	Método de ROUTH- HURWITZ.....	17
1.10	Lugar Geométrico de las raíces.....	17
1.11	Acciones de control Proporcional, Integra y Derivativa (PID).....	18
1.11.1	Controlador Proporcional P.....	19
1.11.2	Controlador Integral.....	19
1.11.3	Controlador Derivativo D.....	20
1.11.4	Controlador PI.....	20
1.11.5	Controlador PD.....	20
1.11.6	Controlador PID.....	20
1.12	Modelado en el espacio de estados.....	21
1.12.1	Estado.....	21
1.12.2	Variable de estado.....	22
1.12.3	Vector de estado.....	22
1.12.4	Espacio de estados.....	22
1.12.5	Representación en el espacio de estados.....	22
1.13	Comparativa entre controladores PID y por Espacio de Estados.....	23
1.14	Identificación de sistemas.....	25
1.14.1	Método de identificación paramétrica.....	26
1.14.2	Método de identificación no paramétrica.....	27
1.15	El PLC.....	29
1.15.1	Aplicaciones de un PLC.....	30
CAPITULO II.....		31
DISEÑO DE CONTROLADORES PID Y POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS.....		31
2.1	Descripción del lugar de estudio.....	31
2.2	Metodología.....	31
2.3	Descripción de Softwares.....	32
2.4	Fundamentos matemáticos para el diseño de los controladores PID y por realimentación de estados.....	33
2.4.1	Factor de amplificación de la ganancia K	33
2.4.2	Constante de Tiempo Tau (τ).....	33
2.4.3	Función de transferencia.....	34
2.4.4	Polinomio deseado de un sistema.....	35

2.4.5	Representación de un PID en tiempo continuo.....	35
2.4.6	Representación de PID en tiempo discreto.....	36
2.4.7	Ecuaciones por espacio de estados.	36
2.5	Selección del PLC Siemens.....	38
2.6	Descripción y reconocimiento de los módulos del laboratorio de control.....	39
2.7	Configuración y comunicación OPC.	41
2.8	Configuración de la red y características.	44
2.9	Identificación de sistemas.....	45
2.10	Análisis de las variables de control en lazo abierto.....	46
2.10.1	Planta de Nivel, Presión y caudal.	47
2.11	Diseño de los controladores PID y por realimentación de estados	52
2.12	Controladores PID.....	52
2.12.1	Controlador PID por asignación de polos para la planta de nivel.	53
2.12.2	Controlador por el LGR para la planta de presión.....	56
2.12.3	Controlador por el LGR para la planta de caudal.....	62
2.13	Controladores por realimentación de estados.....	64
2.13.1	Controlador por realimentación de estados para la planta de Nivel.	64
2.13.2	Controlador por realimentación de estados para la planta de Presión.	65
2.13.3	Controlador por realimentación de estados para la planta de Caudal.....	66
2.14	Discusión.....	68
CAPITULO III		69
IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS CONTROLADORES PID Y POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS.		69
3.1	Desarrollo de la propuesta.....	69
3.2	Implementación de los controladores PID para los sistemas dinámicos de nivel, presión y caudal.....	69
3.2.1	Implementación del controlador para la planta de nivel.	69
3.2.2	Implementación del controlador para la planta de presión.....	73
3.2.3	Implementación del controlador para la planta de caudal.	75
3.3	Implementación de los controladores por realimentación de estados para los sistemas dinámicos de nivel, presión y caudal.	76
3.3.1	Implementación del controlador para la planta de nivel.	76
3.3.2	Implementación del controlador para la planta de presión.....	80
3.3.3	Implementación del controlador para la planta de caudal.	82
3.4	Pruebas de funcionamiento de los controladores PID.....	83

3.4.1	Pruebas de funcionamiento para la planta de nivel.	83
3.4.2	Pruebas de funcionamiento para la planta de presión.	85
3.4.3	Pruebas de funcionamiento para la planta de caudal.	86
3.5	Pruebas de funcionamiento para los controladores por realimentación de estados.	87
3.5.1	Pruebas de funcionamiento para la planta de nivel.	87
3.5.2	Pruebas de funcionamiento para la planta de presión.	88
3.5.3	Pruebas de funcionamiento para la planta de caudal.	90
CONCLUSIONES.....		92
RECOMENDACIONES		94
REFERENCIAS.....		95
ANEXOS		99
ANEXO 1.....		99
ANEXO 2.....		101
ANEXO 3.....		102
ANEXO 4.....		103
ANEXO 5.....		104
ANEXO 6.....		105
ANEXO 7.....		106
ANEXO 8.....		115
ANEXO 9.....		167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Entrada y salida del proceso	6
Figura 2 Tipos de entradas a los sistemas de control.....	7
Figura 3 Representación de diagrama de bloques para un sistema de control.....	8
Figura 4 Diagrama de bloques con sus respectivos componentes	9
Figura 5 Sistema de control en lazo abierto.....	10
Figura 6 Sistema de control en lazo cerrado	10
Figura 7 Señales de estabilidad absoluta	13
Figura 8 Error del sistema	13
Figura 9 Señales de respuesta de los sistemas de segundo orden	15
Figura 10 Respuesta Subamortiguada de segundo orden.....	16
Figura 11 Representación polar de los números complejos	18
Figura 12 Estructura de un controlador PID en lazo cerrado	21
Figura 13 Diagrama de bloques del sistema de control representado en el espacio de estados	23
Figura 14 Esquema para el análisis de un sistema de control	25
Figura 15 Respuesta de señal frente a una entrada escalón	27
Figura 16 Auto correlación de la señal de entrada.....	28
Figura 17 Autocorrelación de la señal de salida	28
Figura 18 Correlación de cruzada entre la señal de entrada y salida.....	28
Figura 19 Mapa conceptual del PLC.....	29
Figura 20 Aplicaciones de un PLC	30
Figura 21 Identificación y direccionamiento de cada módulo de control	42
Figura 22 Conexión exitosa de todos los PLCs	42
Figura 23 Periodo de muestreo	42
Figura 24 Configuración de Variables en KEPServerEX.....	43
Figura 25 Configuración de variables para envío y adquisición de datos en el PLC-Siemens	43
Figura 26. Comunicación exitosa en KEPSERVEREX	44
Figura 27 Esquemático de la red LAN de comunicaciones.....	44

Figura 28 Pasos que seguir para realizar la identificación de sistemas	45
Figura 29 Variables de control para el análisis en lazo abierto con RSLogix500English.....	46
Figura 30 Variables en lazo abierto en OPC KEPServerEx.....	47
Figura 31 Configuración de tiempos de muestreo y ubicación de las variables para lectura y escritura	47
Figura 32 Algoritmo para la variable de nivel en lazo abierto.....	48
Figura 33 Bloques OPC y señal de lectura.....	48
Figura 34 Bloque OPC y constantes de activación.....	49
Figura 35 Entrada de frecuencia y escalamiento	49
Figura 36 Cambio de señal de entrada.....	50
Figura 37 Diagrama de con controlador PID discreto	55
Figura 38 Diagrama de flujo para diseñar un controlador PID	57
Figura 39 Respuesta escalón en lazo abierto y cerrado del sistema	57
Figura 40 Lugar geométrico de las raíces y polos objetivos del sistema.....	58
Figura 41 Controlador y planta en lazo cerrado	58
Figura 42 Interfaz gráfica RLTOOL de la planta de presión.....	59
Figura 43 Configuración de T_a y M_p	60
Figura 44 Polos y ceros complejos añadidos al sistema de primer orden.....	60
Figura 45 Polos y ceros modificados en la planta primer orden para presión	61
Figura 46 Polos y ceros modificados en la planta primer orden para caudal	63
Figura 47 Diagrama de flujo para el diseño de un controlador por realimentación de estados para nivel.....	65
Figura 48 Diagrama de flujo para el diseño de un controlador por realimentación de estados para presión	66
Figura 49 Diagrama de flujo para el diseño de un controlador por realimentación de estados para caudal	67
Figura 50 Interfaz de control PID para Nivel.....	70
Figura 51 Interruptores de activación de la planta	71
Figura 52 Subsistema de comunicaciones y bloques OPC.....	71
Figura 53 Subsistema PID, realimentación, controlador y saturador.....	72

Figura 54. Ventanas para la visualización y comportamiento de las variables	72
Figura 55 Configuración del bloque PID discreto en Matlab-Simulink.....	73
Figura 56 Interfaz de control PID para Presión	74
Figura 57 Configuración de las acciones PID para la planta de presión	74
Figura 58 Interfaz de control PID para Caudal.....	75
Figura 59 Configuración de las acciones PID para la planta de caudal	76
Figura 60 Interfaz del sistema de control de nivel por realimentación de estados.....	77
Figura 61 Interruptores de activación de la planta.	77
Figura 62 Subsistema de comunicaciones y bloques OPC.....	78
Figura 63 Subsistema de realimentación de estados, ganancias y saturador	79
Figura 64 Ventanas para la visualización de las variables de nivel, setpoint y control del variador de frecuencia	79
Figura 65 Configuración de ganancias y tiempo de muestreo en el control de nivel	80
Figura 66 Sistema de control de presión por realimentación de estados	81
Figura 67 Configuración de ganancias y tiempo de muestreo en el control de presión.....	81
Figura 68 Sistema de control de caudal por realimentación de estados	82
Figura 69 Configuración de ganancias y tiempo de muestreo en el control de Presión	83
Figura 70 Respuesta del controlador PID por asignación de polos para nivel	84
Figura 71 Respuesta del controlador PID por el lugar geométrico de las raíces para presión	85
Figura 72 Respuesta del controlador PID por el lugar geométrico de las raíces para caudal	86
Figura 73 Respuesta del controlador por realimentación de estados para nivel	88
Figura 74 Respuesta del controlador por realimentación de estados para presión	89
Figura 75 Respuesta del controlador por realimentación de estados para caudal	90

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	7
TABLA 1.2 ELEMENTOS DE UN DIAGRAMA DE BLOQUES.	9
TABLA 1.3 CUADRO COMPARATIVO ENTRE LOS CONTROLADORES PID Y POR ESPACIO DE ESTADOS.	23
TABLA 1.4 ETAPAS PARA IDENTIFICAR UN SISTEMA.....	26
TABLA 2.1 CARACTERÍSTICAS DEL PLC SELECCIONADO.....	39
TABLA 2.2 MÓDULOS DIDÁCTICOS CORRESPONDIENTES AL LABORATORIO DE SISTEMAS DE CONTROL.....	40
TABLA 2.3 IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE DE CADA MÓDULO.	41
TABLA 2.4 DIRECCIONES IP EN LOS DISPOSITIVOS DE LA RED LAN.....	45
TABLA 2.5 VALORES OBTENIDOS DE LA PLANTA DE NIVEL.	50
TABLA 2.6 SISTEMAS EN TIEMPO CONTINUO Y TIEMPO DISCRETO.....	52
TABLA 2.7 VALORES DE LA ACCIÓN PROPORCIONAL E INTEGRAL ENCONTRADOS POR EL MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE POLOS.	56
TABLA 2.8 ACCIONES DEL CONTROLADOR PID MEDIANTE EL MÉTODO LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES PARA LA PLANTA DE PRESIÓN.....	62
TABLA 2.9 ACCIONES DEL CONTROLADOR PID MEDIANTE EL MÉTODO LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES PARA LA PLANTA DE CAUDAL.	64

RESUMEN

El presente trabajo de grado se basa en aplicaciones para el uso de diferentes tipos de control, mediante los cuales se pueden realizar prácticas de laboratorio orientadas a sistemas dinámicos de nivel, presión y caudal en la carrera de Electricidad.

Esta tesis se la realizó con el fin de Implementar controladores PID y por espacios de estados, codificados en un software especializado integrados a sistemas dinámicos mediante la utilización de un PLC para la adquisición de datos y variables de estado en tiempo real, con los cuales se dio a conocer la configuración de comunicaciones OPC, la identificación de sistemas, el control y monitoreo de variables que conforman cada uno de los sistemas de nivel, presión y caudal, que, a partir de un estudio de métodos y técnicas de control se llegó a su diseño e implementación, los cuales contribuyen al aprendizaje y la formación de conocimientos sobre los sistemas de control PID y realimentación de estados.

A este trabajo de investigación se lo complementa con un análisis comparativo entre los controladores PID y por realimentación de estados. Las pruebas de funcionamiento y experimentos realizados determinan el tiempo de estabilización, el máximo pico de sobre impulso y el error de estado estable en cada sistema, los cuales muestran un desempeño del 90% para el controlador PID en sistemas no lineales y un 98%% para sistemas lineales, a diferencia de los controladores por realimentación de estados, estos tienen un desempeño al 50% en sistemas no lineales y un desempeño al 100% en sistemas lineales. Además, se realizó un manual técnico para prácticas de control PID y por realimentación de estados aplicados a las variables de nivel, presión y caudal.

Palabras Claves: *Identificación de sistemas, Comunicaciones OPC, Diseño, Controladores PID, Controladores por realimentación de estados, Sistema de Nivel, Sistema de Presión, Sistema de Caudal.*

ABSTRACT

The current project is based on applications for the use of different types of control, through which laboratory practices oriented to dynamic systems of level, pressure and flow can be carried out in the Electricity career.

This thesis was done with the objective of implementing PID and state-space controllers programmed with specialized software, integrated to dynamic systems by using a PLC to acquire the data and state variables in real time, with which the OPC communications configuration, the systems identification, and the control and monitoring of the variables that conform each of the level, pressure, and flow systems became known, from a study of methods and control techniques resulting in its design and implementation, which contributed to the learning and knowledge formation about the PID control systems and feedback states.

This investigative project is complemented by a comparative analysis between PID controllers and feedback states. The functional tests and experiments that were done determine the stabilizing time, the maximum peak over impulse, and the stable state error in each system, which shows a 90% performance for the PID controller in non-linear systems and 98% for linear systems, contrasting with the state feedback controllers, which have a 50% performance in non-linear systems and 100% performance in linear ones. Also, a technical manual was done for the PID control and state feedback practices applied to the level, pressure, and flow variables.

Keywords: *Systems identification, OPC communication, design, PID controllers, State feedback controllers, Level system, Pressure system, Flow system.*

INTRODUCCIÓN

CONTEXTO.

El desarrollo de tecnologías con controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo) ha permitido que el hombre mejore su calidad de vida, de tal manera que ciertas actividades que llevan un proceso complejo dentro de una industria sean realizadas de manera autónoma sin la necesidad de la intervención humana.

Los procesos industriales actualmente pueden cumplir con sus funciones por sí solos mediante la incorporación de instrumentos de medición y control (Quezada, Bautista, Flores, & Quezada, 2014). El uso de estos instrumentos dentro de un sistema de control autónomo ha permitido elaborar productos innovadores de alta relevancia global, que, mediante un proceso manual resultaría difícil de conseguirlo. (Sandoval, 2009).

El control de procesos es llevado a cabo mediante un controlador PID el cual ha proporcionado diversos métodos de diseño a través de la retroalimentación o bucles, lo que ha hecho que este controlador sea el más utilizado durante dos décadas atrás hasta la actualidad. Según (Astrom & Hagglund, Abril), (Sabina, Vilanova, & Arrieta, 2014) el 90% de estos procesos y bucles son realizados mediante un controlador PID el cual permite manipular entradas y salidas para procesar la información mediante la transformada de la place. De igual manera en la que se utilizan controladores PID, las continuas formas de operar un controlador han originado técnicas modernas de control mediante el uso de espacios de estados (Fernández, 2002), dando solución a procesos con comportamiento dinámico complejo. Este método se basa en el modelamiento matemático de un sistema físico relacionado por medio de la agrupación de entradas, salidas y variables de estado vinculadas por ecuaciones diferenciales de primer orden las cuales se acoplan en una sola ecuación diferencial matricial de primer orden, permitiendo evaluar un modo sólido y eficaz de modelar y analizar sistemas de control con múltiples entradas y salidas lineales e invariantes en el tiempo (Rodríguez & Bordós, 2015), (Mago, Válles, Oyala, & Palomino, 2015).

(Reinoso, Blasco, & Sanchis, 2009), (Kuo & Golnaraghi, 2009), afirma que el diseño de controladores debe considerar aspectos como: el error, sensibilidad, estabilidad, ancho de banda y exactitud. para su exitosa implementación. Tanto el controlador PID y por espacios de estados deben ajustarse repetitivamente a través de un software de computadora que le permita obtener un resultado de acuerdo con su estructura, así lo describe (Pillajo, Bonilla, & Hincapié, 2016), este debe enfocarse en cómo procesar un error que está ligado a las

diferentes ganancias que el controlador debe manejar para su correcto funcionamiento. Así pues, se obtiene un sistema que varía en el tiempo y un controlador PID que debe responder a cada una de las ganancias presentes para que todo el sistema sea eficiente como lo mencionan (Pillajo, Bonilla, & Hincapié, 2016).

Es común encontrar procesos automáticos con las características mencionadas, estos han conseguido la modernización de empresas y laboratorios prácticos mediante la implementación de un controlador lógico programable (PLC) que basa su funcionamiento en un lenguaje de programación fundamentado en diagramas de bloques, Basic, C o en lógica de estado según (AUTRACEM, 2019). El PLC permite ejecutar funciones lógicas, configuración de secuencia, conteo, aritméticas y sincronización para el control de máquinas y procesos como lo menciona (Martínez, 2015). Este controlador lleva ese nombre porque la programación se vincula con la realización de operaciones lógicas y de computación. (Martínez, 2015).

La utilización de cualquier lenguaje de programación para este controlador es muy eficiente. De igual manera, el controlador tiene su propio software de operación (TIA-PORTAL), el cual permite poner en marcha las funciones del PLC (SIEMENS, 2019), este programa es tradicional y maneja variables de estado y PID, pero no es el único software que se puede incorporar para poner en marcha sus funciones, también se lo puede hacer mediante la utilización de un software especializado utilizando espacios de estados (MATHWOKS.COM, 2019), estos permiten tener más interacción con las variables PID, logrando que este software sea más adecuado en el desarrollo de prácticas de laboratorio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El amplio uso de los controladores (PID) en el sector industrial (Rude, 2008) a causa del desarrollo de la matriz energética, ha forzado a los profesionales a capacitarse de manera continua con las tecnologías encaminadas al uso de sistemas prácticos en controladores lógicos programables (PLC). Estos sistemas son controlados mediante softwares y sistemas de control, de tal manera que permiten relacionarse con el uso de instrumentos de medición-control y, además, habituarse a la integración, manipulación y mantenimiento de dispositivos industriales conectados a un módulo de laboratorio práctico.

La Universidad Técnica del Norte (UTN), actualmente cuenta con módulos de laboratorio prácticos dentro del edificio de la carrera de Electricidad, en donde el estudiante no puede interactuar de forma práctica con los distintos métodos de operar un controlador, viéndose limitado a la manipulación de procesos de control e instrumentación necesarias para para su formación profesional, para ello es necesario contar con un proceso de control manipulable en el cual se puedan realizar prácticas de laboratorio acorde a los requerimientos del estudiantado.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

¿Es posible implementar controladores PID y por espacios de estados, codificados en un software especializado a un sistema dinámico real?

OBJETIVO GENERAL.

Implementar controladores PID y por espacios de estados, codificados en un software especializado, integrados a un sistema dinámico mediante la utilización de un PLC para la adquisición de datos y variables de estado en tiempo real.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Realizar una comparativa respecto a los controladores PID y por realimentación de estados, codificados en un software especializado aplicados a sistemas dinámicos.
2. Diseñar los controladores PID y por realimentación de estados codificados a un sistema real utilizando técnicas de control mediante un software especializado.
3. Evaluar el funcionamiento de controladores PID y por realimentación de estados codificados a un controlador lógico programable PLC.

JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.

La amplia gama de equipos de control, automatización, monitoreo y adquisición de datos se enfrentan a constantes cambios, simplificando sus estructuras y perfeccionando cada vez más sus procesos de operación.

La importancia del presente trabajo de grado radica en concebir un software para el control, monitoreo y adquisición de datos, llevada a cabo mediante un software programable que le permitirá al estudiante familiarizarse con el uso de sistemas de control, mediante la manipulación de variables PID y por espacios de estados que hacen que dicho sistema opere de manera eficiente para cualquiera de los dos casos.

Previo a lo antes mencionado, se puede afirmar que, por medio del software utilizado, los estudiantes podrán manipular variables PID y por espacio de estados dentro de los rangos definidos dependiendo de las necesidades que éste tenga y, además, de realizar prácticas de control y automatización en los módulos del laboratorio de control perteneciente al edificio de la carrera de electricidad, siendo así un complemento a su formación académica.

ALCANCE DEL TRABAJO.

El presente trabajo de grado está basado en una investigación de carácter tecnológico y práctico referente a la integración de controladores PID y espacios de estados, codificados en un software especializado a un sistema dinámico real, mediante la utilización de un PLC para la obtención de variables de estado y control automático del sistema.

La implementación del presente trabajo se realizará en el laboratorio de Control perteneciente a las instalaciones de la carrera de ingeniería eléctrica. Por lo tanto, el tipo de alcance de la investigación es tecnológico y práctico.

VIABILIDAD DEL TRABAJO.

La implementación de controladores PID y por espacios de estados, se basa en la adquisición de datos mediante el uso de un PLC programable, a través de la utilización de un software especializado, el cual permite que el proceso que se quiera llevar a cabo se desarrolle o ejecute de manera segura, cumpliendo así con las condiciones operativas y técnicas que el controlador requiera.

La implementación de estos tipos de controladores es una herramienta muy útil para llevar acabo procesos industriales y prácticos, por estas razones, teóricamente se cuenta con el suficiente acceso a la información acerca de controladores PID y por espacios de estados mediante internet, revistas, libros, artículos entre otros, y de forma práctica a los diversos módulos didácticos pertenecientes al laboratorio de la carrera de Electricidad, los cuales permitirán realizar el monitoreo, adquisición de datos y pruebas de control necesarias para el correcto funcionamiento de los mismos.

Se pretende brindar un Módulo PLC a la carrera de Electricidad de tal manera que el estudiante pueda interactuar con él y sus diversas formas de operación, el equipo no demanda de mucha inversión y además cuenta con la suficiente información para ponerlo en marcha, razón por la cual la adquisición del PLC se lo realizará por medio de recursos monetarios propios, por consiguiente la investigación e implementación no requiere de un financiamiento mayor, es por eso que, el presente trabajo de grado tiene relevancia y es viable económica y técnicamente.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de control automáticos representan elementos habituales de suma importancia en la vida cotidiana, están constituidos por componentes y dispositivos que hacen posible llegar a un objetivo de control (Pinzón, 2010).

(Zánches & Muzo, 2017) & (Carreres, Suardías, & H, 2016) describen que los sistemas de control automático son de gran importancia en diversos campos, tales como la industria, la generación eléctrica, electrónica, transporte, redes computacionales, comunicaciones, manufactura, medicina y sistemas, mediante los cuales han logrado el desarrollo de la humanidad. Todo esto es posible gracias a los avances y mejoras tecnológicas que se han implementado mediante conceptos y fundamentos matemáticos, de los cuales surge la ingeniería de control.

La ingeniería de control está altamente relacionada con fundamentos matemáticos que permiten estructurar los diversos tipos de controladores existentes, ya sea PID, por espacio de estados, lugar geométrico de las raíces, entre otros (Ramos, Vargas, & Vergara, 2015). El estudio de estos ayudará a entender la abstracción matemática de sistemas dinámicos, que son de vital importancia en el estudio de sistemas de control, a partir de ellos se obtiene un modelo matemático, haciendo más fácil el análisis de los sistemas de control.

1.1 Sistemas de control automáticos.

Un sistema o parte de él está sujeta a cambios capaces de ser controlados, en donde se aplica una señal de entrada $r(t)$ para obtener una señal de salida $y(t)$, la cual puede ser representada mediante diagramas de bloques como indica la Figura 1 (Hernández R. , 2010).



Figura 1 Entrada y salida del proceso

Fuente: (Hernández R. , 2010)

La relación entrada-salida conlleva una causa y efecto con respecto al sistema, por eso el proceso a controlar puede ser considerado planta. (Mercado & Reyes, 2017), menciona que

las entradas características aplicados a estos sistemas son: escalón, rampa e impulso, como se detalla en la Figura 2.

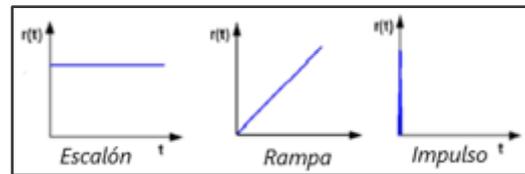


Figura 2 Tipos de entradas a los sistemas de control

Fuente: (Hernández R. , 2010)

La entrada escalón muestra un comportamiento invariable que se introduce al sistema, mientras que la entrada rampa indica una señal con variación continua en el tiempo, y por último la entrada impulso es aquella que presenta una señal de magnitud muy grande y corta duración en el tiempo. Este tipo de respuesta es considerada la representación matemática del sistema (Hernández R. , 2010) & (Mercado & Reyes, 2017).

La ingeniería de control consiste en la selección y ajuste de un conjunto determinado de elementos de manera que, al interconectarse, el sistema resultante debe responder a un comportamiento específico (Taylor & Francis Group, 2002).

1.2 Elementos de un sistema de control.

TABLA 1.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL.

Elementos de un sistema de control	
Planta	Equipo que junto a otros elementos ejecutan una operación en particular.
Proceso	Acción de forma continua, se encuentra sujeta a cambios controlados que conducen a tener un resultado.
Instrumento	<ul style="list-style-type: none"> • Medidor • Actuador • Controlador
Variable controlada	Se mantiene dentro de ciertas condiciones.
Variable manipulada	Influye en la variable controlada para corregir o limitar la desviación del valor medido con respecto al valor deseado.
Perturbaciones	Señal que afecta de forma negativa el valor de la salida de un sistema.

Fuente: (Ogata, 2010) & (Perez, Peres, & Perez, 2007)

La TABLA 1.1 muestra los diferentes componentes que conforman un sistema de control. Un sistema de control está compuesto esencialmente por 4 elementos fundamentales: unidad de medida, unidad de control, un elemento final de control y el propio proceso (Kuo & Golnaraghi, 2009).

1.3 Representación de los sistemas de control.

Un sistema de control puede estar representado mediante diagramas de bloques y señales.

1.3.1 Diagrama de bloques.

(Carillo, 2011) & (Hernández R. , 2010) mencionan que la representación de sistemas de control mediante diagramas de bloques se emplea para explicar las partes que conforman un sistema de control. La Figura 3, muestra la representación en diagrama de bloques de un sistema, con sus respectivas entradas y señales de retroalimentación, así también muestra la función de transferencia en dominio de la frecuencia (s).

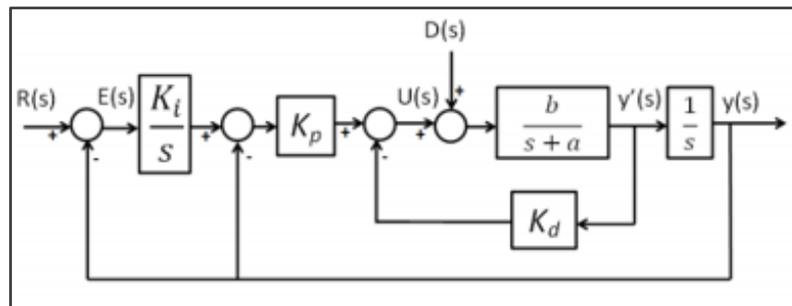


Figura 3 Representación de diagrama de bloques para un sistema de control

Fuente: (Hernández, Pesa, García, & Torres, 2015)

1.3.2 Elementos de un diagrama de bloques.

TABLA 1.2 ELEMENTOS DE UN DIAGRAMA DE BLOQUES.

Elementos de un diagrama de bloques	
Bloque funcional	Se representa por bloques en donde se encuentran dispositivos o una operación matemática.
Sumador o comparador	Punto de adición en donde una salida representa accionamiento o la suma algebraica de las posibles entradas existentes.
Punto de bifurcación	Es el punto cuya señal sale de un bloque para llegar a un punto de suma, en donde se derivan líneas dirigidas que indican que se ha tomado una muestra de la señal de salida del bloque funcional.

Fuente: (Hernández R. , 2010); (Horacio, 2019). & (Carillo, 2011)

La TABLA 1.2, muestra los diversos componentes que tiene un diagrama de bloques, en la Figura 4. se muestran dichos componentes.

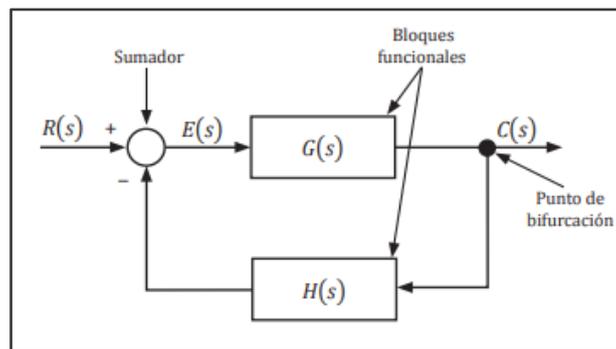


Figura 4 Diagrama de bloques con sus respectivos componentes

Fuente: (Carillo, 2011)

1.4 Requisitos de un sistema de control.

Un sistema de control ideal debe ser apto de lograr sus objetivos desempeñando las siguientes condiciones (Ogata, 2010):

- Garantizar la estabilidad y ser robusto ante perturbaciones y posibles errores en cualquier sistema de control.
- Ser tan eficiente como sea posible.
- Ser fácil de implementar, además, ser cómodo de operar en tiempo real con el apoyo de un ordenador.

En la Figura 6., se muestra a un sistema de control en lazo cerrado, el cual tiene una relación entre la salida y entrada de referencia, comparándola y utilizando su diferencia para realizar una acción de control, dicho sistema utiliza un sensor o medidor para detectar la respuesta y así compararla.

1.6 Diseño de los sistemas de control.

Según (Astrom & Tore, 2009), el diseño de los sistemas de control se puede realizar mediante el lugar geométrico de las raíces, la respuesta en frecuencia, compensadores PID y la aproximación en el espacio de estados, etc.

Los sistemas de control se diseñan con el fin de llevar a cabo tareas específicas, estas pueden ser requerimientos en la respuesta transitoria y en el estado estacionario, dichas especificaciones deben ser dadas antes del comenzar con el diseño, las cuales relacionan la precisión, estabilidad y velocidad de respuesta, limitaciones y robustez (Astrom & Tore, 2009).

Los procedimientos de diseño están relacionados con la aproximación de prueba y error, el diseño comienza a partir de un modelo matemático del sistema de control y se ajustan los parámetros de un compensador. Se debe tener en cuenta el comportamiento del sistema mediante un análisis, luego de cada ajuste de los parámetros.

El diseño que se desee realizar debe ser llevado a cabo mediante un programa computacional que permita realizar un cálculo numérico exhaustivo permitiendo verificar el mismo. Una vez conseguido el modelo matemático, el diseñador debe construir un prototipo y probar el sistema realizado, las pruebas de funcionamiento deben realizarse en lazo abierto asegurando la estabilidad y de esa forma cerrar el lazo y probar su comportamiento en lazo cerrado. Si el comportamiento del sistema no es el deseado, el diseñador debe cambiar el prototipo hasta que el sistema cumpla con las especificaciones. Finalmente, el diseñador debe lograr que las especificaciones de comportamiento sean las correctas para el sistema de control y cumpliendo así que el sistema sea fiable y económico (Ogata, 2010).

1.7 Característica de respuesta de los sistemas de control.

Los sistemas de control pueden identificarse mediante el principio físico que los define, es así como podemos tener sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos, térmicos, neumáticos, biológicos, electrónicos, etcétera. También estos pueden ser identificados con respecto al

orden de la ecuación diferencial que define cada sistema, estos pueden ser de primer, segundo y orden superior (Kuo & Golnaraghi, 2009).

1.7.1 Análisis temporal de respuestas de sistemas de control.

Todos los sistemas de control presentan un fenómeno transitorio antes de llegar a la respuesta de estado estable, tal es el caso de la masa, inercia, etc. Estos componentes no pueden establecer su tiempo de respuesta de manera inmediata, pues para hacerlo requieren de un cierto tiempo (Kuo & Golnaraghi, 2009) & (Ogata, 2010).

- **Respuesta en régimen transitorio.** Está relacionado con la rapidez de respuesta, estabilidad y oscilaciones a través del estado permanente.
- **Respuesta en régimen permanente.** Es aquel que determina el estado estable del sistema, el valor propio de funcionamiento y el error cometido.
- **Estabilidad absoluta**

La estabilidad absoluta nos indica si el sistema es estable o no es estable. Un sistema de control está en equilibrio si, en ausencia de cualquier perturbación o entrada haciendo este tenga un comportamiento indeseado, la salida permanece en el mismo estado (Ogata, 2010) & (Rodríguez & Bordóns, 2005) . Y si un sistema de control contiene una condición inicial o cualquier perturbación, se dice que:

- Es estable, si la salida termina por regresar a su estado de equilibrio.
- Es críticamente estable si las oscilaciones de la salida permanecen en el estado de equilibrio.
- Es inestable si la salida diverge sin límite a partir de su estado de equilibrio.

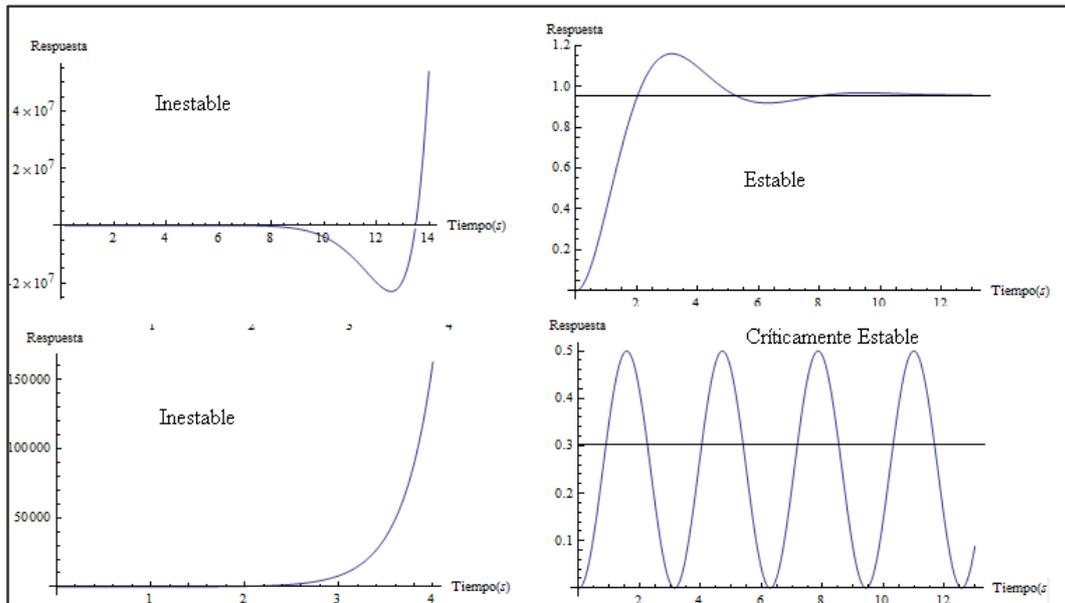


Figura 7 Señales de estabilidad absoluta

Autor: (Hernández R. , 2010)

En La Figura 7, se muestran a las señales de estabilidad absoluta y su comportamiento en condiciones iniciales y perturbaciones.

- **Error de estado estacionario.**

Según (Llata García, Fernández Pérez, Gonzáles Sarabia, Torres Ferreo, & Robla Gómez , 2013), el error de estado estacionario consiste en que la salida de un sistema en estado estacionario no coincide de manera exacta con la señal de referencia, se dice que la señal tiene un error de estado estacionario como se muestra en la Figura 8.

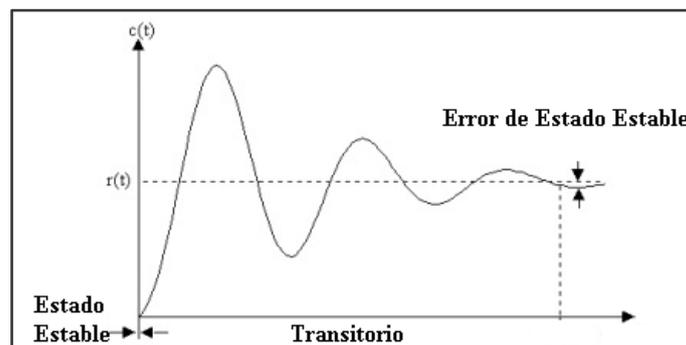


Figura 8 Error del sistema

Fuente: (Montoya., 2011)

El error que presenta el sistema indica la precisión de este, es decir a mayor error de estado estacionario la precisión disminuye.

1.7.2 Función de transferencia.

La función de transferencia corresponde a una expresión matemática que caracteriza las relaciones de entrada-salida de sistemas mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo, que, se define como el cociente entre la transformada de Laplace de salida y la transformada de Laplace de entrada, asumiendo que todas sus condiciones iniciales son cero (Ogata, 2010).

1.7.3 Sistemas de primer orden.

Según (Kuo & Golnaraghi, 2009), los sistemas de primer orden son aquellos sistemas que tienen un solo polo y están representados por ecuaciones diferenciales de primer orden, esto quiere decir que el máximo orden de la derivada es 1. Estos sistemas tienen diversas aplicaciones las cuales están representadas por procesos físicos o industriales como:

- Sistemas eléctricos.
- Sistemas hidráulicos
- Sistemas térmicos, etc.

1.7.4 Sistemas de segundo orden

(Hernández R. , 2010) menciona que los sistemas de segundo orden son aquellos que están definidos por ecuaciones diferenciales de segundo orden, algunos de los ejemplos, son los sistemas mecánicos, rotación y traslación respectivamente, también, la unión de dos sistemas de primer orden.

Este sistema está representado con ecuaciones diferenciales de segundo orden, las cuales representan a dos polos en su ecuación matemática. El comportamiento de los sistemas de segundo orden se efectuará de acuerdo con la ubicación de sus polos, teniendo así los siguientes sistemas:

- **Sistema sobreamortiguado:** cuando se tiene polos reales distintos.
- **Sistema críticamente amortiguado:** cuando tiene polos reales repetidos.
- **Sistema subamortiguado:** cuando tiene polos complejos.

Las señales de respuestas de estos sistemas quedan representadas como se indica en la Figura 9.

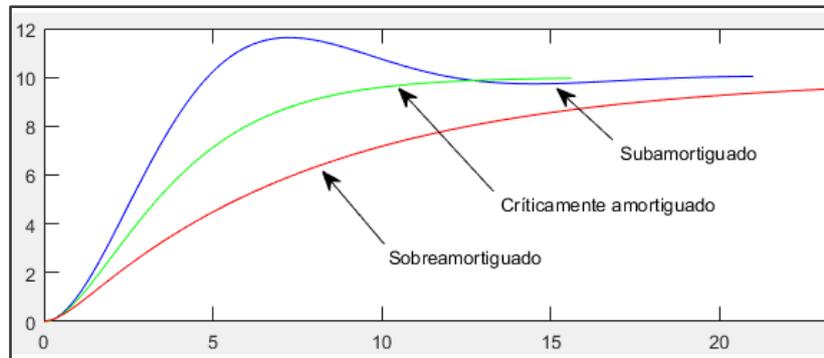


Figura 9 Señales de respuesta de los sistemas de segundo orden

Fuente: (Kuo & Golnaraghi, 2009)

Los sistemas de segundo orden también pueden ser identificados mediante su ecuación canónica que:

En el comportamiento dinámico de un sistema de segundo orden sus polos en lazo cerrado son complejos conjugados y quedan en el semiplano izquierdo del plano s . Entonces, se dice que el sistema puede ser subamortiguado, críticamente amortiguado y sobreamortiguado (Monasterio, 2016).

(Monasterio, 2016) señale que, las señales de pruebas aplicadas a un sistema de control son las funciones escalón, impulso, rampa, senoidal, parábola y similares. Con este tipo de señales se pueden realizar análisis matemáticos y experimentos del comportamiento del sistema, dichas señales son funciones del tiempo en donde se puede realizar un estudio de la respuesta del sistema.

- **Parámetros de diseño para los sistemas de segundo orden.**

Los sistemas de control de segundo orden pueden diseñarse a partir de los parámetros de comportamiento del sistema en régimen transitorio, además de, identificar las condiciones que el sistema debe satisfacer. Mediante una señal escalón unitario para un sistema subamortiguado de segundo orden, se presenta a la Figura 10 la cual indica su comportamiento.

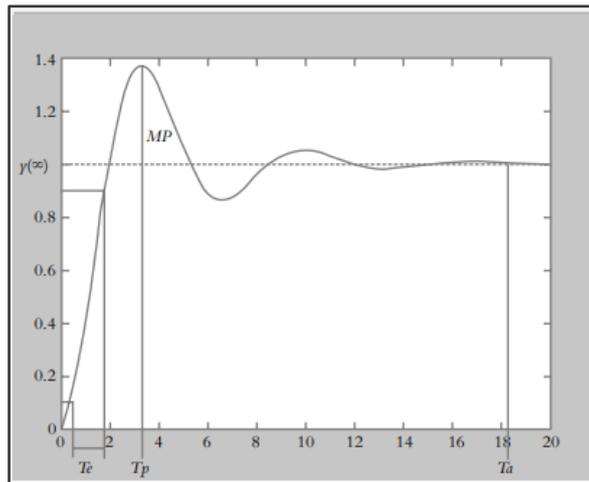


Figura 10 Respuesta Subamortiguada de segundo orden

Fuente: (Hernández R. , 2010)

- **Máximo pico de sobre impulso MP .**

Es el valor pico máximo de la curva de respuesta medida desde la unidad, este parámetro es también característico de los sistemas subamortiguados (Hernández R. , 2010).

- **Tiempo pico TP .**

Es el tiempo que requiere el sistema para que la respuesta alcance el primer pico de sobre impulso, este parámetro aparece únicamente en los sistemas subamortiguados (Hernández R. , 2010)

- **Tiempo de asentamiento Ta .**

El tiempo de asentamiento es aquel tiempo que requiere el sistema para llegar a su valor final; para cumplir esta condición, el tiempo debe transcurrir en cuatro constantes de tiempo (4τ) (Hernández R. , 2010).

- **Tiempo de Elevación Te .**

Es el tiempo requerido por el sistema para que la respuesta incremente del 10% al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final (Hernández R. , 2010).

1.7.5 Sistemas de orden superior.

Los sistemas de segundo orden son aquellos sistemas cuyo polinomio característico sea de orden mayor a 2. Este tipo de sistemas están compuestos únicamente por polos y ceros (Kuo & Golnaraghi, 2009).

Para obtener los parámetros de este sistema se tiene en cuenta el concepto de polos dominantes, de tal manera que son los que definen el comportamiento del sistema. El polo o los polos dominantes existentes en el sistema, es la parte que, por su cercanía con el origen del plano, influyen con mayor impacto sobre el comportamiento transitorio del sistema. Cuando un polo o los polos del sistema se alejen del origen, su efecto tendrán menos efecto sobre el comportamiento transitorio del sistema.

1.8 Ceros y polos en una función de transferencia.

Añadir ceros a una función de transferencia conlleva a que el sistema se manifieste únicamente como una alteración en los coeficientes de la respuesta transitoria. Mientras que los polos permiten la solución de una función característica, de tal manera que permita conocer la respuesta transitoria de un sistema en lazo cerrado.

1.9 Método de ROUTH- HURWITZ.

Este método corresponde a un arreglo numérico en el cual se debe determinar la cantidad de polinomios existentes en el semiplano derecho del plano s , y así proporcionar una respuesta rápida para conocer la estabilidad de un sistema a partir de la función característica de un polinomio, así lo menciona (Álvarez, Martínez, & Juárez, 2018) & (Hernández R. , 2010).

1.10 Lugar Geométrico de las raíces.

(Álvarez, Martínez, & Juárez, 2018) afirma que el lugar geométrico de las raíces corresponde a una característica de la respuesta transitoria de cualquier sistema en lazo cerrado, la cual se vincula con la ubicación de los polos. Los polos o raíces de una ecuación característica $1 + G(s)H(s) = 0$, permiten conocer si se ha variado algún parámetro desde un inicio, verificando así la respuesta transitoria del sistema (Hernández R. , 2010).

Este está representado por un número complejo en notación binómica: $a+jb=-1+0j$, en donde la parte imaginaria corresponde a cero. Los números complejos pueden ser representados de diversas maneras, tales como: polar, exponencial y trigonométrica, siendo representada de forma polar, teniendo así un vector con magnitud r y dirección θ , según se muestra en la Figura 11. (Hernández R. , 2010).

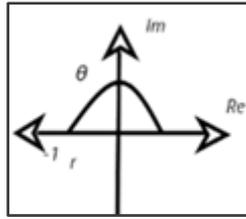


Figura 11 Representación polar de los números complejos

Fuente. (Hernández R. , 2010)

- **Condición de fase: $1 \angle 180^\circ n$**

Esta condición permite calcular los posibles lugares geométricos contenida en la condición de fase, esto debido a que, cualquier valor de s que satisfaga la relación angular será una raíz de la ecuación característica de la función de transferencia.

- **Condición de magnitud:1**

Esta condición es el resultado de la obtención de todos los puntos que satisfacen la condición de fase, permitiendo construir el LGR (Lugar Geométrico de las Raíces). Esta condición se usa para dar una escala al lugar geométrico resultante, su función específica es la de cuantificar las ganancias para operar en puntos característicos del LGR con el fin de obedecer a los requerimientos establecidos en régimen transitorio.

1.11 Acciones de control Proporcional, Integral y Derivativa (PID).

Las acciones de control de cualquier sistema automático se basan en la comparación del valor real del resultado con el valor de referencia (error), haciendo que el sistema tenga una pequeña diferencia a un valor reducido. (Victor, 2002).

Los sistemas de control se pueden clasificar de acuerdo con su acción de control, estas son:

- Controlador proporcional P.
- Controlador integral I.
- Controlador derivativo D.
- Controlador proporcional – integral PI.
- Controlador proporcional – derivativo PD.
- Controlador proporcional – integral y derivativo PID.

1.11.1 Controlador Proporcional P.

El control proporcional corresponde a un sistema de control con realimentación lineal. En este tipo de control, el error de estado estacionario depende inversamente de la ganancia proporcional, la cual puede ser ajustada mediante la multiplicación con una constante k_p , llamada ganancia proporcional, y así, mejorar la respuesta (Saeteros, 2018).

La ganancia proporcional es el resultado de la relación entre la respuesta de salida y la señal de error. Algo que se debe señalar es que, la velocidad de respuesta del sistema aumenta con el incremento de la constante proporcional, si esta se la aumenta demasiado, el sistema saldrá de control manteniéndose inestable.

Cualquier mecanismo real con su forma de operar, para un controlador proporcional corresponde a un amplificador con una ganancia ajustable (Hernández R. , 2010).

- **Características con K_p .**

- Si se aumenta K_p , la velocidad de respuesta del sistema aumenta
- Con el aumento de K_p , incrementa el sobre impulso del sistema del circuito cerrado.
- Cuando aumenta K_p , el error de estado estable disminuye.
- Si se aumenta demasiado K_p , el sistema en lazo cerrado se hace inestable.
- Si K_p disminuye demasiado, la acción de control puede ser demasiado pequeña al responder a las perturbaciones del sistema.

1.11.2 Controlador Integral.

El control integral según (Del Castillo, 2014) es aquel controlador que elimina el error frente a la referencia, el controlador integral cambiará su salida. El control integral es proporcional a la magnitud de error y a la duración de este, haciendo que la señal de control se modifique a una velocidad instantánea a la señal de error (Rodriguez, Berenguel, & Manuel, 2004).

Un control integral (K_i) tendrá el efecto de eliminar el error de estado estable, pero de igual manera puede empeorar la respuesta transitoria.

La acción integral conlleva en hacer cambiar la salida de un controlador para corregirlo por lo que este intentará quitar los errores en régimen permanente. Su utilización puede hacer que el sistema tenga una respuesta muy oscilatoria. Se puede tener una acción integral de mucho tiempo para que el controlador opere en condiciones normales, pero esto conllevaría a que su respuesta sea lenta (Vladivía, 2012).

1.11.3 Controlador Derivativo D.

El control derivativo es el encargado de determinar la pendiente del error a lo largo de la trayectoria del tiempo, es aquel que aumenta la estabilidad del sistema, mejorando la respuesta transitoria (K_d).

1.11.4 Controlador PI.

Un controlador proporcional- integral es cuando el valor de salida del controlador proporcional cambia en proporción al tiempo que ha permanecido un error y la magnitud de este (Vladivía, 2012).

1.11.5 Controlador PD.

La acción de control proporcional-derivativo genera una salida que es proporcional a la velocidad y magnitud de la señal de error (Vladivía, 2012).

1.11.6 Controlador PID.

La acción de control proporcional (el presente)- integral (el futuro) y derivativa (el pasado), permite tener ventajas relacionadas con el error de estado estacionario y la respuesta transitoria (Kuo & Golnaraghi, 2009) & (Astrom & Tore, 2009).

El diagrama representativo del control PID queda detallado en la Figura 12.

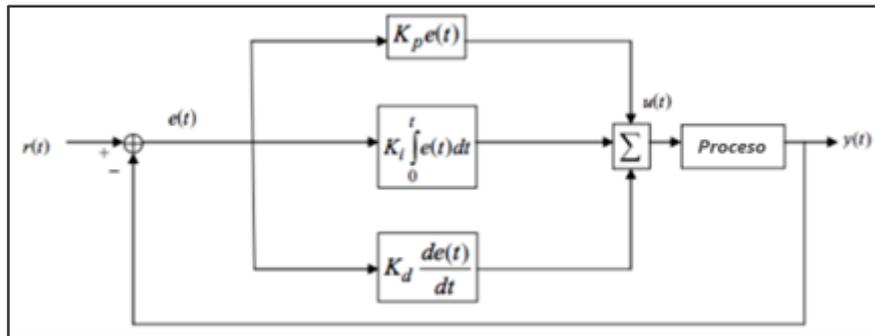


Figura 12 Estructura de un controlador PID en lazo cerrado

Fuente: (Saeteros, 2018)

Este tipo de controladores pueden obtener salidas de la siguiente naturaleza:

- Parámetro P: proporcional al error en t , este error es presente.
- Parámetro I: proporcional a la integral hasta t , se la puede definir como una acumulación de error “pasado”.
- Parámetro D: proporcional a la derivada del error en t , puede ser interpretado como como la predicción de error “futuro”.

Por ende, un controlador PID se basa en el presente, pasado y futuro del error, para alcanzar un valor óptimo de la respuesta desea (Saeteros, 2018).

1.12 Modelado en el espacio de estados.

El método de análisis más adecuado para sistemas de control con múltiples entradas, salidas y sistemas no lineales son los sistemas de control en el espacio de estados. El comportamiento de dichos sistemas es más complejo haciendo que su respuesta cumpla con más requisitos para obtener una operación deseada, basándose en el concepto de estado, (González C. , 2010) .

1.12.1 Estado.

(Ogata, 2010) & (Rodríguez & Bordóns, 2005) mencionan que estado es el conjunto de variables más pequeño, de tal manera que estas variables en $t = t_0$, junto con la entrada para $t \geq t_0$, determinan por completo en comportamiento del sistema en $t \geq t_0$. Este concepto no

se relaciona a sistemas físicos, pero si es aplicable a sistemas económicos, biológicos, sociales, etc.

1.12.2 Variable de estado.

Las variables de estado dentro de un sistema dinámico son aquellas variables que constituyen el menor conjunto de estas para determinar el estado del sistema dinámico, es así que se requieren de n variables para describir dicho sistema, por lo que las n variables son un conjunto de variables de estado, (Ogata, 2010).

Las variables de estado no requieren ser físicamente medidas, contables u observables, pero las leyes que rigen los sistemas de control deben seleccionar variables de estados físicamente medibles para obtener el óptimo control de operación.

1.12.3 Vector de estado.

Corresponde a n componentes de un vector \mathbf{x} el cual determina el estado del sistema $x(t)$ en cualquier instante de tiempo $t \geq t_0$, una vez que se conoce el estado en $t = t_0$ y se especifica la entrada $u(t)$ para $t \geq t_0$ (Rodríguez & Bordóns, 2005).

1.12.4 Espacio de estados.

Para una acción de control en un sistema, la táctica de control empleada busca mejorar la estabilidad del sistema, la sensibilidad a errores, la capacidad de atenuar el ruido, para evitar perturbaciones y mejorar la respuesta transitoria. El espacio n dimensional cuyos ejes de coordenadas están formados por el eje x_1, x_2, \dots, x_n , donde cada eje son variables de estados, (Ogata, 2010) & (González C. , 2010).

1.12.5 Representación en el espacio de estados.

Los sistemas dinámicos dentro del análisis en el espacio de estados se centran en la utilización de tres tipos de variables: variables de entrada, variables de salida y variables de estados, (Oka & Suzuki, 2013).

El sistema dinámico tiene que contener elementos que recuerden a los valores de entrada, de tal manera que los integradores de un sistema de control en un lapso continuo sirvan como un dispositivo de memoria, las salidas de dichos integradores son variables que se refieren al

estado interno del sistema dinámico, de esa manera las salidas pueden ser utilizadas como variables de estado. El número de variables de estado existentes en la dinámica del sistema es igual al número de integradores de este, (Ogata, 2010).

A continuación, la Figura 13, presenta el diagrama de bloques que representan a ganancia en formas de matrices las cuales permiten hacer el control por realimentación de estados.

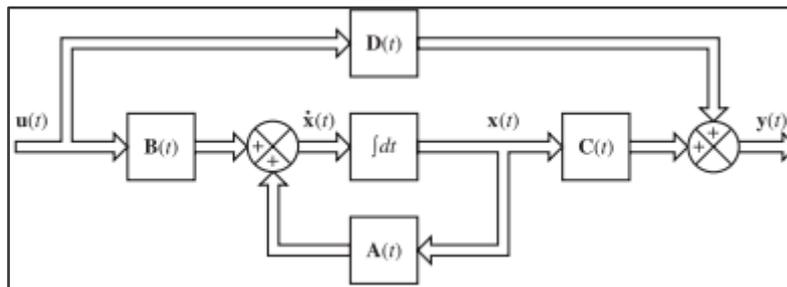


Figura 13 Diagrama de bloques del sistema de control representado en el espacio de estados

Fuente: (Ogata, 2010)

1.13 Comparativa entre controladores PID y por Espacio de Estados.

TABLA 1.3 CUADRO COMPARATIVO ENTRE LOS CONTROLADORES PID Y POR ESPACIO DE ESTADOS.

Comparativa entre controladores PID y por Espacio de Estados		
Tipo de controlador	Contenido	Referencias
Controladores PID	El control PID es uno de los sistemas de control más utilizados en plantas e industrias, se considera que el 84% a 90% de ellos incluyen tecnologías avanzadas.	(Oka & Suzuki, 2013).
	El control PID es un control que utiliza la acción proporcional, integral y derivativa, de manera que juntos pueden brindar una alta gama de procesos automáticos para la implementación digital de dicho proceso junto a componentes neumáticos o eléctricos.	(Dormido & Bisioli, 2015).
	Los controladores PID representan un componente esencial para esquemas de control sofisticados que pueden ser implementados cuando el control básico no es suficiente para obtener el resultado requerido o cuando una tarea de control que sea difícil.	(Dormido & Bisioli, 2015).
	Los controladores PID se relaciona con capacidad lógica, funciones secuenciales y bloques de funciones capaces de formar los complejos sistemas automáticos utilizados en procesos industriales, producción de energía y transporte.	(Astrom & Tore, 2009)

Tipo de controlador	Contenido	Referencias
Controladores PID	El control PID ha pasado por diversos cambios tecnológicos, uno de ellos la integración de microcontroladores, de manera que permiten generar características tales como la sintonía automática, planificación de ganancia, adaptación continua y diagnóstico de sistemas de control, convirtiéndola en promotora de innovadoras ideas de control.	(Carillo, 2011)
	Este tipo de controladores relaciona la entrada-salida de un sistema de control, o también su función de transferencia con el fin de determinar los parámetros de dicho sistema de una forma conocida.	(Ogata, 2010)
	En el campo laboral y de laboratorio muchos profesionales y estudiantes utilizan los controladores PID como fuentes de investigación y trabajo.	(Astrom & Tore, 2009)
Tipo de controlador	Contenido	Referencias
Controladores por Espacio de Estados	Este tipo de controladores se relaciona con las múltiples entradas-salidas y variables de estado que un sistema de control dispone cuando este es complicado, pudiendo así entender el comportamiento dinámico en todos los estados internos del sistema representativo.	(Oka & Suzuki, 2013)
	Para realizar el análisis de este tipo de controladores, se es necesario reducir la complejidad matemática que este preside, de tal manera que el uso de un ordenador y/o microcontrolador es indispensable para realizar el cálculo exhaustivo que este necesita.	(Ogata, 2010)
	Los controladores por espacio de estados son altamente utilizados en implementaciones de casos de multivariados de estado en un sistema de control.	(Jara & Maldonado, 2015)
	Estos controladores se presentan mediante ecuaciones diferenciales de orden infinito que se transforman en una ecuación diferencial matricial de primer orden capaz de determinar el número de entradas, salidas y variables de estados en un sistema lineal o no lineal.	(Ogata, 2010)
	Los controladores por espacio de estados corresponden a una nueva etapa de ingeniería de control, siendo estos unos de los promotores para el desarrollo de tecnologías computacionales, los cuales permiten posicionar a la ingeniería de control moderna como un gran campo de investigación.	(Kuo & Golnaraghi, 2009)
La operación de matemática de estos controladores requiere de la utilización de softwares especializados que permitan llevar a cabo todos los cálculos y simulaciones necesarias para reducir cálculos tediosos y simular sistemas de control de tal manera que se pueda analizar sus respuestas de salida.	(Astrom & Tore, 2009), (Hernández R. , 2010) & (Jara & Maldonado, 2015).	

La TABLA 1.3 muestra una comparativa entre los controladores PID y por Espacio de estados, en donde se evidencian las características más representativas de cada controlador. Se debe tener en cuenta, que, para cualquier tipo de controlador es importante su análisis y diseño, de tal manera que sea posible identificar el fundamento matemático de un sistema dinámico que permita conocer el comportamiento de cada uno de estos, con el fin de obtener un resultado satisfactorio en el proceso que se desee llevar a cabo, sean estos lineales o no lineales. La manera de realizar el análisis de un sistema se presenta en la Figura 14, el cual determina las aproximaciones que un sistema puede tener, sea este lineal o no lineal y de esa manera conocer las leyes físicas que la gobiernan mediante ecuaciones matemáticas, instrumentos y cálculos que permitan dar solución al funcionamiento correcto sistema.

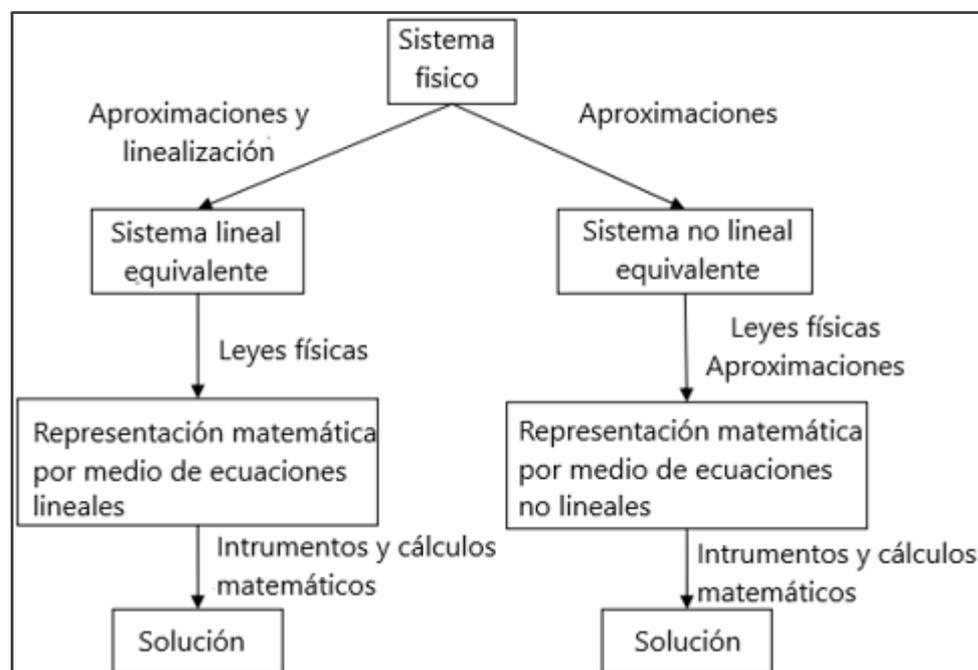


Figura 14 Esquema para el análisis de un sistema de control

Fuente: (Perez, Peres, & Perez, 2007)

Una vez realizado el fundamento matemático necesario de un sistema, se pueden utilizar varias herramientas analíticas o computacionales que permitan manipular los diferentes parámetros que hacen que un sistema de control sea eficiente (Perez, Peres, & Perez, 2007).

1.14 Identificación de sistemas.

La identificación de sistemas conlleva la realización de pruebas experimentales, las cuales permitan obtener el modelo de un sistema dinámico, a través de la excitación de señales

específicas que registren valores de entrada y salida que determinan al sistema (Jara & Maldonado, 2015) & (González P. , 2016).

La obtención de dicho modelo conlleva las siguientes etapas, mírese la TABLA 1.4.

TABLA 1.4 ETAPAS PARA IDENTIFICAR UN SISTEMA.

Etapas para identificar un sistema, mediante un modelo dinámico	
Recolección de datos	<p>La recolección de datos se lo puede llevar a cabo mediante la determinación de señales que se quiera medir, cómo y cuándo se las quiere medir, además de poder escoger las señales de entrada para obtener una respuesta del sistema.</p> <p>El objetivo de hacer dicha determinación conlleva seleccionar los datos que brinden la mayor cantidad de información para realizar la identificación de un sistema.</p>
Selección del modelo	<p>Esta etapa empieza a partir un grupo de modelos, seleccionando el más adecuado y representativo del sistema. Es la etapa más complicada de la identificación, pues en ella, las características de cada modelo deben juntarse para obtener resultados gratos.</p>
Validación del modelo	<p>Tiene como objetivo determinar el desempeño del modelo seleccionado con los datos adquiridos en la medición experimental.</p>

Fuente: (González P. , 2016)

Tras haber realizado las etapas descritas, existen métodos de identificación de sistemas, los cuales se dividen en dos grupos: métodos de identificación paramétrica y no paramétrica.

1.14.1 Método de identificación paramétrica.

Este método se basa en la selección finita de parámetros que describan a una estructura ya existente mediante el diseño de una señal de entrada. Este método es muy eficiente cuando el proceso generador de datos sigue la distribución establecida, pero puede ser sensible si no se utilizan los datos necesarios (Jara & Maldonado, 2015).

- **Diseño de una señal de entrada.**

Para determinar la entrada con la que se va a identificar la planta, esta debe tener las siguientes características.

- No forzar a los actuadores.
- Que sea tan corta como sea posible.
- No intervenir con las variables del proceso que se está controlando.

Para tener una señal adecuada en la entrada, se debe conocer algunos parámetros de la planta, una de ellas es analizando su respuesta ante una señal escalón como se muestra en la Figura 15. (Rodríguez, Martín, & Rojas, 2011).

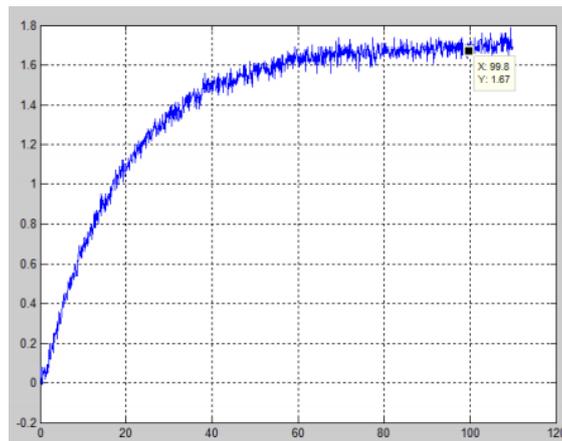


Figura 15 Respuesta de señal frente a una entrada escalón

Fuente: (Rodríguez, Martín, & Rojas, 2011)

De la cual se deben conseguir las siguientes constantes del sistema con que se quiera trabajar.

- Constante de tiempo (T_{ao}), Ganancia última y tiempo de estabilización.

Obteniendo así, después de una serie de pruebas la señal de entrada que más se adapta a la forma de respuesta de la planta (Rodríguez, Martín, & Rojas, 2011).

1.14.2 Método de identificación no paramétrica.

Este método no proporciona los parámetros de una estructura ya establecida, sin embargo, opera mediante funciones y curvas que pueden utilizarse en una futura aplicación de un método paramétrico. Este método de identificación se relaciona con el análisis de correlación y el análisis espectral. El primer análisis aproxima la respuesta del sistema como una entrada idéntica al ruido blanco, mientras que el análisis espectral aproxima la respuesta en el dominio de la frecuencia (Jara & Maldonado, 2015).

- **Análisis no paramétrico de una señal:**

Este análisis consiste en saber si existe una relación entre la señal de entrada con respecto a una señal de salida, mediante un pre-blanqueamiento (Rodríguez, Martín, & Rojas, 2011).

- **Auto correlación de la entrada.**

Esto se lo realiza mediante la aplicación de un pre-blanqueamiento a la señal, con el fin de obtener parámetros que identifiquen el comportamiento de señal de entrada como se muestra en la Figura 16.

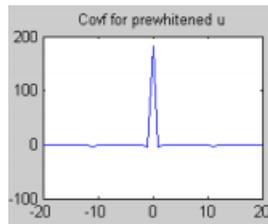


Figura 16 Auto correlación de la señal de entrada

Fuente: (Rodríguez, Martín, & Rojas, 2011)

- **Auto correlación de la salida.**

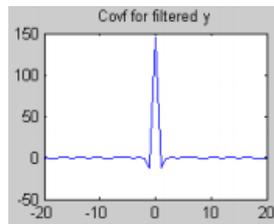


Figura 17 Autocorrelación de la señal de salida

Fuente: (Rodríguez, Martín, & Rojas, 2011)

En la Figura 17 & Figura 18, se muestra la señal de salida similar a la de entrada previo al blanqueamiento de la señal, de tal manera que en una correlación cruzada se pueda verificar la relación entre la entrada y salida, permitiendo de esa manera proseguir con los análisis necesarios para identificar un sistema (Rodríguez, Martín, & Rojas, 2011).

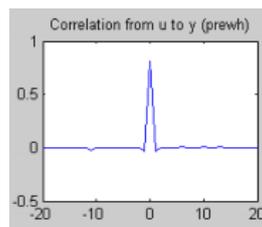


Figura 18 Correlación de cruzada entre la señal de entrada y salida

Fuente: (Rodríguez, Martín, & Rojas, 2011)

1.15 El PLC.

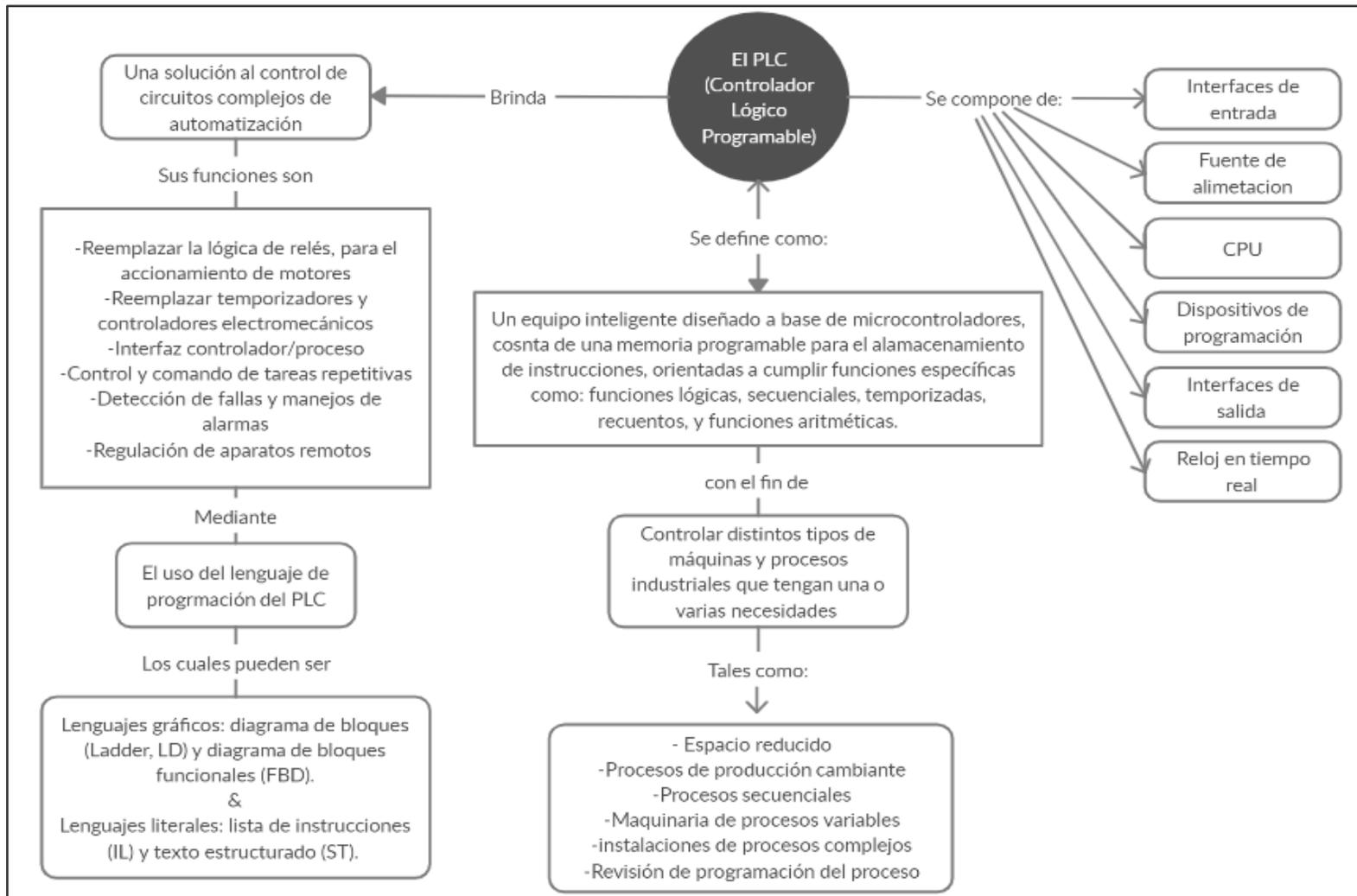


Figura 19 Mapa conceptual del PLC

Fuente: (Molina Cruz, y otros, 2019) & (Borjas, 2013)

1.15.1 Aplicaciones de un PLC.

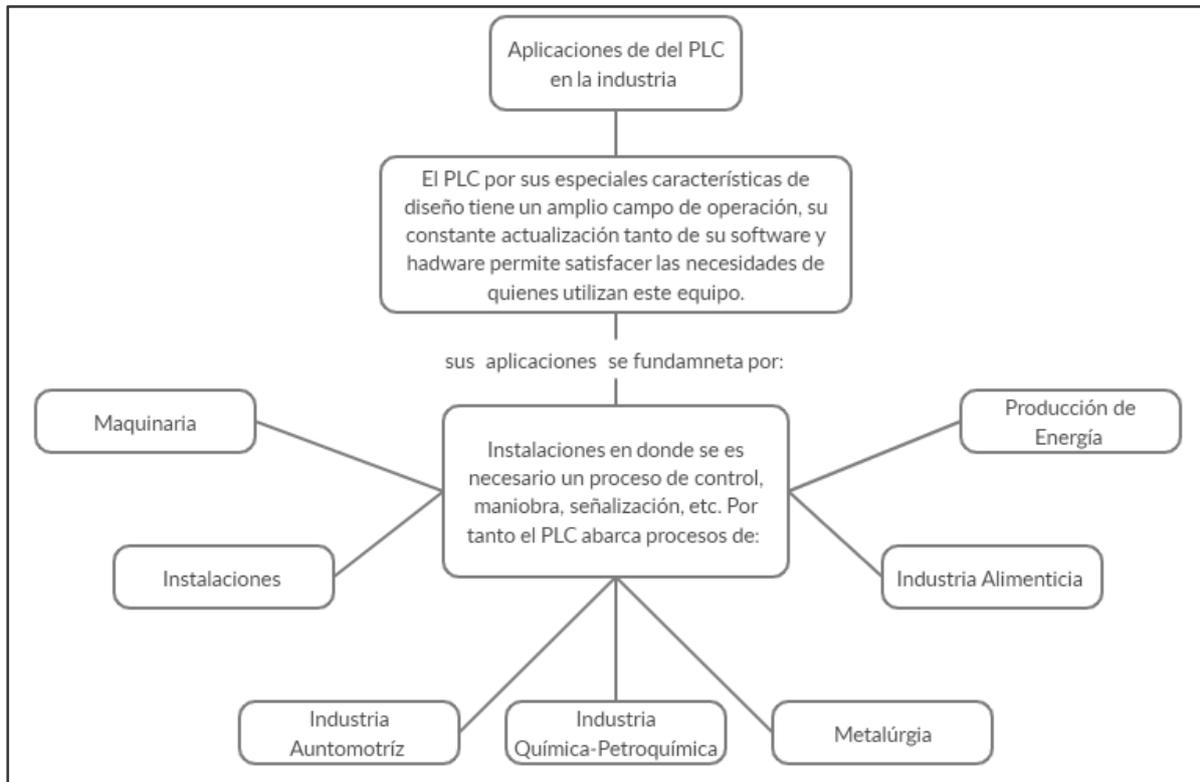


Figura 20 Aplicaciones de un PLC

Fuente: (Autycom, 2019)

En la Figura 19 & Figura 20, se muestran las principales características, funciones y aplicaciones de un PLC, que, mediante la programación necesaria se puede poner en marcha su funcionamiento. Este autómatas es la parte esencial de cualquier proceso de control, al igual que diversos simuladores y programas que permiten obtener la comunicación del sistema, y además de lograr realizar un análisis de los datos que se tomen.

Luego de haber realizado el fundamento teórico sobre los controladores, se puede evidenciar que los controlados PID respecto a los controladores por espacio de estados son más utilizados en la industria con métodos y aplicaciones de fácil entendimiento, mientras que los controlados por espacio de estados necesitan de un análisis matemático muy complejo de cada estado que conforma el sistema para hacer control, es por eso que se lo utiliza para estudios en sistemas que necesitan un control refinado.

CAPITULO II

DISEÑO DE CONTROLADORES PID Y POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS.

En este capítulo se presentan los cálculos y métodos necesarios para el diseño de un controlador PID y por realimentación de estados, la descripción de los módulos que se utilizaron en este trabajo investigativo, la selección del PLC S7-1200 Siemens, la identificación de los sistemas, las comunicaciones y configuraciones Ethernet – OPC necesarias para realizar el diseño de los controladores en las plantas de nivel, presión y caudal.

2.1 Descripción del lugar de estudio.

El diseño de los controladores y su implementación se realiza en la Universidad Técnica del Norte Campus el Olvido, ubicada en la Av17 de Julio 5-21; Ibarra, específicamente en el laboratorio de control de la carrera de Electricidad en donde se encuentran los módulos de nivel, presión y caudal; y además el módulo Siemens S7-1200 con el que se realizó este trabajo investigativo.

2.2 Metodología.

Para el desarrollo de este capítulo, se procedió a realizar los siguientes pasos:

- Descripción de los programas utilizados.
- Selección del PLC Siemens.
- Descripción y reconocimiento de los módulos del laboratorio de control.
- Configuración y comunicación OPC de los módulos de nivel, presión y caudal.
- Configuración de la red LAN y características del módulo S7-1200 y los módulos de nivel, presión y caudal.
- La identificación de sistemas de cada módulo de control en lazo abierto.
- Y, finalmente el diseño de los controladores.

2.3 Descripción de Softwares.

En este trabajo de Investigación se emplearon los siguientes Softwares:

- **RSLOGIX 500 ENGLISH:**

RSlogix 500 English es un software que permite realizar el control, automatización y adquisición de datos de un PLC Allen Bradley, mediante la programación tipo escalera en lazo abierto y cerrado, para esta investigación se lo usó para la adquisición de datos en lazo abierto de los módulos de nivel, presión y caudal.

- **RSLINX CLASSIC GATEWAY:**

RSlinx Classic Gateway, es un programa que permite realizar la comunicación OPC, transferencia y adquisición de datos entre PLCs Allen Bradley. En este trabajo investigativo se lo utilizó para hacer la comunicación OPC, transferencia y adquisición de datos en los PLCs de los módulos de nivel, presión y caudal.

- **TIA PORTAL:**

TIA Portal es un software del PLC S7-1200, el cual permite realizar el control, la automatización, y sirve como puente de transferencia y adquisición de datos entre diferentes PLCs. En este trabajo se lo utilizó para la transferencia y adquisición de los PLCs Allen Bradley a Matlab - Simulink.

- **KEPSERVEREX:**

KEPServerEX es un software que permite realizar comunicaciones OPC de distintas marcas de PLCs, transfiriendo o adquiriendo datos de un microcontrolador a otro. En esta investigación se lo utilizó para comunicación OPC del PLC S7-1200 entre los PLCs Allen Bradley y Matlab - Simulink.

- **MATLAB - SIMULINK:**

Matlab - Simulink es un programa que permite realizar cálculos técnicos, mediante representaciones matemáticas y gráficas de estas, además que a través de este software se puede comunicar diversos programas y tarjetas de comunicación de datos. En esta investigación se lo utilizó para creación de algoritmos e interfaces gráficas para la

manipulación de los controladores PID y por Espacio de Estados en las plantas del laboratorio de sistemas de control.

2.4 Fundamentos matemáticos para el diseño de los controladores PID y por realimentación de estados.

A continuación, se presenta la fundamentación matemática que se utilizó en el desarrollo de este trabajo de investigación.

2.4.1 Factor de amplificación de la ganancia K .

El factor de amplificación de la ganancia K corresponde a la pendiente de un sistema la cual está representada por la Ec. (1).

$$K = \frac{V_{out} - V_{in}}{F_{out} - F_{in}} \quad (1)$$

Donde:

V_{in} : Se define como el valor de nivel de entrada.

V_{out} : Es el valor de nivel de salida.

F_{in} : Se define como el valor de frecuencia de entrada.

F_{out} : Es el valor de Frecuencia de salida.

2.4.2 Constante de Tiempo Tau (τ).

La constante de tiempo del sistema τ , corresponde al tiempo de asentamiento o establecimiento de un sistema y está representada por las Ec. (2).

$$Ta = 4\tau = \frac{4}{\lambda\omega_n} \quad (2)$$

Donde:

Ta : Es el tiempo de asentamiento.

ω_n : Se define como la frecuencia natural no amortiguada de un sistema.

λ : La relación de amortiguación del sistema.

2.4.3 Función de transferencia.

Según (Ogata, 2010) la función de transferencia corresponde a una expresión matemática que caracteriza las relaciones de entrada-salida de sistemas mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo, estas pueden ser de primer, segundo, y tercer orden, etc.

Un sistema de primer orden es aquel que está definido por la Ec (3):

$$x \frac{dc}{dt} + y c(t) = z r(t) \quad (3)$$

Siendo x, y, z constantes. Obteniendo una función de transferencia resultante $G(s)$ como se muestra en la Ec (4):

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{z/y}{\left(\frac{x}{y}\right) s + 1} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (4)$$

Donde:

K : Es la ganancia del sistema (factor de amplificación entre la salida y entrada).

τ : Es la constante de tiempo del sistema (s).

Mientras que los sistemas de segundo orden son representados por ecuaciones diferenciales de segundo orden como la que se muestra en la Ec (5):

$$\frac{d^2c}{dt^2} + a_1 \frac{dc}{dt} + a_0 c(t) = b_0 r(t) \quad (5)$$

En donde, a_1, a_0 y b_0 son constantes.

Además, a los sistemas de segundo orden también pueden ser identificados mediante la Ec (6), esta se encuentra en su forma canónica:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\lambda \omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

Donde:

ω_n : Se define como la frecuencia natural no amortiguada de un sistema.

λ : La relación de amortiguación del sistema.

2.4.4 Polinomio deseado de un sistema.

El polinomio deseado de un sistema corresponde a la señal de respuesta de este; se lo denomina de esta manera porque está ajustado a los valores del tiempo de asentamiento y a la frecuencia no amortiguada que se desea implementar en un controlador (Monasterio, 2016)., la cual se la representa por la Ec. (7).

$$Pd = S^2 + P1S + P2 = S^2 + 2 \lambda \omega_n + \omega_n^2 \quad (7)$$

Donde:

Pd : Es el Polo deseado

ω_n : Se define como la frecuencia natural no amortiguada.

λ : La relación de amortiguación del sistema.

y, despejando $P1$ y $P2$ se obtiene las Ec (8) & (9).

$$P1 = 2 \lambda \omega_n \quad (8)$$

$$P2 = \omega_n^2 \quad (9)$$

2.4.5 Representación de un PID en tiempo continuo.

La fórmula general de un controlador PID en tiempo continuo, está dada por la Ec (10), en la cual se conoce el comportamiento de las acciones proporcional, integral y derivativa en el tiempo.

$$v(t) = Kp e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(t)dt + Kp Td \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

Donde:

Kp : Es la ganancia proporcional.

Ti : Es el tiempo integral.

Td : Es el tiempo derivativo

Y, partiendo de esta ecuación, se recurre a Kp y Ti , las cuales se representan mediante las Ec (11) & (12).

De tal manera, que:

$$Kp = \frac{(P1 * \tau) - 1}{K} \quad (11)$$

$$Ti = \frac{K * Kp}{P2 * \tau} \quad (12)$$

2.4.6 Representación de PID en tiempo discreto.

La discretización de sistemas permite obtener un mejor comportamiento de una planta mediante la selección de datos aleatorios y así obtener los valores discretos de Kp y Ti para cualquier controlado PID. La Ec (13) representa a un controlador PID en tiempo discreto.

$$C(Z^{-1}) = \frac{U(K)}{E(K)} = \frac{q_0 + q_1 Z^{-1} + q_2 Z^{-2}}{1 - Z^{-1}} \quad (13)$$

Donde q_0 representa a la Ec (14), q_1 a la Ec (15), q_2 a la Ec (16): e igualando a q_0 y q_1 la Ec (17).

$$q_0 = Kp \left[1 + \frac{Ts}{2Ti} + \frac{Td}{Ts} \right] \quad (14)$$

$$q_1 = -Kp \left[1 - \frac{Ts}{2Ti} + \frac{2Td}{Ts} \right] \quad (15)$$

$$q_2 = \frac{KpTd}{Ts} \quad (16)$$

$$I = \frac{q_0 + q_1}{Ts} \quad (17)$$

Y, Ts corresponde al periodo de muestreo y;

$$Kp = q_0 \cdot$$

2.4.7 Ecuaciones por espacio de estados.

Se define un sistema con diversas entradas-salidas con n integradores, y que se cuenta con r entradas $u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)$ y m salidas $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$. Se definen las n salidas de los integradores como variables de estado: $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$. Entonces el sistema puede ser representada mediante la Ec (18).

$$\begin{aligned}
x_1(t) &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\
x_2(t) &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\
&\vdots \\
x_n(t) &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t)
\end{aligned}
\tag{18}$$

Las salidas $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$ del sistema se obtienen mediante la Ec (19).

$$\begin{aligned}
y_1(t) &= g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\
y_2(t) &= g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\
&\vdots \\
y_m(t) &= g_m(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t)
\end{aligned}
\tag{19}$$

Si se define (20):

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}, \quad f(x, u, t) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{bmatrix}
\tag{20}$$

y

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_m(t) \end{bmatrix}
\tag{21}$$

$$g(x, u, t) = \begin{bmatrix} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_r(t) \end{bmatrix}$$

Las Ec (18) & (19) se convierten las nuevas Ec (22) & (23):

$$x(t) = f(x, u, t)
\tag{22}$$

$$y(t) = g(x, u, t)
\tag{23}$$

Donde la Ec (22) es la ecuación de estado y la Ec (23) es la ecuación de la salida. Si las funciones vectoriales f y g involucran al tiempo t , el sistema se designa sistema variante en el tiempo.

Linealizando las Ec (22) & (23) en torno al estado de operación, se obtienen las Ec (24) & (25) ecuaciones de estado y de salida linealizada.

$$x(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t)
\tag{24}$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t)
\tag{25}$$

donde

$A(t)$: Se denomina matriz de estado.

$B(t)$: Se denomina matriz de entrada.

$C(t)$: Se denomina matriz de salida.

$D(t)$: Se denomina matriz de transmisión directa.

Si las funciones vectoriales f y g no involucran el tiempo t , el sistema se denomina invariante en el tiempo, y se presentarían por las Ec (26) & (27).

$$x(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (26)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (27)$$

La Ec (26) representa el estado del sistema lineal invariante en el tiempo, mientras que la Ec (27), representa la salida para el mismo sistema.

2.5 Selección del PLC Siemens.

El módulo didáctico constituye una herramienta práctica, la cual permitió desarrollar técnicas de control de forma que su instrucción sea educativa, con el fin de brindar apoyo en los conocimientos que se quieren ofrecer a los estudiantes de la carrera de electricidad.

El equipamiento para utilizarse se diseña con equipos tecnológicos que prestan un sin número de herramientas en técnicas de control.

El PLC, de acuerdo con las características del módulo didáctico a construir, es necesario elegir un fabricante específico en controladores lógicos programables; es así, que, de acuerdo con los requerimientos de los laboratorios de la carrera de electricidad y de los trabajos de investigación de la misma, se selecciona un PLC S7-1200, el cual cuenta con funciones similares a los del laboratorio de la carrera, garantizando el desarrollo de capacidades didácticas a los estudiantes.

El CPU cuenta con un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada y salida, E/S de control de movimiento de alta velocidad y entradas analógicas incorporadas. Además, se encarga de vigilar las entradas y cambia el estado de las salidas de acuerdo con la lógica programa por el usuario, tales como instrucciones de conteo y temporización, funciones matemáticas complejas y la comunicación con otros equipos inteligentes.

El PLC S7-1200 es el encargado de recibir y emitir señales con las cuales se controlan los distintos procesos de control, en la TABLA 2.1 se muestran las características del PLC S7-1200 seleccionado para este trabajo de investigación.

TABLA 2.1 CARACTERÍSTICAS DEL PLC SELECCIONADO.

Características técnicas del controlador lógico programable.		
Descripción eléctrica	Modelo	S7- 1200 CPU 1212C AC/DC RELAY
	Voltaje de alimentación	120 VAC. A 264 máx. VAC
	Comunicación	Ethernet
	Entradas/Salidas	Entradas digitales a 24 Vdc Dos entradas digitales de 4-20mA

Fuente: Autor

En el ANEXO 1: Construcción del módulo didáctico PLC S7-1200, se muestran todos los elementos que componen al módulo didáctico.

En el ANEXO 2: Diagrama de conexiones del módulo didáctico PLC S7-1200 se muestran la ubicación de cada uno de sus elementos, así como su cableado.

2.6 Descripción y reconocimiento de los módulos del laboratorio de control.

En las instalaciones de la carrera de Electricidad, se cuenta con el laboratorio de control y automatización, el cual dispone con los siguientes módulos:

- Módulo didáctico para el estudio de sensores de nivel de líquidos.
- Módulo didáctico para el control de caudal de líquidos.
- Módulo didáctico para el control de nivel de líquidos por presión o caudal.

Cada uno de estos módulos cuenta con un PLC ALLEN BRADLEY, los cuales operarán de manera conjunta una vez realizada la interconexión de redes industriales, mediante una comunicación vía TCP/IP Ethernet. Al mismo tiempo por medio del presente proyecto se podrá

enviar y recibir datos de los PLCs de cada módulo, a través de un PLC establecido como unidad terminal maestra, el cual será el encargado de poner en marcha las funciones de las técnicas de control PID y por espacio de estados.

En la TABLA2.2, se muestran los módulos que conforman el laboratorio de control de la carrera de electricidad.

TABLA2.2 MÓDULOS DIDÁCTICOS CORRESPONDIENTES AL LABORATORIO DE SISTEMAS DE CONTROL.

Módulos didácticos del laboratorio de sistemas de control



Módulo didáctico para el estudio de sensores de nivel de líquidos.



Módulo didáctico para el control de caudal de líquidos.



Módulo didáctico para el control de nivel de líquidos por presión o caudal.

Fuente: Autor

2.7 Configuración y comunicación OPC.

Para realizar las comunicaciones entre el Matlab, PLC Siemens y las variables de los PLCs Allen Bradley, se configuró el software RSLinx Classic Gateway y KEPServerEx permitiendo realizar la comunicación y enlazar las variables con el módulo Siemens, para que todos los PLCs sean reconocidos por el programa, como indica en la Figura 21.

Se configura el tópico correspondiente para cada PLC Allen Bradley, y el nombre que permita reconocer el PLC direccionado como se observa en la TABLA 2.3.

TABLA 2.3 IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE DE CADA MÓDULO.

Identificación del tópico	Módulo al que pertenece	Dirección IP
Caudal	Módulo de caudal	192.168.111.20
Nivel	Módulo de Nivel	192.168.111.50
Presión	Módulo de presión	192.168.111.10

Fuente: Autor

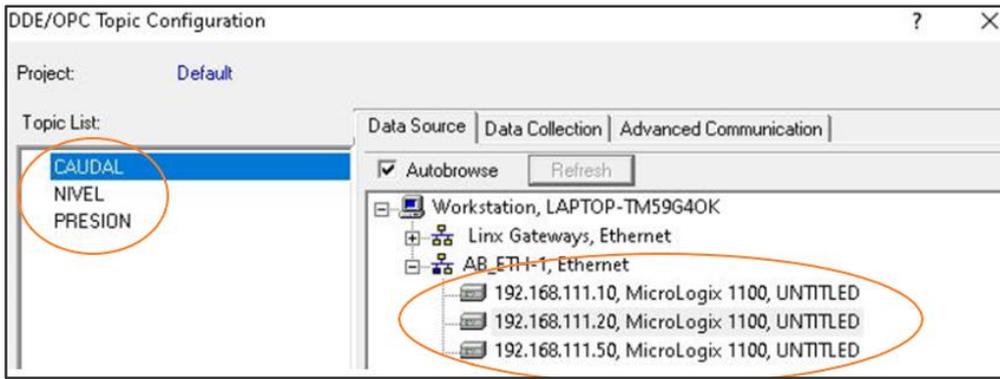


Figura 21 Identificación y direccionamiento de cada módulo de control

Fuente: Autor

Se verifica que todos los PLCs sean reconocidos por el software RSLinx Classic Gateway como se muestra en la Figura 22, en caso de que el software no reconozca alguno de los PLCs, se marcará con una “X” sobre el PLC.

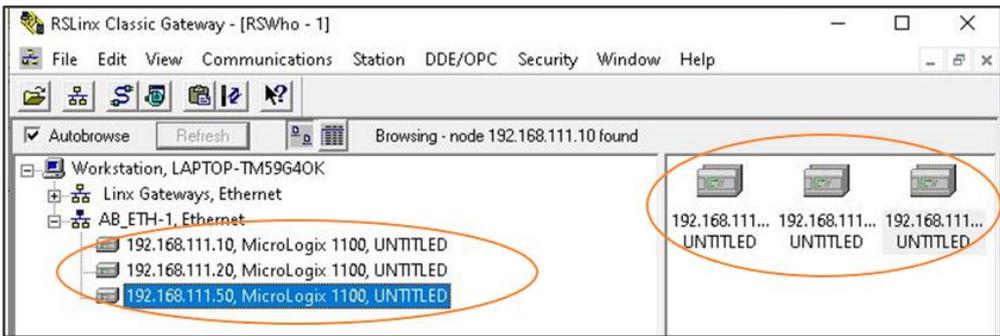


Figura 22 Conexión exitosa de todos los PLCs

Fuente: Autor

Además, se configura el tiempo de adquisición de datos para cada módulo como se muestra en la Figura 23. Se asigna un tiempo de 50 milisegundos (ms) para cada uno.

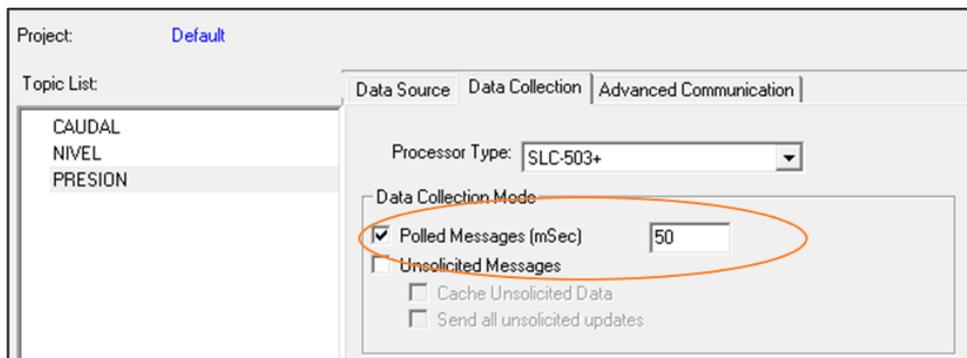


Figura 23 Periodo de muestreo

Fuente: Autor

Una vez realizado este procedimiento, en el software KEPServerEx, se configura los tags de cada módulo correspondiente, incluyendo el módulo PLC - Siemens como se presenta en la Figura 24, permitiendo obtener los datos y estados de cada uno de estos, y, además, utilizando al PLC - Siemens como un puente de adquisición de datos para la configuración en el OPC de Matlab.

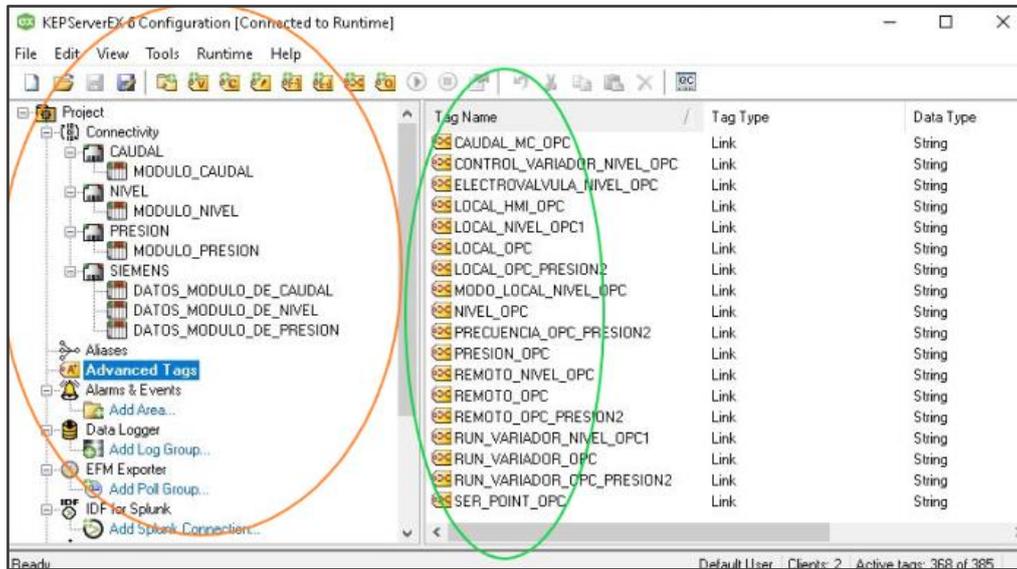


Figura 24 Configuración de Variables en KEPServerEX

Fuente: Autor

A continuación, en el Software TIA PORTAL se deben configurar las mismas variables que se encuentran en KEPServerEX como se muestra en la Figura 25, de esta manera permitiéndole ser al PLC Siemens un puente de adquisición y envío de datos.

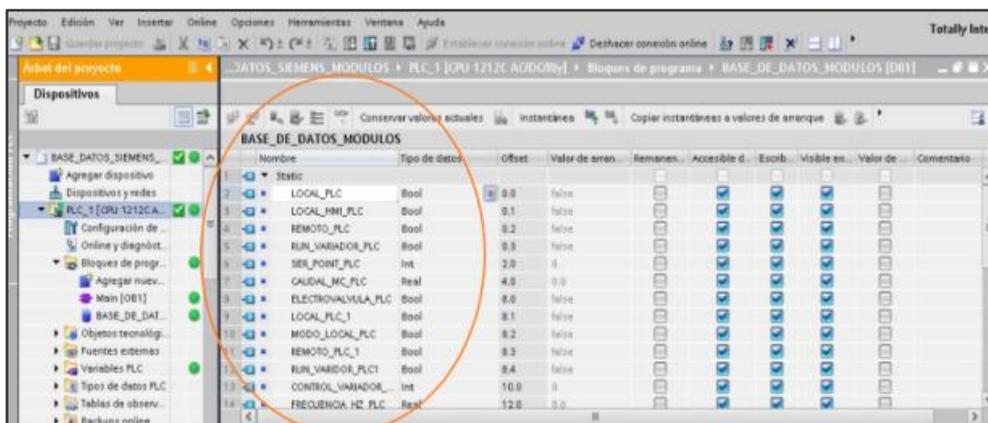


Figura 25 Configuración de variables para envío y adquisición de datos en el PLC-Siemens

Fuente: Autor

Finalmente, se verifica la comunicación exitosa mediante el software KEPServerEX como se muestra en la Figura 26, en la cual todas las variables se encuentran en estado “Good”, garantizando la comunicación entre los PLCs incluido el PLC Siemens S7-1200.

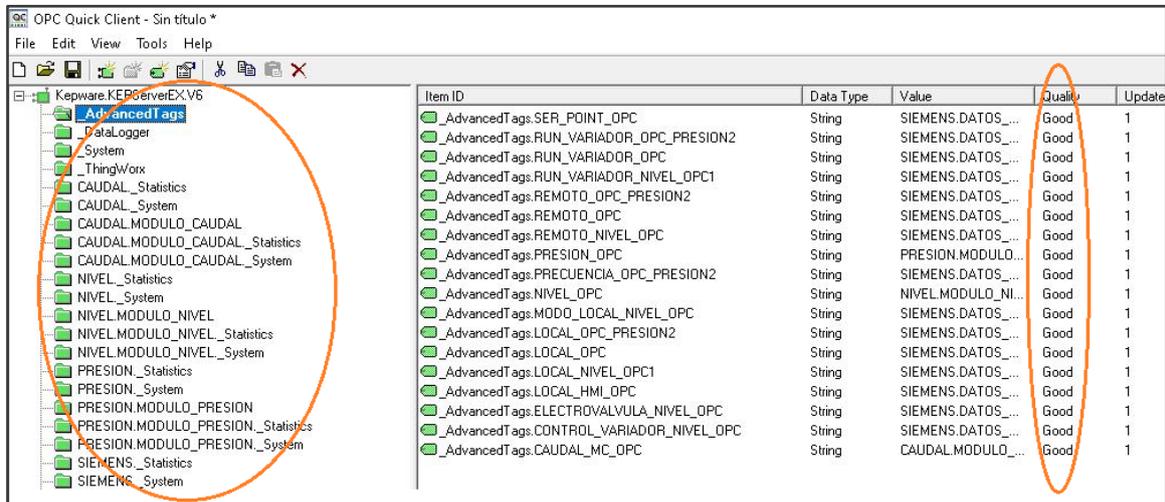


Figura 26. Comunicación exitosa en KEPSERVEREX

Fuente: Autor

2.8 Configuración de la red y características.

Para la implementación del presente trabajo de grado se precisó utilizar una red Ethernet para todos los PLCs como se muestra en la Figura 27, debido a que estos cuentan con un puerto de red o Ethernet que les permitirá compartir información para la implementación de los controladores PID y por espacio de estados.

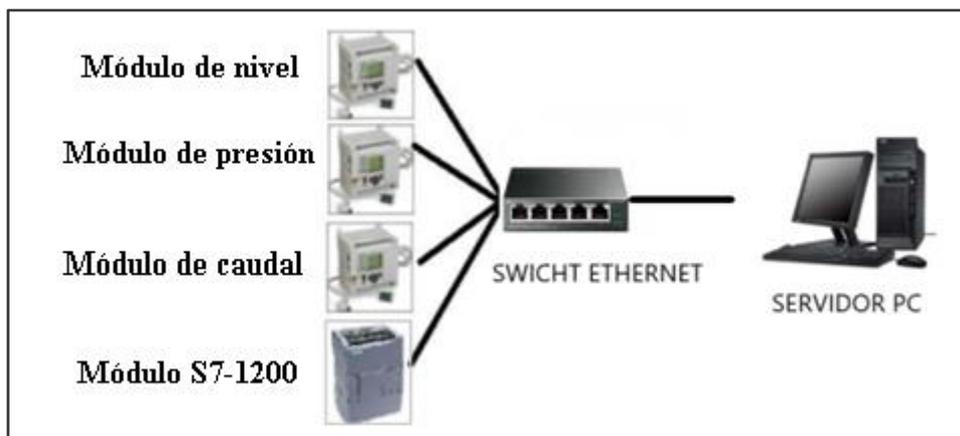


Figura 27 Esquemático de la red LAN de comunicaciones

Fuente: Autor

Además, se debe tener en cuenta las características de enrutamiento de cada módulo que se va a utilizar como se presenta en la TABLA 2.4.

TABLA 2.4 DIRECCIONES IP EN LOS DISPOSITIVOS DE LA RED LAN.

Dispositivo	Dirección IP	Máscara de subred
Módulo control de caudal	192.168.111.20	255.255.255.0
Módulo control de nivel	192.168.111.50	255.255.255.0
Módulo control de presión	192.168.111.10	255.255.255.0
Módulo didáctico PLC S7-1200	192.168.0.1	255.255.255.0
Servidor PC	192.168.111.80 192.168.0.241	255.255.255.0

Fuente: Autor

2.9 Identificación de sistemas.

Para obtener el modelo del sistema con el que se va a trabajar en cada módulo, se siguen los siguientes pasos que, de acuerdo con el organigrama que se presenta en la Figura 28, permiten identificar el tipo de sistema al cual se sujeta la planta existente.

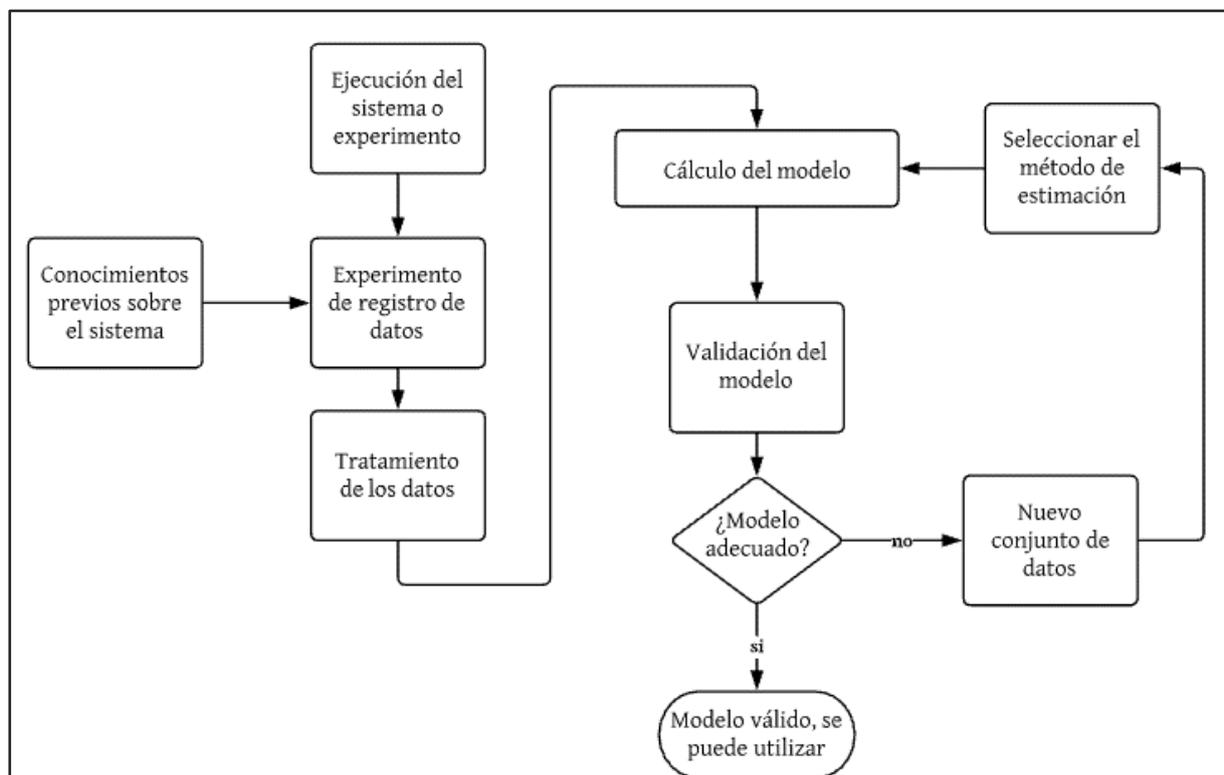


Figura 28 Pasos que seguir para realizar la identificación de sistemas

Fuente: Autor

Para la identificación de cada sistema, es necesario la creación de una interfaz gráfica de control, con el cual se puede interactuar de forma directa con cada módulo descrito anteriormente.

Para realizar la comunicación o enlazar los programas descritos anteriormente, primero se debe romper los lazos de control de cada uno de los módulos mediante la programación existente en RSLogix 500 English, y para poder comunicar a todos los módulos se utiliza el programa RSLinx Classic Gateway, de tal manera que nos permita obtener y enviar datos mediante el software OPC KEPServerEx, y una vez identificadas las variables que rompen los lazos de control en la programación de cada PLC, Matlab junto el PLC Siemens S7-1200 y los PLCs existentes sirven como una tarjeta de adquisición y envío de datos para identificar a cada una de las plantas, y de la misma manera implementar los controladores deseados.

2.10 Análisis de las variables de control en lazo abierto.

Para el análisis en lazo abierto, primero se debe obtener las variables más representativas en la programación de cada planta mediante el software RSLogix 500 English como se muestra en la Figura 29.

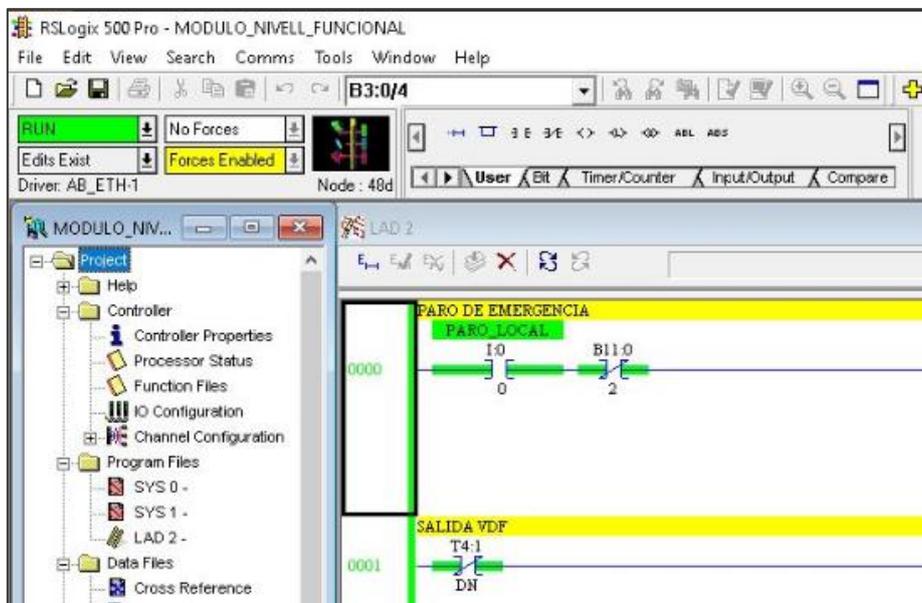


Figura 29 Variables de control para el análisis en lazo abierto con RSLogix500English

Fuente: Autor

De manera que permita manipular las variables deseadas a través del OPC KEPServerEX, y el OPC de Matlab - Simulink para visualizar el comportamiento de estas en lazo abierto como se presenta en la Figura 30.

Item ID	Data Type	Value	Quality	Update Count
NIVEL.MODULO_NIVEL.NIVEL	Float	1,5	Good	101
NIVEL.MODULO_NIVEL.FRECUENCIA_HZ	Float	0	Good	1
NIVEL.MODULO_NIVEL.RUN_VARIADOR	Boolean	0	Good	1
NIVEL.MODULO_NIVEL.REMOTO	Boolean	0	Good	1
NIVEL.MODULO_NIVEL.MODO_LOCAL	Boolean	0	Good	1
NIVEL.MODULO_NIVEL.LOCAL	Boolean	0	Good	1
NIVEL.MODULO_NIVEL.ELECTROVALVULA	Boolean	0	Good	1
NIVEL.MODULO_NIVEL.CONTROL_VARIADOR	Word	0	Good	1

Figura 30 Variables en lazo abierto en OPC KEPServerEx

Fuente: Autor

Es necesario recalcar que este análisis se lo realiza a detalle solo a la planta de nivel, porque al ser un sistema no lineal es más complejo codificar la información que esta brinde, y de igual manera con las plantas de presión y caudal al tratarse de sistemas lineales se realizó el mismo procedimiento, pero con menos complicaciones.

2.10.1 Planta de Nivel, Presión y caudal.

Lo primero que se debe hacer es configurar los bloques OPC de KEPServerEX en el OPC de Matlab - Simulink, configurando los mismos tiempos de muestreo en ambos OPC's a 50 ms y ubicando las variables de lectura y escritura como se muestra en la Figura 31, de tal manera que permita visualizar y manipular las variables que deseemos que cambien de estado.

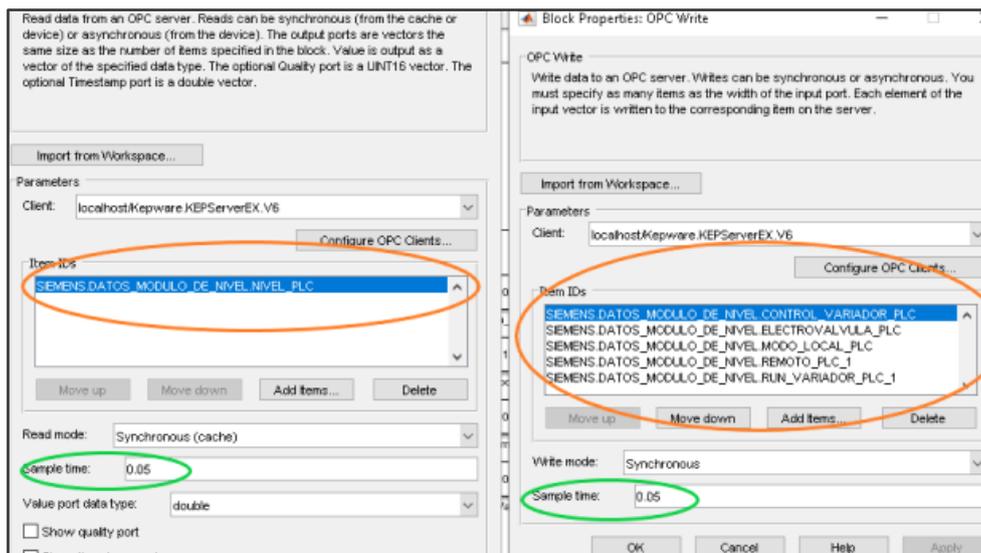


Figura 31 Configuración de tiempos de muestreo y ubicación de las variables para lectura y escritura

Fuente: Autor

Una vez configuradas las comunicaciones se realizó de programación de los bloques de control para visualizar el comportamiento de la variable de nivel en lazo abierto. El diagrama de bloques se muestra en la Figura 32.

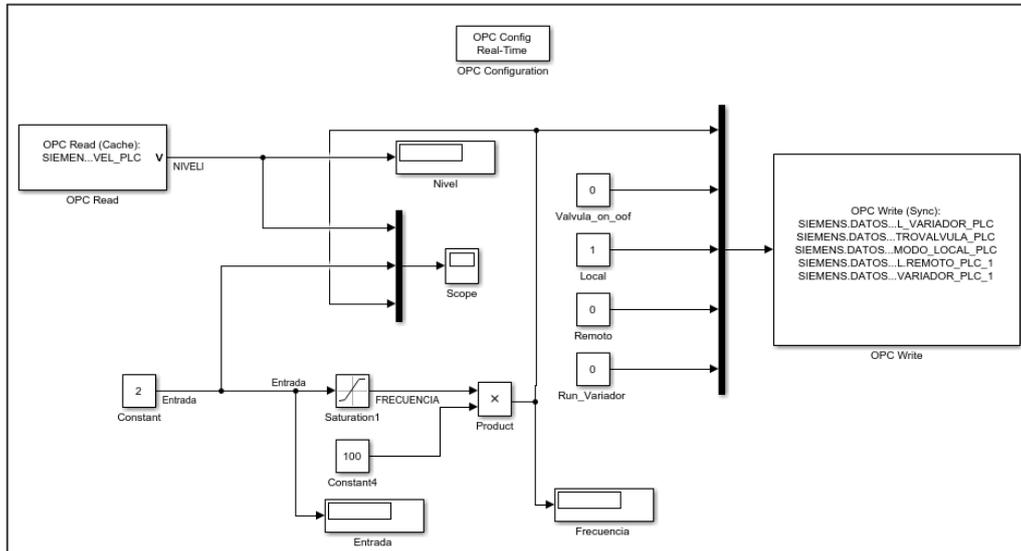


Figura 32 Algoritmo para la variable de nivel en lazo abierto

Fuente: Autor

A continuación, se detalla el algoritmo diseñado para visualizar el comportamiento y estado de la variable de nivel.

En la Figura 33, se muestra los bloques OPC de Matlab utilizados, del cual se adquiere la variable de nivel para visualizarla mediante un osciloscopio, esta representa la señal de entrada que viene a ser la señal de lectura de los valores enviados por el sensor de nivel del módulo correspondiente.

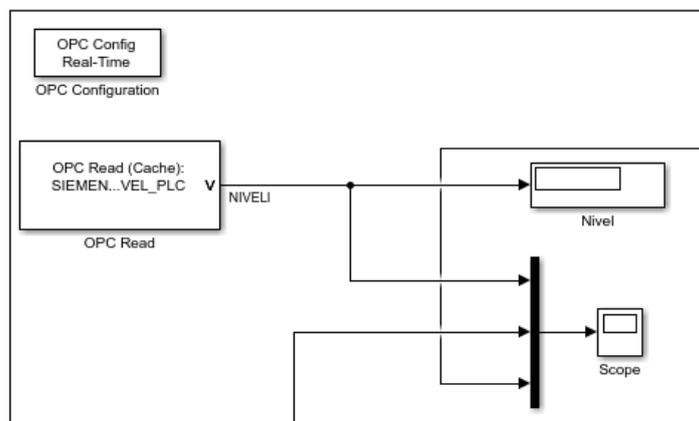


Figura 33 Bloques OPC y señal de lectura.

Fuente: Autor

En la Figura 34 se presenta el bloque OPC que permite activar el variador de frecuencia, y, además, constantes para modo local, remoto y el encendido-apagado de la válvula del módulo.

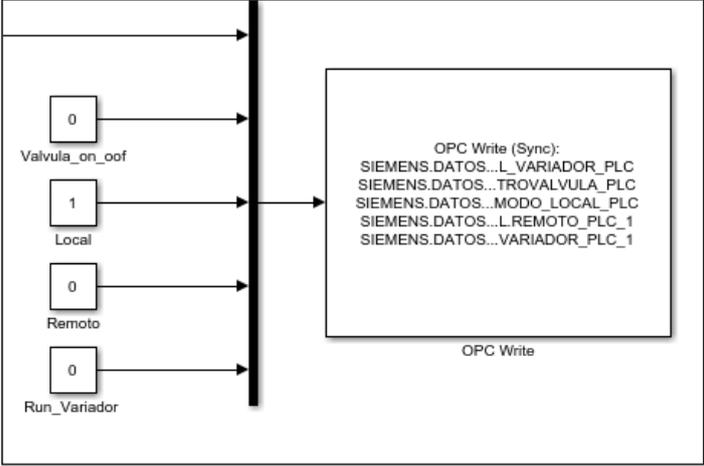


Figura 34 Bloque OPC y constantes de activación

Fuente: Autor

En la Figura 35, se muestra la entrada de frecuencia, una saturación de 0 a 30 Hz para la protección de los equipos y un escalamiento de esta mediante un multiplicador para que su rango esté de 0 a 60 Hz.

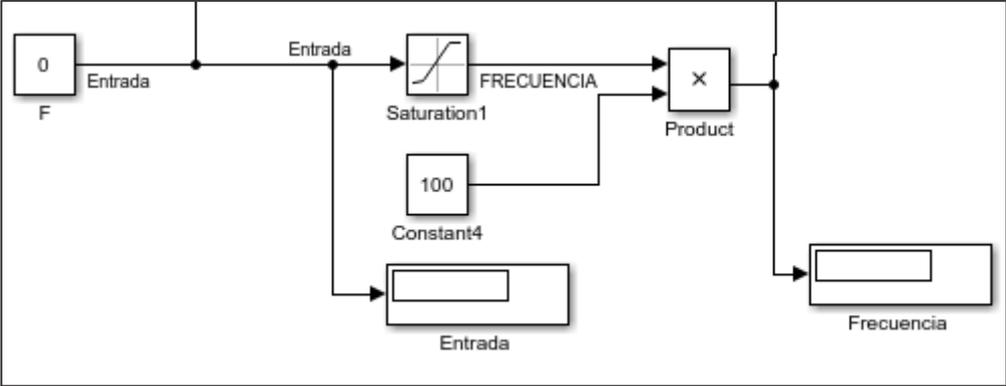


Figura 35 Entrada de frecuencia y escalamiento

Fuente: Autor

Para continuar con la identificación del sistema, se activa la válvula y el variador de frecuencia, asignado valores en los que se pueda ver el incremento de la variable nivel, además, se busca una estabilidad en la planta, de manera que en un cierto tiempo esta variable no cambie, y dándole un salto de un punto a otro, muestre un cambio en la señal de entrada (nivel) como se muestra la Figura 36.

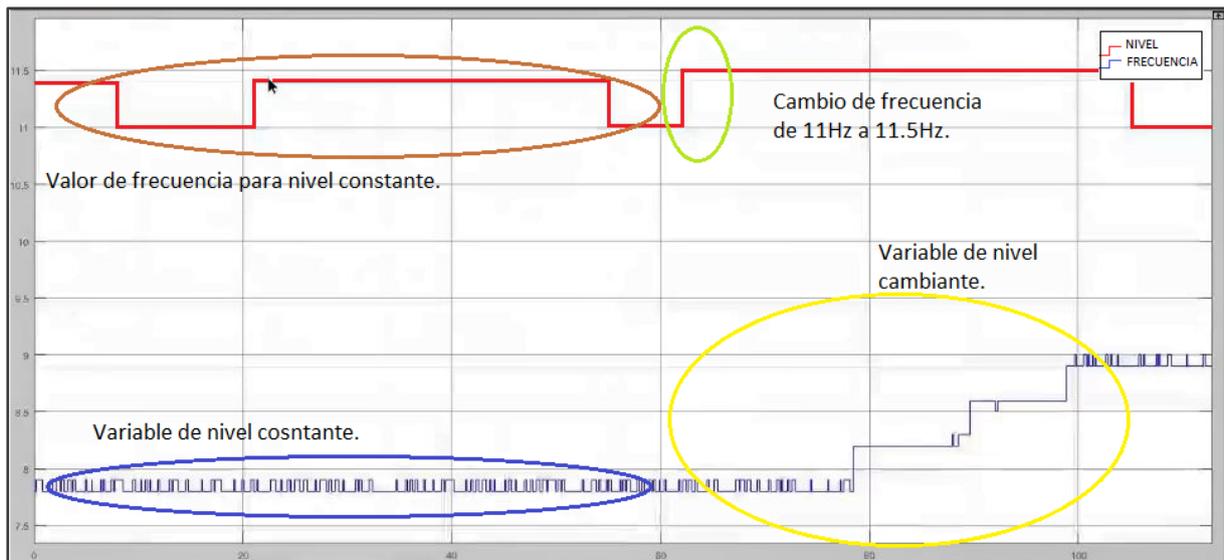


Figura 36 Cambio de señal de entrada

Fuente: Autor

Los datos obtenidos se presentan en la TABLA 2.5, en los que se puede verificar que el cambio de frecuencia si alteró a la variable de nivel con un tiempo de asentamiento de 40s desde el pulso de frecuencia.

TABLA 2.5 VALORES OBTENIDOS DE LA PLANTA DE NIVEL.

	Datos	Unidades
Frecuencia para niveles constantes de nivel	11 – 11.4	Hz
Variable Nivel constante	7.8	Cm
Frecuencia para cambio de la variable nivel.	11 – 11.5	Hz
Variable de nivel cambiante	7.8 – 8.2	Cm

Fuente: Autor

Una vez obtenidos estos datos, se procede a identificar la planta, y aplicando un método no paramétrico se pretende obtener una función de transferencia, que permita tener una constante de tiempo y una ganancia última del sistema. La ganancia se la obtiene mediante la Ec (1).

$$K = \frac{8,2 - 7,8}{11 - 11,5}$$

$$K = 0.8$$

Y para encontrar la constante de tiempo del sistema Tau (τ), se aplica la Ec. (2), Donde Ta es el tiempo de asentamiento, y;

Despejando Tau (τ), y reemplazando los valores se obtiene que:

$$\tau = \frac{40 s}{4}$$

$$\tau = 10$$

Entonces con K y τ encontrados, se encontró a un sistema de primer orden con la siguiente función de transferencia en tiempo continuo, la cual está representada por la Ec (4):

$$G(s) = \frac{0,8}{10s + 1}$$

Las comunicaciones OPC realizadas en KEPServerEX y los módulos de control correspondientes, permitieron realizar a identificación de sistemas cada una de las plantas existentes en el laboratorio de control. Para ello se aplicó el método no paramétrico para las plantas de nivel, presión y caudal, se pudo identificar que estos corresponden a sistemas de primer orden con las siguientes funciones de transferencia en tiempo continuo. Pero para trabajar en el diseño de los controladores se los transformó en tiempo discreto; y utilizando el comando 'zoh' en Matlab se transforma a los sistemas presentados en tiempo continuo a tiempo discreto como se presenta en la TABLA 2.6.

El código que se muestra inicia con la definición en 's', que representa el tiempo continuo de una función de transferencia, luego se ingresa a dicha función en la variable 'Gs', y finalmente en 'Gd' se ingresa 'c2d', 'Gd', el tiempo de muestreo de datos y el comando 'zoh' para discretizar a la función de transferencia en tiempo continuo.

```
s= tf('s')
```

```
Gs= tf (0.6)/(0.35*s +1 )
```

```
Gd= c2d (Gs,0.05,'zoh')
```

TABLA 2.6 SISTEMAS EN TIEMPO CONTINUO Y TIEMPO DISCRETO.

Sistemas de primer orden	Función de transferencia en tiempo continuo	Función de transferencia en tiempo discreto
Nivel	$G(s) = \frac{0.8}{10s + 1}$	$G(d) = \frac{0.00399}{z - 0.995}$
Presión	$G(s) = \frac{0.3583}{0.95s + 1}$	$G(d) = \frac{0.01837}{z - 0.9487}$
Caudal	$G(s) = \frac{0,6}{0.35s + 1}$	$G(d) = \frac{0,07987}{z - 0.8669}$

Fuente: Autor

Para utilizar este comando se debe señalar que el tiempo de muestreo debe ser el mismo al configurado en los diferentes OPC's tanto en Matlab como en KEPserverEx con el fin de evitar problemas de comunicación.

2.11 Diseño de los controladores PID y por realimentación de estados

A continuación, se presenta el diseño de los controladores PID y por realimentación de estados para los módulos de nivel, presión y caudal a través de cálculos matemáticos y algoritmos creados en Matlab - Simulink.

2.12 Controladores PID.

Para el diseño de los controladores se utilizaron dos métodos, estos son:

- Método por asignación de polos.
- Método por el lugar geométrico de las raíces.

De las cuales se utilizó: el método por asignación de polos para la planta de nivel y el método por el lugar geométrico de las raíces para las plantas de presión y caudal.

Se utilizó estos métodos, primero por la facilidad de diseño y segundo porque los controladores que se van a diseñar son para plantas de primer orden que no necesitan un controlador PID completo, sino un PI que es suficiente para su correcto funcionamiento.

2.12.1 Controlador PID por asignación de polos para la planta de nivel.

Para el diseño del controlador se eligió el método por: "Asignación de polos" el cual permite encontrar un regulador basado en acciones proporcional, integral y derivativa PID, de tal manera que le permita al sistema responder al cambio en sus variables en una forma estable.

De la Ec (4): representativa de la planta primer orden de nivel:

$$G(s) = \frac{0.8}{10s + 1}$$

Se obtiene que el tiempo de asentamiento de la planta es de 40s de acuerdo Ec (2)

$$T_a = 4 * 10 = 40s$$

Y, para que la planta sea eficiente se propone realizarlo en un 37,5% más rápido que el tiempo actual, se toma este valor por las pruebas realizadas en el laboratorio de control tras exponer a la planta de nivel a perturbaciones y respuestas del sensor, siendo a este porcentaje óptimo para que la planta mejore sus condiciones de respuesta, este puede variar de 0% a 100%.

si, 40 s es el 100%, entonces 62.5% cuánto será:

Por regla de proporcionalidad, es igual a:

$$T_a = \frac{40s * 62.5}{100} = 15s$$

De tal manera, que la planta será el porcentaje propuesto más eficiente que la actual con un tiempo de asentamiento de 15s. Con este criterio se diseña el controlador, el cual debe mantenerse en una relación de amortiguamiento del sistema de: $0 \leq \lambda \leq 1$ para obtener los polos complejos del sistema dentro del semiplano izquierdo del plano s, y así determinar los parámetros de K_p , T_i , T_d .

Para evitar sobrepicos y mejorar el tiempo de asentamiento se escogió un λ de 1.

Y por criterio del tiempo de asentamiento representativa de la Ec (2):

Se obtiene que ω_n es igual a:

$$\omega_n = \frac{4}{1 * 15}$$

$$\omega_n = 0.2666$$

Una vez encontrado estos valores, se parte de la Ec. (7) correspondiente al polinomio deseado para encontrar los valores de las ecuaciones Ec. (8) & (9).

$$P1 = 2 * (1 * 0.2666)$$

$$P1 = 0.5333$$

&

$$P2 = (0.2666)^2$$

$$P2 = 0.0711$$

Una vez realizadas estas operaciones se recurre a la fórmula general de un controlador PID en tiempo continuo, esta es la Ec (10), con ella se encontraron los valores de Kp y Ti , correspondientes a las ecuaciones Ec (11) & (12). De tal manera, que:

$$Kp = \frac{(0.5333 * 10) - 1}{0.8}$$

$$Kp = 5.4166$$

Y, Ti es igual a:

$$Ti = \frac{0,8 * 5.4166}{0.0711 * 10}$$

$$Ti = 6.09375$$

Una vez obtenido los valores de Kp y Ti en tiempo continuo, es necesario transformarlo a tiempo discreto, de tal manera que permitan obtener valores que hagan que los lazos de control sean más adecuados para este controlador.

A continuación, en la Figura 37, se presenta el diagrama de bloques de un controlador PID discreto.

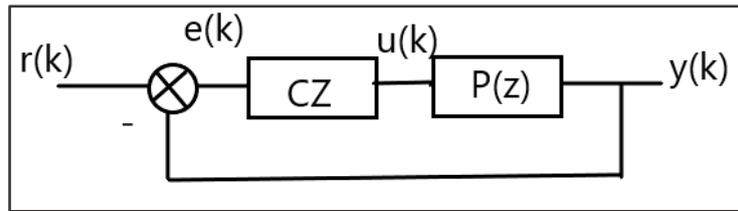


Figura 37 Diagrama de con controlador PID discreto

Fuente: Autor

De acuerdo con $\tau = 10ms$, este puede variar hasta $20ms$ haciendo que el tiempo de asentamiento sea más rápido o lento, y para obtener un periodo de muestreo en los límites establecidos, se utiliza la Ec (2)

$$Ts = \frac{10}{10}$$

$$Ts = 1ms$$

$$Ts = \frac{10}{20}$$

$$Ts = 0.5ms$$

El cual permite saber el rango en el que se puede mostrar los datos del controlador que se desea discretizar, para este controlador se seleccionó $Ts = 0.5ms$.

Para realizar este procedimiento, se utilizó la Ec (13), la cual permite obtener los valores discretos de q_0 y q_1 correspondientes a las Ec (14), (15) & (16), la acción derivativa Td no tiene injerencia en este controlador, haciéndolo 0 y que: $q_0, q_1, y q_2$ sean igual a:

$$q_0 = 5.4166 \left[1 + \frac{0.5}{2 * (6.0937)} \right]$$

$$q_0 = 5.6388$$

$$q_1 = -5.4166 \left[1 - \frac{0,5}{2 * (6.0937)} \right]$$

$$q_1 = -5.1944$$

$$q_2 = 0$$

Donde; la acción proporcional P corresponde a q_0 , y la acción integral I corresponde a la Ec: (17). Calculando su valor se obtiene que:

$$I = \frac{5.6388 - 5,1944}{0.5}$$

$$I = 0.888$$

Los valores que se presentan en la TABLA 2.7, corresponden a las acciones proporcional P e integral I que se encontraron mediante el método de asignación de polos, los cuales pueden ser implementados en la planta de nivel.

TABLA 2.7 VALORES DE LA ACCIÓN PROPORCIONAL E INTEGRAL ENCONTRADOS POR EL MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE POLOS.

Acciones	Valor discreto
Proporcional P	5.6388
Integral I	0.8888

Fuente: Autor.

2.12.2 Controlador por el LGR para la planta de presión.

Para el diseño del controlador se parte de la función de transferencia representativa de la planta, la cual está representada como un sistema de primer orden de acuerdo con la Ec (4).

$$G(s) = \frac{0.3583}{0.95s + 1}$$

Con la ayuda de Matlab se realizó el algoritmo que permite obtener los polos objetivos y raíces de la planta, de tal forma de visualizar el comportamiento de la planta en lazo abierto y en lazo cerrado, para ello se ejecuta el código en el editor de Matlab (ANEXO 3), el cual está representado por el siguiente diagrama de flujos en la Figura 38.

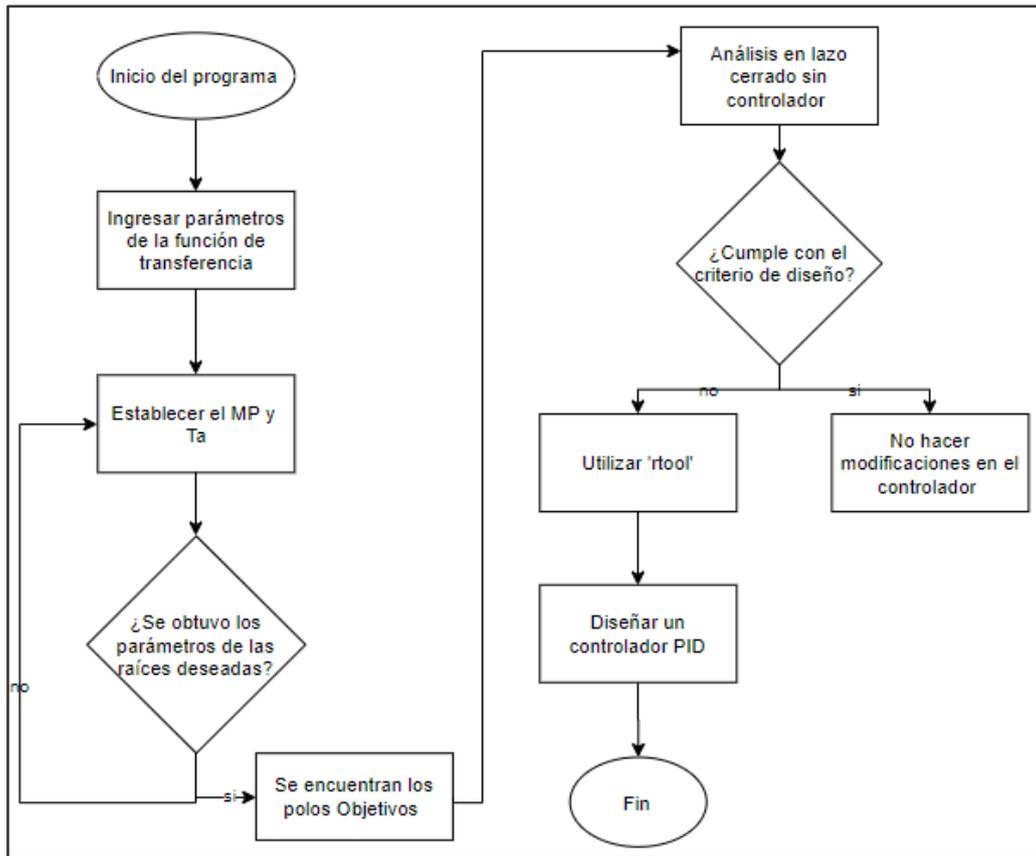


Figura 38 Diagrama de flujo para diseñar un controlador PID

Fuente: Autor

El cual, mediante gráficas permite realizar un análisis de todo el sistema frente a una entrada escalón, tal y como se muestra en la Figura 39.

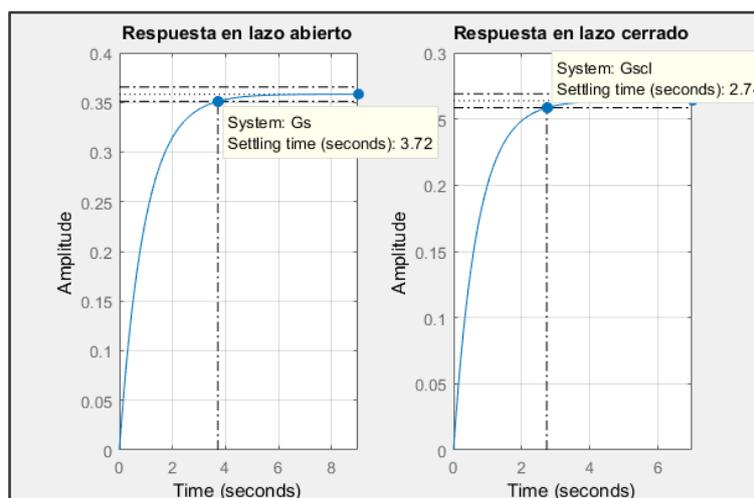


Figura 39 Respuesta escalón en lazo abierto y cerrado del sistema

Fuente: Autor

Estas respuestas muestran que el sistema no llega a un valor de estado estable en un punto de referencia, haciendo que exista un error de estado estable que debe ser compensando mediante un controlador, además, de hacer cumplir las especificaciones de diseño, que bien se muestran que tanto para el tiempo de asentamiento (Ta) y el máximo pico de sobre impulso (MP) no cumplen con las especificaciones realizadas.

Para corregir el error de estado estable y cumplir con los criterios de diseño se analiza el lugar geométrico de las raíces y los polos objetivos del sistema, permitiendo tomar decisiones para implementar un controlador que cumplan con lo especificado.

En la Figura 40, se muestra los polos y el lugar geométrico de las raíces del sistema correspondientes a una planta de primer orden con una respuesta sobre amortiguada, a la cual se interactuó con un sistema de control que permitió ajustar las ganancias Kp , Ki y Kd .

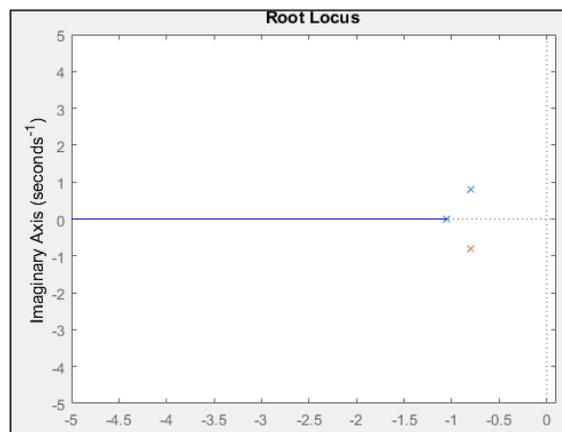


Figura 40 Lugar geométrico de las raíces y polos objetivos del sistema

Fuente: Autor

Para encontrar estas ganancias, mediante Matlab se utiliza el comando "rtool" el cual permite establecer criterios de diseño y añadir un par de ceros y un polo en el origen con el fin de encontrar una función de transferencia que represente a un controlador PID frente al sistema de primer orden en lazo cerrado como se muestra en la Figura 41.

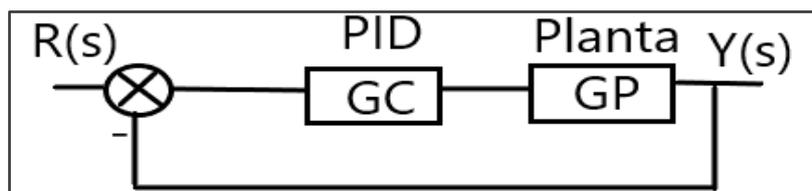


Figura 41 Controlador y planta en lazo cerrado

Fuente: Autor

Una vez ejecutado el comando "rltool" se visualiza una interfaz gráfica como se muestra en la Figura 42; esta permite ajustar los parámetros mencionados anteriormente, y realizar el diseño de un controlador PID para la planta de presión.

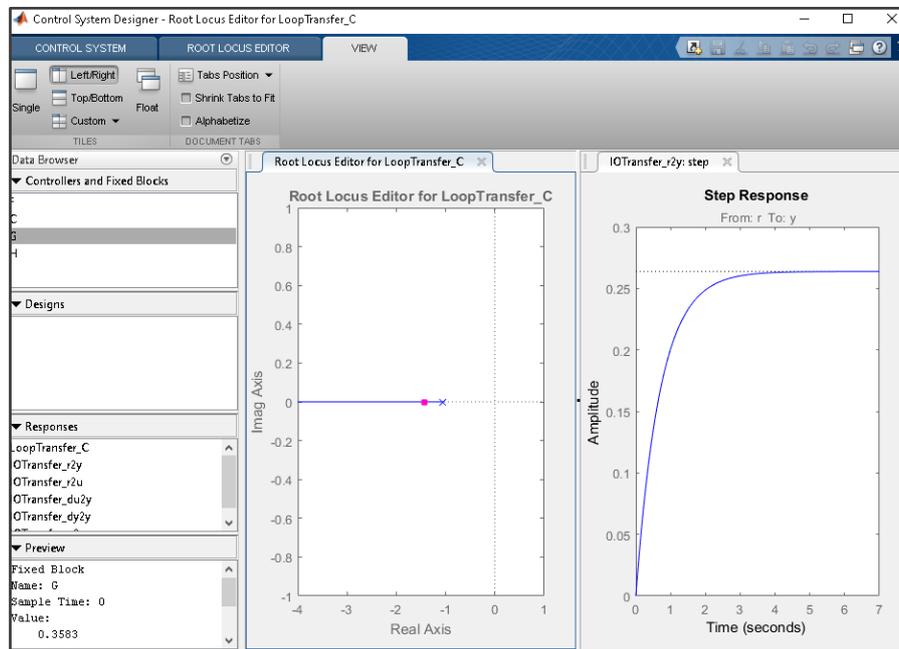


Figura 42 Interfaz gráfica RLTOOL de la planta de presión

Fuente: Autor

Para el diseño del controlador fueron considerados los criterios especificados en el algoritmo de Matlab, en el cual se detalla que:

$$MP \leq 4.3\%, \text{ y } Ta = 5\text{seg.}$$

En la Figura 43, se muestran estos parámetros configurados, permitiendo establecer límites del máximo pico de sobre impulso y el tiempo de asentamiento para el diseño del controlador.

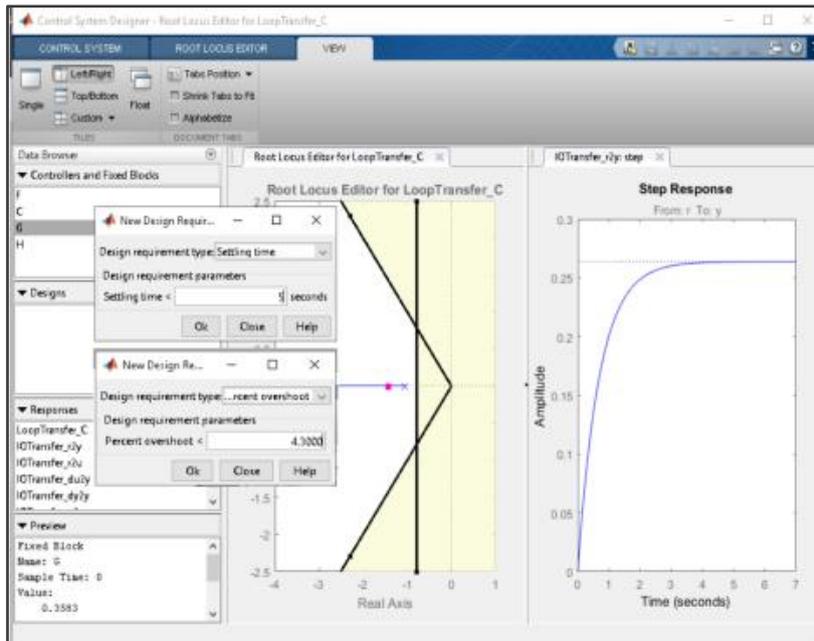


Figura 43 Configuración de T_a y M_p

Fuente: Autor

Previo al diseño del controlador, se añaden un par de ceros cerca de los límites establecidos y un polo en el origen, mediante los cuales se diseña el controlador requerido manipulando los polos del sistema, de tal manera que se corrija el error de estado estable y se cumplan con los criterios para encontrar una función de transferencia que represente a un controlador PID.

En la Figura 44, se muestra los elementos añadidos al sistema de primer orden para que este cumpla con las especificaciones requeridas en el diseño del controlador.

Pole/Zero		Parameter	
Dynamics			
Type	Location	Damping	Frequency
Integrator	0	-1	0
Complex Zero	-3.63 +/- 0.122i	0.999	3.64

Figura 44 Polos y ceros complejos añadidos al sistema de primer orden

Fuente: Autor

Los elementos añadidos se modificaron manualmente en la interfaz, de tal manera que se obtuvo una respuesta en donde el error de estado estable fue corregido ante una entrada paso unitario, obteniendo así una función de transferencia en lazo cerrado correspondiente a un PID.

En la Figura 45, se muestra el error de estado estable corregido ante una entrada paso con un $MP = 1.9\%$ y $Ta = 5.09\text{seg}$.

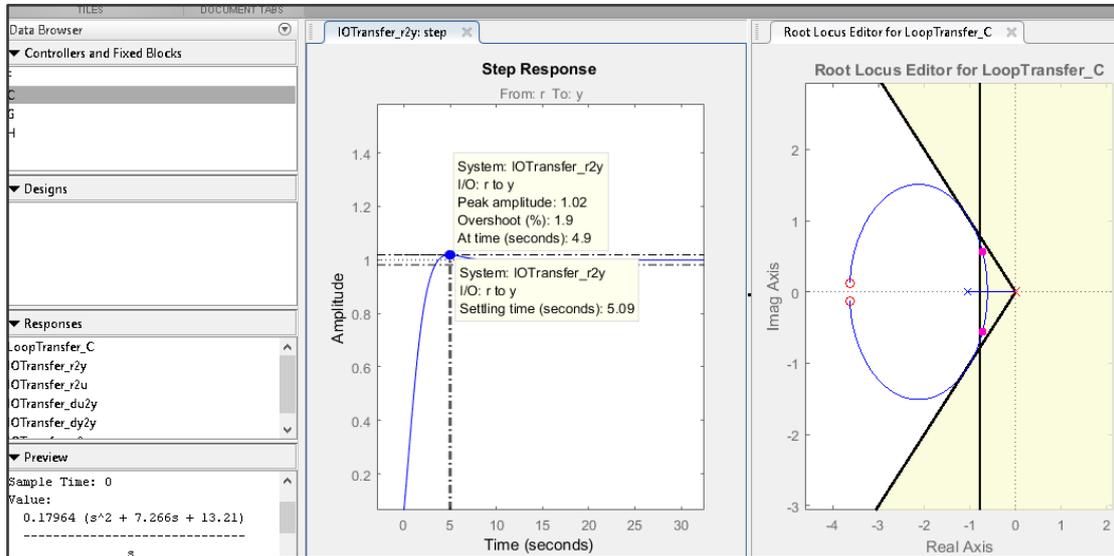


Figura 45 Polos y ceros modificados en la planta primer orden para presión

Fuente: Autor

Y, su función de transferencia en tiempo continuo correspondiente a un PID igual a:

$$GC = \frac{0.17964 * (s^2 + 7.266s + 13.21)}{s}$$

Finalmente, mediante la ayuda de Matlab se ejecuta el comando:

$$[Kp, Ki, Kd]= piddata (Ccontrolador)$$

“Ccontrolador”, corresponde al nombre con los cuales fueron guardados los resultados que se obtuvieron en “rtool”. El cual permitió obtener las constantes en tiempo continuo de Kp , Ki y Kd del controlador, y una vez importada la información al “Workspace” en Matlab, se obtiene que:

$$Kp = 1.3053$$

$$Ki = 2.3738$$

$$Kd = 0.1796$$

En la TABLA 2.8, se presenta los valores del controlador PID en tiempo continuo y discreto que pueden ser implementados en la planta de presión.

TABLA 2.8 ACCIONES DEL CONTROLADOR PID MEDIANTE EL MÉTODO LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES PARA LA PLANTA DE PRESIÓN.

Acciones PID	Tiempo continuo	Tiempo discreto
Proporcional K_p	1.3053	3.8654
Integral K_i	2.3738	3.9612
Derivativo K_d	0.1796	0

Fuente: Autor

2.12.3 Controlador por el LGR para la planta de caudal.

Para el diseño del controlador por método Lugar Geométrico de las raíces se parte de la función de transferencia representativa de la planta de caudal, la cual está representada como un sistema de primer orden de acuerdo con la Ec (4).

$$G(s) = \frac{0.6}{0.35s + 1}$$

Con la ayuda de Matlab se realizó el algoritmo que permitió obtener los polos objetivos y raíces de la planta, de tal forma que permite visualizar el comportamiento de esta en lazo abierto y en lazo cerrado (Anexo 3), además, de modificar los parámetros directamente con la metodología utilizada en la anterior planta el T_a y MP con la ayuda del comando "rltool". Este comando permite establecer criterios de diseño y añadir un par de ceros y un polo en el origen con el fin de encontrar una función de transferencia que represente a un controlador PID frente al sistema de primer orden en lazo cerrado. Para el diseño del controlador fueron considerados los criterios de MP y T_a , en el cual se detalla que: $MP \leq 4.3\%$, y; $T_a = 2.5\text{seg}$.

Permitiendo establecer límites de diseño para el controlador. En la Figura 46, se muestra la configuración de estos parámetros y, además, los elementos añadidos al sistema de primer orden, mostrando una respuesta en donde el error de estado estable fue corregido ante una entrada paso unitario, obteniendo una función de transferencia en lazo cerrado correspondiente a un PID.

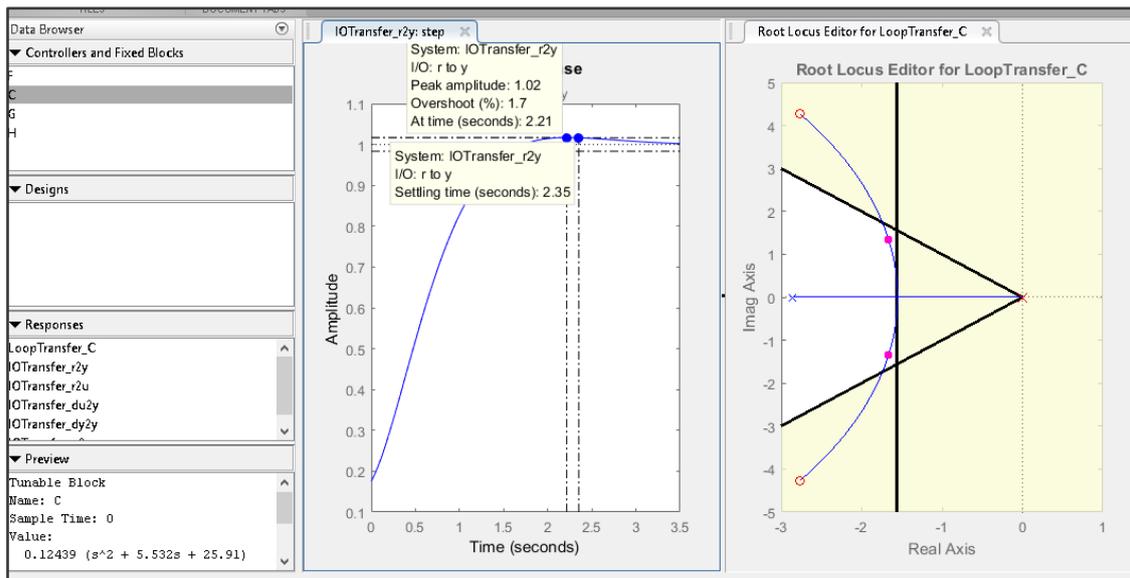


Figura 46 Polos y ceros modificados en la planta primer orden para caudal

Fuente: Autor

Y, su función de transferencia en tiempo continuo correspondiente a un PID igual a:

$$GC = \frac{0.12439 * (s^2 + 5.532s + 25.91)}{s}$$

Finalmente, mediante la ayuda de Matlab se ejecuta el comando:

$$[Kp, Ki, Kd]= piddata (Ccontrolador)$$

“Ccontrolador”, corresponde al nombre con los cuales fueron guardados los resultados que se obtuvieron en “rtool”.El cual permitió obtener las constantes en tiempo continuo de Kp , Ki y Kd del controlador, y una vez importada la información al “Workspace” en Matlab, se obtiene que:

$$Kp = 0.6882$$

$$Ki = 3.2224$$

$$Kd = 0.1244$$

En la TABLA 2.9, se presenta los valores del controlador PID en tiempo continuo y discreto que pueden ser implementados en la planta de caudal.

TABLA 2.9 ACCIONES DEL CONTROLADOR PID MEDIANTE EL MÉTODO LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES PARA LA PLANTA DE CAUDAL.

Acciones PID	Tiempo continuo	Tiempo discreto
Proporcional K_p	0.6882	1.0218
Integral K_i	3.2224	1.6694
Derivativo K_d	0.1244	0

Fuente: Autor

2.13 Controladores por realimentación de estados.

Para el diseño de un controlador por realimentación de estados se busca un sistema en espacios de estados, que, a partir de una función de transferencia se encuentran sus parámetros, la cual constituye un sistema linealizado compuesto por matrices A , B , C y D de acuerdo con las Ec (24) & (25) ecuaciones de estado y de salida linealizada de un sistema en realimentación de estados.

Partiendo de un algoritmo y un código de programación en Matlab - Simulink, se procedió a realizar el diseño del controlador por realimentación de estados para las plantas de nivel, presión y caudal.

2.13.1 Controlador por realimentación de estados para la planta de Nivel.

Para el diseño del controlador por realimentación de estados para la planta de nivel, se realizó un código de programación en el editor de Matlab (ANEXO 4); mediante el cual se encontraron las matrices del controlador y sus respectivas ganancias para el seguimiento de control de la planta de nivel. A continuación, se presenta el diagrama de flujos de la programación en Matlab en la Figura 47.

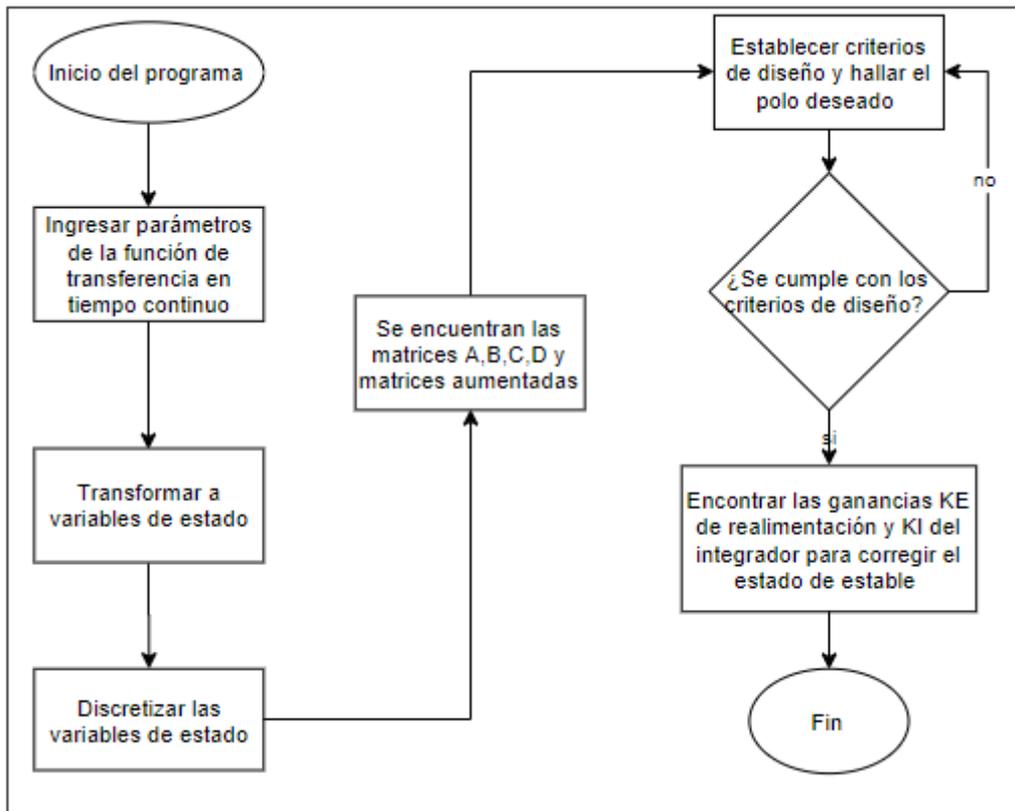


Figura 47 Diagrama de flujo para el diseño de un controlador por realimentación de estados para nivel.

Fuente: Autor

Los valores obtenidos de las ganancias KE y KI tras correr el código de programación son:

$$KE = -0.5919$$

&

$$KI = 0.0316$$

Los valores de KE y KI que fueron encontrados pueden ser implementados en el sistema por realimentación de estados para la planta de nivel.

2.13.2 Controlador por realimentación de estados para la planta de Presión.

Para el diseño del controlador por realimentación de estados para la planta de presión, se realizó un código de programación en el editor de Matlab (ANEXO 5); mediante el cual se encontraron las matrices del controlador y sus respectivas ganancias para el seguimiento de control en la planta de presión. A continuación, se presenta el diagrama de flujos de la programación en Matlab en la Figura 48.

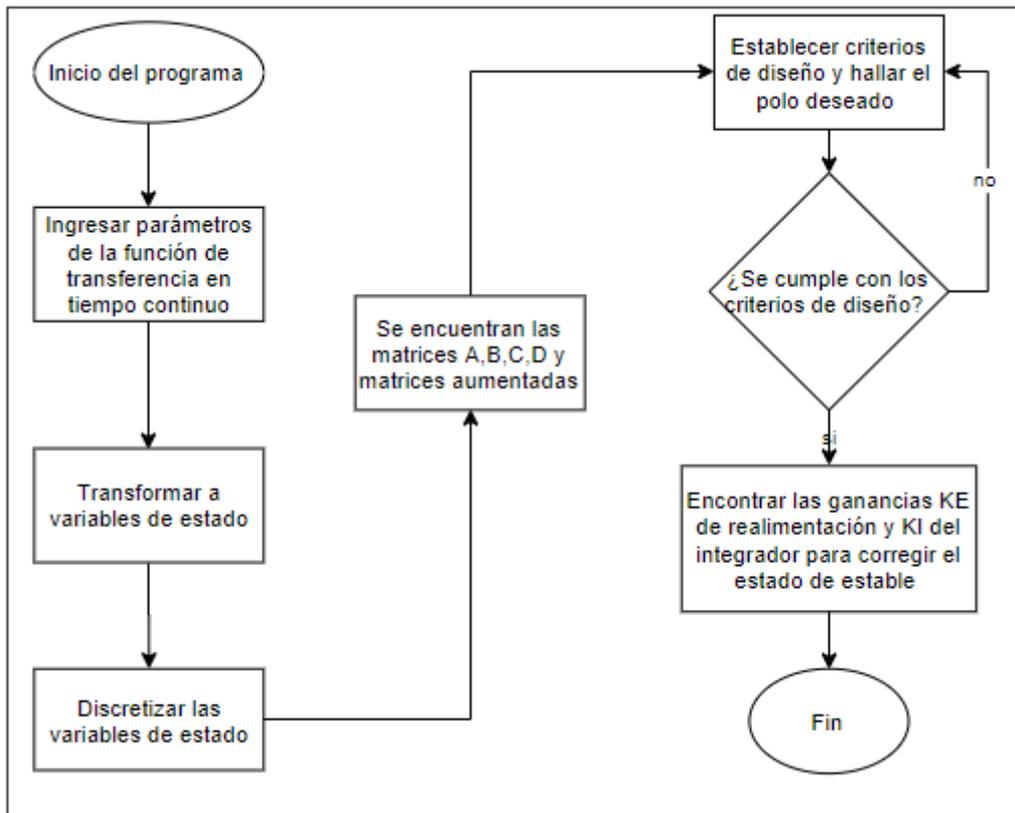


Figura 48 Diagrama de flujo para el diseño de un controlador por realimentación de estados para presión

Fuente: Autor

Los valores obtenidos de las ganancias KE y KI tras correr el código de programación fueron:

$$KE = -1.5102$$

&

$$KI = 0.2310$$

Los valores de KE y KI que fueron encontrados pueden ser implementados en el sistema por realimentación de estados para la planta de presión.

2.13.3 Controlador por realimentación de estados para la planta de Caudal.

En el diseño del controlador por realimentación de estados para la planta de caudal, se realizó un código de programación en el editor de Matlab (ANEXO 6); mediante el cual se encontraron las matrices del controlador y sus respectivas ganancias para el seguimiento de control de la planta de caudal. A continuación, se presenta el diagrama de flujos de la programación en Matlab en la Figura 49.

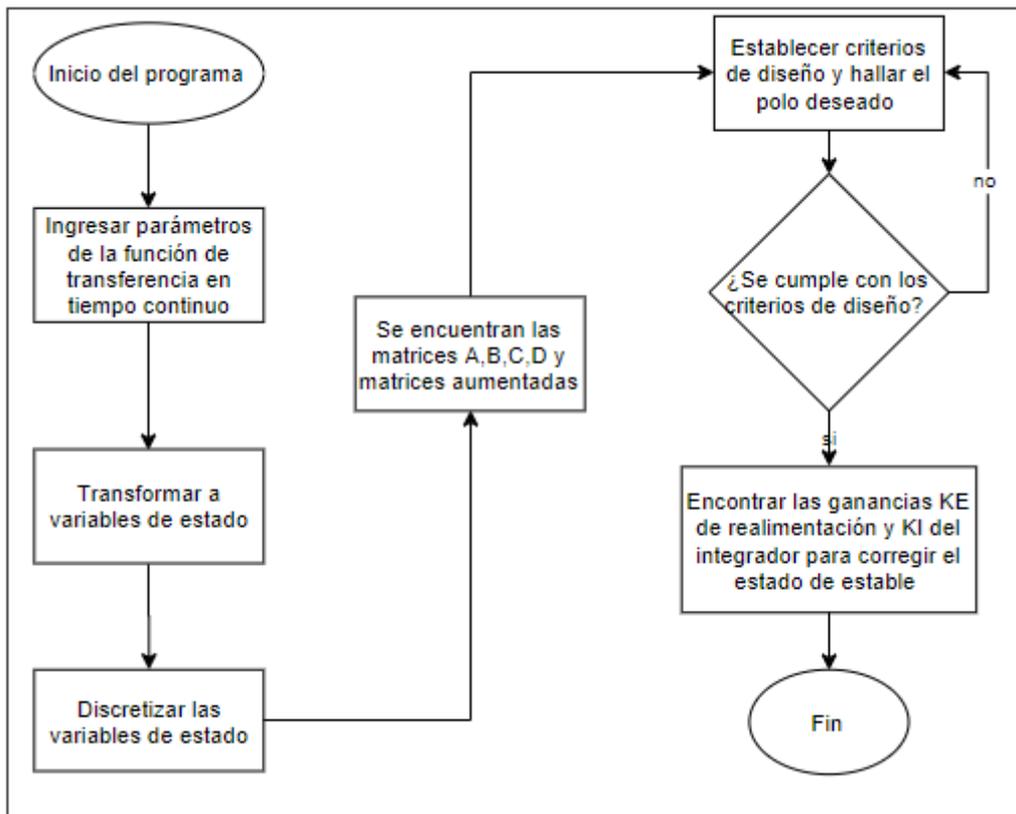


Figura 49 Diagrama de flujo para el diseño de un controlador por realimentación de estados para caudal

Fuente: Autor

Los valores obtenidos de las ganancias KE y KI tras correr el código de programación son:

$$KE = -1.0334$$

&

$$KI = 0.1157$$

Los valores de KE y KI que fueron encontrados pueden ser implementados en el sistema por realimentación de estados para la planta de caudal.

2.14 Discusión.

Por último, se analizan los resultados obtenidos en este capítulo.

Para la selección de los equipos, se tomó en cuenta los modelos utilizados en los laboratorios de la carrera de electricidad, de tal manera que este se acople a ellos con el fin de realizar prácticas de comunicación y adquisición de datos.

El PLC S7-1200 seleccionado cuenta con las entradas y salidas tanto analógicas y digitales necesarias para poner en marcha cualquier tipo de control que se desee hacer, además puede servir como una tarjeta de adquisición y envío de datos para comunicar equipos diferentes a su marca.

Posteriormente, se realizó el reconocimiento de los módulos de control con los que se trabajó en esta investigación, siendo estos el módulo de caudal, presión y nivel, cada uno con su PLC correspondiente a la marca Allen Bradley.

La identificación correspondiente a cada módulo, se lo realizó mediante comunicaciones OPC propias del PLC Allen Bradley y comunicaciones correspondiente a KEPServerEx y TIA Portal, además, con la ayuda del OPC de Matlab se pudo adquirir los datos y variables necesarias para identificar a cada uno de los sistemas con los que se trabajó permitiendo conocer a la función de primer orden representativa de cada planta.

Y, finalmente se encontraron los parámetros de los controladores PID mediante el método por asignación de polos para la plana de nivel y por el lugar geométrico de las raíces para la planta de presión y caudal, de igual manera se encontraron las ganancias representativas para los controladores por realimentación de estados a través de un algoritmo diseñado en Matlab para las plantas de nivel, presión y caudal, siendo estos lo más adecuados para ser implementados en cada sistema de control.

CAPITULO III

IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS CONTROLADORES PID Y POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS.

En este capítulo se presenta la implementación de los controladores PID y por realimentación de estados a los sistemas dinámicos de presión, nivel y caudal, mediante la elaboración de interfaces gráficas de control en Matlab - Simulink que permitan la interacción de forma directa con el control de procesos diseñado para cada módulo. Además, se muestran las pruebas de control realizadas a los controladores PID y por realimentación de estados en cada interfaz diseñada en Matlab - Simulink, verificando que cada sistema de control esté funcionando adecuadamente en tiempo real.

3.1 Desarrollo de la propuesta

Para el desarrollo de este capítulo, se procedió a realizar los siguientes pasos:

- Implementación de los controladores PID y por realimentación de estados en interfaces gráficas realizadas en Simulink para los sistemas dinámicos de nivel, presión y caudal.
- Pruebas de funcionamiento de los controladores PID y por realimentación de estados en los sistemas dinámicos de nivel, presión y caudal.

3.2 Implementación de los controladores PID para los sistemas dinámicos de nivel, presión y caudal.

La implementación de este tipo de controlador, se lo realiza una vez obtenidos los valores de K_p , K_i , K_d , los cuales deben cumplir con los parámetros establecidos en el Capítulo II, tanto para el control PID por asignación de polos, como para el PID por el lugar geométrico de las raíces.

3.2.1 Implementación del controlador para la planta de nivel.

La implementación de este controlador se lo realizó mediante herramientas de Matlab - Simulink, las cuales permiten el uso de bloques de control, como PID_discrete o continue, en dónde se configuraron los valores del controlador PID por asignación de polos que se diseñó en el capítulo II. Luego realizaron las comunicaciones de los bloques OPC KEPserverEx en

Simulink, y se creó una interfaz gráfica la cual cuenta con subsistemas que permiten la visualización del comportamiento de todas las variables del sistema nivel como se muestra en la Figura 50.

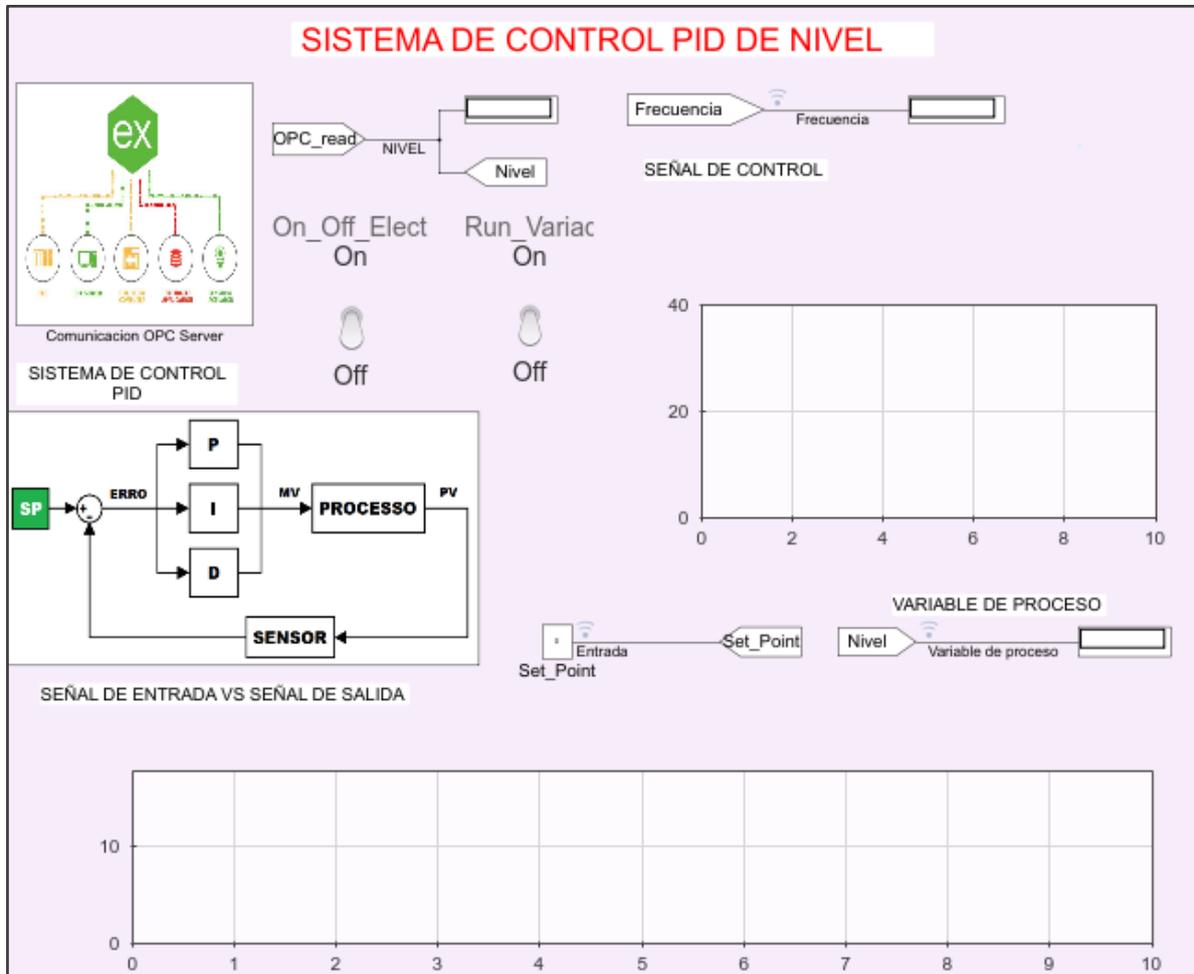


Figura 50 Interfaz de control PID para Nivel

Fuente: Autor

A continuación, se explica la interfaz gráfica en Simulink del controlador PID para la variable de proceso (nivel).

Como se muestra en la Figura 51, los elementos de activación para los equipos físicos de la planta de nivel están representados mediante interruptores que son los encargados de poner en marcha al variador de frecuencia y la electroválvula del módulo de nivel.

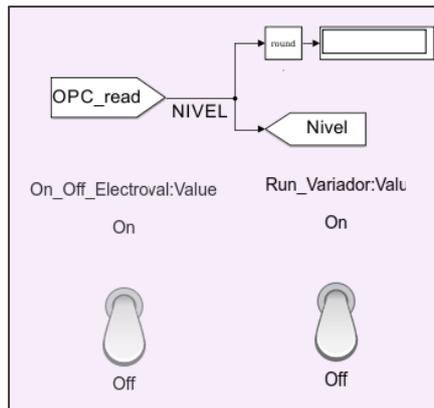


Figura 51 Interruptores de activación de la planta

Fuente: Autor

En la Figura 52, se muestra el subsistema de comunicaciones, en su interior están los bloques OPC “Read”, “Write” y “Configuration” que permiten leer todas las variables de activación de quipos y procesos de control, toda la información que se guarda en el subsistema es enviada a la interfaz principal en forma de elementos y señales de visualización.

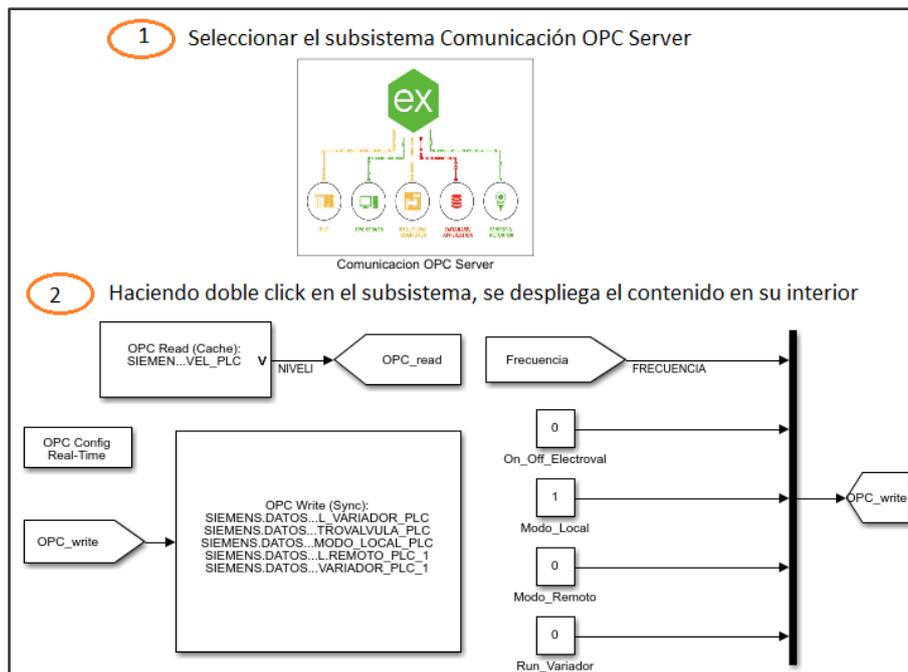


Figura 52 Subsistema de comunicaciones y bloques OPC

Fuente: Autor

En la Figura 53, se muestra el subsistema PID, en su interior tiene el controlador PID en lazo cerrado y a una saturación de señal con el fin de evitar daños en los equipos físicos de

la planta, todo el proceso que se realiza dentro del subsistema es transmitida a la interfaz principal en forma de señales de visualización.

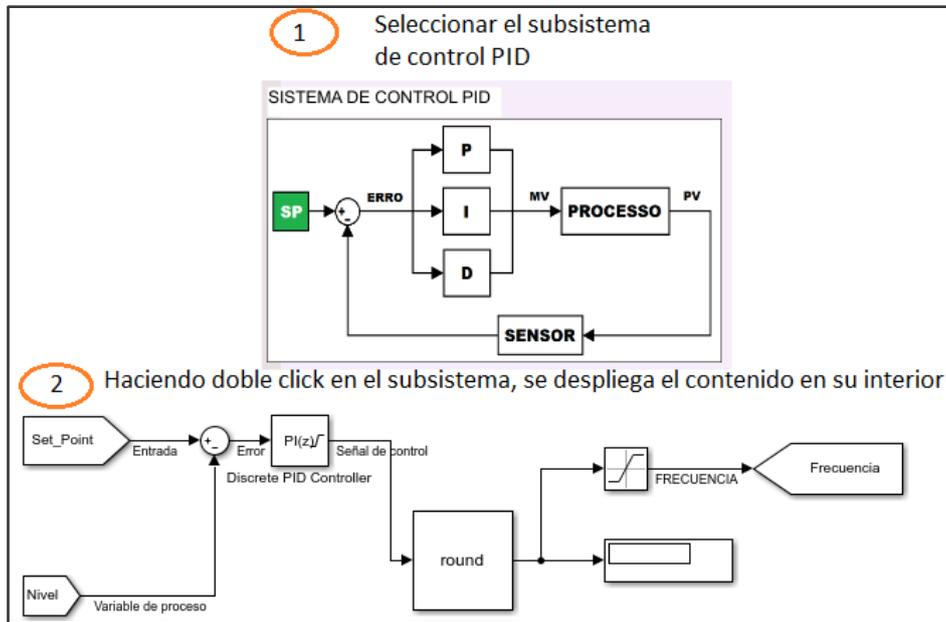


Figura 53 Subsistema PID, realimentación, controlador y saturador

Fuente: Autor.

Finalmente, en la Figura 54 se cuenta con las pantallas de interacción, visualización y comportamiento de las variables de nivel, Setpoint y control de variador de frecuencia.

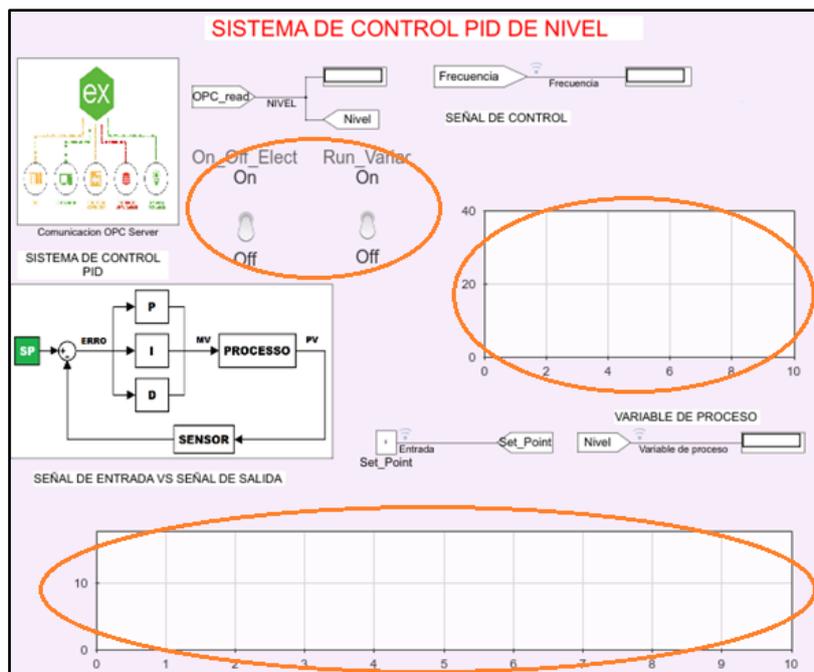


Figura 54. Ventanas para la visualización y comportamiento de las variables

Fuente: Autor

Una vez realizada la interfaz gráfica y encontradas las acciones PID del controlador por asignación de polos, se procedió a configurar el bloque PID discreto en Matlab - Simulink, como se muestra en la Figura 55.

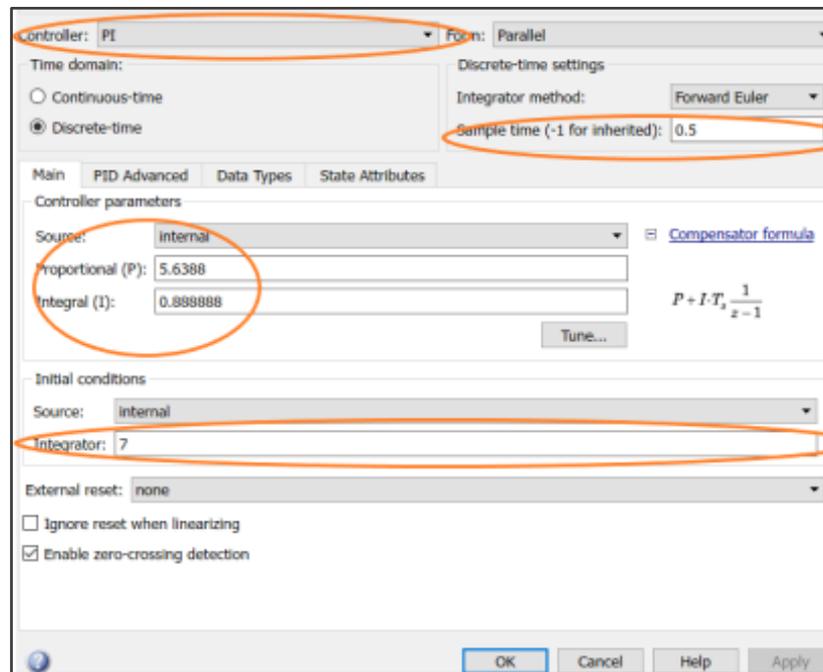


Figura 55 Configuración del bloque PID discreto en Matlab-Simulink

Fuente: Autor.

Dentro del bloque PID discreto en Matlab-Simulink, se configuran los valores PI obtenidos mediante el método por asignación de polos los cuales se muestran en la Tabla 2.7 del capítulo II, además, se configura el tiempo de muestreo y finalmente se realiza una configuración adicional en el parámetro de inicialización del sistema con 7 Hz, de manera que el controlador realice un proceso más rápido al arrancar su funcionamiento.

3.2.2 Implementación del controlador para la planta de presión.

Para la implementación de este controlador se utilizaron herramientas de Matlab - Simulink, las cuales permiten el uso de bloques de control, como PID_discrete o continue, en dónde se configuraron los valores del controlador PID por el Lugar Geométrico de las Raíces que se diseñó en el capítulo II. Para ello, primero se configuraron los bloques de comunicación OPC KEPserverEx en Simulink, y luego se creó una interfaz gráfica que cuenta con subsistemas que permiten la visualización del comportamiento de todas las variables del sistema de presión como se muestra en la Figura 56.

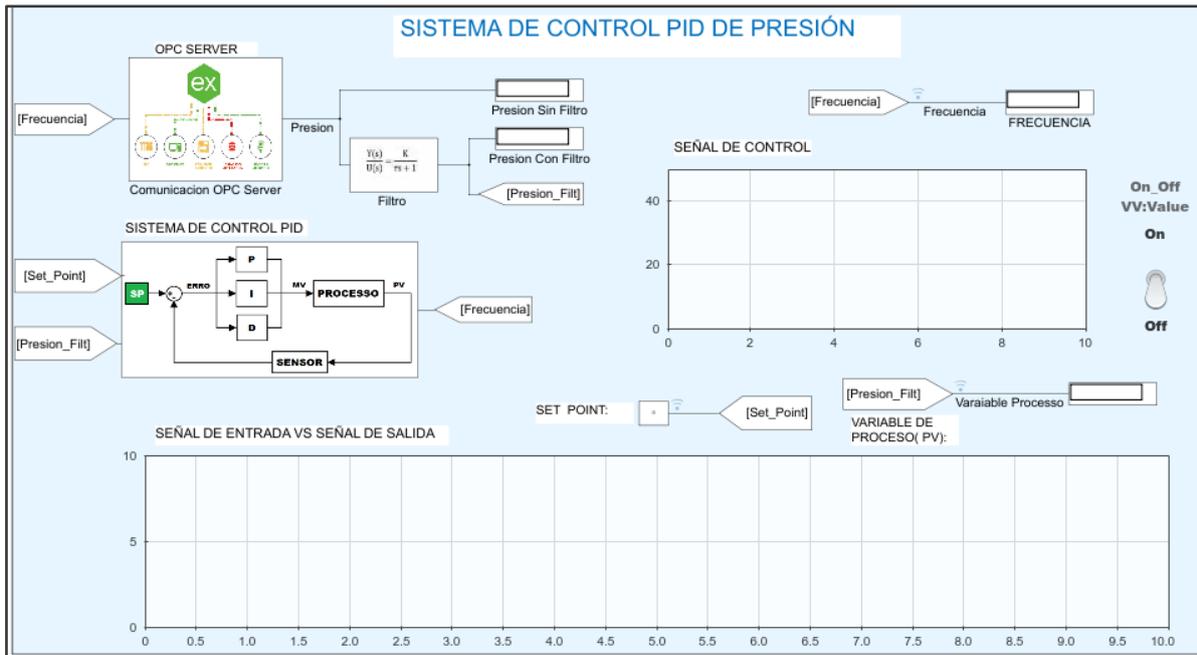


Figura 56 Interfaz de control PID para Presión

Fuente: Autor

Una vez configurada la interfaz gráfica y encontradas las acciones PID del controlador por el lugar geométrico de las raíces, se procede a configurar el bloque PID continuo y discreto en Matlab - Simulink como se muestra en la Figura 57, además, se configura el tiempo de muestreo a 0.05 ms para evitar problemas de comunicación y hacer la adquisición de datos en tiempo discreto.

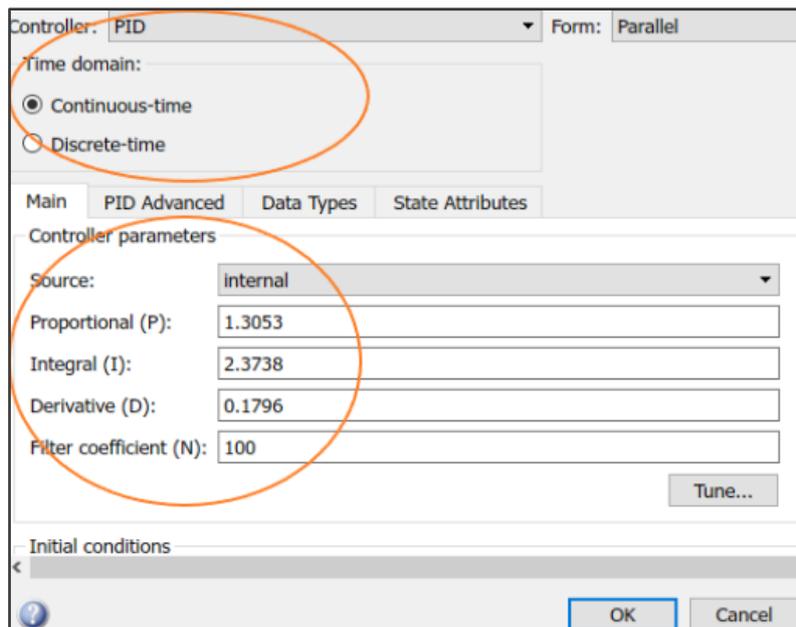


Figura 57 Configuración de las acciones PID para la planta de presión

Fuente: Autor

Los valores PID implementados corresponden al diseño del controlador por el método del lugar geométrico de las raíces. los cuales se muestran en la Tabla 2.8 del capítulo II.

3.2.3 Implementación del controlador para la planta de caudal.

En la implementación del controlador PID para la planta de caudal, se utilizaron herramientas de Matlab - Simulink, las cuales permiten el uso de bloques de control, como PID_discrete o continue, en dónde se configuraron los valores del controlador PID por el Lugar Geométrico de las Raíces que se diseñó en el capítulo II. Para ello, primero se configuraron los bloques de comunicación OPC KEPServerEx en Simulink, y luego se creó una interfaz gráfica que cuenta con subsistemas que permiten la visualización del comportamiento de todas las variables del sistema de caudal como se muestra en la Figura 58.

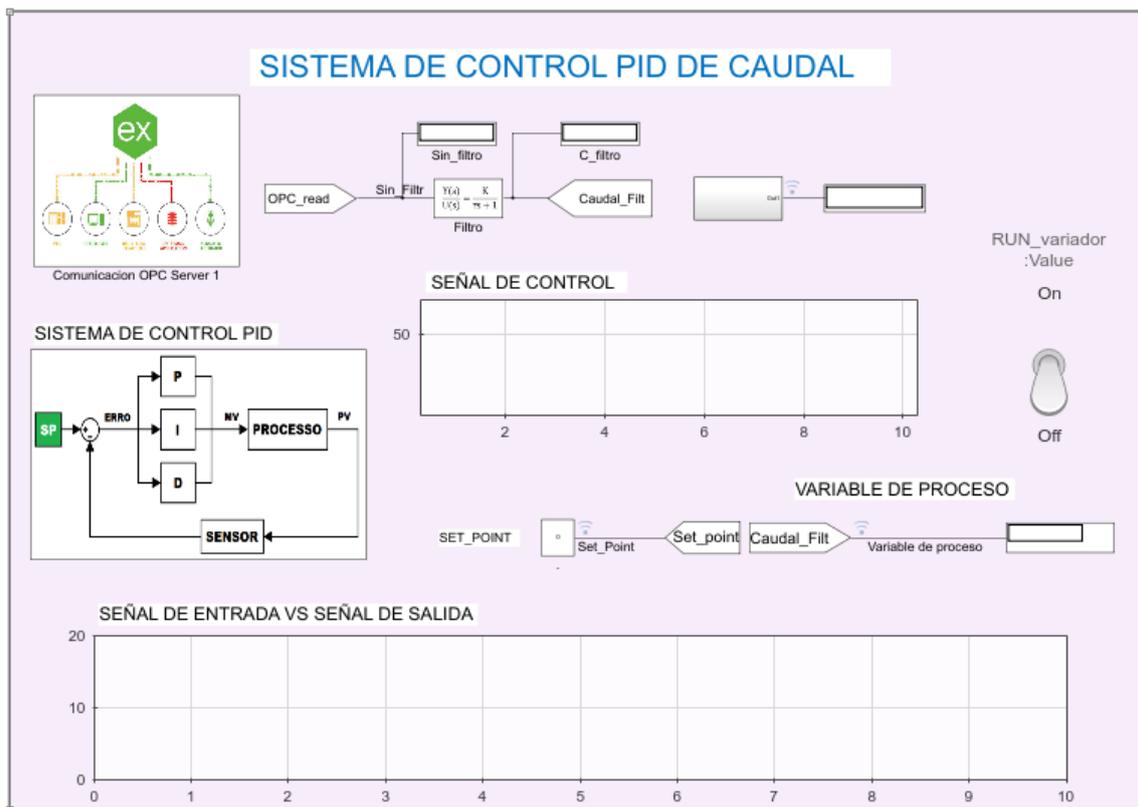


Figura 58 Interfaz de control PID para Caudal

Fuente: Autor.

Una vez configurada la interfaz gráfica y encontradas las acciones PID del controlador por el lugar geométrico de las raíces para la planta de presión, se procede a configurar el bloque PID continuo y discreto en Matlab - Simulink como se muestra en la Figura 59, además, se

configura el tiempo de muestreo a 0.05 ms para evitar problemas de comunicación y hacer la adquisición de datos en tiempo discreto.

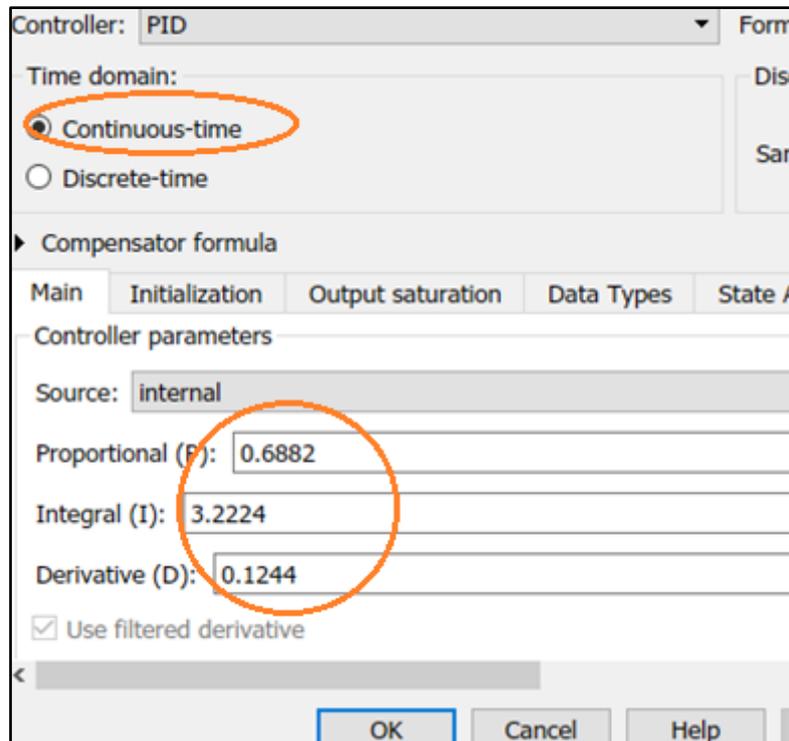


Figura 59 Configuración de las acciones PID para la planta de caudal

Fuente: Autor.

Los valores PID implementados corresponden al diseño del controlador por el método del lugar geométrico de las raíces para la planta de caudal. los cuales se muestran en la Tabla 2.9 del capítulo II.

3.3 Implementación de los controladores por realimentación de estados para los sistemas dinámicos de nivel, presión y caudal.

La implementación de estos controladores, se lo realiza una vez hecho obtenidas sus ganancias de control, las cuales deben cumplir con las especificaciones detalladas para su diseño en el Capítulo II.

3.3.1 Implementación del controlador para la planta de nivel.

Para la implementación de este controlador, primero se configuraron los bloques de comunicación OPC KEPServerEx en Simulink, y una vez configurados, se realizó una interfaz

gráfica como se observa en la Figura 60. Esta, cuenta con subsistemas que permiten la visualización del comportamiento de las variables correspondientes a la planta de nivel.

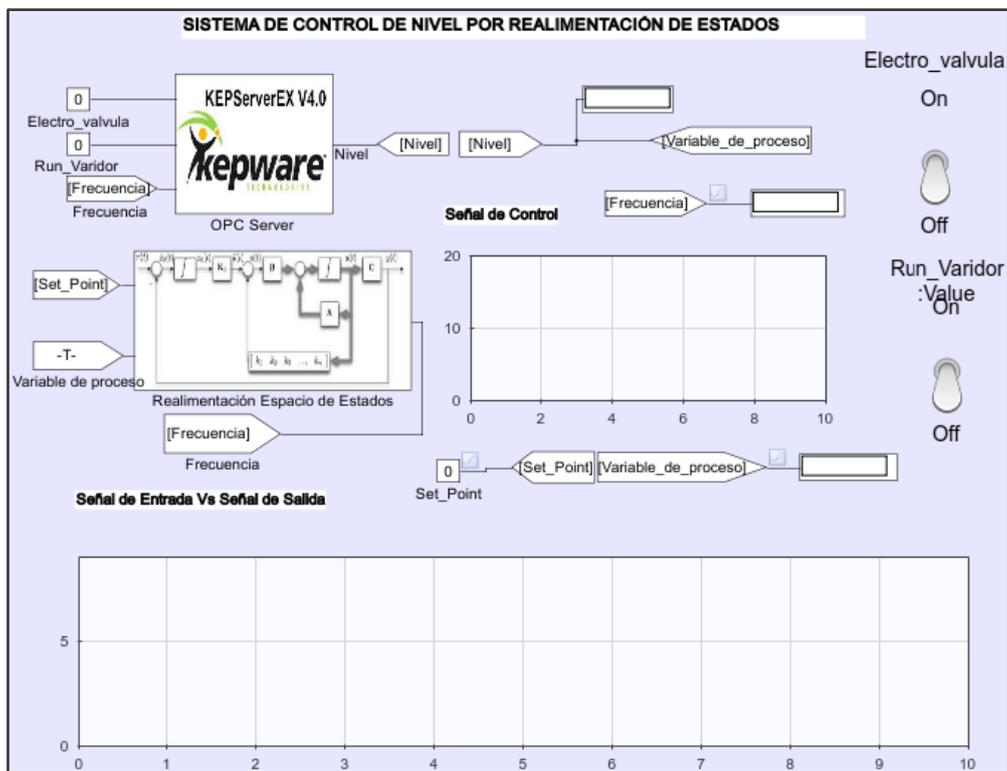


Figura 60 Interfaz del sistema de control de nivel por realimentación de estados

Fuente: Autor

A continuación, se explica la interfaz gráfica creada en Simulink del controlador por realimentación de estados para la planta de nivel.

Como se muestra en la Figura 61, los elementos de activación para los equipos físicos de la planta de nivel están representados mediante interruptores que son los encargados de poner en marcha al variador de frecuencia y la electroválvula del módulo de nivel.

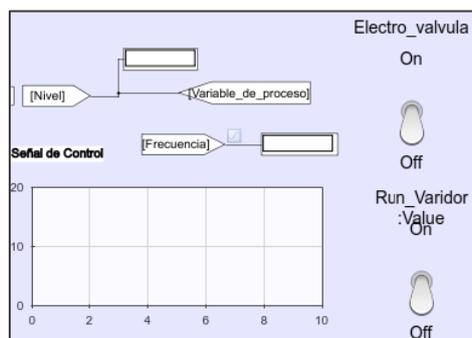


Figura 61 Interruptores de activación de la planta.

Fuente: Autor

En la Figura 62, se muestra el subsistema de comunicaciones, en su interior están los bloques OPC “Read”, “Write” y “Configuration” que permiten leer todas las variables de activación de quipos y procesos de control, toda la información que se guarda en el subsistema es enviada a la interfaz principal en forma de elementos y señales de visualización.

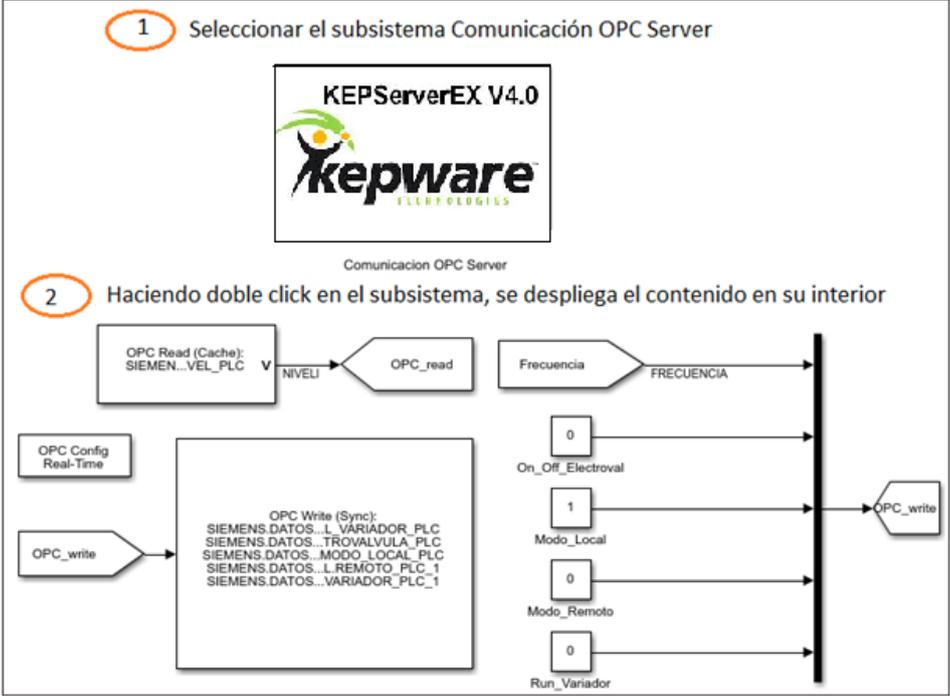


Figura 62 Subsistema de comunicaciones y bloques OPC

Fuente: Autor

En la Figura 63, se muestra el subsistema por realimentación de estados, en su interior tiene el controlador en lazo cerrado, sus ganancias de control y una saturación de señal de la velocidad del variador de frecuencia, todo el proceso que se realiza dentro del subsistema es transmitida a la interfaz principal en forma de señales de visualización.

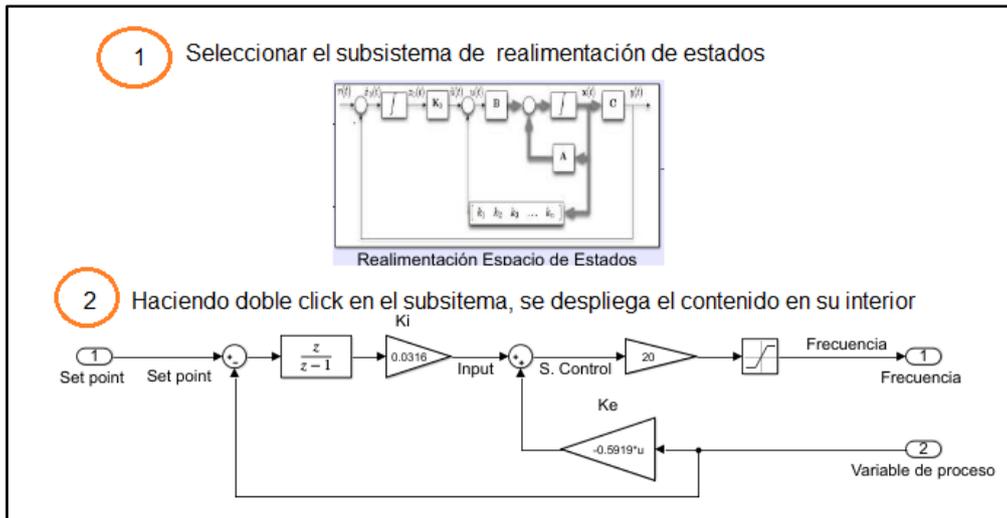


Figura 63 Subsistema de realimentación de estados, ganancias y saturador

Fuente: Autor

Finalmente, en la Figura 64 se cuenta con las pantallas de interacción, visualización y comportamiento de las variables de nivel, Setpoint y control de variador de frecuencia.

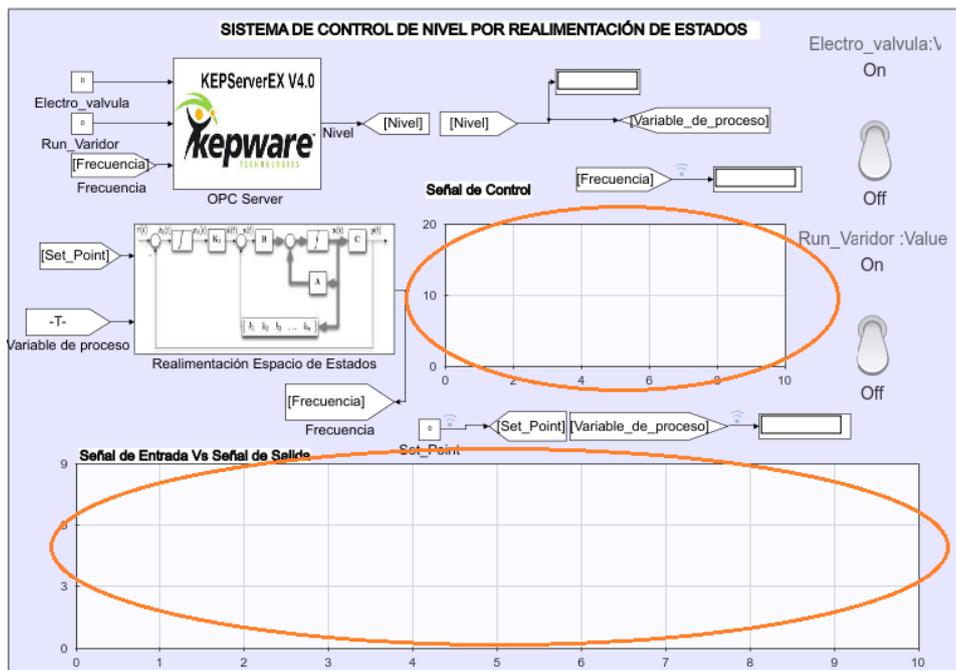


Figura 64 Ventanas para la visualización de las variables de nivel, setpoint y control del variador de frecuencia

Fuente: Autor.

Una vez realizada la interfaz gráfica y encontradas las ganancias de $KE - KI$ por realimentación de estados, se procedió a configurar a cada una de ellas abriendo en sus bloques correspondientes en Matlab – Simulink e introduciendo los valores encontrados en su diseño como se muestra en la Figura 65.

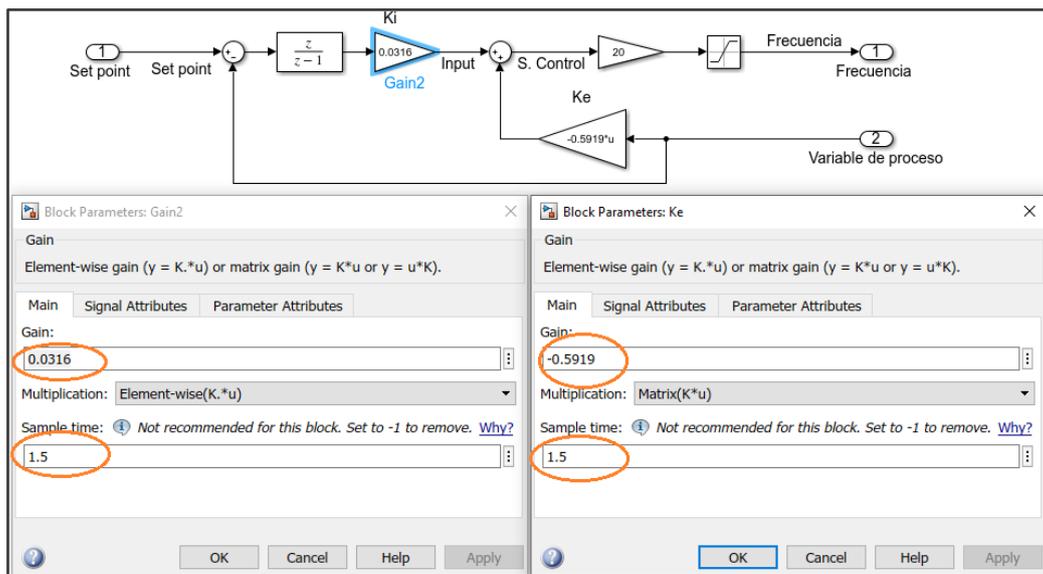


Figura 65 Configuración de ganancias y tiempo de muestreo en el control de nivel

Fuente: Autor

Los valores KE y KI implementados corresponden al diseño del controlador por realimentación de estados para la planta de nivel, los cuales se muestran en el capítulo II.

3.3.2 Implementación del controlador para la planta de presión.

Para realizar la implementación del control por realimentación de estados en la planta de presión se realizó el mismo procedimiento que la planta de nivel, primero se configuraron los bloques de comunicación OPC KEPserverEx en Simulink, y una vez configurados, se realizó una interfaz gráfica como se observa en la Figura 66. Esta, cuenta con subsistemas que permiten la visualización del comportamiento de las variables correspondientes a la planta de presión.

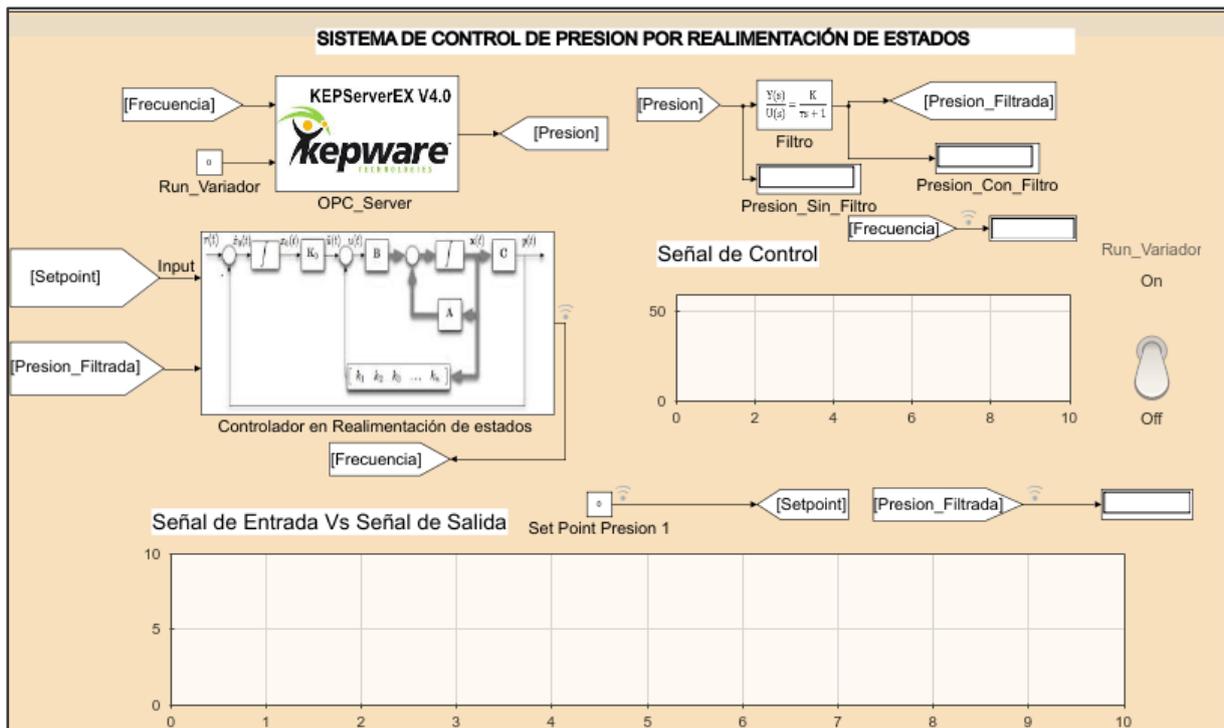


Figura 66 Sistema de control de presión por realimentación de estados

Fuente: Autor

Una vez realizada la interfaz gráfica y encontradas las ganancias de KE - KI por realimentación de estados, se procedió a configurar a cada una de ellas abriendo en sus bloques correspondientes en Matlab – Simulink e introduciendo los valores encontrados en su diseño como se muestra en la Figura 67.

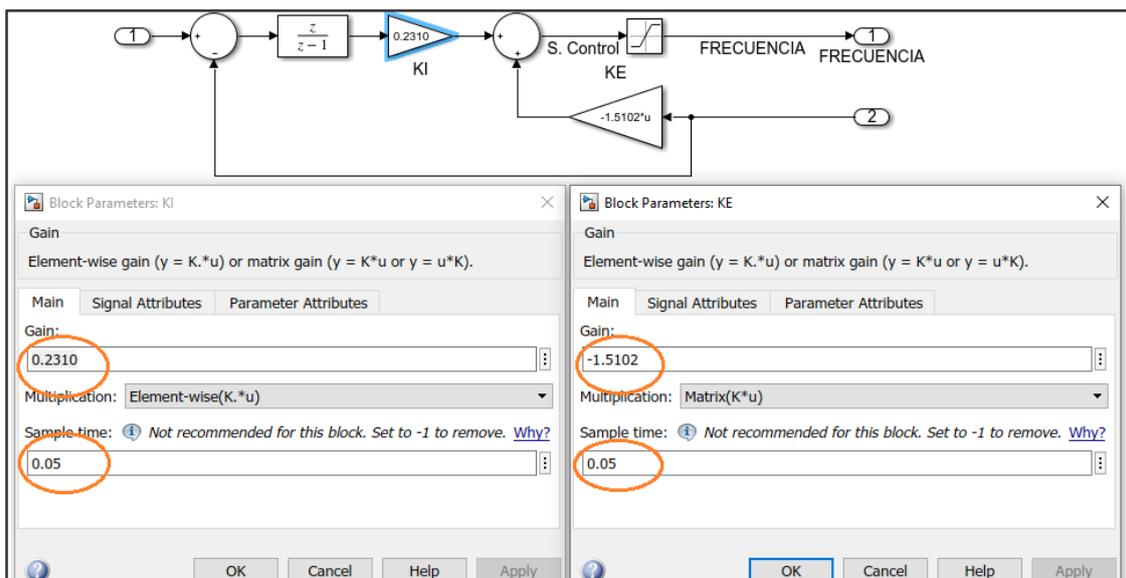


Figura 67 Configuración de ganancias y tiempo de muestreo en el control de presión

Fuente: Autor

Los valores KE y KI implementados corresponden al diseño del controlador por realimentación de estados para la planta de presión, los cuales se muestran en el capítulo II.

3.3.3 Implementación del controlador para la planta de caudal.

Para la implementación del controlador por realimentación de estados para la planta de caudal, primero se configuraron los bloques de comunicación OPC KEPServerEx en Simulink, y una vez configurados, se realizó una interfaz gráfica como se observa en la Figura 68, en la cuenta con subsistemas que permiten la visualización del comportamiento de las variables correspondientes a la planta de caudal.

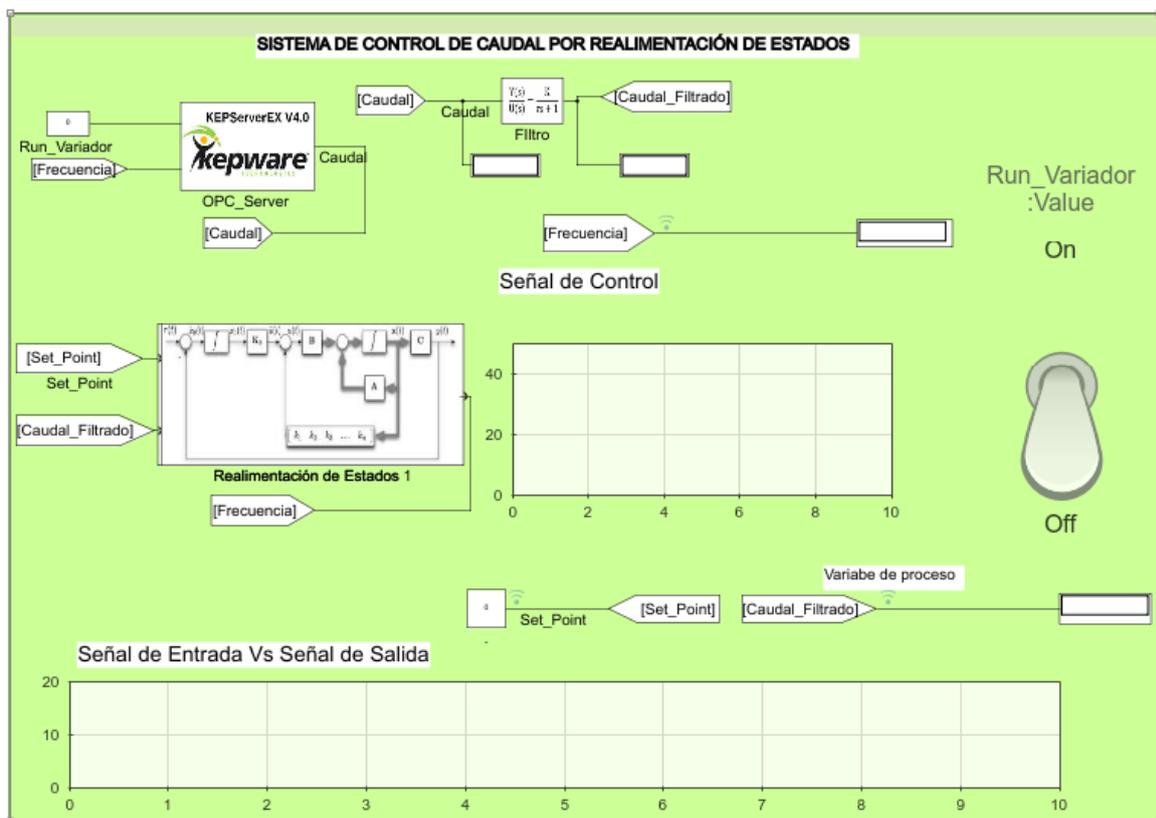


Figura 68 Sistema de control de caudal por realimentación de estados

Fuente: Autor

Una vez realizada la interfaz gráfica, se configuran los valores de las ganancias $KE - KI$ que fueron encontradas en el capítulo anterior para la planta de caudal, además, se configura el tiempo de muestro a 0.05 ms dentro del sistema de realimentación de estados diseñado en Simulink como se muestra en la Figura 69.

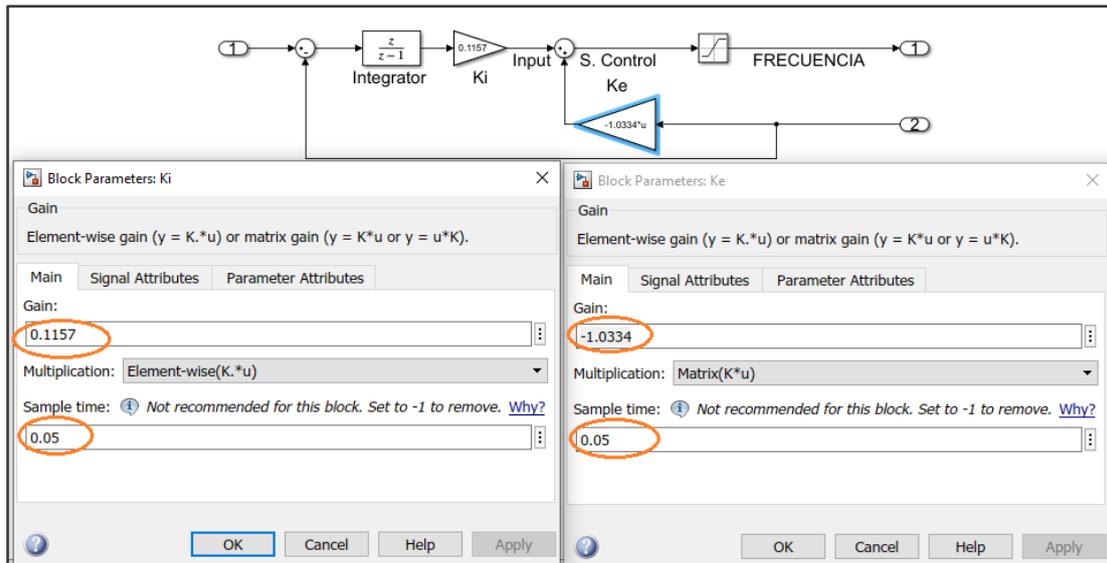


Figura 69 Configuración de ganancias y tiempo de muestreo en el control de Presión

Fuente: Autor

Los valores KE y KI implementados corresponden al diseño del controlador por realimentación de estados para la planta de caudal, los cuales se muestran en el capítulo II.

3.4 Pruebas de funcionamiento de los controladores PID.

Las pruebas de funcionamiento para los controladores PID, consisten en observar el comportamiento de las variables de nivel, presión y caudal frente a una señal tipo escalón con diferentes amplitudes, la cuales se regulan a través del control de frecuencia del variador de velocidad en cada módulo.

3.4.1 Pruebas de funcionamiento para la planta de nivel.

Esta prueba consiste en observar el comportamiento de la variable nivel ante una señal tipo escalón con diferentes amplitudes a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 70.

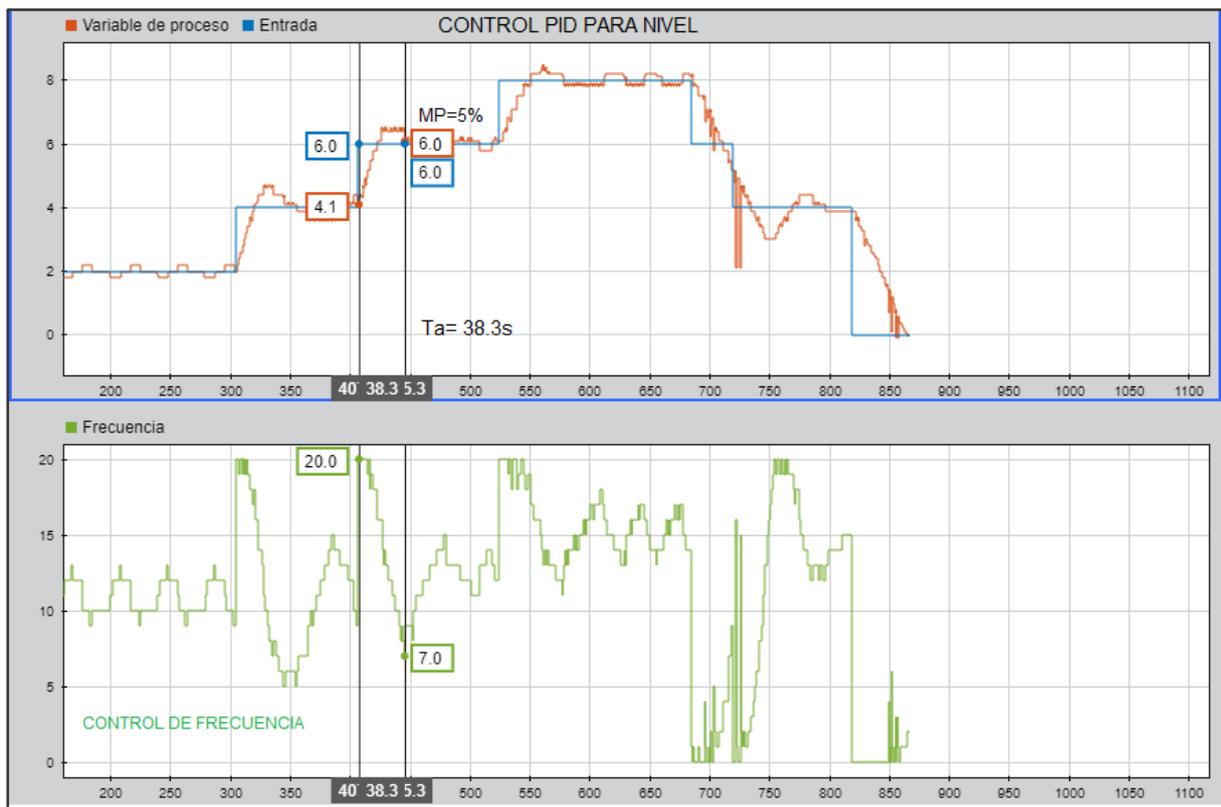


Figura 70 Respuesta del controlador PID por asignación de polos para nivel

Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 70, la señal de entrada tipo escalón arranca desde 0 *cm* hasta 8 *cm* y se incrementa cada 2 *cm* y viceversa hasta llegar a cero, permitiendo que el control de frecuencia que se encarga de regular la velocidad de la bomba acoplada en el módulo responda ante esta señal, obteniendo así una respuesta de la variable de nivel en función del controlador diseñado.

La señal de nivel obtenida tiene un máximo pico de sobreimpulso de 5 %, un error de estado estable de 0.001% y una respuesta del sistema con un tiempo de establecimiento de 38.3s, que cumple en su totalidad con los criterios de diseño a pesar de tener un tiempo de establecimiento considerable debido a la respuesta del sensor utilizado y por tratarse de un sistema no lineal, así garantizando un buen funcionamiento del controlador PID por asignación de polos.

Las perturbaciones existentes en la señal del sistema corresponden a movimientos del líquido en el módulo y la calidad del sensor utilizado.

3.4.2 Pruebas de funcionamiento para la planta de presión.

Esta prueba consiste en observar el comportamiento de la respuesta del sistema de presión ante una señal tipo escalón con diferentes amplitudes a lo largo del tiempo. Los resultados Obtenidos se muestran en la Figura 71.

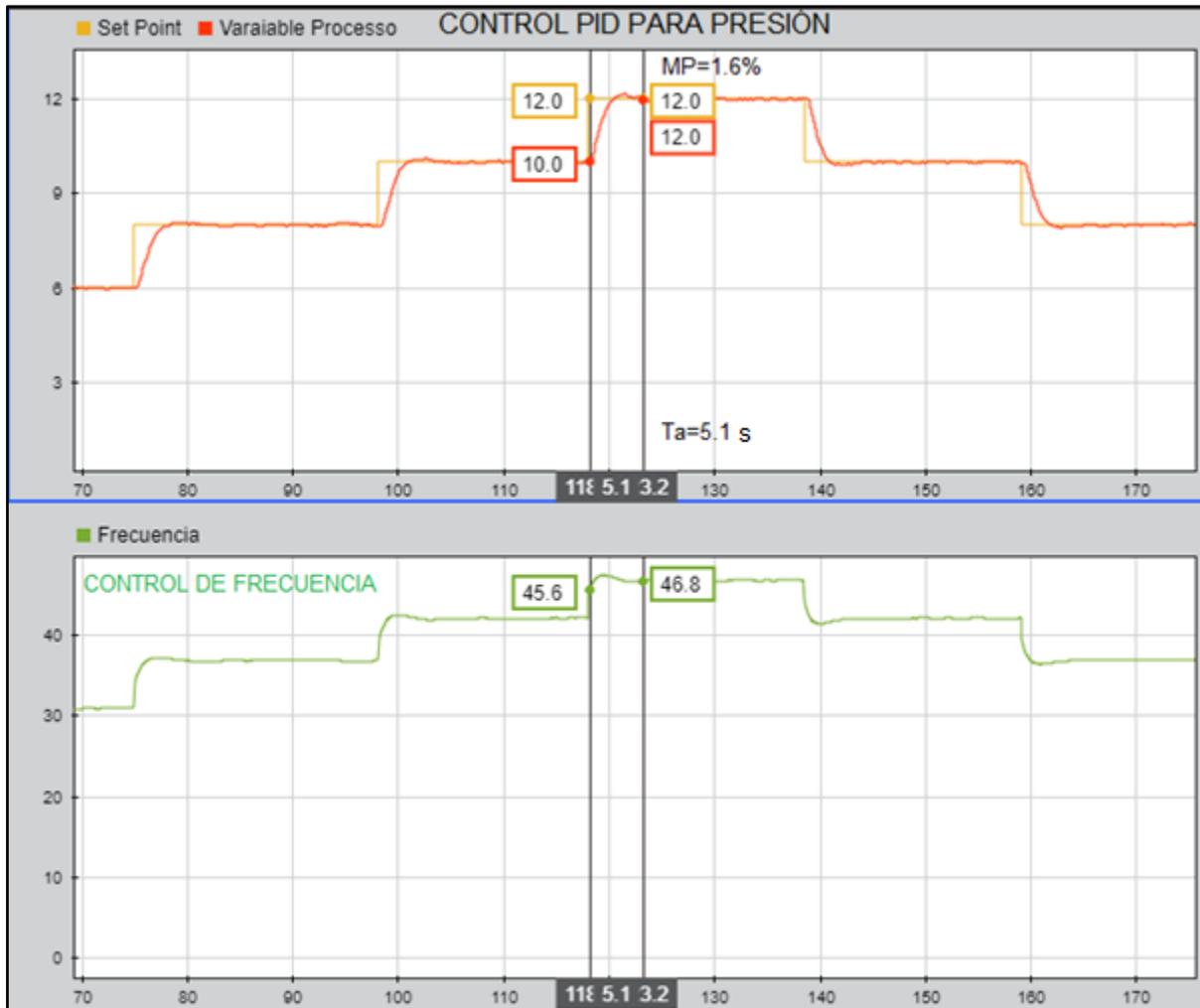


Figura 71 Respuesta del controlador PID por el lugar geométrico de las raíces para presión

Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 71, la señal de entrada tipo escalón arranca desde 0 *psi* hasta 12 *psi* y se incrementa cada 2 *psi* y viceversa hasta llegar a cero, mientras que la variable de proceso actúa ante esta señal a través del control de frecuencia que se encarga de regular la velocidad de la bomba acoplada en el módulo.

La señal de presión obtenida tiene un máximo pico de sobreimpulso de 1.6%, un error de estado estable de 0% y una respuesta del sistema con un tiempo de establecimiento de 5.1s,

que cumple con los criterios de diseño, de esa manera asegurando el buen funcionamiento del controlador PID por el lugar geométrico de las raíces.

Las perturbaciones existentes en las señales del sistema corresponden al ruido, vibraciones emitido por la planta de presión y a la calidad del sensor utilizado.

3.4.3 Pruebas de funcionamiento para la planta de caudal.

La prueba consiste en observar el comportamiento de la respuesta del sistema de caudal ante una señal tipo escalón con diferentes amplitudes a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 72.

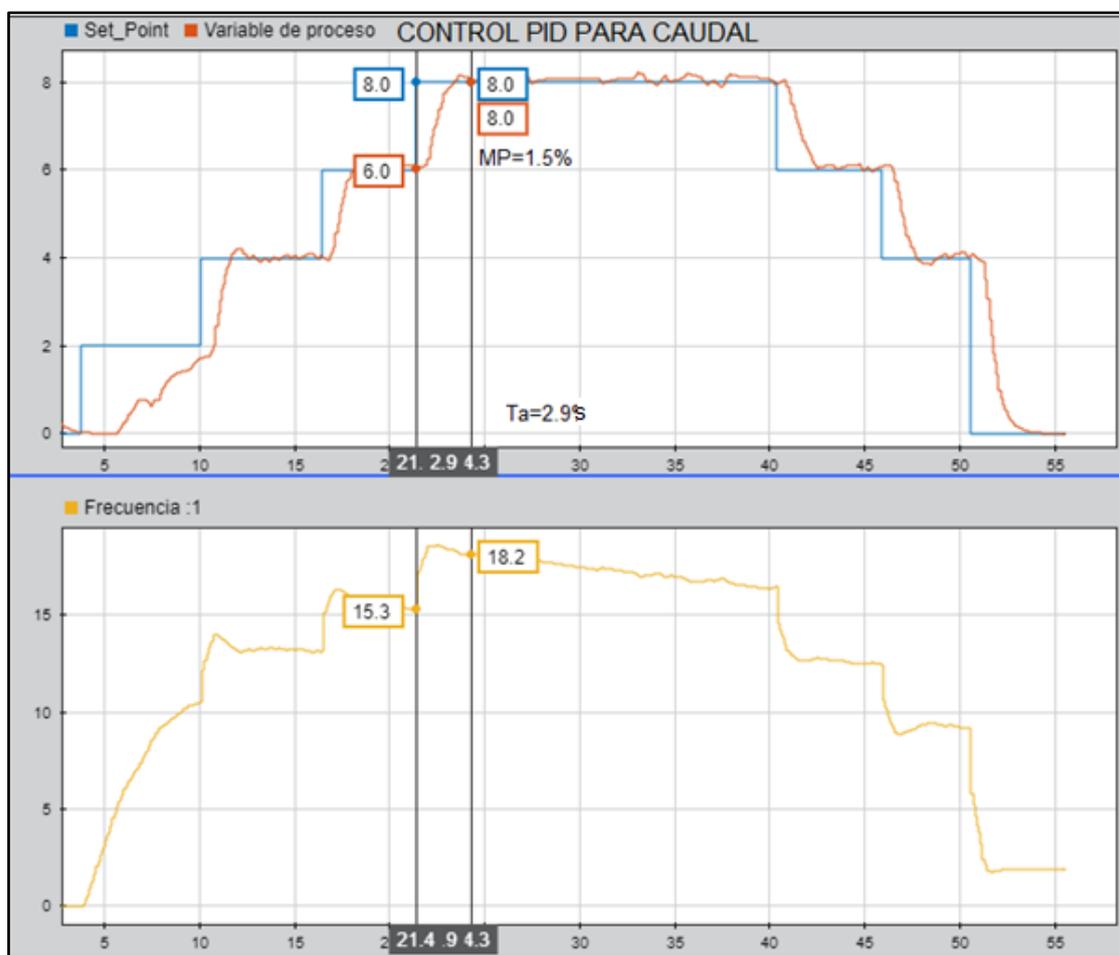


Figura 72 Respuesta del controlador PID por el lugar geométrico de las raíces para caudal

Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 72, la señal de entrada tipo escalón arranca desde 0 cm^3 hasta 8 cm^3 y se incrementa cada 2 cm^3 y viceversa hasta llegar a cero, mientras que la

variable de proceso actúa ante esta señal a través del control de frecuencia que se encarga de regular la velocidad de la bomba acoplada en el módulo.

La señal de caudal obtenida tiene un máximo pico de sobreimpulso de 1.5%, un error de estado estable de 0% y una respuesta del sistema con un tiempo de establecimiento de 2.9s, que cumple con los criterios de diseño, de esa manera ratificando el buen funcionamiento del controlador PID por el lugar geométrico de las raíces.

Las perturbaciones existentes en las señales del sistema corresponden al ruido, vibraciones emitido por la planta de presión y a la calidad del sensor utilizado.

3.5 Pruebas de funcionamiento para los controladores por realimentación de estados.

Las pruebas de funcionamiento para los controladores por realimentación de estados consisten en observar el comportamiento de las variables de nivel, presión y caudal frente a una señal tipo escalón con diferentes amplitudes, la cuales se regulan mediante el control de frecuencia del variador de velocidad en cada módulo.

3.5.1 Pruebas de funcionamiento para la planta de nivel.

La prueba consiste en observar el comportamiento de la respuesta del sistema de caudal ante una señal tipo escalón con diferentes amplitudes a lo largo del tiempo.

La señal de entrada tipo escalón arranca desde 0 *cm* hasta 8 *cm* y se incrementa cada 2 *cm* y viceversa hasta llegar a cero, mientras que la variable de proceso actúa ante esta señal a través del control de frecuencia que se encarga de regular la velocidad de la bomba acoplada en el módulo.

La señal de nivel obtenida tiene un máximo pico de sobreimpulso de 0% un error de estado estable de 0.001% y tiempo de establecimiento del sistema de 57.9s que cumple en su totalidad con los criterios de diseño a pesar de tener un tiempo de establecimiento alto debido a la respuesta del sensor utilizado y por tratarse de un sistema no lineal, así testificando un buen funcionamiento del control por realimentación de estados para nivel. Los resultados se muestran en Figura 73.

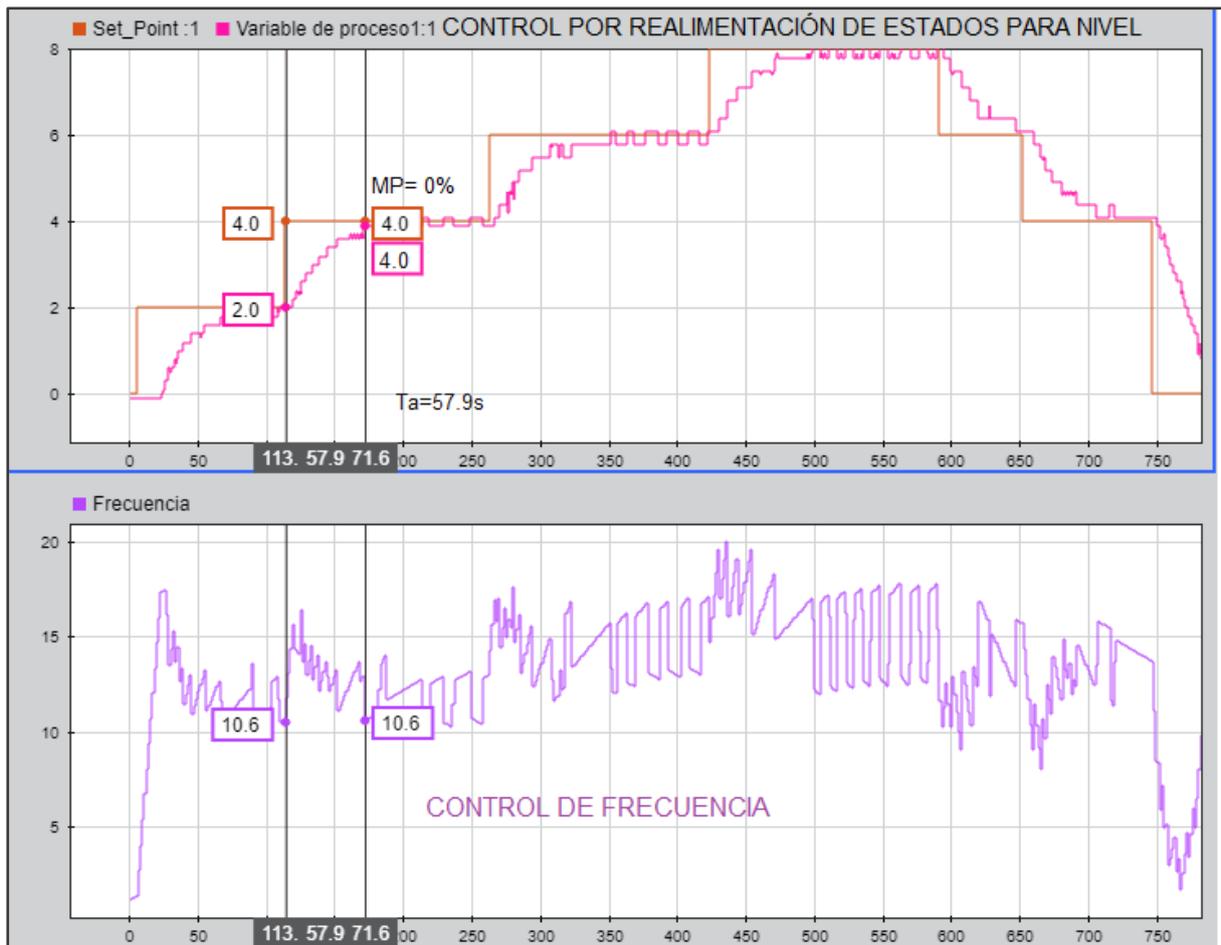


Figura 73 Respuesta del controlador por realimentación de estados para nivel

Fuente: Autor

Las perturbaciones existentes en la señal del sistema corresponden a movimientos del líquido en el módulo y la calidad del sensor utilizado.

3.5.2 Pruebas de funcionamiento para la planta de presión.

La prueba consiste en observar el comportamiento de la respuesta del sistema de presión ante una señal tipo escalón con diferentes amplitudes a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 74.

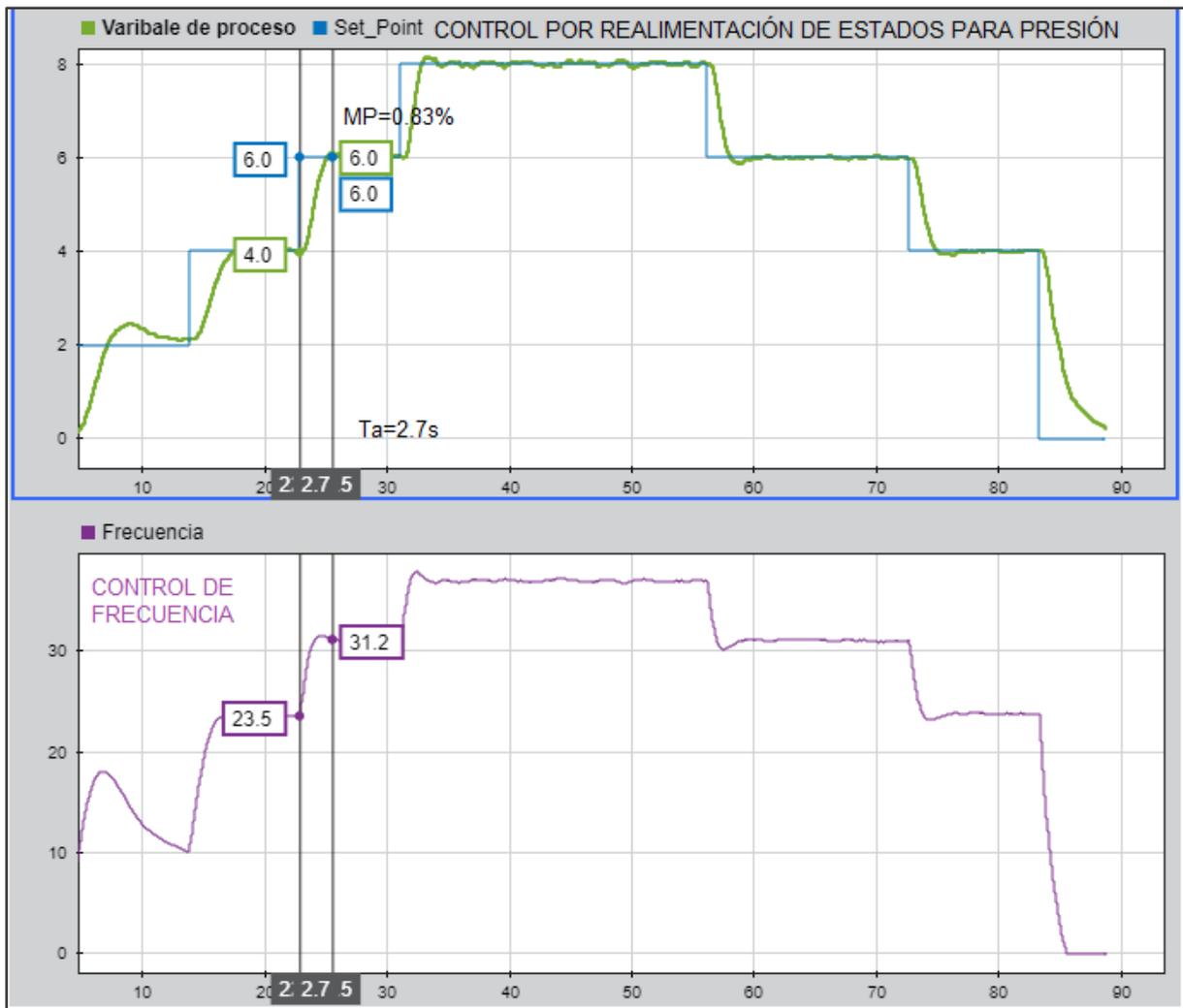


Figura 74 Respuesta del controlador por realimentación de estados para presión

Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 74, la señal de entrada tipo escalón arranca desde 0 *psi* hasta 8*psi* y se incrementa cada dos *psi* y viceversa hasta llegar a cero, mientras que la variable de proceso actúa ante esta señal a través del control de frecuencia que se encarga de regular la velocidad de la bomba acoplada en el módulo.

La señal de presión obtenida tiene un máximo pico de sobreimpulso de 0.83%, un error de estado estable de 0% y un tiempo de establecimiento del sistema de 2.7s, que cumple con los criterios de diseño, de esa manera corroborando el buen funcionamiento del controlador por realimentación de estados.

Las perturbaciones existentes en las señales del sistema corresponden al ruido, vibraciones emitido por la planta de presión y a la calidad del sensor utilizado.

3.5.3 Pruebas de funcionamiento para la planta de caudal.

Esta prueba consiste en observar el comportamiento de la respuesta del sistema caudal ante una señal tipo escalón con diferentes amplitudes a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 75.

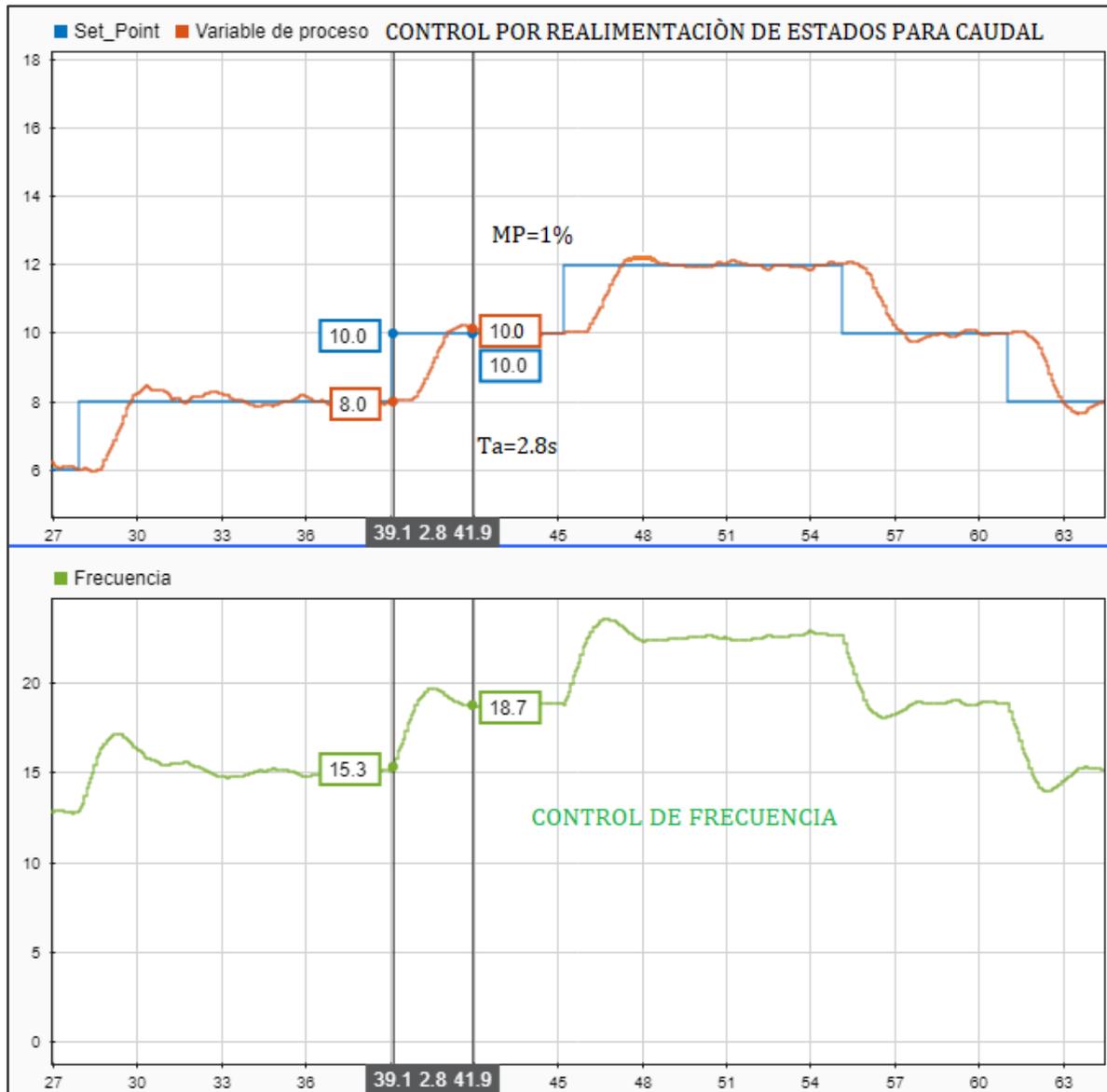


Figura 75 Respuesta del controlador por realimentación de estados para caudal

Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 75, la señal de entrada tipo escalón arranca desde 0 cm^3 hasta 12 cm^3 y se incrementa cada 2 cm^3 y viceversa hasta llegar a cero, mientras que la variable de proceso actúa ante esta señal a través del control de frecuencia que se encarga de regular la velocidad de la bomba acoplada en el módulo.

La señal de presión obtenida tiene un máximo pico de sobreimpulso de 1%, un error de estado estable de 0% y un tiempo de establecimiento del sistema de 2.8s, que cumple con los criterios de diseño, de esa manera asegurando el buen funcionamiento del controlador por realimentación de estados.

Las perturbaciones existentes en las señales del sistema corresponden al ruido, vibraciones emitido por la planta de presión y a la calidad del sensor utilizado.

CONCLUSIONES

- En este trabajo de investigación, luego de hacer la comparación teórica de los controladores PID y por espacio de estados, se pudo verificar mediante el diseño que los controladores de espacio de estados son más robustos en comparación de los controlados PID puesto que estos no manejan las ganancias K_p , K_i y K_d y su operatividad depende de un análisis matemático complejo centrado en cada estado del sistema.
- El diseño y montaje del módulo didáctico S7-1200 permitió realizar las comunicaciones necesarias para el envío y adquisición de datos de los módulos de nivel, presión y caudal, con los cuales se desarrolló distintas pruebas y análisis de señales en Matlab – Simulink, permitiendo la identificación no paramétrica de cada sistema en lazo abierto, obteniendo así un modelo estimado de las funciones de transferencia representativas en cada planta. Como resultado del diseño de los controladores PID, las ganancias K_p , K_i y K_d para la planta de nivel se encontraron mediante el método de asignación de polos, permitiendo obtener un control adecuado para el sistema dinámico de nivel tanto en tiempo continuo y discreto, mientras que las ganancias K_p , K_i y K_d para las plantas de presión y caudal fueron halladas mediante el método del lugar geométrico de las raíces con la ayuda de Matlab, obteniendo un óptimo desempeño de estos sistemas dinámicos en tiempo continuo y discreto. Finalmente, el diseño de los controladores por realimentación de estados se lo realizó mediante un análisis de matrices y ganancias de control, los cuales fueron encontradas a través de algoritmos de programación en Matlab, en donde se establecieron condiciones de diseño para hacer un control rápido y confiable en todos los sistemas dinámicos.
- El programa Matlab - Simulink tiene las herramientas necesarias para diseñar, simular y trabajar en tiempo real y dinámico con un controlador PID y por realimentación de estados.
- Dentro de los procesos de nivel presión y caudal; las perturbaciones que se dan en el control son de un rango moderado, por ello, los controladores implementados en este trabajo investigativo manejan estabilidades con pequeños disturbios de 0% a 5% máximo de los valores diseñados, pero si las perturbaciones son más grandes a esos porcentajes, se pierde el control total de los procesos y las variables no llegarían a su punto de consigna establecido.

- Los resultados obtenidos para la planta de nivel indican que el control PID tiene un error de estado estable de 0.001% y un tiempo de estabilización de 38.3s, que es un 33.81% mejor que el tiempo de establecimiento del controlador por realimentación de estados, sin embargo en el control por realimentación de estados se obtiene un error de estado estable de 0% y un máximo pico de sobreimpulso de 0% que es 95 veces menor que el PID, el cual alcanza un valor del 5%, esto debido a que la planta corresponde a un sistema no linealizado.
- Los resultados obtenidos para la planta de presión muestran que el control por realimentación de estados tiene un tiempo de estabilización de 2.7s, que es un 47.05% mejor que el tiempo de establecimiento del controlador PID, además, con el control por realimentación de estados, se logra un error de estado estable de 0% y se obtiene un máximo pico de sobreimpulso del 0.83% que es 86 veces menor que el PID, el cual alcanza un valor de 1.5%, esto debido a que la planta corresponde a un sistema lineal.
- Los resultados obtenidos para la planta de caudal indican que el control por realimentación de estados tiene un tiempo de estabilización de 2.8s, que es un 3% mejor que el tiempo de establecimiento del controlador PID, además, con el control por realimentación de estados, se logra un error de estado estable de 0% y se obtiene un máximo pico de sobreimpulso del 0.51% que es 80 veces menor que el PID, el cual alcanza un valor de 1.5%, esto debido a que la planta corresponde a un sistema lineal.
- Al observar los resultados de los controladores implementados, es posible decir que los controladores por realimentación de estados prestan mejores prestaciones para plantas linealizadas, a diferencia del control PID que sus prestaciones son mejores para los sistemas no lineales.

RECOMENDACIONES

- Para obtener controladores PID y por realimentación de estados más eficientes, se debe aplicar un filtro de señal adecuado a las perturbaciones y ruidos de señal en cada sistema dinámico, de tal manera que se pueda realizar un estudio amplio y preciso de estos con el fin de obtener un mejor funcionamiento de estas plantas.
- El PLC utilizado en este trabajo de investigación, se lo realizó con un S7-1200 de la marca Siemens, para fines didácticos se propone utilizar diferentes microcontroladores como Arduino, Raspberry. etc, en donde se puedan realizar las comunicaciones necesarias y poner en práctica el uso de librerías y paquetes OPC de envío y adquisición de datos.
- Para realizar la identificación al sistema de nivel, es necesario realizar una linealización del sistema, puesto que este es un sistema no lineal y sus parámetros no pueden ser calculados con métodos de identificación paramétricas y no paramétricas fácilmente.
- Acerca del diseño de los controladores PID, para futuras investigaciones se propone realizar algunas mejoras con este tipo de control, utilizando métodos de control y algoritmos de programación más sofisticados como lógica difusa entre otros, para tener un mejor funcionamiento de los sistemas de nivel presión y caudal.
- Para comprender el funcionamiento de los controladores por realimentación de estados, se requiere tener un conocimiento muy extenso en variables de estados, puesto que su entendimiento conlleva un amplio estudio de matrices y matemática aplicada.

REFERENCIAS

- Álvarez, J., Martínez, I., & Juárez, C. (2018). Diseño y análisis de ω de un motor de CC mediante la selección óptima de parámetros. *Pistas Educativas*, 142-153.
- Astrom, K. J., & Tore, H. (2009). *Control PID Avanzando*. Madrid: Pearson Education.
- Astrom, K., & Hagglund, T. (2001 de Abril). The future of PID control. *PERGAMON* ; *Department of Automatic Control, Lund University of Technology, Box 118, S-22100, Lund, Sweden*, 1163–1175.
- AUTRACEM. (5 de Marzo de 2019). Obtenido de AUTRACEM: www.aldakin.com/aplicaciones-plc-industria-moderna/
- Autycom. (19 de Marzo de 2019). *AUTYCOM*. Obtenido de AUTYCOM: <https://www.autycom.com/aplicaciones-del-plc-en-la-industria-moderna/>
- Borjas, F. (2013). *Introducción a la Automatización*. Chinlayo: Universidad San Martín de Porres .
- Carillo, J. (2011). *Sistemas automáticos de control. Fundamentos básicos de análisis y modelado*. . Santa Rita: UNERMB.
- Carreres, D., Suardías, J., & H, P. (2016). Diseño e implementación de un sistema de control automático programable para aplicaciones de telemetría, telecontrol y posicionamiento vía satélite . *Anuario de jóvenes investigadores*, 200-203.
- Del Castillo, F. D. (2014). *Control de refrigeración*. Madrid.
- Dormido, S., & Bisioli, A. (2015). *PID Control*. (J. Bailleul, & T. Samad, Edits.) London: Springer. doi:10.1007/978-1-4471-5058-9_245
- Fernández, V. (2002). *Modelado y control en el espacio de estados*. Ángel, Valencia : Universidad Politécnica de Valencia .
- González, C. (2010). *OPTIMIZACIÓN EN EL ESPACIO DE ESTADOS DEL FUNCIONAMIENTO EN MODO AUTÓNOMO DE UNA MICRORRED. (Tesis Doctoral)*. Universidad de Oviedo. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, Oviedo.
- González, P. (2016). Diseño e implementación de controladores digitales a través de un sistema de adquisición de datos. *Scientía Et Technica*, 204-212.
- Hernández, C., Pesa, E., García, E., & Torres, J. (2015). Simulación de los Sistemas de Control Proporcional Derivativo y Proporcional Integral Derivativo de un Servomecanismo de segundo orden bajo la plataforma de LabVIEW. *Revista de Tecnología e Innovación*, 2(4), 688-700.
- Hernández, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control*. México: Pearson Education .
- Horacio, N. (26 de Diciembre de 2019). *Educación y tecnología* . Obtenido de Educación y tecnología : http://www.tecnologia-tecnica.com.ar/index_archivos/Page266.htm

- Jara, C., & Maldonado, J. (2015). *Diseño e implementación de un controlador PID y un MPC aplicado al posicionamiento lineal de un sistema neumático en bucle cerrado (Tesis de pregrado)*. Universidad Politécnica Salesiana Cede Cuenca, Cuenca, Ecuador .
- Kuo, B. C., & Golnaraghi, F. (2009). *Automatic Control Systems*. New Jersey: WILEY.
- Llata García, J. R., Fernández Pérez, D., Gonzáles Sarabia, E., Torres Ferreo, C., & Robla Gómez , M. S. (2013). *Automática*. Cantabria.
- Mago, G., Válles, L., Oyala, J., & Palomino, C. (2015). Aplicación del modelo de control en espacios de estado a partir de las pérdidas totales obtenidas del porcentaje de carbono de la chapa de acero al silico. *ITECKNE*, 127-136.
- Martínez, H. (Abril de 2015). Módulo didáctico para prácticas de laboratorio con controladores lógicos programables. Recuperado el Oomingo 3 de Noviembre de 2019
- MATHWOKS.COM. (6 de Noviembre de 2019). *MATHWOKS*. Obtenido de MATHWOKS: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Mercado, J., & Reyes, V. (2017). Sistema de instrumentación y control de equipo de laboratorio:Facultad de Ingenierías y Tecnologías, Universidad Luis Vargas Torres Esmeraldas . *Dominio de las ciencias* , 537-566.
- Molina Cruz, D., Cedeño Ferrín, J., Parrales, K., Parrales , A., Hernández , M., & Gracia, F. (2019). *Modulo con controladores lógicos programables para la enseñanza - aprendizaje de electrónica*. Manabi: Area de Innovación y Desarrollo, S.L.
- Monasterio, F. (2016). *Sistemas de segundo orden: especificaciones de diseño del réguiemen transitorio. Controladore P, PD y P-D*.
- Montoya. (2011). *ElectrónicaUNIMAG*. Obtenido de ElectrónicaUNIMAG: <http://electronicaunimag.blogspot.com/2012/05/5-error-en-estado-estable.html>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* . Madrid: Pearson Education.
- Oka, Y., & Suzuki, K. (2013). *Nuclear Reactor Kinectis and Plant Control*. 10. 1007/978-4-431-54195-0. Tokyo: Springer .
- Perez, M., Peres, A., & Perez, E. (2007). Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales Invariantes en el tiempo. . Argentina : Universidad Nacional de San Juan. Departamento de Electrónica y Automática. .
- Pillajo, C., Bonilla, P., & Hincapié, R. (Septiembre de 2016). Algoritmo genético para sintonización del PID basado en la integral de error absoluto. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas ISSN; 1390-1869; N° 13; Mayo - Septiembre, 2016*, 49-60.
- Pinzón, O. (2010). Estado actual y futuro de la ingeniería de control . *Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga*.
- Prieto, J. (13 de Marzo de 2015). *Aprender 20*. Obtenido de Aprender 20: <http://www.aprender20.es/periodico/node/273>

- Quezada, J. C., Bautista, J., Flores, E., & Quezada, V. (Marzo de 2014). Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo basado en HMI-PLC para un pozo de agua potable. *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XV (número 1), enero-marzo 2014: 41-50, 42-50.*
- Ramos, O., Vargas, M., & Vergara, S. (2015). Control de ganancias para robots de n- grados de libertad . *Pistas educativas* , 99-114.
- Reinoso, G., Blasco, X., & Sanchis, J. (2009). Diseño Multiobjetivo de controladores PID para el Benchmark de control 2008-2009. *RIAI*, 93-103.
- Rodríguez, C. D., Martín, C. A., & Rojas, L. (2011). Identificación y diseño del controlador para una planta de regulación de presión. . *DSpace*.
- Rodríguez, D., & Bordóns, C. (5 de Mayo de 2005). Apuntes de Ingeniería de Control. *Análisis y control de los sistemas en espacio de estado, identificación de sistemas. control adaptativo. control predictivo.* . Sevilla, España: Universidad Literaria de Sevilla. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática .
- Rodríguez, D., & Bordóns, C. (5 de Junio de 2015). Apuntes de Ingeniería de control. *Análisis y control de sistemas en espacio de estado.*
- Rodríguez, F., Berenguel, & Manuel. (2004). *Control y robótica en agricultura*. Almería: Universidad de Almería.
- Rude, A. (2008). Método básico para implementar un controlador digital PID en un microcontrolador PIC para desarrollo de aplicaciones a bajo costo. *Aplicaciones en control de Potencia y la Industria*.
- Sabina, H., Vilanova, R., & Arrieta, O. (2014). Implementación de controladores PID: Equivalencia y Optimalidad ´. Barcelona , España .
- Saeteros, C. (2018). *Implementación de un control PID FUZZY para la regulación de nivel del módulo MPS PA COMPACT WORKSTATION mediante la tarjeta STM32F4 Discovery (Tesis de pregrado)*. Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, Quito.
- Sandoval, A. (Junio de 2009). Sistema de control de nivel aplicado a un PID en un modelo de distribuidor de colada continua. México, México.
- SIEMENS. (6 de Noviembre de 2019). *TIA PORTAL*. Obtenido de TIA PORTAL: https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/tia-portal/tia_portal/pages/tia-portal.aspx
- Taylor & Francis Group. (2002). *Modern control engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Vaca, E. (2019). *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ESCADA MEDIANTE EL SOFTWARE INTOUCH PARA EL CONTROL Y VISUALIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES. (Trabajo de pregrado)*. Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Imbabura .
- Victor, A. (2002). Ecuaciones para controladores PID universales. *Revista ingeniería*, 11-20.
- Vladivía, C. (2012). *Sistemas de control continuos y discretos*. Madrid: Paraninfo.

Zánches, C., & Muzo, L. (2017). *Formulación de una metodología teórico-práctico para el diseño de sistemad de control automático de bombas, mediante simulaciones en Matlab (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.

ANEXOS
ANEXO 1
CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO PLC-S71200

- **Características Generales**

La construcción del módulo didáctico PLC S7-1200, contiene elementos necesarios para fortalecer el manejo y la mejor comprensión del funcionamiento de los PLC, así también fomentar el desarrollo de proyectos de control y automatización en proyectos industriales aportando al aprendizaje de los estudiantes.

- **Diseño y construcción**

El módulo se diseñó de tal manera que las señales de entradas y salidas existentes (Digitales y Análogas) estén disponibles en bornes externos de la caja que los resguarda para que el estudiante sea capaz de realizar las conexiones necesarias para poner en funcionamiento el módulo de una manera eficaz.

Los elementos que conforman el módulo fueron colocados sobre una caja metálica, a continuación, se describe a cada uno de ellos.

ITEM	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
1	PLC S7 1200	Controlador lógico programable
2	Entradas digitales del PLC	Entradas del PLC donde se encuentran los selectores, paro de emergencia y pulsadores.
3	Salidas digitales del PLC	Salidas del PLC donde se encuentran los indicadores luminosos de activación.
4	BREAKER 4 A	Protección principal para el circuito de control.
5	Fuente de voltaje de 24 V	Alimentación de 24 V DC
6	Fusibles de 1 A	Protección para el PLC
7	Fusibles de 1 A	Protección para las entradas del PLC
8	Fusibles de 1 A	Protección para las salidas del PLC

ITEM	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
9	Entradas analógicas	Entradas donde pueden acoplarse sensores análogos.
10	Ethernet switchtes 5 puertos	Punto de conexión Ethernet

Fuente: Autor

Para poner en funcionamiento el módulo didáctico PLC Siemens S7-1200 se debe alimentar con 120 V AC, su diseño se hizo de manera que las señales de entradas y salidas estén disponibles en bornes de conexión tipo banana para que el estudiante sea capaz de realizar distintas conexiones para su manejo de forma rápida y simple como se muestra en la Figura 1. En el ANEXO 2 muestra el diagrama eléctrico del módulo.

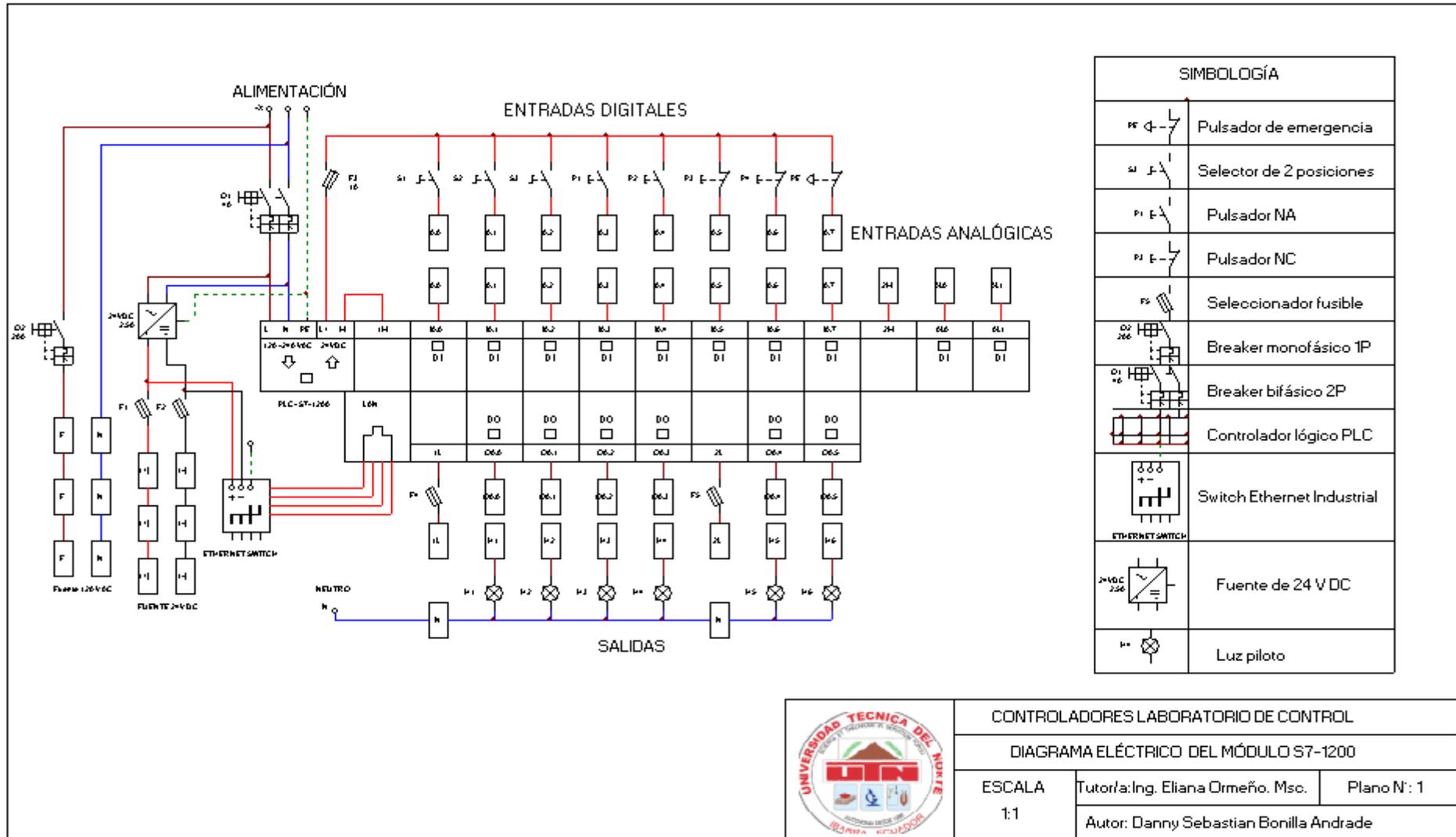


Figura 1 Estructura interna y externa del módulo PLC-S7-1200 SIEMENS

Fuente: Autor

ANEXO 2

Diagrama eléctrico del módulo PLC S7-1200



	CONTROLADORES LABORATORIO DE CONTROL	
	DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL MÓDULO S7-1200	
ESCALA 1:1	Tutor/a: Ing. Eliana Ormeño, Msc.	Plano N: 1
Autor: Danny Sebastian Bonilla Andrade		

ANEXO 3
ALGORITMO PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR PID POR EL LUGAR
GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES.

```
s=tf('s')
Gs = 0.3583/(0.95*s+1) %Se establece la función de transferencia de la planta
figure (1)
subplot (1,2,1)
pzmap (Gs)
subplot (1,2,2)
pzmap (Gs)
step (Gs)

%% Diseño del sistema
%Análisis de los polos objetivos
MP= 4.3/100;
Ta= 5;
%%Parámetros de las raíces
lambda = sqrt (log (MP)^2) /sqrt (pi^2+ log (MP)^2)
omegan = 4 /(Ta*lambda)

%% Polos objetivos
a= lambda* omegan
omega= omegan*sqrt(1-lambda^2)

%% Respuesta en lazo cerrado sin controlador
Gscl= feedback (Gs,1,-1) %Respuesta del sistema en realimentación
figure (2)
subplot (1,2,1)
step (Gs)
subplot (1,2,2)
pzmap (Gscl)
step (Gscl)

%% Graficar LGR Y polos objetivos
figure (3)
rlocus (Gs) % grafica del lugar geométrico de las raíces
axis ([-5 0.1 -5 5])
hold on;
plot (-a, omega, 'x')
plot (-a, -omega, 'x')
```

ANEXO 4

ALGORITMO PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS PARA NIVEL.

```
% CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL CONTROL POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS
%PARA LA PLANTA DE NIVEL
% FT de la Planta de Nivel en s
s=tf('s');
Gs= 0.8/(10*s+1)
[n d]=tfdata(Gs,'v')
% FT de la Planta de Nivel en variables de estado
[A,B,C,D] = tf2ss(n,d);
sys=ss(A,B,C,D)
Tm=0.5;
% Discretización de las matrices A, B, C Y D
sysd=c2d(sys,Tm,'zoh')
%Los valores de las matrices se guardan en G, H, CZ, DZ
G=sysd.A
H=sysd.B
Cz=sysd.C
Dz=sysd.D
Gum=[G H;0 0 ]%Aum=[G H;0 0]
Hum= [0;1] % Bum= [0:0;1]
% Condiciones de Diseño
ts_s= 20 %Tiempo de establecimiento
rho_s= 0.999
wn_s= 4/(rho_s*ts_s) %ts= 4/ rho*wn
pd_s= s^2+2*rho_s*wn_s*s+wn_s^2 % Polos continuos polo deseado
cpd_s= tfdata (pd_s,'v')
rpd_s= roots (cpd_s)
pd_z= exp (rpd_s*Tm) % Raíces discretas Polos deseados en z
%
% Ganancias del controlador
K2=place (Gum, Hum, pd_z')
Kum= (K2+ [0 1]) *inv ((G-eye (1) H; Cz*G Cz*H)) % [k2.K1]=[K2+[0...1]*inv([(G-In) H; Cz*G Cz*H])
KE=-Kum (1) %Valor ganancia realimentación
KI=Kum (2) %Valor para corregir error estado estable
```

ANEXO 5

ALGORITMO PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS PARA PRESIÓN.

```
clear;
clc;
% CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL CONTROL POR REALIMENTACIÓN DE
ESTADOS
% PARA LA PLANTA DE PRESIÓN
% FT de la Planta de Presión en s
s=tf('s');
Gs=0.3583/(0.95*s+1)
[n d]=tfdata(Gs,'v')
% FT de la Planta de Presión en variables de estado
[A,B,C,D] = tf2ss(n,d);
sys=ss(A,B,C,D)
Tm=0.05;
% Discretización de las matrices A, B, C Y D
sysd=c2d(sys,Tm,'zoh')
% Los valores de las matrices se guardan en G, H, CZ, DZ
G=sysd.A;
H=sysd.B;
Cz=sysd.C;
Dz=sysd.D;
Gum=[G H;0 0] %Aum=[G H;0 0]
Hum=[0;1] % Bum=[0;0;1]
%
% Condiciones de Diseño
ts_s= 3; %Tiempo de establecimiento o asentamiento
rho_s= 0.99;
wn_s= 4/(rho_s*ts_s); %ts= 4/ rho*wn
pd_s= s^2+2*rho_s*wn_s*s+wn_s^2; % polos continuos polo deseado
cpd_s= tfdata (pd_s,'v');
rpd_s= roots (cpd_s);
pd_z= exp (rpd_s*Tm); % Raíces discretas Polos deseados en z
%
% Ganancias del controlador
K2=place (Gum, Hum, pd_z')
Kum= (K2+ [0 1]) *inv ([G-eye (1) H; Cz*G Cz*H]) % [k2..K1]=[K2+[0...1]*inv([(G-In) H;
Cz*G Cz*H])
KE=-Kum (1) %Valor ganancia realimentación segunda aproximación
KI=Kum (2) %Valor para corregir error estado estable
```

ANEXO 6

ALGORITMO PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS PARA CAUDAL.

```
clear;
clc;
% CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL CONTROL POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS
% PARA LA PLANTA DE CAUDAL
% FT de la Planta de Caudal en s
s=tf('s');
Gs= tf (0.6,[0.35 1])
[n d]=tfdata (Gs,'v')
% FT de la Planta de Caudal en variables de estado
[A,B,C,D] = tf2ss(n,d);
sys=ss(A,B,C,D)
Tm=0.05;
% Discretización de las matrices A, B, C Y D
sysd=c2d(sys,Tm,'zoh')
% Los valores de las matrices se guardan en G, H, CZ, DZ
G=sysd.A;
H=sysd.B;
Cz=sysd.C;
Dz=sysd.D;
Gum=[G H;0 0] %Aum=[G H;0 0]
Hum= [0;1] % Bum= [0:0;1]
%
% Condiciones de Diseño
ts_s= 2; %Tiempo de establecimiento o asentamiento
rho_s= 0.99;
wn_s= 4/(rho_s*ts_s); %ts= 4/ rho*wn
pd_s= s^2+2*rho_s*wn_s*s+wn_s^2; % polos continuos polo deseado
cpd_s= tfdata (pd_s,'v');
rpd_s= roots (cpd_s);
pd_z= exp (rpd_s*Tm); % Raíces discretas Polos deseados en z
%
% Ganancias del controlador
K2=place (Gum, Hum, pd_z')
Kum= (K2+ [0 1]) *inv ([G-eye (1) H; Cz*G Cz*H]) % [k2.K1]= [K2+[0...1]*inv([(G-In) H; Cz*G Cz*H])
KE=-Kum (1) %Valor ganancia realimentación segunda aproximación
KI=Kum (2) %Valor para corregir error estado estable
```

ANEXO 7

MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DE LOS CONTROLADORES PID Y POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS

El principal objetivo de este manual es dar a conocer al estudiante sobre una guía práctica del funcionamiento de los controladores que se han diseñado para las plantas de nivel, presión y caudal, por tal razón se han creado interfaces que permiten facilitar la al estudiante el control de procesos mediante comunicaciones OPC.

Para iniciar con el funcionamiento de los controladores, se realizan los siguientes pasos:

1. Conectar los módulos de nivel, presión, caudal y Siemens S7 – 1200 a sus respectivas fuentes de alimentación.
2. Dirigirse al computador “COM7” del laboratorio de control, encender el computador y ejecutar el programa Oracle VM VirtualBox que se encuentra en el escritorio.



Figura 7.1 Máquina virtual en donde se encuentran los controladores.

Fuente: Autor

3. Una vez iniciado el programa dar click en iniciar.

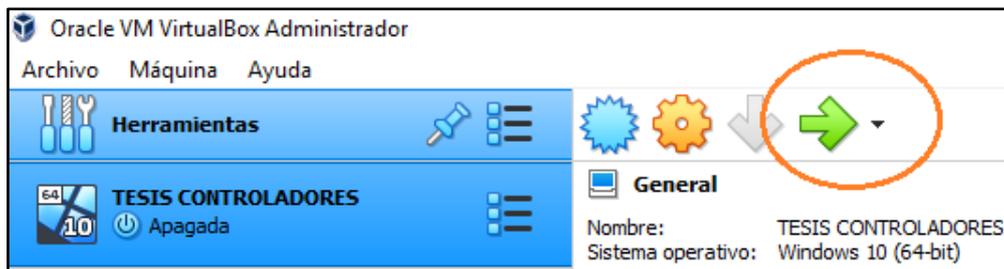


Figura 7.2 Inicio del programa Oracle VM VirtualBox

Fuente: Autor.

4. Al iniciar la aplicación se ejecuta el sistema operativo de Windows 10 e introduciendo la contraseña “CIELE” se puede acceder a su escritorio como se muestra en la Figura 7.3.

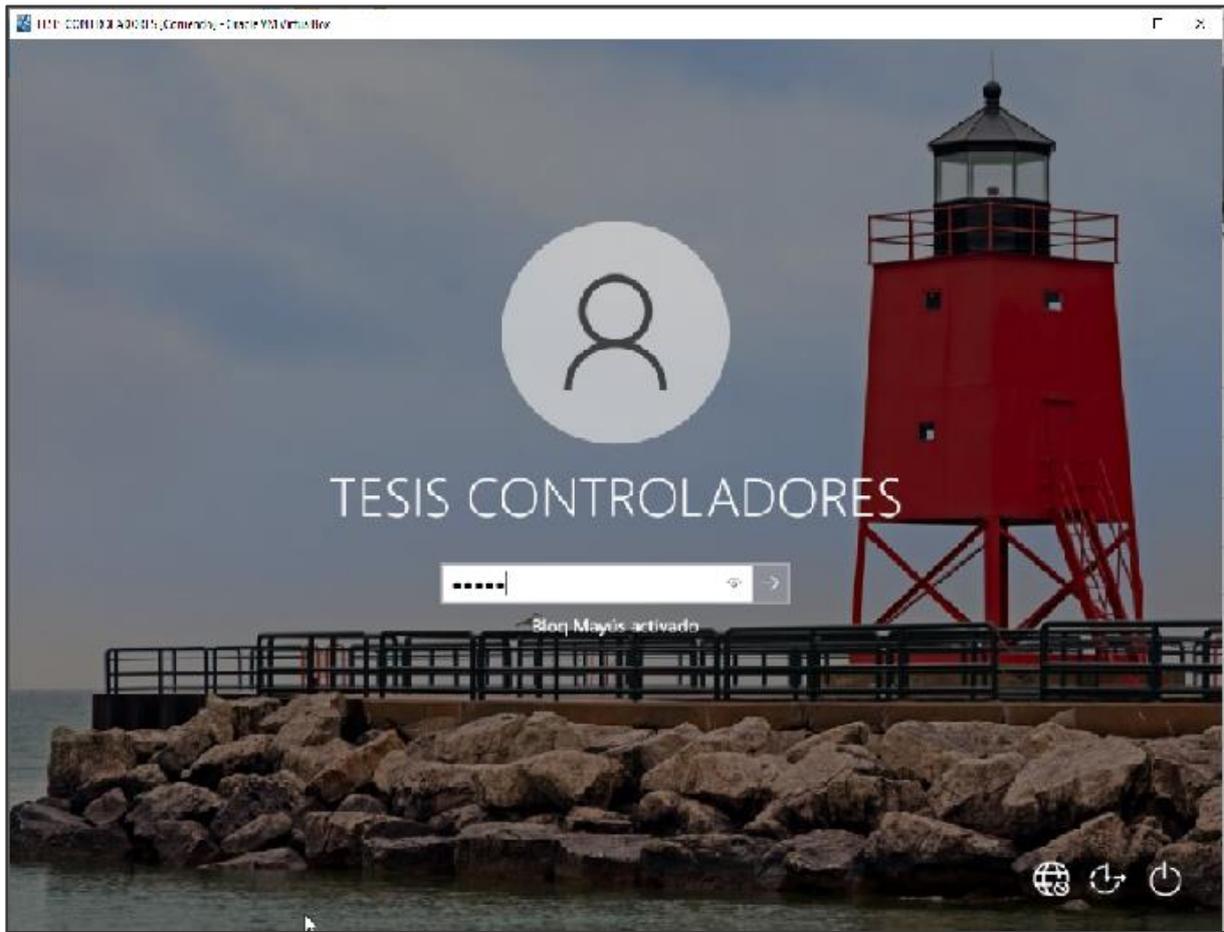


Figura 7.3 Inicio del sistema operativo de Windows 10 en la máquina virtual
Fuente: Autor.

5. Una vez encendida la máquina, dirigirse al programa RSLinx Classic.



Figura 7.4 Programa RSLinx Classic

Fuente: Autor.

6. Abierto el programa, se verifica que todos los PLCs Allen Bradley estén conectados a la red como se indica en la Figura 7.5.

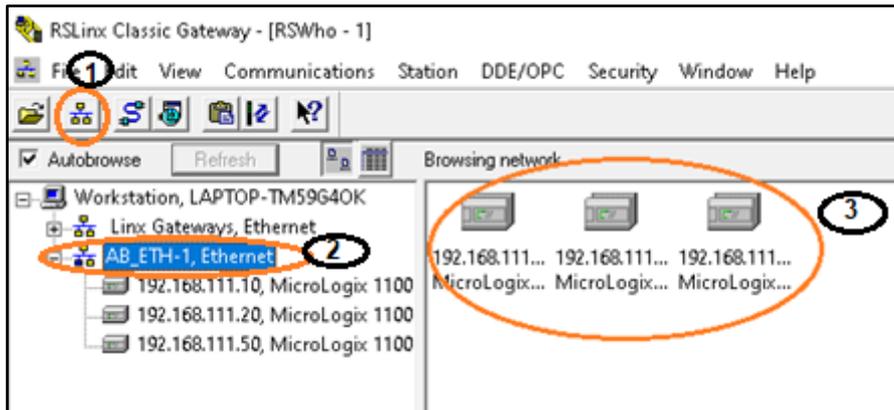


Figura 7.5 Verificación de conexión de los PLCs y conexión exitosa.

Fuente: Autor

- Una vez verificada la conexión exitosa de los PLCs Allen Bradley, se procede a ejecutar el programa de TIA Portal V15.

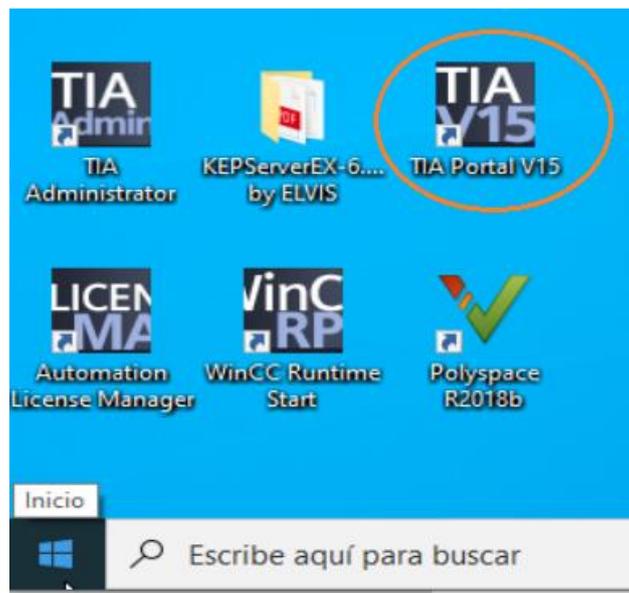


Figura 7.6 Programa TIA Portal V15

Fuente: Autor

- Una vez abierto el programa de TIA Portal V15, se procede a cargar el archivo "BASE_DATOS_SIEMENS_MODULOS" ubicado en la carpeta "TESIS_PRACTICA_MODULOS", se configura sus parámetros y se verifica que el PLC sirva como un puente de comunicación en la transferencia y adquisición de datos como se muestra en la Figura 7.7.

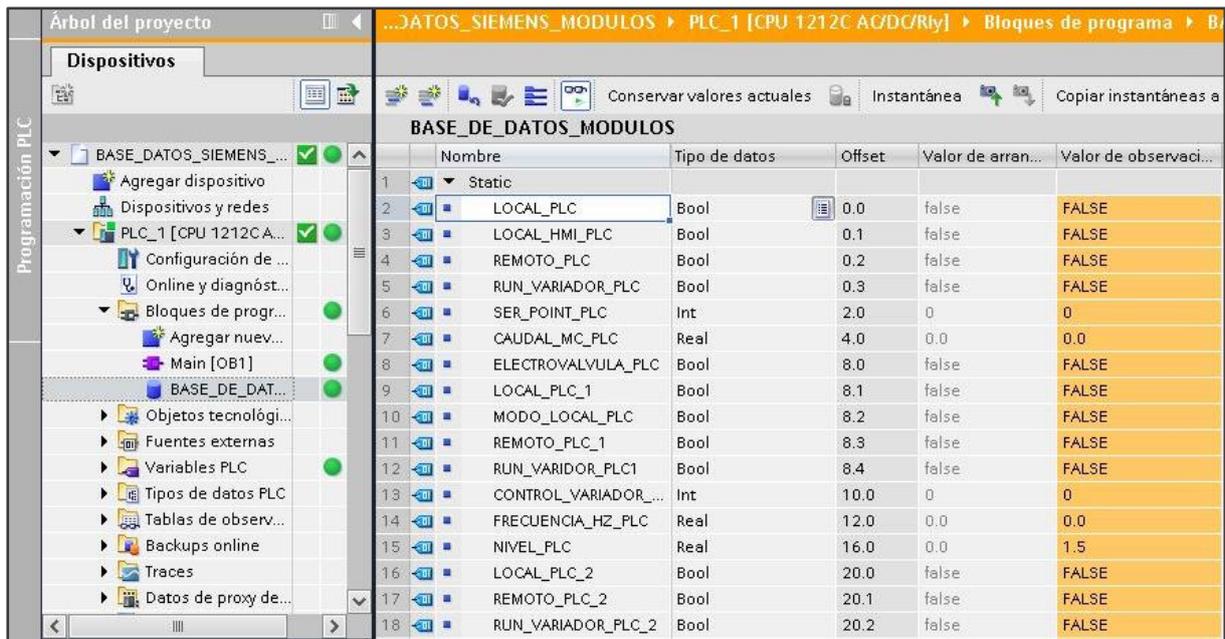


Figura 7.7 PLC SIEMENS como tarjeta de adquisición y envío de datos,

Fuente: Autor

- Una vez que verifique que el PLC esté funcionando correctamente, se ejecuta el programa KEPServerEx.



Figura 7.8 Programa KEPServerEX

Fuente: Autor

- Una vez ejecutado el programa, en la casilla "Quick Client" dar click en él y verificar que su estado esté en "Good" para asegurar la comunicación OPC en KEPServerEx con el módulo Siemens S7-1200 como tarjeta de envío y adquisición de datos y los módulos Allen Bradley como receptores de información como se muestra en la Figura 7.9.

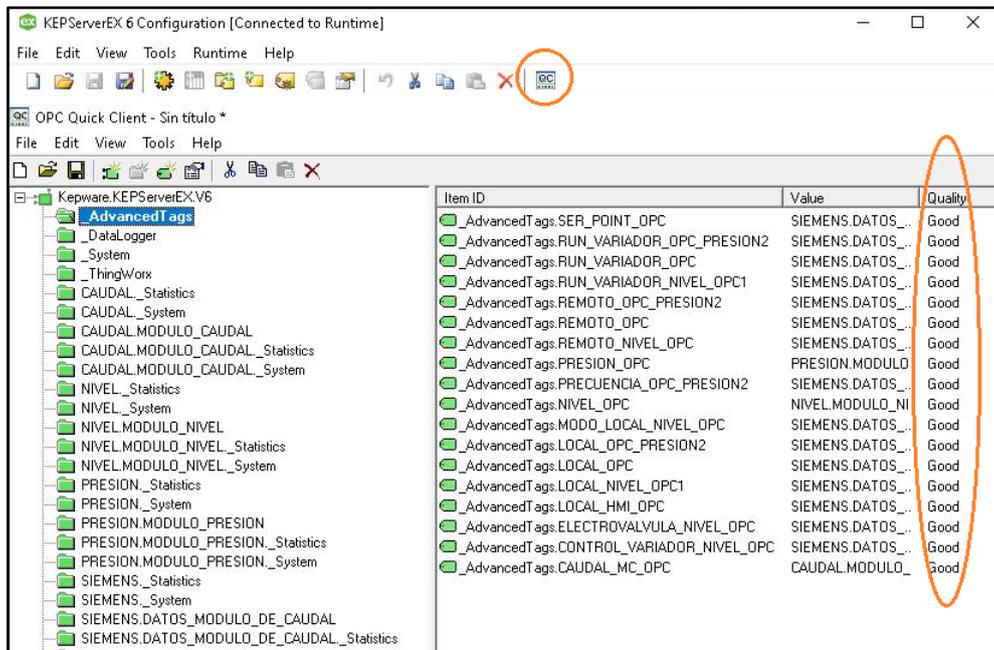


Figura 7.9 Comunicación exitosa en KEPServerEx.

Fuente: Autor.

- Una vez que se ha verificado que las comunicaciones están en orden se procede a ejecutar el programa de Matlab.

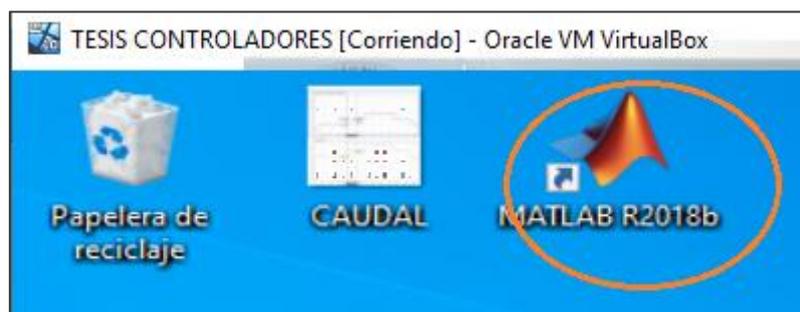


Figura 7.10 Programa Matlab

Fuente: Autor

- En el programa Matlab abrir la carpeta "Programas Matlab", después seleccionar la carpeta "SIEMENS_OPC-MATLAB_CONTROLADORES_FUNCIONALES", ahí se desplegarán 11 carpetas que contienen el material necesarias para realizar simulaciones y diseño de los controladores; a continuación, se selecciona la carpeta "Interfaces" y se

desplegarán 14 interfaces en donde se encuentran los controladores para la planta de presión, nivel y caudal, cada una con un PID en tiempo continuo y discreto y tres controladores por realimentación de estados, además con sus interfaces para identificar a cada uno de los sistemas como se muestra en la Figura 7.11.

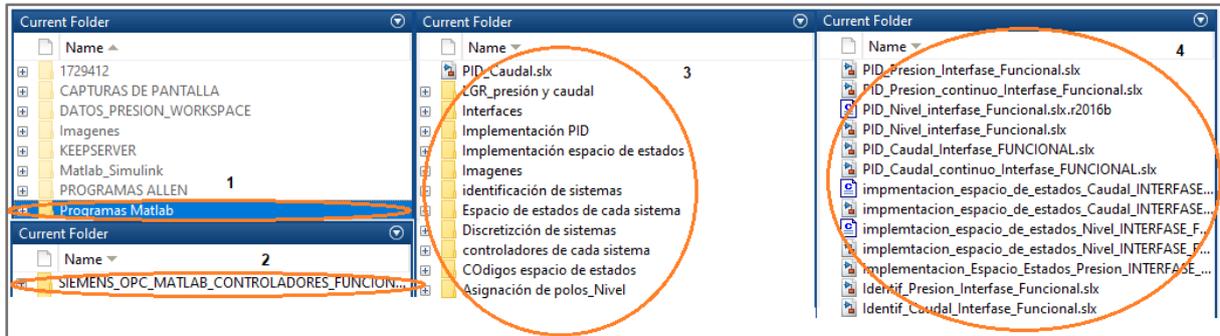


Figura 7.11 Archivos de interacción e Interfaces en Matlab.

Fuente: Autor

Una vez identificadas las Interfaces, se abrirá Simulink de Matlab y se podrá visualizar el comportamiento de los controladores una vez configurados los parámetros de comunicación y puesta en marcha.

A continuación, se explicará el funcionamiento general de los controladores PID implementados.

INTERFAZ PARA LA PLANTA DE NIVEL.

Para iniciar el funcionamiento del controlador PID para la planta de nivel, como se muestra en la Figura 7.12, primero se verifica si el tiempo del proceso se encuentra en “inf”, después se corre el programa dando click en icono play.

Una vez corrido el programa se activan los interruptores del variador de frecuencia y electroválvula y finalmente se introduce valores aleatorios en el Set_Point de entrada.

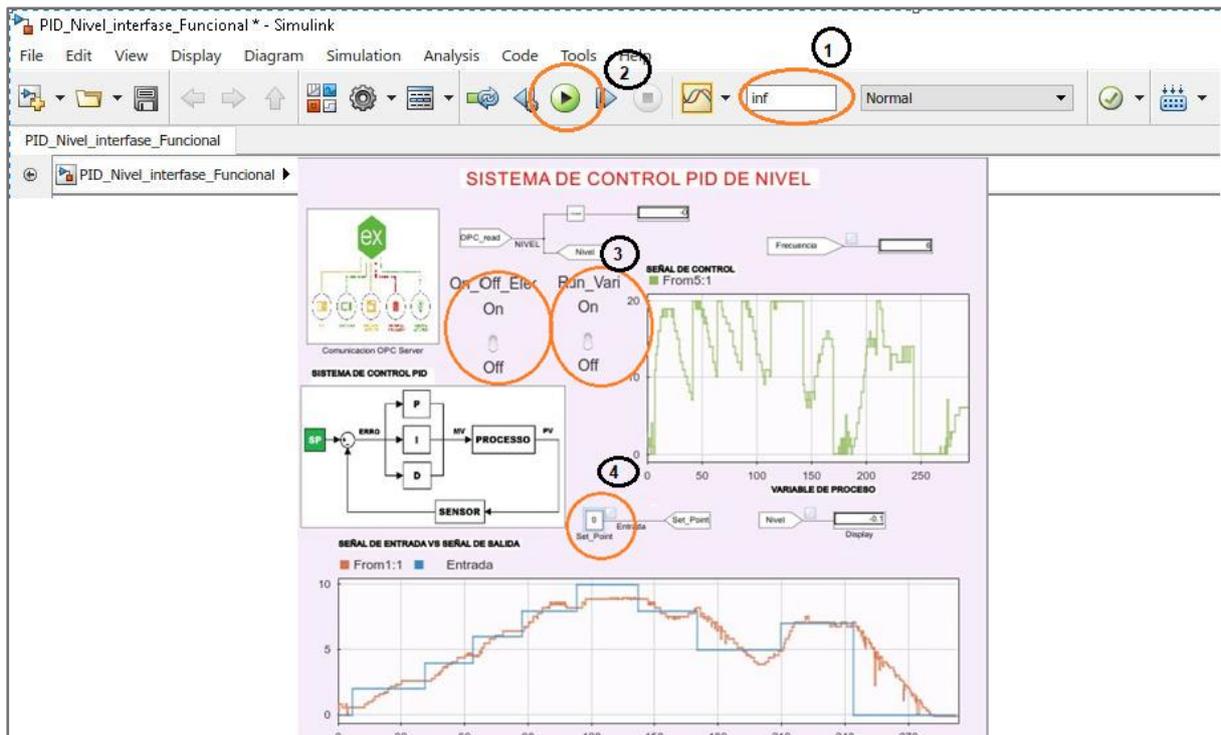


Figura 7.12 Interfaz de control PID para nivel

Fuente: Autor

Una vez realizada la activación de los equipos se realizan pruebas de funcionamiento para el control PID en la planta de nivel, el cual consiste en observar el comportamiento de la variable de nivel frente a una señal tipo escalón con diferentes amplitudes, la cuales se regulan a través del control de frecuencia del variador de velocidad en el módulo.

El comportamiento de la variable y señal de entrada pueden ser visualizadas en las pantallas de interacción, las cuales corren en tiempo real al iniciar el funcionamiento de la interfaz.

INTERFAZ PARA LA PLANTA DE PRESIÓN.

Para iniciar el funcionamiento del controlador PID para la planta de presión, como se muestra en la Figura 7.13, primero se verifica si el tiempo del proceso se encuentra en “inf”, después se corre el programa dando click en icono play.

Una vez corrido el programa se activa el interruptor del variador de frecuencia en el módulo y finalmente se introducen valores aleatorios en el Set_Point de entrada.

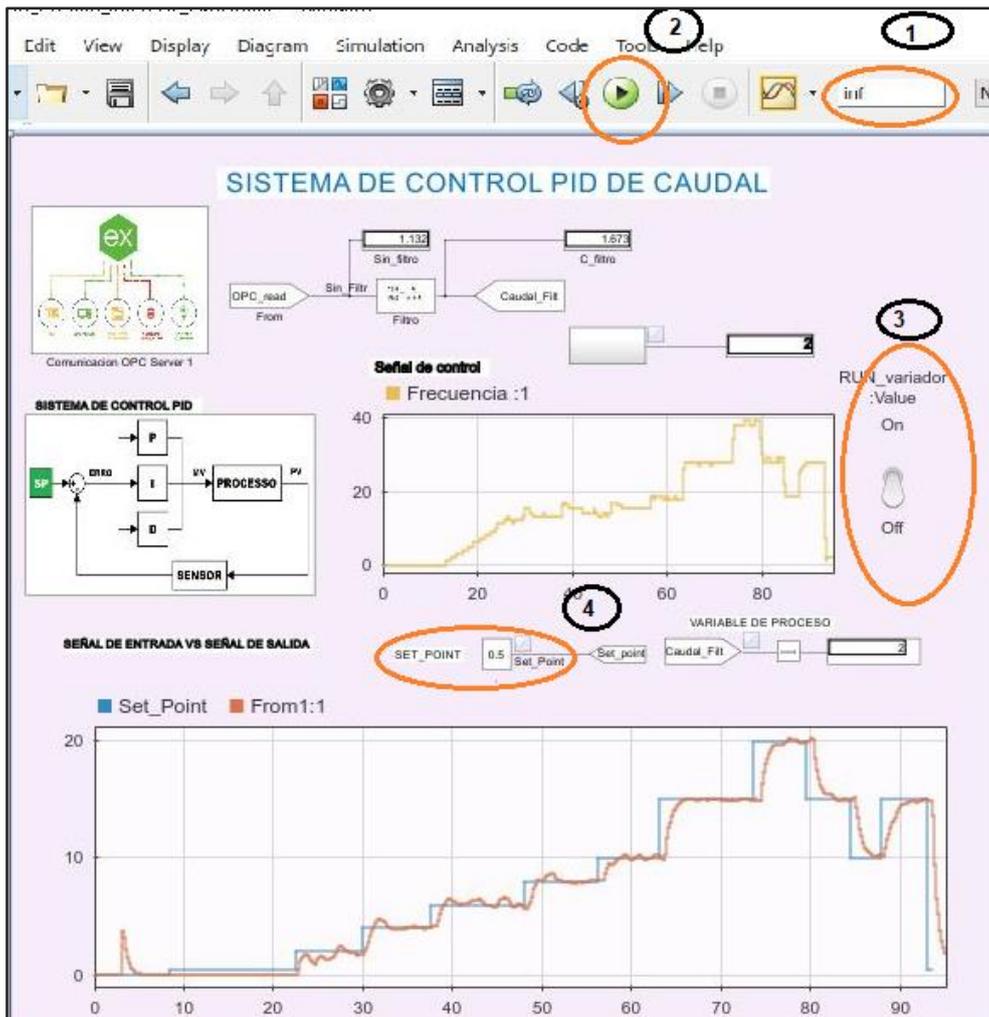


Figura 7.12 Interfaz de control PID para caudal

Fuente: Autor

Una vez realizada la activación de los equipos se realizan pruebas de funcionamiento para el control PID en la planta de caudal, el cual consiste en observar el comportamiento de la variable de presión frente a una señal tipo escalón con diferentes amplitudes, la cuales se regulan a través del control de frecuencia del variador de velocidad en el módulo.

El comportamiento de la variable de caudal y la señal de entrada pueden ser visualizadas en las pantallas de interacción, las cuales corren en tiempo real al iniciar el funcionamiento de la interfaz.

Para poner en funcionamiento los controladores por realimentación de estados se sigue el mismo procedimiento, por tal motivo no se lo describe en este apartado, porque su introducción en este texto sería repetitivo y redundante.

ANEXO 8
MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO
Práctica 1

1.1 Tema: Configuración de parámetros del software de comunicación con el PLC Allen Bradley MicroLogix 1100.

1.2 Objetivo general

Configurar los parámetros de comunicación del Allen Bradley MicroLogix 1100.

1.3 Objetivos específicos:

- Relacionar al estudiante con el software RSLogix500 English y RSlinx Classic Gateway.
- Crear un servidor OPC para el intercambio de datos y comunicación.

1.4 Introducción

RSlogix 500 English es un software que permite realizar el control, automatización y adquisición de datos de un PLC Allen Bradley, mediante la programación tipo escalera en lazo abierto y cerrado, mientras que RSlinx Classic Gateway, es un programa que permite realizar la comunicación OPC, transferencia y adquisición de datos entre PLCs Allen Bradley. A continuación, se detalla los pasos a seguir para lograr una exitosa comunicación entre PCLs Allen Bradley.

1.5 Equipos y materiales

- Computador
- PLC Allen Bradley MicroLogix 1100
- Software RSLinx ClassicGateway
- Software RSLogix 500 English

1.6 Desarrollo

1. En el software RSLinx Classic Gateway, ejecutar el programa y dar click en “Comunicaciones”, seleccionar “Configure Drivers”, como se muestra en la Figura 8.1.1.

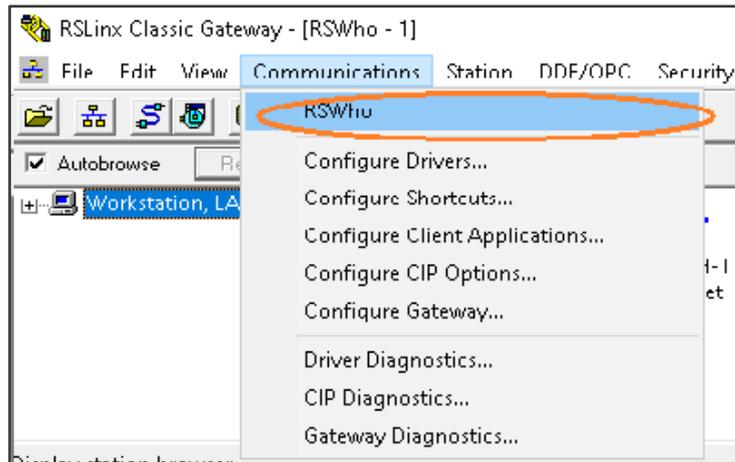


Figura 8.1.1 Configuración del Driver de comunicación en RSLinx Classic Gateway.

Fuente: Autor

2. Seleccionar "Configure Drivers" y cuando se despliegue una lista de opciones elegir el protocolo de comunicación a utilizar; en este caso la comunicación Ethernet, dar click en "Ethernet devices" y posteriormente click en "Add New" (Figura 8.1.2).

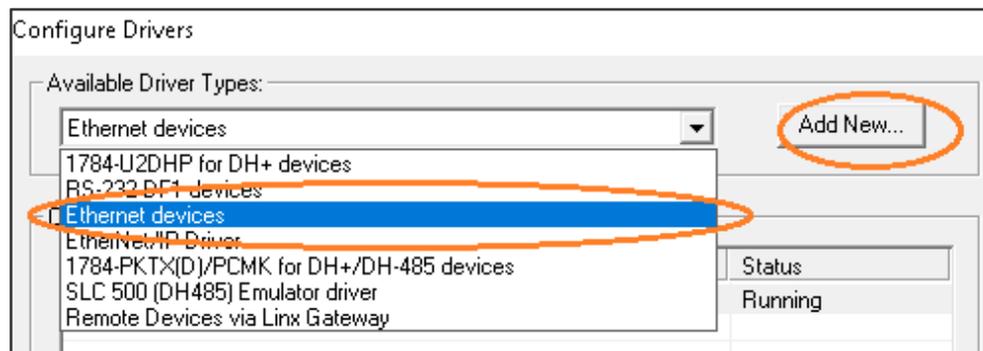


Figura 8.1.2 Selección del Driver de comunicación OPC.

Fuente: Autor.

3. Luego escribir el nombre para el Driver de comunicación y dar click en "OK" como se muestra en la Figura 8.1.3.

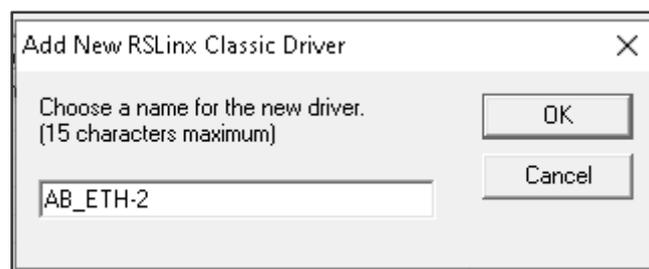


Figura 8.1.3 Asignación al Driver de comunicación

Fuente: Autor

- Una vez asignado el nombre, aparece una ventana en la que se ingresan las direcciones IP de cada PLC Allen Bradley correspondientes a los módulos de nivel, presión y caudal. En la Figura 8.1.4 se muestra las direcciones utilizadas.

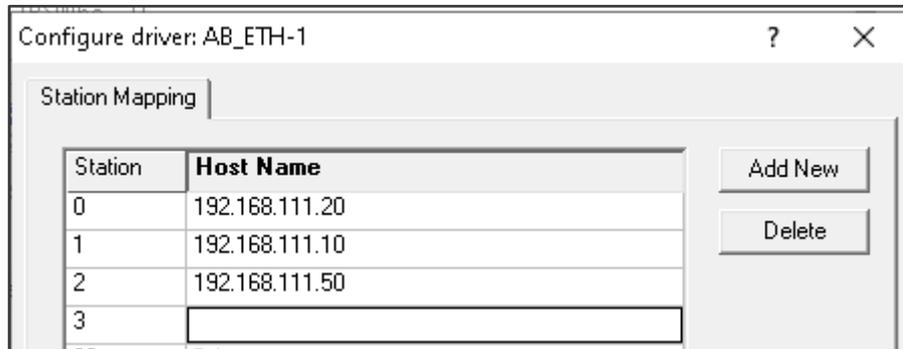


Figura 8.1.4 Configuración de direcciones IP de los módulos de nivel, presión y caudal.

Fuente: Autor

- Para verificar que comunicación sea exitosa, dar click en “RSWho”, “AB_ETH-1, Ethernet” y confirmar que los íconos no estén marcados con una “X” en rojo.

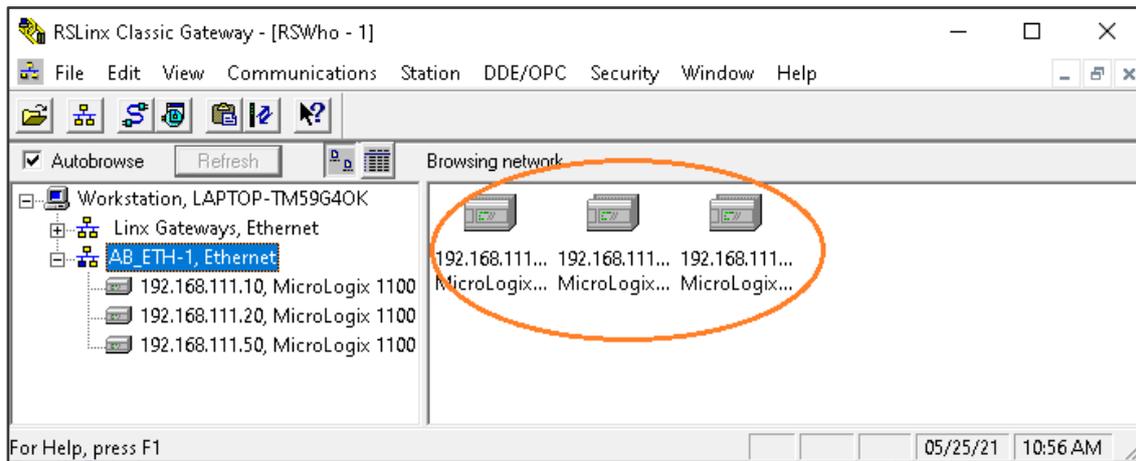


Figura 8.1.5 Comunicación exitosa entre los PLCs y el computador.

Fuente: Autor

Finalmente, la comunicación Ethernet se ha concretado correctamente, sin problemas de comunicación y reconociendo cada uno de los PLCs Allen Bradley.

- Una vez configurada la comunicación entre los PLCs y el computador, se procede a utilizar el programa RSLogix 500 English para adquirir las variables del control realizado en la Tesis “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA MEDIANTE EL SOFTWARE INTUCH PARA EL CONTROL DE Y VISUALIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES” de Vaca Edison, 2019. Las variables seleccionadas están en lazo abierto y no deben

realizar ningún tipo de control el PLC físico que es el MicroLogix 1100 serie B como se muestra en la Figura 8.1.6.

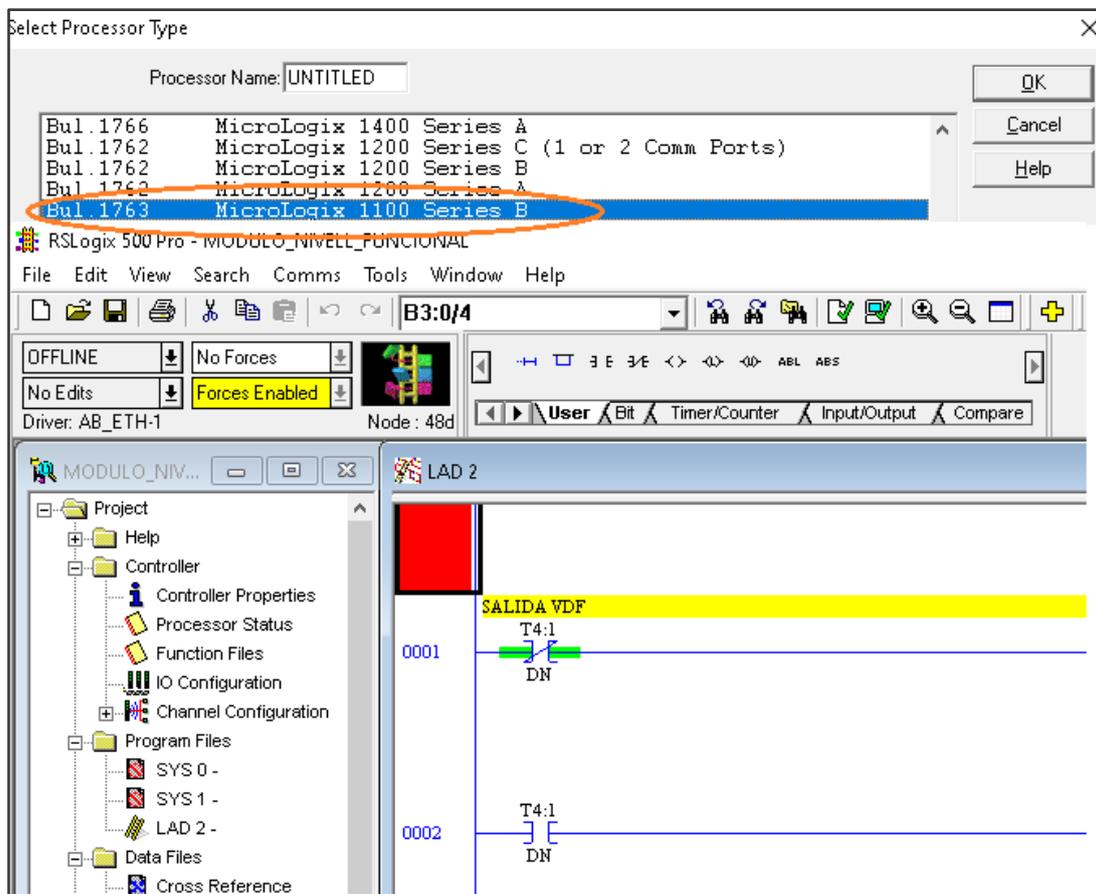


Figura 8.1.6 ventana de selección de del tipo de autómatas y ventana de programación Ladder.

Fuente: Autor

Finalmente, en la Tabla 1.1 se muestran las variables en lazo abierto que fueron extraídas de la programación en cada PLC Allen Bradley.

TABLA 1.1 Variables extraídas de los PLCs Allen Bradley.

Variables	Memorias
MÓDULO DE CAUDAL	
RUN_VARIADOR_PLC	Boolean
REMOTO_PLC	Boolean
LOCAL_HMI_PLC	Boolean
LOCAL_PLC	Boolean
SER_POINT_PLC	Word
CAUDAL_MC_PLC	Float
MÓDULO DE NIVEL	
RUN_VARIADOR_PLC1	Boolean

Variables	Memorias
REMOTO_PLC1	Boolean
LOCAL_PLC1	Boolean
MODO_LOCAL_PLC	Boolean
CONTROL_VARIADOR_PLC1	Word
ELECTROVÁLVULA_PLC	Boolean
NIVEL_PLC	Float
MÓDULO DE PRESIÓN	
RUN_VARIADOR_PLC2	Boolean
REMOTO_PLC2	Boolean
LOCAL_PLC2	Boolean
PRESION_PLC	Float
FRECUENCIA_PLC2	Float

Fuente: Autor.

Práctica 2

2.1 Tema: Comunicación PLC S7-1200 con KEPServerEx y módulos de nivel presión y caudal.

2.2 Objetivo general

Configurar los parámetros de comunicación del PLC Siemens S7-1200 con KEPServerEX y los módulos de nivel, presión y caudal.

2.3 Objetivos específicos:

- Relacionar al estudiante con la comunicación OCP de KEPServer Ex, el PLC S7-1200.
- Crear la comunicación para KEPServer Ex, el PLC S7-1200.y los módulos de nivel presión y caudal.

2.4 Introducción

KEPServerEX es un software que permite realizar comunicaciones OPC de distintas marcas de PLCs, transfiriendo o adquiriendo datos de un microcontrolador a otro, mientras que TIA Portal es un software del PLC S7-1200, el cual permite realizar el control, la automatización, y sirve como puente de transferencia y adquisición de datos entre diferentes PLCs.

En esta práctica se realiza la configuración de las variables de los módulos de nivel presión y caudal para tener una comunicación en KEPServer EX y el PLC S7-1200.

2.5 Equipos y materiales

- Computador
- PLC Siemens S7-1200
- Software TIA Portal S7-1200
- Software KEPServerEX

2.6 Desarrollo

Para que el PLC Siemens S7-1200 actúe como una tarjeta de adquisición y envío de datos, se realizan los siguientes pasos.

1. Abrir el programa de TIA PORTAL V15, después se procede a crear un proyecto, a este proyecto se lo nombra como desee el usuario, y de la misma forma se lo guarda en una carpeta de preferencia, por último, se selecciona en crear como se muestra en la Figura 8.2.1

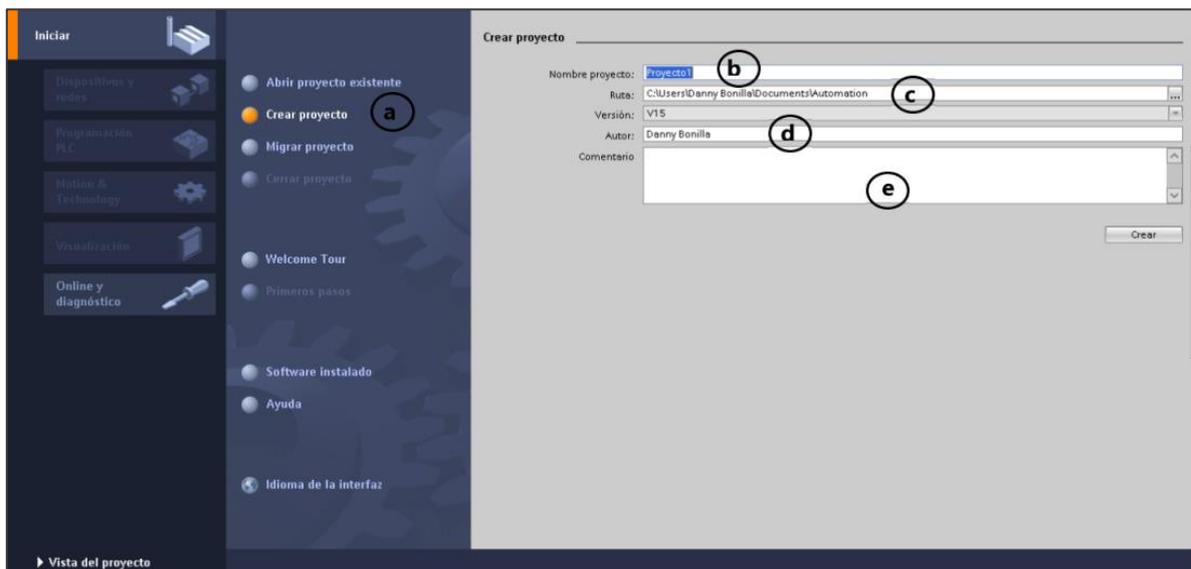


Figura 8.2.1 Creación de un nuevo proyecto en TIA Portal

Fuente: Autor.

2. Agregar el CPU que se va a utilizar, en este caso el 1212CAC/DC/Rly, y además la especificación del dispositivo con que se cuenta, como se muestra en a Figura 8.2.2.

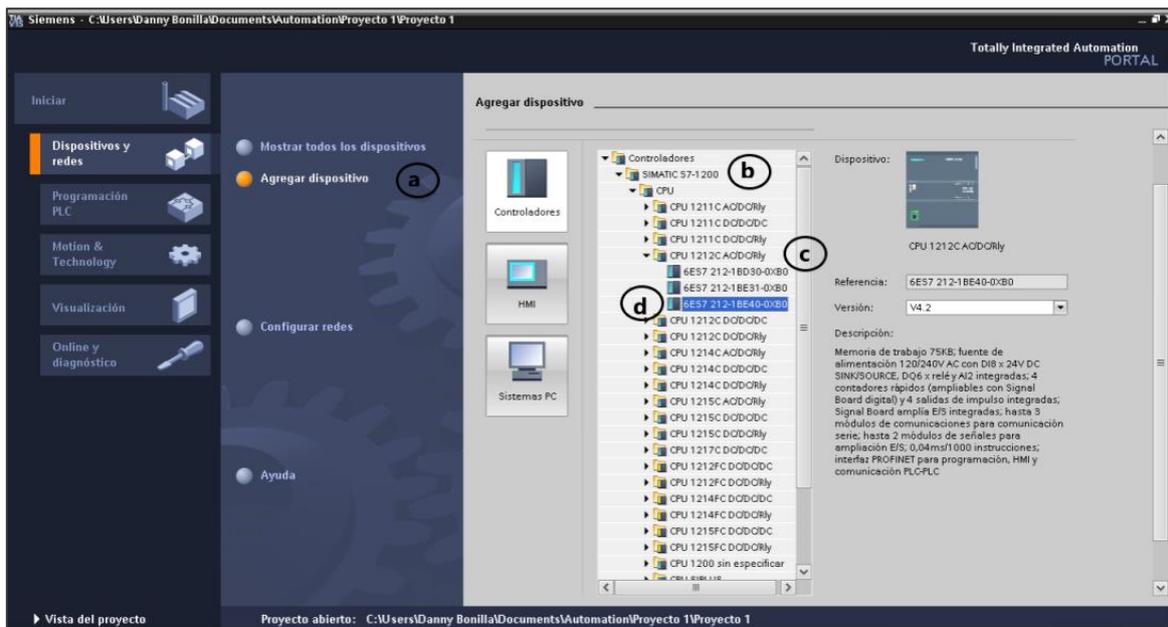


Figura 8.2.2 Selección del CPU para el PLC S7-1200.

Fuente: Autor

- a) Seleccionar la pestaña de dispositivos y redes.
 - b) Seleccionar en agregar el dispositivo.
 - c) En la pestaña de controladores elegir el modelo de CPU, y dar clic izquierdo en agregar.
 - d) Seleccionar el dispositivo con que se cuenta y agregar.
3. Para que el PLC sirva como un puente de comunicación en la transferencia y adquisición de datos, se crea una base de datos en donde se encuentren las variables representativas que son utilizadas en los módulos de nivel presión y cauda (Figura 8.2.3).

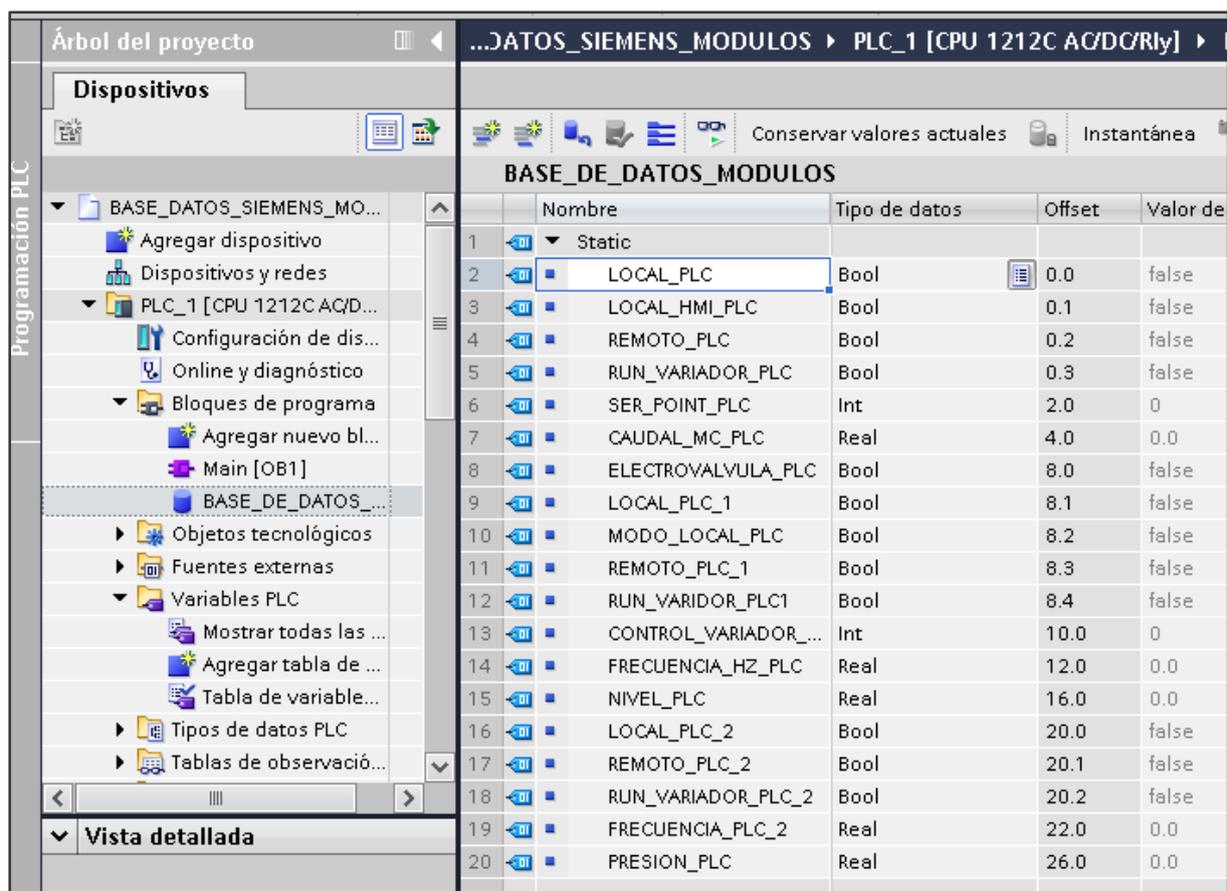


Figura 8.2.3 Base de datos de las variables de nivel, presión y caudal.

Fuente: Autor

- Una vez creada la base de datos, se configura en propiedades el acceso optimizado al bloque, dejándolo desmarcado para que no haya interferencias de comunicación como se muestra en la Figura 8.2.4.

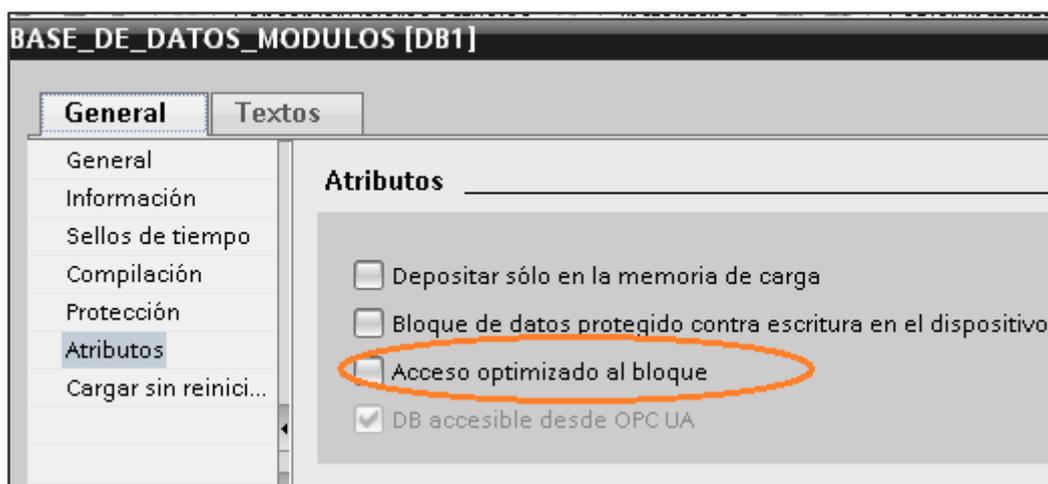


Figura 8.2.4 Configuración del acceso optimizado al bloque.

Fuente: Autor

Y, finalmente se carga la base de datos al dispositivo como se muestra en la Figura 8.2.5 y se da acceso a la creación de una nueva dirección IP para que el dispositivo sea reconocido.



Figura 8.2.5 Base de datos cargada al dispositivo S7-1200 con una nueva IP.

Fuente: Autor.

A continuación, se realiza la asociación de las variables mediante una configuración de cliente y servidor en KEPServerEX para controlar a los módulos de nivel, presión y caudal desde el PLC Siemens S7-1200.

1. Una vez abierto el programa KEPServerEX, dar click derecho en la opción de Connectivity New Chanel para configurar un nuevo canal OPC para cada uno de los PLCs a Utilizar Figura 8.2.6.

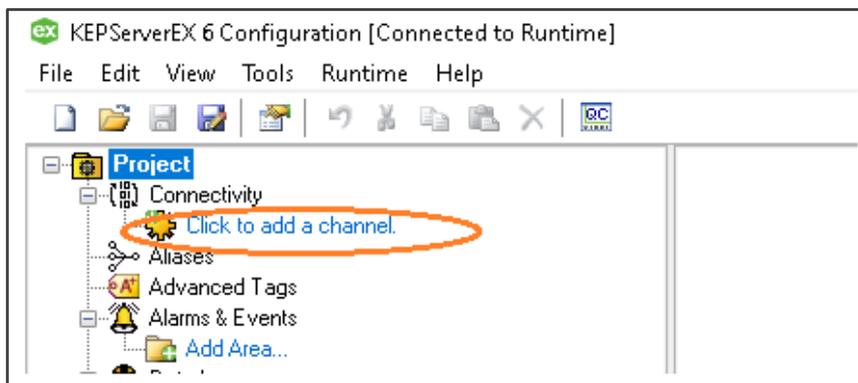


Figura 8.2.6 Configuración del canal de comunicación

Fuente: Autor

2. Dar Click en new channel y se desplegará una ventana que permite seleccionar el tipo y marca de PLC como se muestra en la Figura 8.2.7, para esta práctica se utiliza el PLC Allen Bradley Control Logix Ethernet, dar click en siguiente.

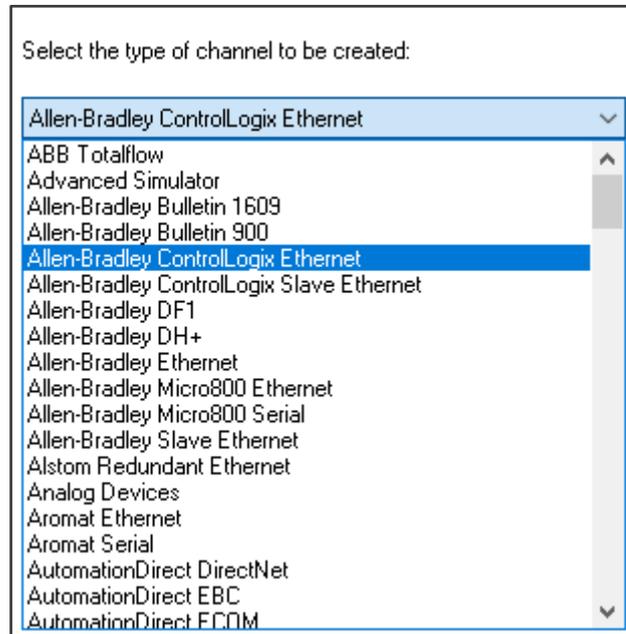


Figura 8.2.7. Configuración del canal de comunicación.

Fuente: Autor

3. Al seleccionar en siguiente se despliega una ventana como se muestra en la Figura 8.2.8 en donde se asigna el nombre a cada PLC (CAUDAL, NIVEL, PRESIÓN Y SIEMENS).

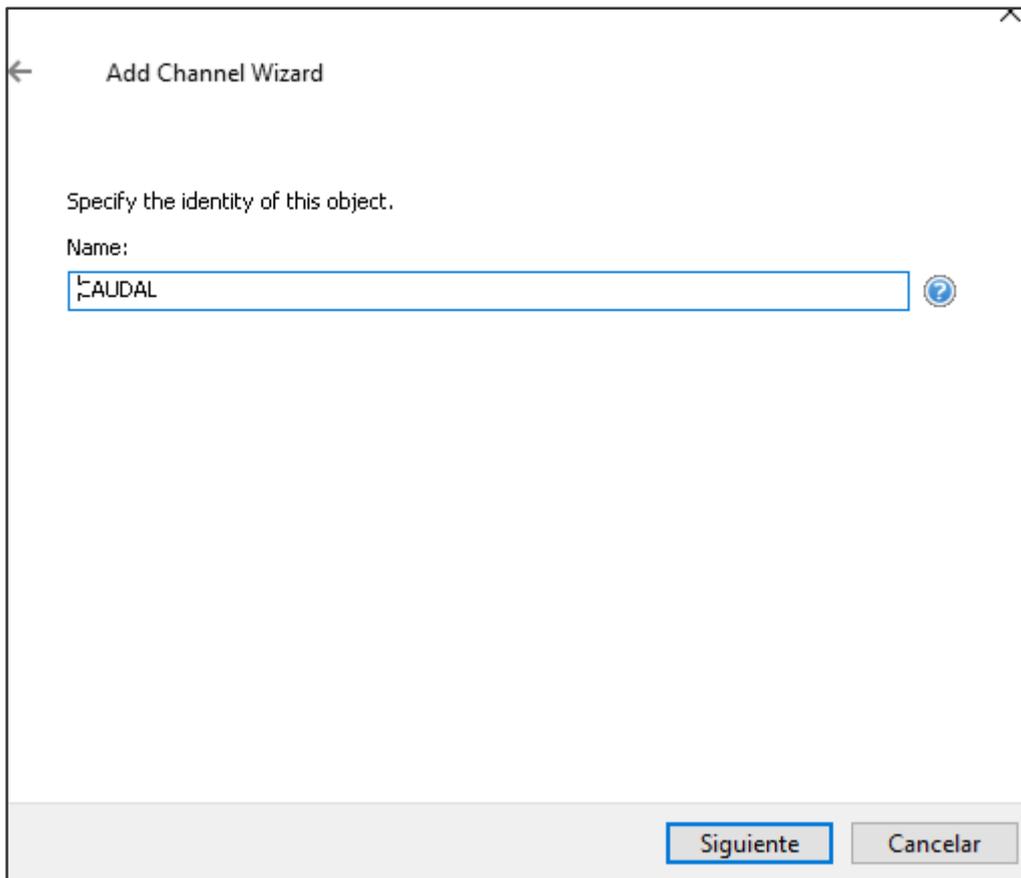


Figura 8.2.8 Asignación de nombre a cada PLC.

Fuente: Autor

4. A continuación, se configura el nombre del adaptador existente en el computador, dar click en OK.

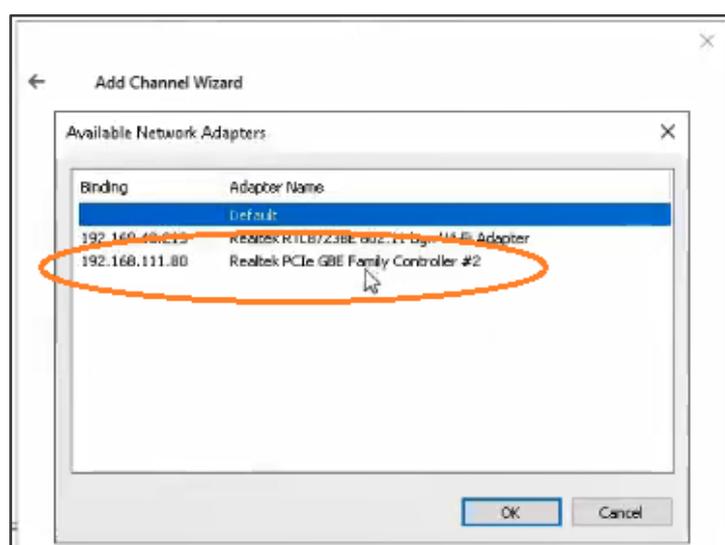


Figura 8.2.9 Adaptador del computador.

Fuente: Autor.

5. A continuación, se elige cómo enviar los datos de escritura al controlador y, además, cómo enviar los números de punto flotante no válidos al cliente (Figura 8.2.10).

The image shows a configuration dialog box with the following elements:

- Instruction: "Choose how write data is passed to the underlying communications driver when more than one write exists in the write queue."
- Section: "Optimization Method:" with a dropdown menu set to "Write Only Latest Value for All Tags".
- Section: "Specify the ratio of write operations to read operations, based on one read per configurable number of writes." with a "Duty Cycle:" input field containing the value "10".
- Section: "Choose how to send invalid floating-point numbers to the client." with a "Floating-Point Values:" dropdown menu set to "Replace with Zero".
- Buttons: "Add Channel Wizard", "Siguiete", and "Cancelar".

Orange circles highlight the "Optimization Method" dropdown, the "Floating-Point Values" dropdown, and the "Siguiete" button.

Figura 8.2.10 Configuración de envío de datos al controlador y envío de datos no válidos al cliente.

Fuente: Autor.

6. Finalmente se despliega una ventana de verificación del nuevo canal como se muestra en la Figura 8.2.11.

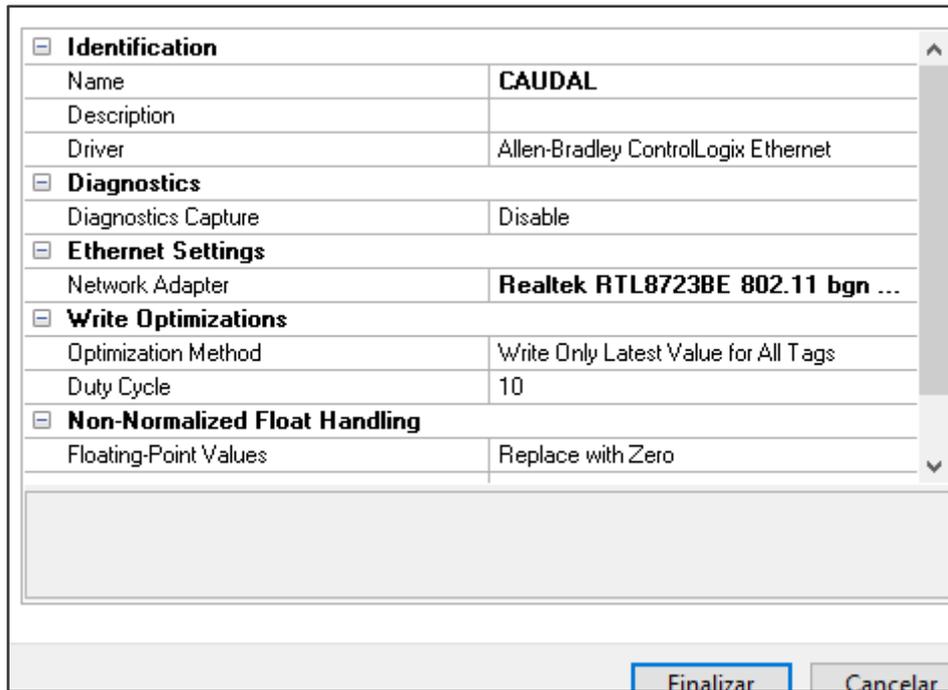


Figura 8.2.11 Verificación del nuevo canal creado.

Fuente: Autor.

- En la Figura 8.2.12 se muestra que se ha creado un nuevo canal para el PLC con el que se realiza la comunicación, se debe señalar que se tiene que configurar un canal único para cada PLC Allen Bradley y Siemens.

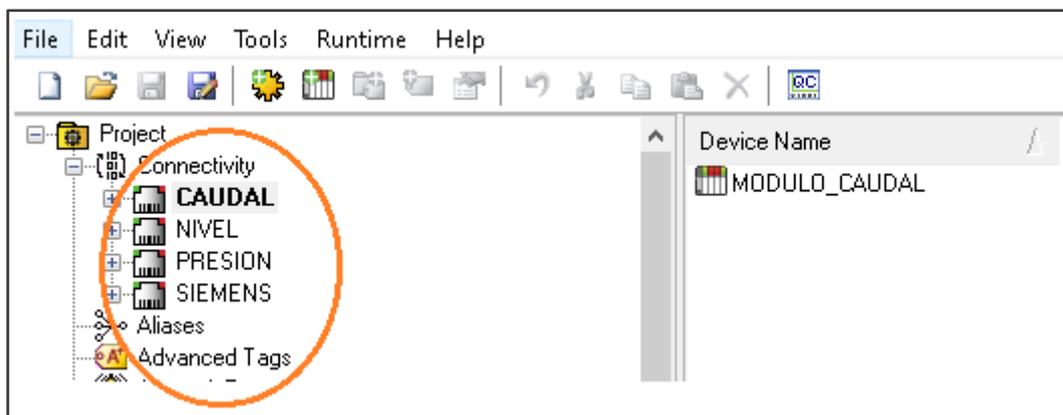


Figura 8.2.12 Nuevo canal creado.

Fuente: Autor

- Una vez configurados los canales para cada PLC, dar click en el ícono MÓDULO_CAUDAL, y se abre una ventana para la configuración de la IP del PLC, cabe recalcar que esta configuración se lo realiza en cada Allen Bradley y Siemens Figura 8.2.13.

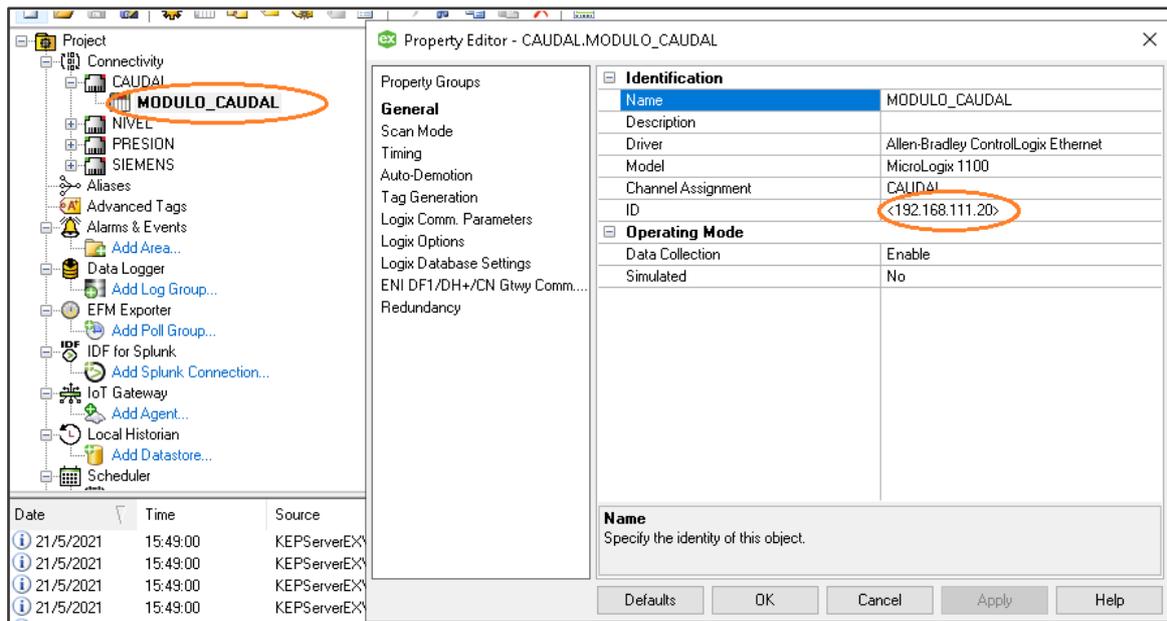


Figura 8.2.13 configuración de direcciones IP de PLCs

Fuente: Autor

9. A continuación, se crean las variables de acuerdo a la programación para realizar la comunicación con las variables existentes en el programa del PLC Allen Bradley Figura 8.2.14.

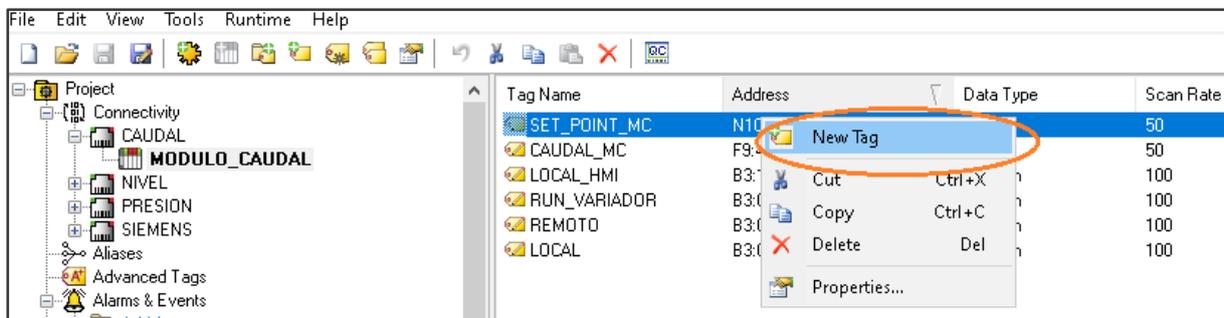


Figura 8.2.14 Creación de variables de comunicación.

Fuente: Autor.

10. Luego se configura la variable asignándole un nombre, realizando el direccionamiento al PLC, identificando el tipo de variable que le corresponde y finalmente asignar un tiempo de lectura en ms como se muestra en la Figura 8.2.15.

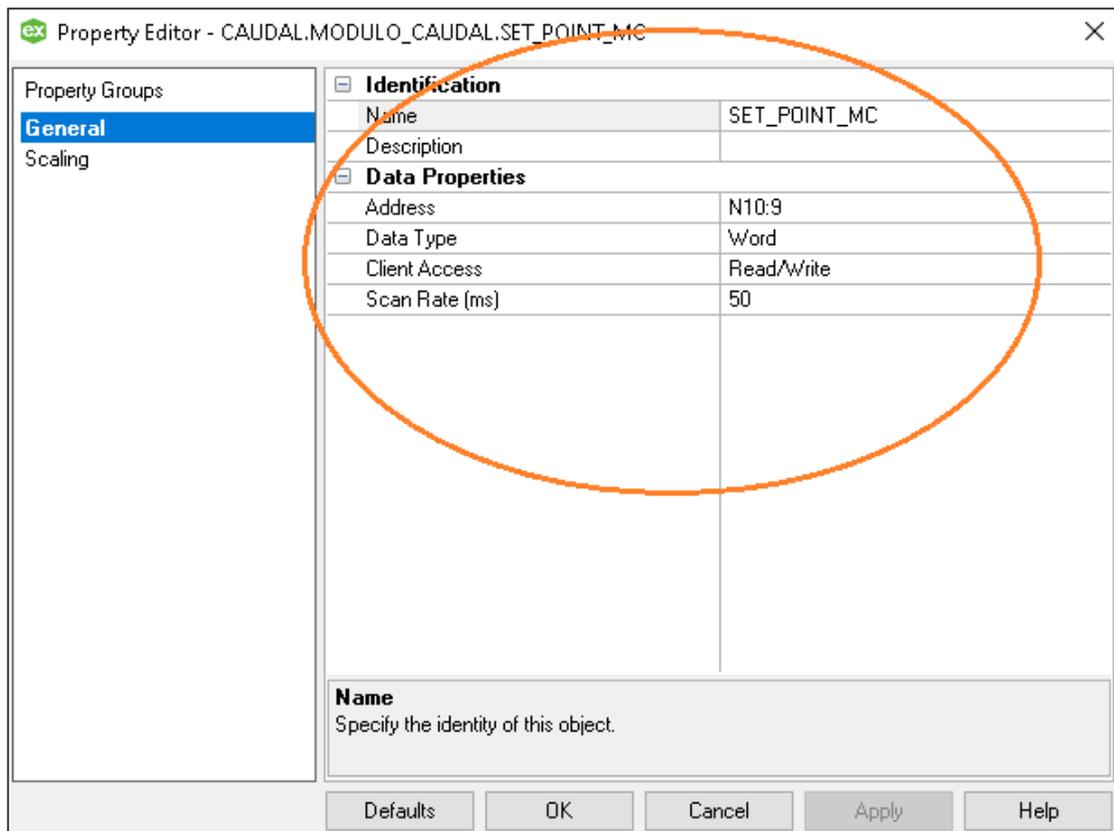


Figura 8.2.15 configuración de variables y tiempo de lectura.

Fuente: Autor.

- Una vez configuradas y asociadas las variables correspondientes de todas las variables creadas, se procede a configurar la comunicación entre el PLC Siemens S7-1200 y el PLC Allen Bradley.

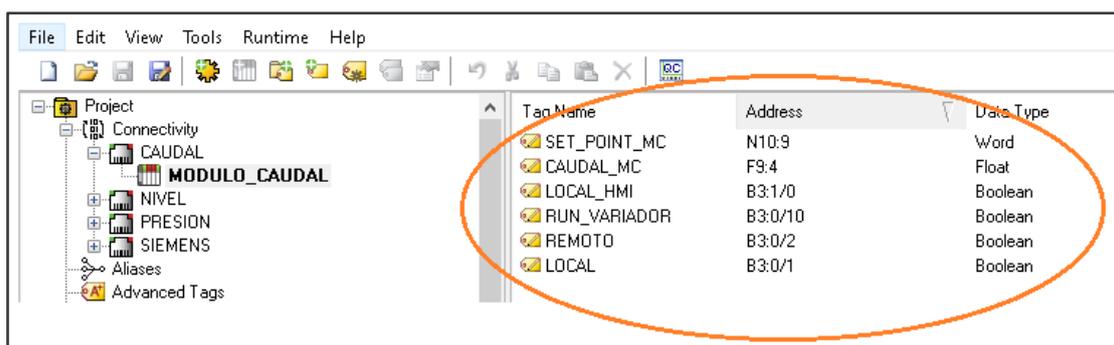


Figura 8.2.16 Asociación de variables en el programa del PLC a sus respectivas variables en KEPServerEx.

Fuente: Autor.

A continuación, se describe los pasos para realizar la comunicación entre el PLC Siemens S7-1200 y los PLCs Allen Bradley mediante variables avanzadas.

12. Primero se debe crear los canales de comunicación respectivos, configurar las variables correspondientes a cada PLC y asignar sus direcciones IP correspondientes como se muestra en la Figura 8.2.17.

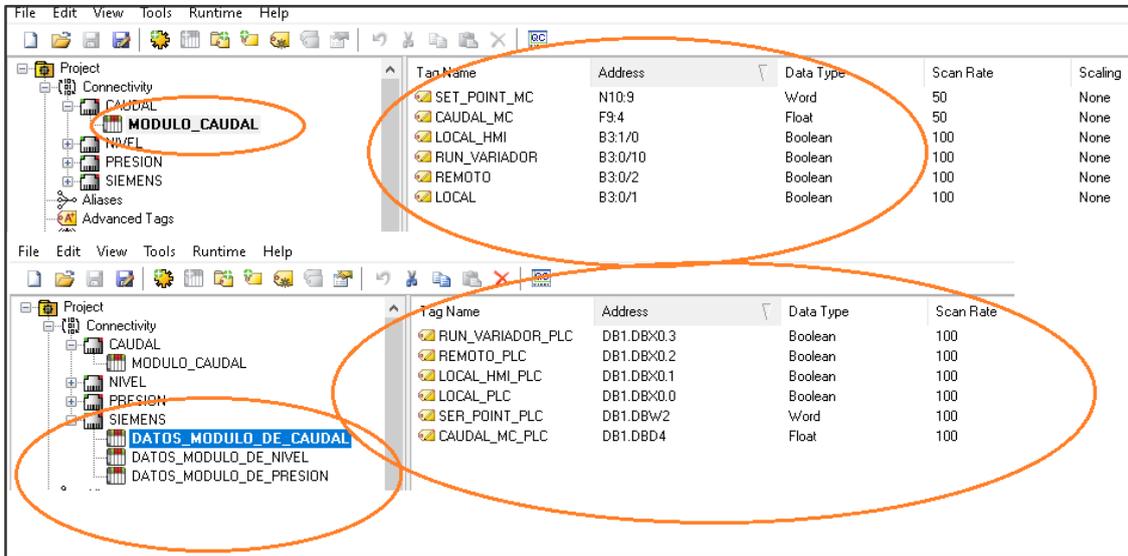


Figura 8.2.17 Variables del PLC Siemens

Fuente: Autor.

13. Una vez creadas las variables correspondientes a cada PLC, dirigirse a “Advanced Tags” y hacer click derecho en crear “New link Tag” Figura 8.2.18.

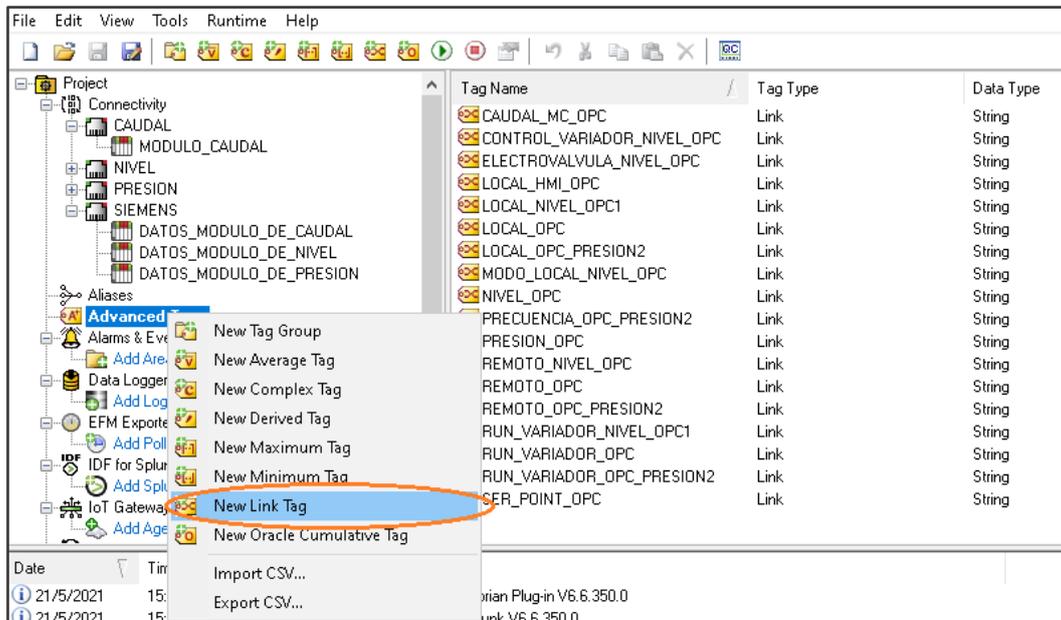


Figura 8.2.18 Creación de “Advance tags”

Fuente: Autor

14. Una vez creado un “New Link Tag” se le asigna un nombre y se configura las variables que requieren como entradas o salidas, dando click en los puntos suspensivos ubicados a la derecha de input se despliega una ventana “Tag Browser” (Figura 8.2.19).

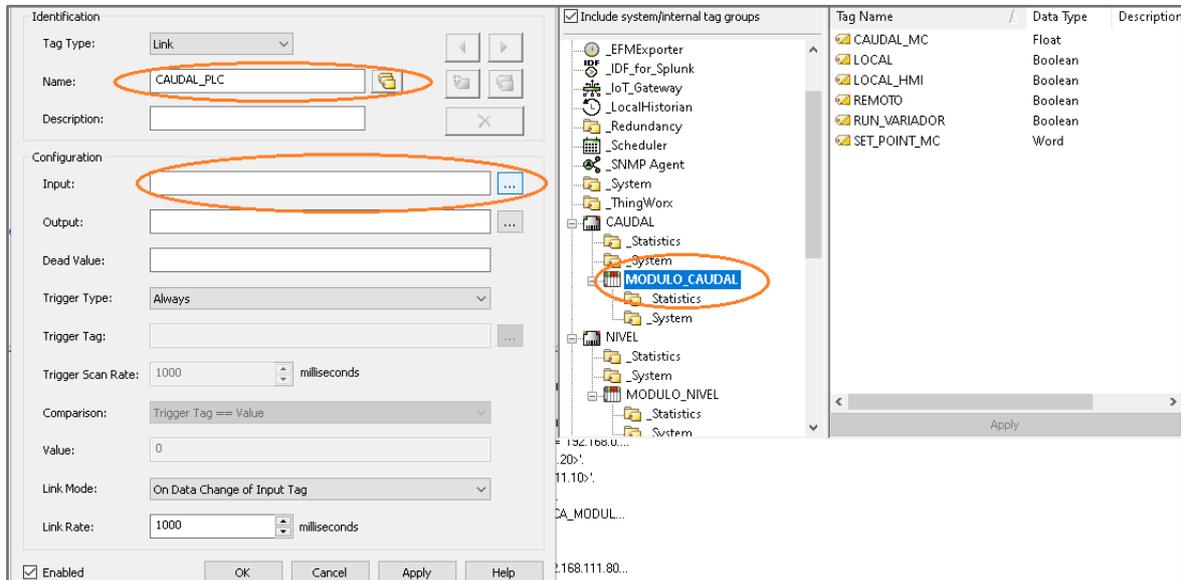


Figura 8.2.19 Configuración de un “Advance Tag”

Fuente: Autor

15. En la venta “Tag Broswer” seleccionar la etiqueta del servidor de donde van a ser extraídos los datos. Se asigna como entrada al PLC Siemens a “RUN_VARIADOR_PLC” debido a que, desde este, se va a controlar las variables del PLC Allen Bradley como se muestra en la Figura 8.2.20.

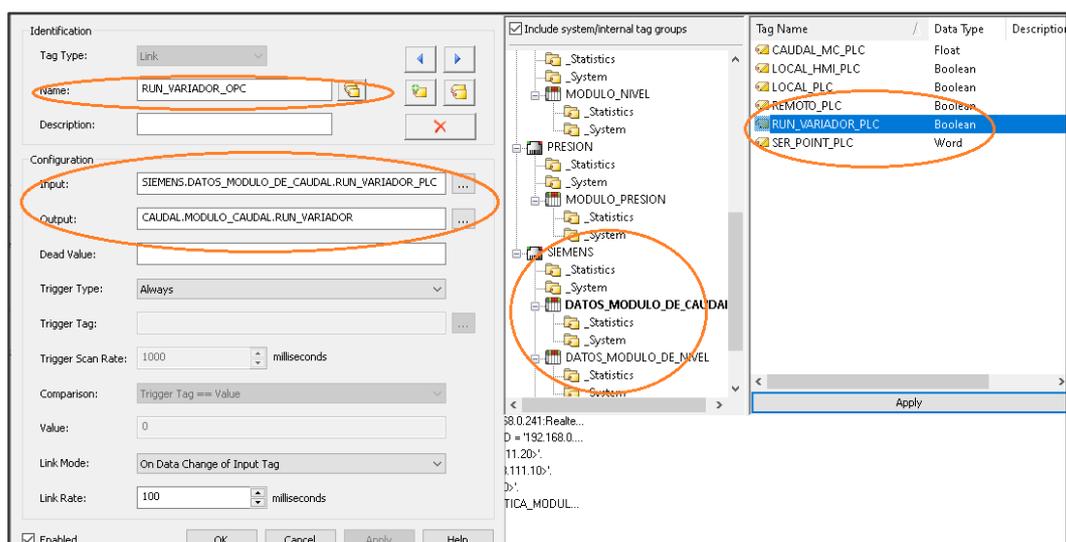


Figura 8.2.20 Configuración de entradas “Advance Tags”

Fuente: Autor.

16. Para configurar la salida dar click en los puntos suspensivos de "Output" y seleccionar la etiqueta donde la entrada va a ser escrita. En la Figura 8.2.21 se muestra que a la variable "CAUDAL_MC" se lo asignó como una salida del PLC Allen Bradley.

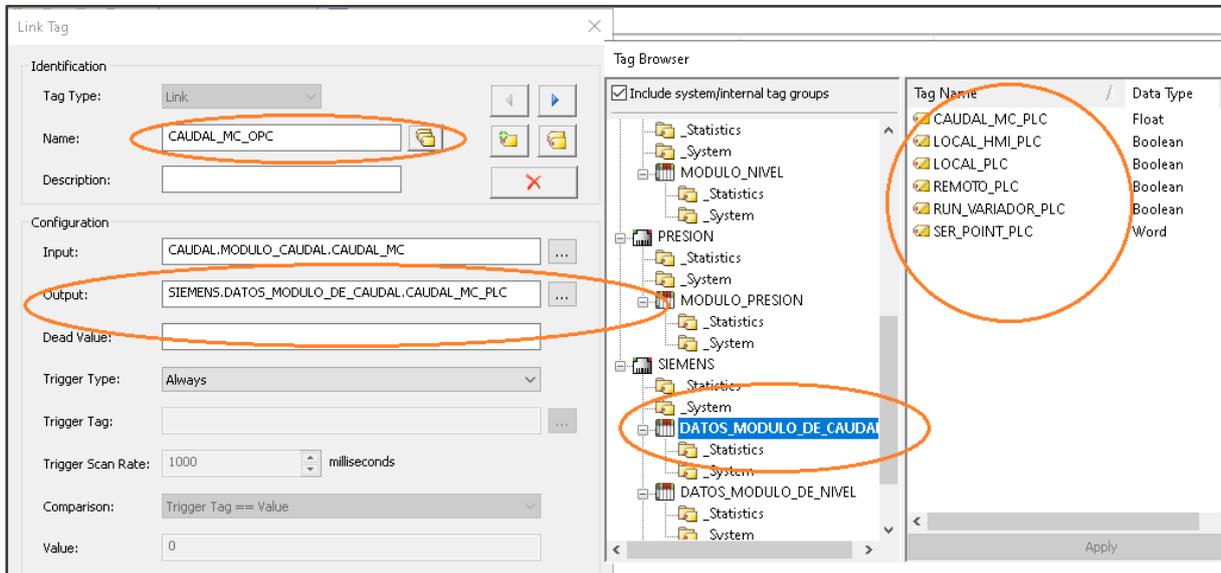


Figura 8.2.21 Configuración de salidas "Advanced Tags"

Fuente: Autor.

Para verificar que la comunicación es exitosa dar click en el ícono que se muestra en la Figura 8.2.22 y verificar que su estado esté en "Good" para asegurar la comunicación OPC en KEPServerEx y el módulo Siemens S7-1200 como tarjeta de envío y adquisición de datos.

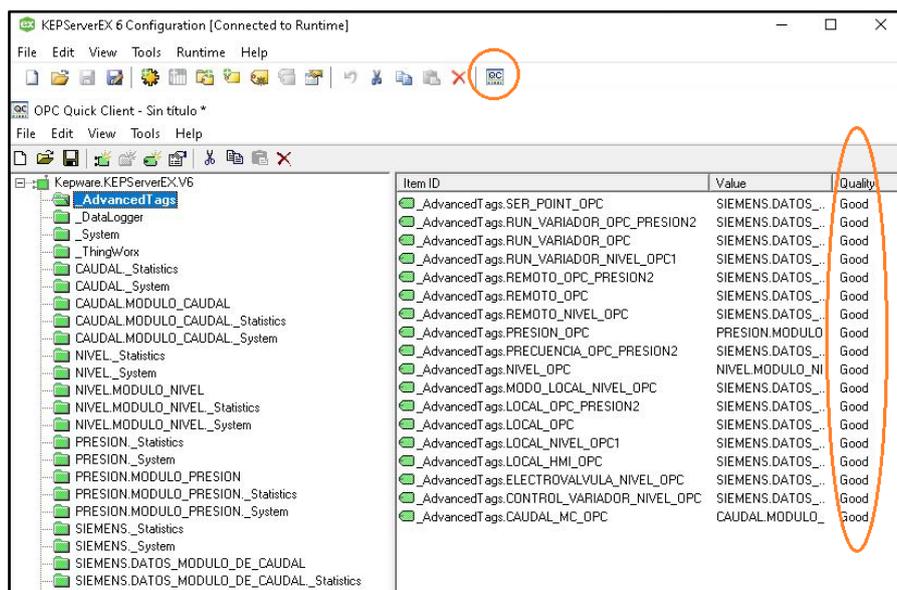


Figura 8.2.22 Comunicación exitosa utilizando OPC KEPServerEx

Fuente: Autor

A continuación, en la Tabla 8.2.1 se presentan las variables de los módulos de nivel, presión y caudal, además de cómo deben ser configuradas en el servidor OPC para que puedan hacer su función de transferencia y adquisición de datos.

Además, en la Tabla 8.2.2 se presentan a las variables con sus respectivas memorias tanto en KEPServerEX como en TiaPortal.

TABLA 8.2.1 VARIABLES DE NIVEL, PRESIÓN Y CAUDAL CONFIGURADAS EN EL SERVIDOR OPC.

Variables	Input	Output
MÓDULO DE CAUDAL		
RUN_VARIADOR_PLC	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.RUN_VARIADOR_PLC	CAUDAL.MODULO_CAUDAL.RUN_VARIADOR
REMOTO_PLC	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.REMOTO_PLC	CAUDAL.MODULO_CAUDAL.REMOTO
LOCAL_HMI_PLC	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.LOCAL_HMI_PLC	CAUDAL.MODULO_CAUDAL.LOCAL_HMI
LOCAL_PLC	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.LOCAL_PLC	CAUDAL.MODULO_CAUDAL.LOCAL
SER_POINT_PLC	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.SER_POINT_PLC	CAUDAL.MODULO_CAUDAL.SET_POINT_MC
CAUDAL_MC_PL C	CAUDAL.MODULO_CAUDAL.CAUDAL_MC	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.CAUDAL_MC_PLC
MÓDULO DE NIVEL		
RUN_VARIADOR_PL C1	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.RUN_VARIADOR_PL_C1	NIVEL.MODULO_NIVEL.RUN_VARIADOR
REMOTO_PL C1	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.REMOTO_PL_C1	NIVEL.MODULO_NIVEL.REMOTO
LOCAL_PL C1	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.LOCAL_PL_C1	NIVEL.MODULO_NIVEL.LOCAL
MODO_LOCAL_P LC	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.MODO_LOCAL_PL_C	NIVEL.MODULO_NIVEL.MODO_LOCAL
CONTROL_VARIA DOR_PL C1	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.CONTROL_VARIADOR_PL_C	NIVEL.MODULO_NIVEL.CONTROL_VARIADOR
ELECTROVÁLVU LA_PL C	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.ELECTROVALVULA_PL_C	NIVEL.MODULO_NIVEL.ELECTROVALVULA
NIVEL_PL C	NIVEL.MODULO_NIVEL.NIVEL	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.NIVEL_PL_C
MÓDULO DE PRESIÓN		

Variables	Input	Output
RUN_VARIADOR_PLC2	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.N.RUN_VARIADOR_PLC_2	PRESION.MODULO_PRESION.RUN_VARIADOR
REMOTO_PLC2	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.N.REMOTO_PLC_2	PRESION.MODULO_PRESION.REMOTO
LOCAL_PLC2	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.N.LOCAL_PLC_2	PRESION.MODULO_PRESION.LOCAL
PRESION_PLC	PRESION.MODULO_PRESION.PRESION	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.PRESION_PLC
FRECUENCIA_PLC2	SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.N.FRECUENCIA_PLC2	PRESION.MODULO_PRESION.FRECUENCIA

Fuente: Autor

TABLA 8.2.2 MEMORIAS DE LAS VARIABLES EN KEPSERVEREX y TIAPORTAL

Variables	Memorias en KEPServerEx	Memorias en TiaPortal
MÓDULO DE CAUDAL		
RUN_VARIADOR_PLC	Boolean	Bool
REMOTO_PLC	Boolean	Bool
LOCAL_HMI_PLC	Boolean	Bool
LOCAL_PLC	Boolean	Bool
SER_POINT_PLC	Word	Int
CAUDAL_MC_PLC	Float	Real
MÓDULO DE NIVEL		
RUN_VARIADOR_PLC1	Boolean	Bool
REMOTO_PLC1	Boolean	Bool
LOCAL_PLC1	Boolean	Bool
MODO_LOCAL_PLC	Boolean	Bool
CONTROL_VARIADOR_PLC1	Word	Int
ELECTROVÁLVULA_PLC	Boolean	Bool
NIVEL_PLC	Float	Real
MÓDULO DE PRESIÓN		
RUN_VARIADOR_PLC2	Boolean	Bool
REMOTO_PLC2	Boolean	Bool
LOCAL_PLC2	Boolean	Bool
PRESION_PLC	Float	Real
FRECUENCIA_PLC2	Float	Real

Fuente: Autor.

Práctica 3

3.1 Tema: Comunicación del Módulo de control de nivel de líquidos mediante KEPServerEx y Matlab - Simulink.

3.2 Objetivo general

Configurar los parámetros de comunicación OPC en Matlab-Simulink mediante las variables del módulo de nivel de líquidos en KEPServerEX.

3.3 Objetivos específicos:

- Relacionar al estudiante con la comunicación OCP de KEPServerEx y Matlab-Simulink.
- Crear la comunicación para el módulo de control de líquidos mediante KEPServer Ex y Matlab Simulink.

3.4 Introducción

KEPServerEX es un software que permite realizar comunicaciones OPC de distintas marcas de PLCs, transfiriendo o adquiriendo datos de un microcontrolador a otro, mientras que Matlab- Simulink es un programa que permite realizar cálculos técnicos, mediante representaciones matemáticas y gráficas de estas, además que a través de este software se puede comunicar diversos programas y tarjetas de comunicación de datos

En esta práctica se realiza la configuración de las variables del módulo de nivel para tener una comunicación entre KEEPServer EX y Matlab-Simulink

3.5 Equipos y materiales

- Computador
- PLC Siemens S7-1200 y PLC Allen Bradley del módulo de nivel.
- Software KEEPServerEX
- Software Matlab-Simulink
- Módulo de nivel

3.6 Desarrollo

A continuación, se realiza la asociación de las variables mediante una configuración de cliente y servidor en KEPServerEX para controlar al módulo de nivel de líquidos mediante el PLC Siemens S7-1200 y Matlab-Simulink.

1. Una vez abierto el programa KEPServerEX, dar click derecho en la opción de "Connectivity New Chanel" para configurar un nuevo canal OPC en cada uno de los PLCs a Utilizar Figura 8.3.1.

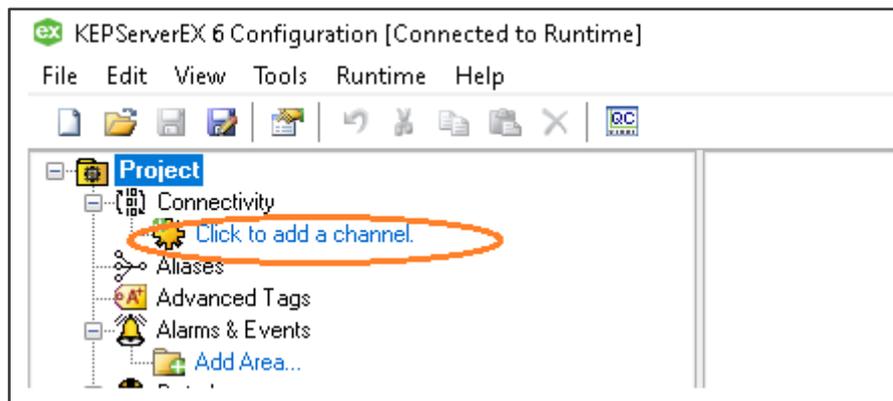


Figura 8.3.1 Configuración del canal de comunicación

Fuente: Autor.

2. Dar Click en new channel y se desplegará una ventana que permite seleccionar el tipo y marca de PLC como se muestra en la Figura 8.3.2, para esta práctica se utiliza el PLC Allen Bradley Control Logix Ethernet, dar click en siguiente.

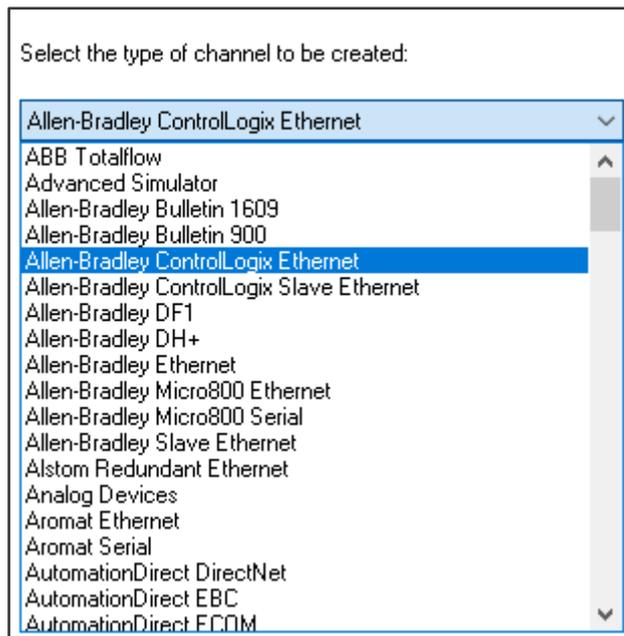


Figura 8.3.2. Configuración del canal de comunicación.

Fuente: Autor

3. Al seleccionar en siguiente se despliega una ventana como se muestra en la Figura 8.3.3 en donde se asigna el nombre al PLC (NIVEL).

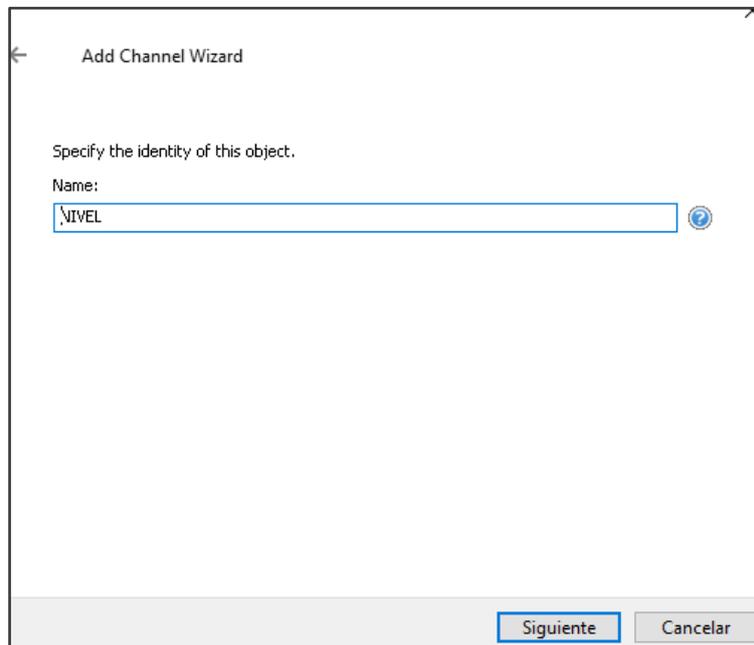


Figura 8.3.3 Asignación de nombre al PLC del módulo de Nivel.

Fuente: Autor

4. A continuación, en la Figura 8.3.4 se muestra la configuración del nombre del adaptador existente en el computador, dar click en OK.

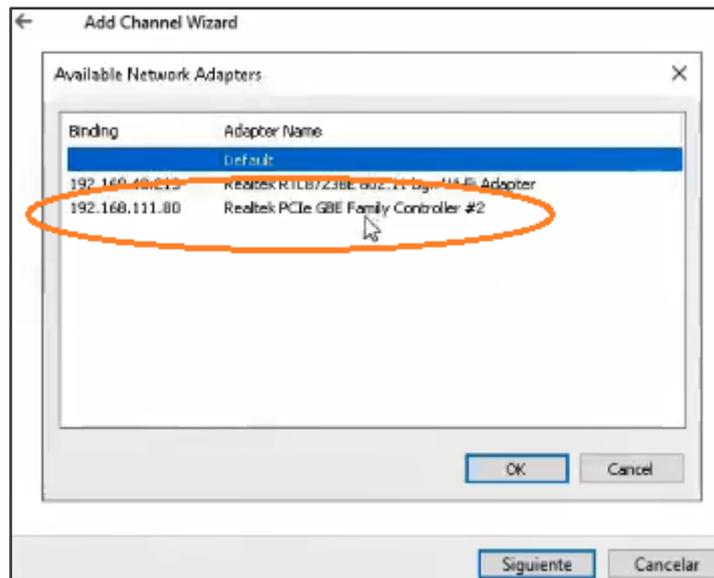


Figura 8.3.4 Adaptador del computador.

Fuente: Autor.

5. A continuación, se elige cómo enviar los datos de escritura al controlador y, además, cómo enviar los números de punto flotante no válidos al cliente (Figura 8.3.5).

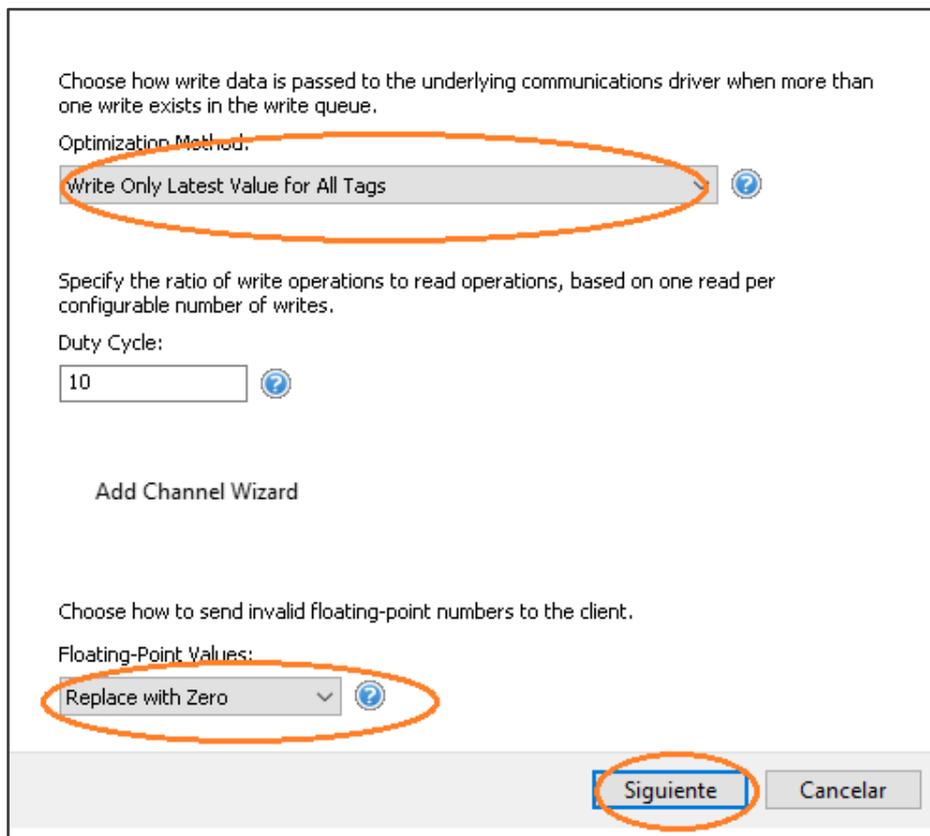


Figura 8.3.5 Configuración de envío de datos al controlador y envío de datos no válidos al cliente.

Fuente: Autor.

6. Finalmente se despliega una ventana de verificación del nuevo canal como se muestra en la Figura 8.3.6.

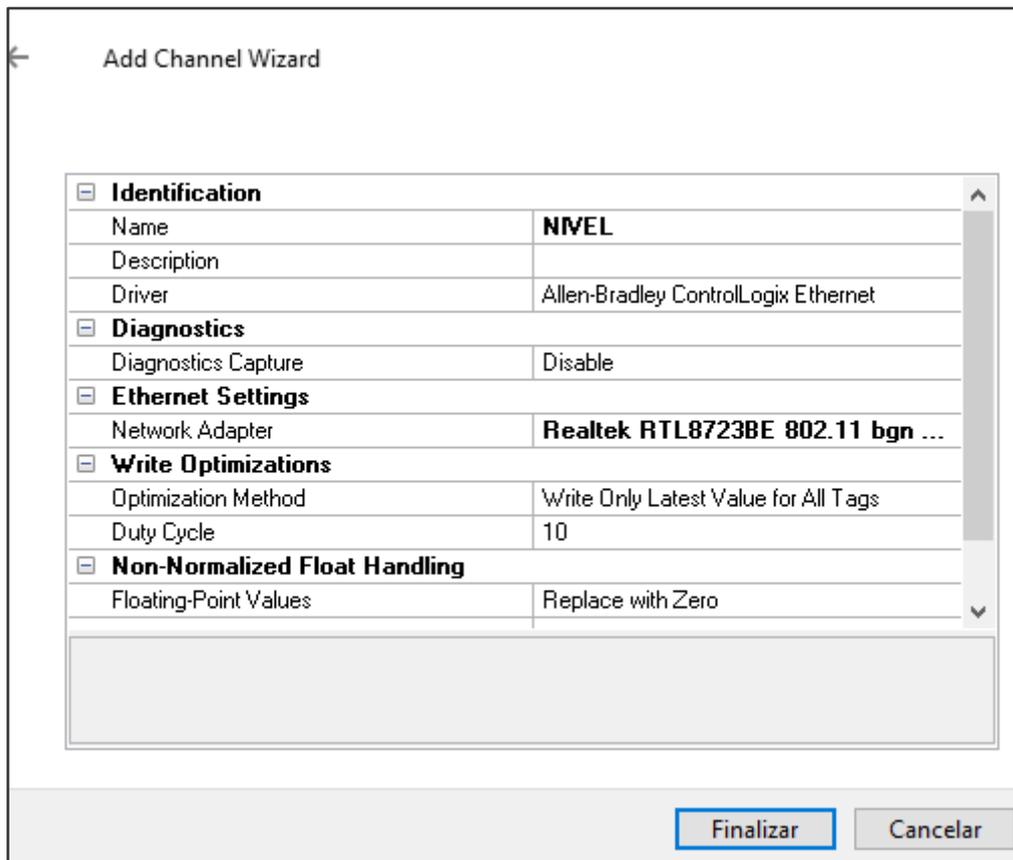


Figura 8.3.6 Verificación del nuevo canal creado.

Fuente: Autor.

7. En la Figura 8.3.7, se muestra que se ha creado un nuevo canal para el PLC con el que se realiza la comunicación, se debe señalar que se tiene que configurar un canal único para cada PLC Allen Bradley y Siemens.

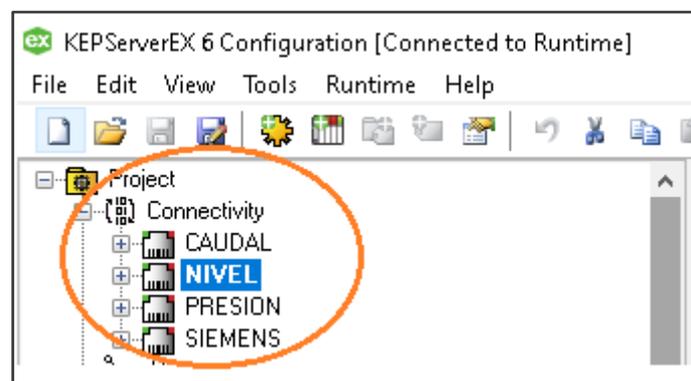


Figura 8.3.7 Nuevo canal creado (Nivel).

Fuente: Autor.

- Una vez configurados los canales para cada PLC, dar click en el ícono MÓDULO_NIVEL, y se abre una ventana para la configuración de la IP del PLC, Figura 8.3.8.

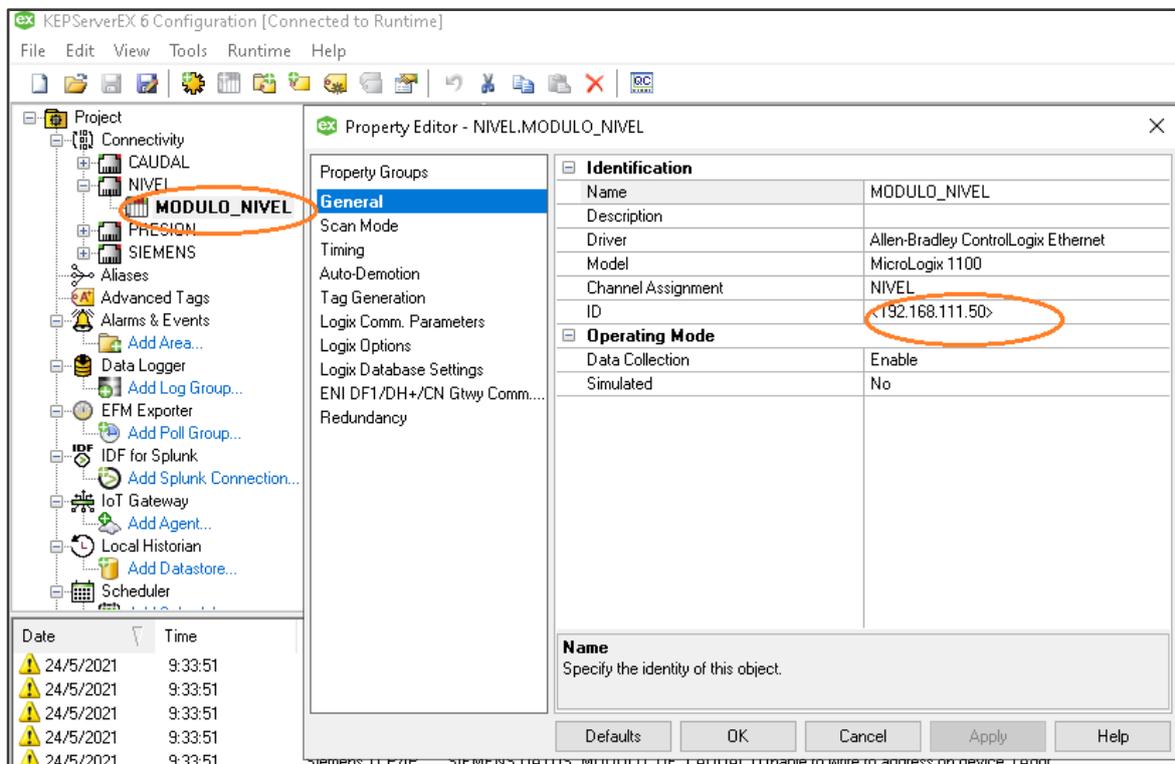


Figura 8.3.8 Configuración de direcciones IP del PLC Allen Bradley de Nivel.

Fuente: Autor.

- A continuación, se crean las variables de acuerdo a la programación, y luego realizar la comunicación con las variables existentes en el programa del PLC Allen Bradley Figura 8.3.9.

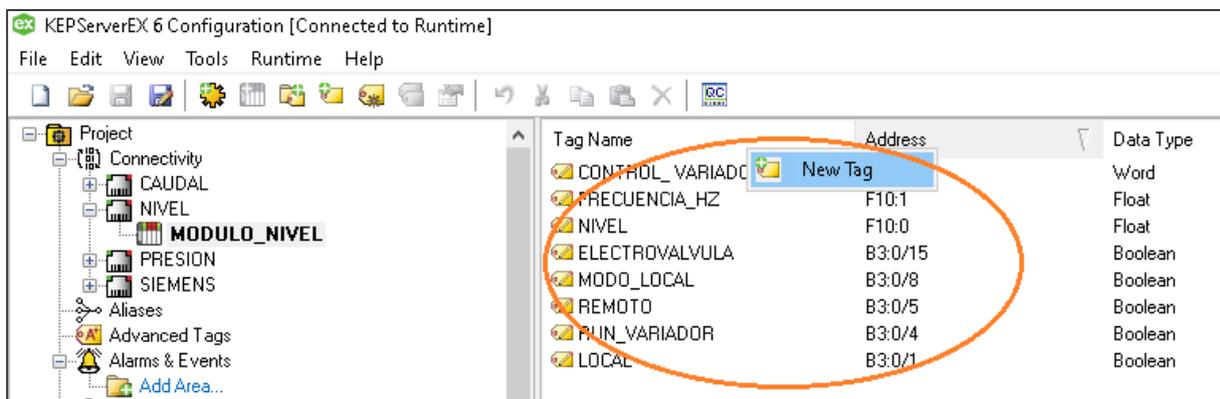


Figura 8.3.9 Creación de variables de comunicación del módulo de nivel.

Fuente: Autor.

10. Luego se configuran las variables asignándoles un nombre, realizando el direccionamiento al PLC identificando el tipo de variable que le corresponde y finalmente asignar un tiempo de lectura en ms como se muestra en la Figura 8.3.10.

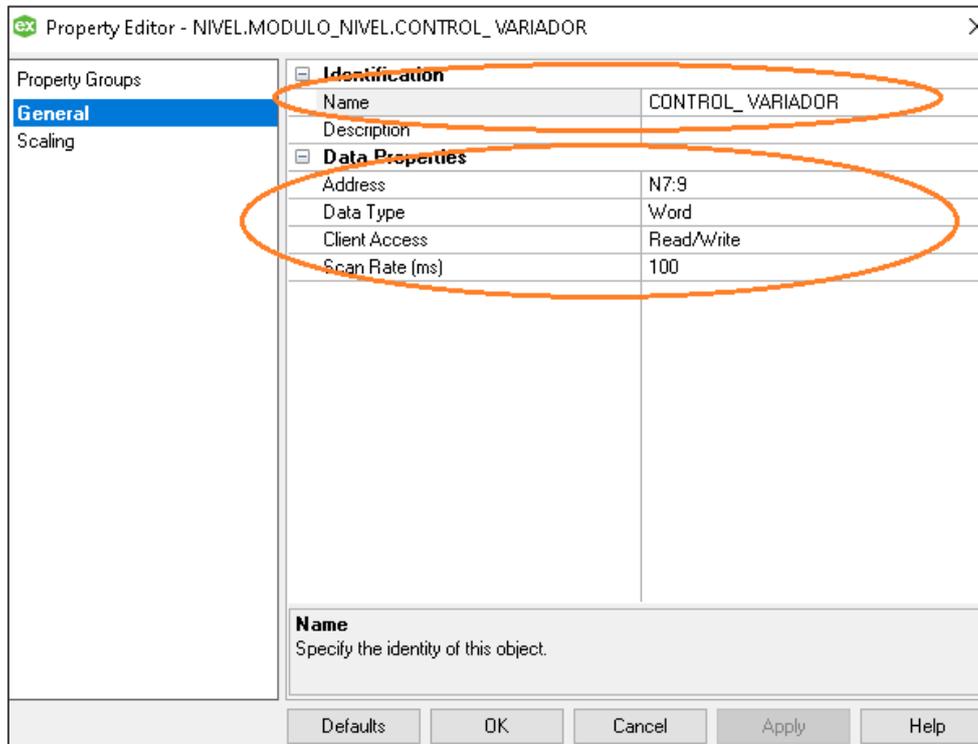


Figura 8.3.10 Configuración de variables y tiempo de lectura para el módulo de nivel.

Fuente: Autor.

11. Una vez configuradas y asociadas las variables correspondientes de todas las variables creadas, se procede a configurar la comunicación entre el PLC Siemens S7-1200 y el PLC Allen Bradley (Figura 8.3.11).

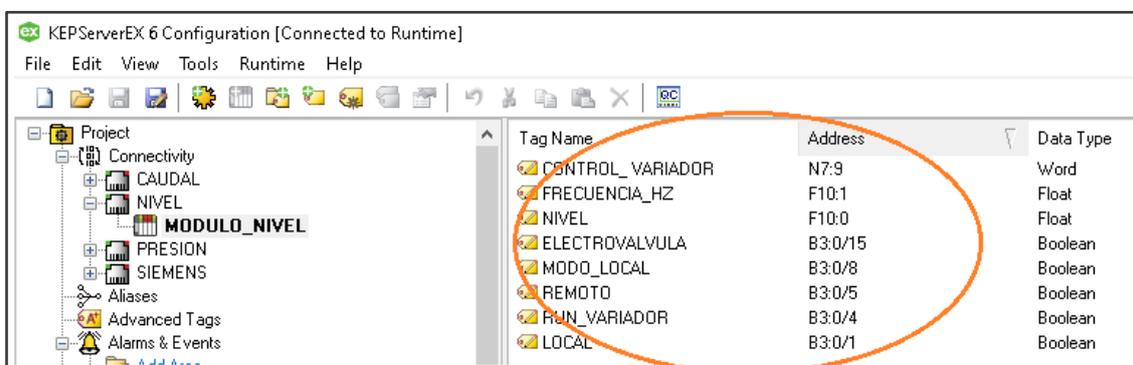


Figura 8.3.11 Asociación de variables del módulo de nivel en el programa del PLC Allen Bradley a sus respectivas variables en KEPServerEx.

Fuente: Autor.

A continuación, se describe los pasos para realizar la comunicación entre el PLC Siemens S7-1200 y el PLC Allen Bradley mediante variables avanzadas.

12. Primero se debe crear los canales de comunicación respectivos, configurar las variables correspondientes a cada PLC y asignar sus direcciones IP correspondientes como se muestra en la Figura 8.3.12.

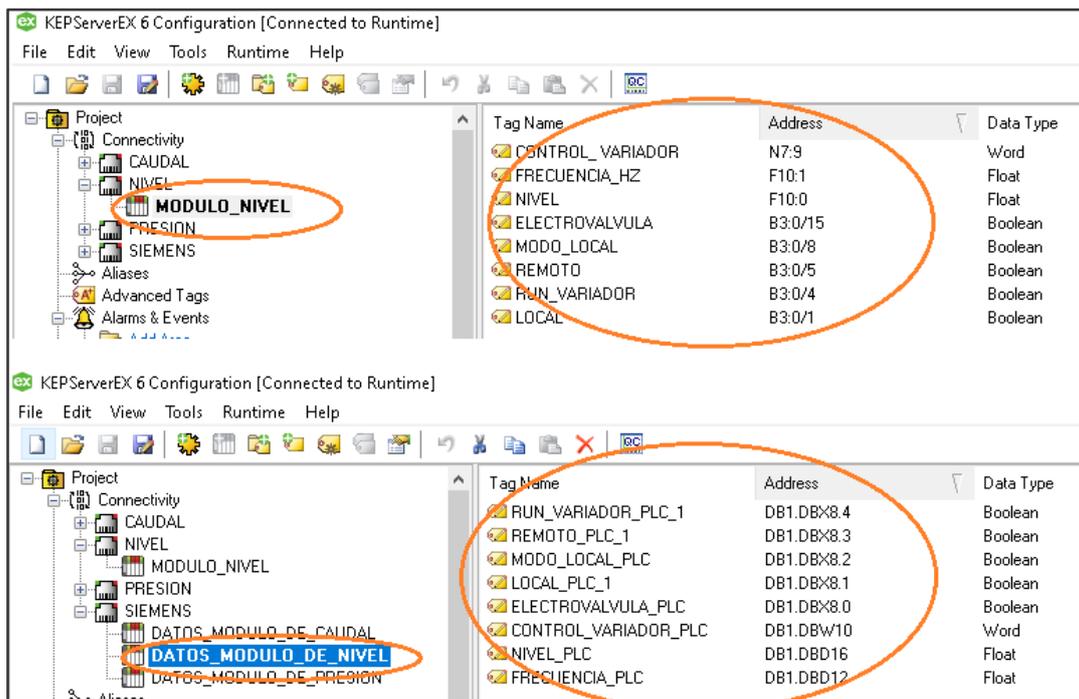


Figura 8.3.12 Variables del PLC Siemens Y El PLC Allen Bradley

Fuente: Autor.

13. Una vez creadas las variables correspondientes a cada PLC, dirigirse a “Advanced Tags” y hacer click derecho en crear “New link Tag” Figura 8.3.13.

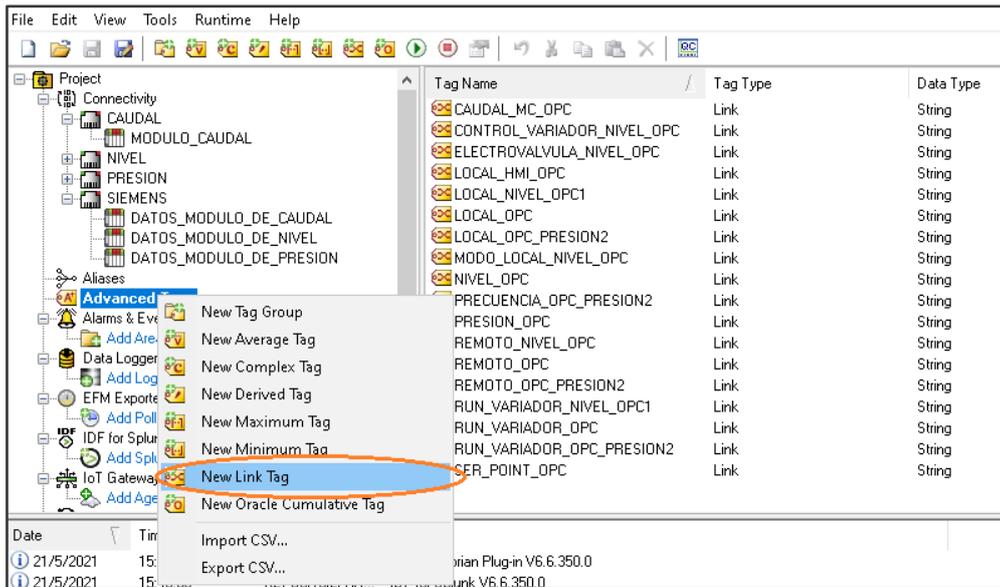


Figura 8.3.13 Creación de “Advance tags”

Fuente: Autor

- Una vez creado un “New Link Tag” se le asigna un nombre y se configura las variables que se requieren como entradas o salidas, dando click en los puntos suspensivos ubicados a la derecha de input se despliega una ventana “Tag Browser” (Figura 8.3.14).

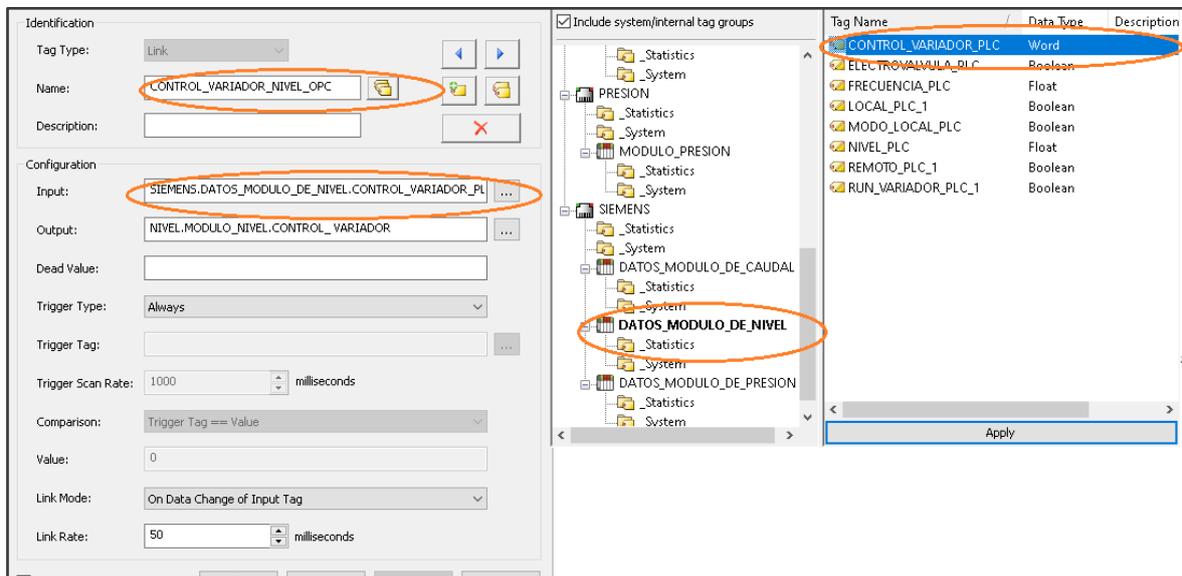


Figura 8.3.14 Configuración de un “Advance Tag”

Fuente: Autor

- En la venta “Tag Browser” seleccionar la etiqueta del servidor de donde van a ser extraídos los datos. Se asigna como entrada al PLC Siemens a “CONTROL_VARIADOR_PL_C debido a que, desde este se va a controlar las variables del PLC Allen Bradley como se muestra en la Figura 8.3.15.

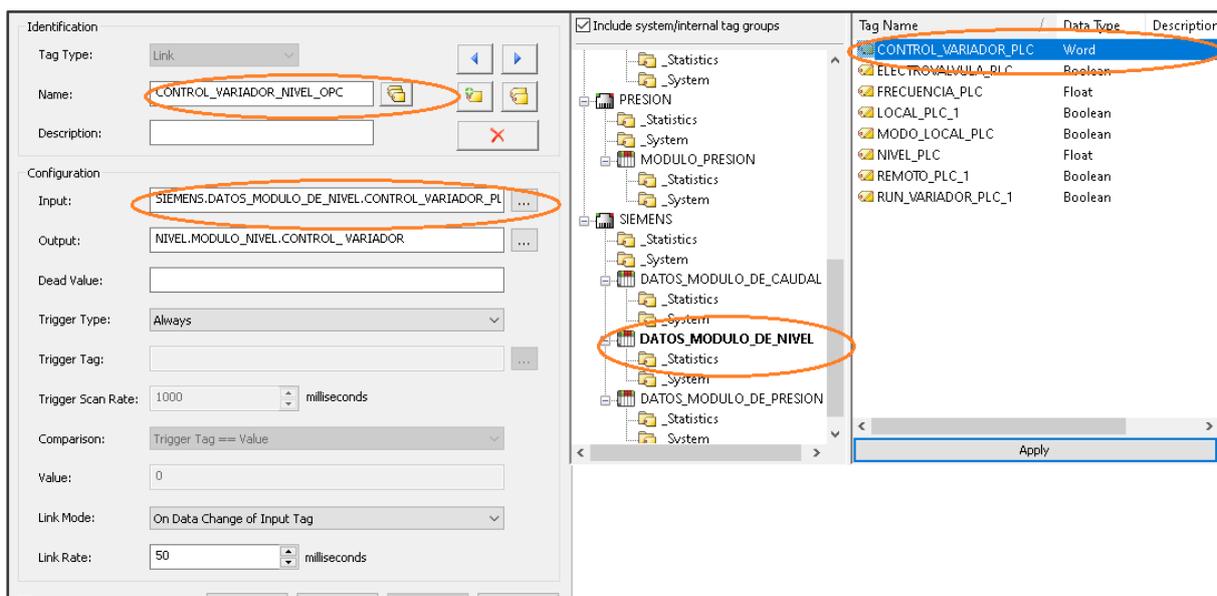


Figura 8.3.15 Configuración de entradas "Advance Tags"

Fuente: Autor

- Para configurar la salida dar click en los puntos suspensivos de "Output" y seleccionar la etiqueta donde la entrada va a ser escrita. En la Figura 8.3.16 se muestra que a la variable "CONTROL_VARIADOR_PLC" se lo asignó como una salida del PLC Allen Bradley.

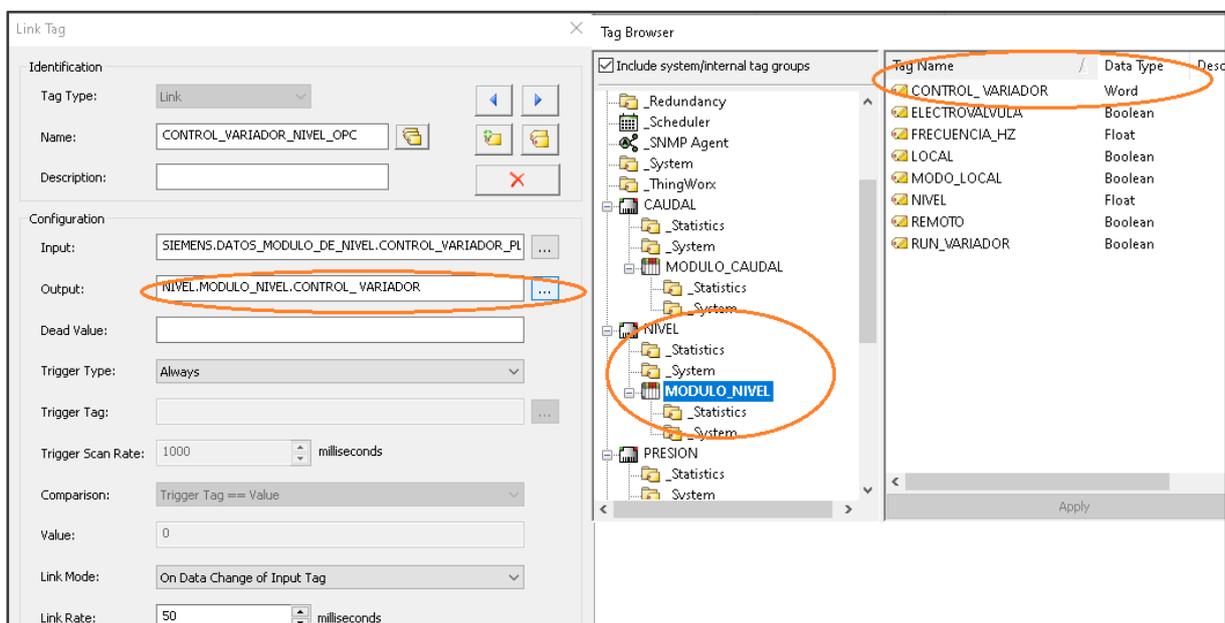


Figura 8.3.16 Configuración de salidas "Advanced Tags"

Fuente: Autor

Para verificar que la comunicación es exitosa dar click en el ícono que se muestra en la Figura 8.3.17 y verificar que su estado esté en "Good" para asegurar la comunicación OPC con KEPServerEx y el módulo Siemens S7-1200.

Item ID	Data Type	Value	Quality
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.NIVEL_PLC	Float	1.5	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.RUN_VARIADOR_P...	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.REMOTO_PLC_1	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.MODD_LOCAL_PLC	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.LOCAL_PLC_1	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.FRECUENCIA_PLC	Float	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.ELECTROVALVULA...	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_NIVEL.CONTROL_VARIAD...	Word	0	Good

Figura 8.3.17 Comunicación exitosa de nivel utilizando OPC KEPServerEx y el módulo S7-1200.

Fuente: Autor.

Una vez realizada la comunicación a continuación, se realiza la configuración del KEPServerEx dentro de Simulink.

- En la ventana de Simulink, seleccionar la librería OPC Toolbox, seleccionar los bloques OPC de configuración, de lectura y el bloque OPC de escritura como se muestra en la Figura 8.3.18; y finalmente añadir los bloques OPC en un nuevo modelo de Simulink.

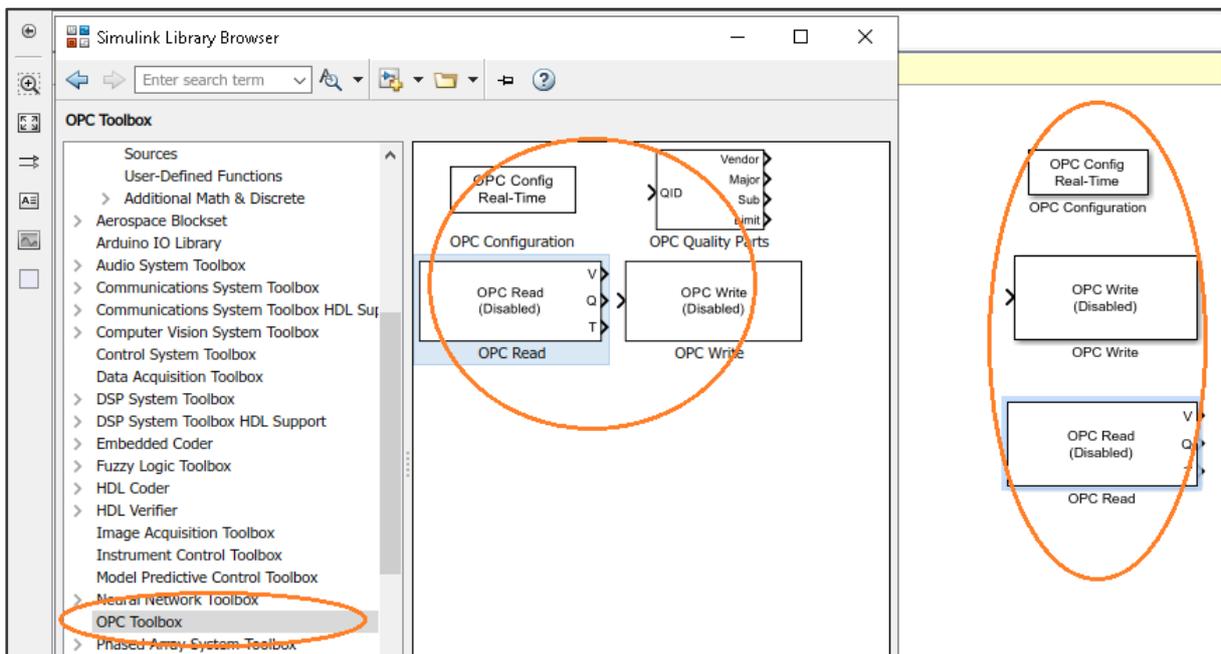


Figura 8.3.18 Bloques OPC dentro de Simulink

Fuente: Autor.

- Dentro del bloque OPC de configuración definir el cliente OPC utilizado, en este caso el programa KEPServerEx donde se realizan todas las comunicaciones, como se muestra en la Figura 8.3.19

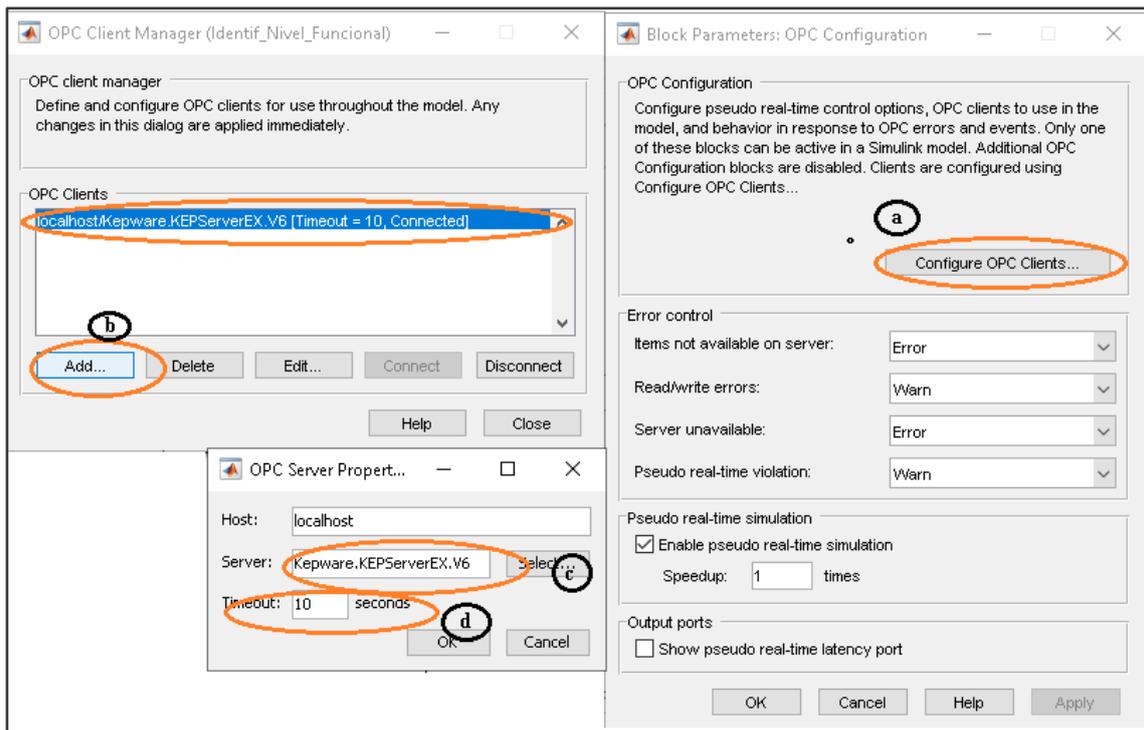


Figura 8.3.19 Bloque de configuración OPC

Fuente: Autor

Los para agregar los parámetros del bloque de configuración OPC, se detallan a continuación.

- a) Seleccionar Configure OPC Clients.
- b) En la venta OPC Client Manager, seleccionar add.
- c) Seleccionar el servidor KEPServerEx, generado por el mismo programa.
- d) Seleccionar OK en cada una de las ventanas abiertas.

19. Dentro del bloque OPC de lectura añadir la variable a controlar (Nivel), sensor conectado al módulo de nivel, como se muestra en la Figura 8.3.20.

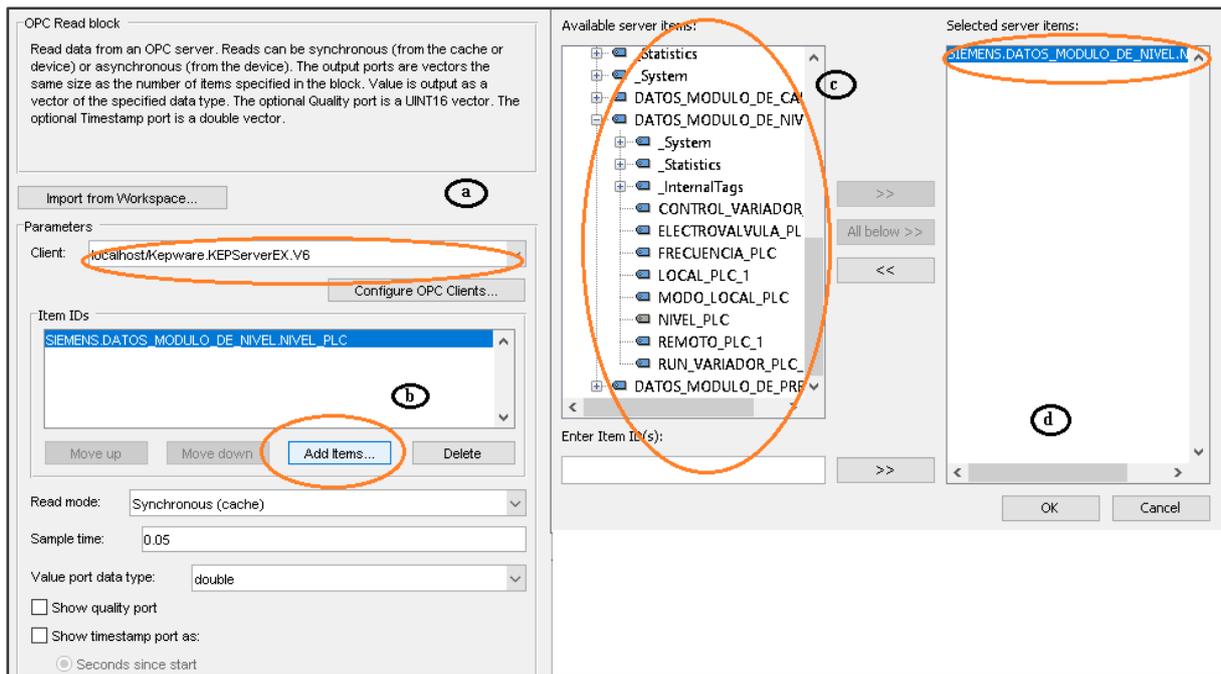


Figura 8.3.20 Configuración del Bloque OPC de Lectura.

Fuente: Autor.

Los pasos para agregar los parámetros del bloque de lectura OPC, se detallan a continuación.

- a) Seleccionar Configure OPC Clients y se realiza la configuración de acuerdo a los literales b, c y d, del paso 12.
- b) Seleccionar Add Items.
- c) Agregar los Items que se utilizan como variables de lectura
- d) Seleccionar OK y poner el "Sample time" a 0.05ms.

20. Finalmente, dentro del bloque OPC de escritura añadir las variables con referencia a actuadores conectados al módulo de nivel como se observa en la Figura 8.3.21.

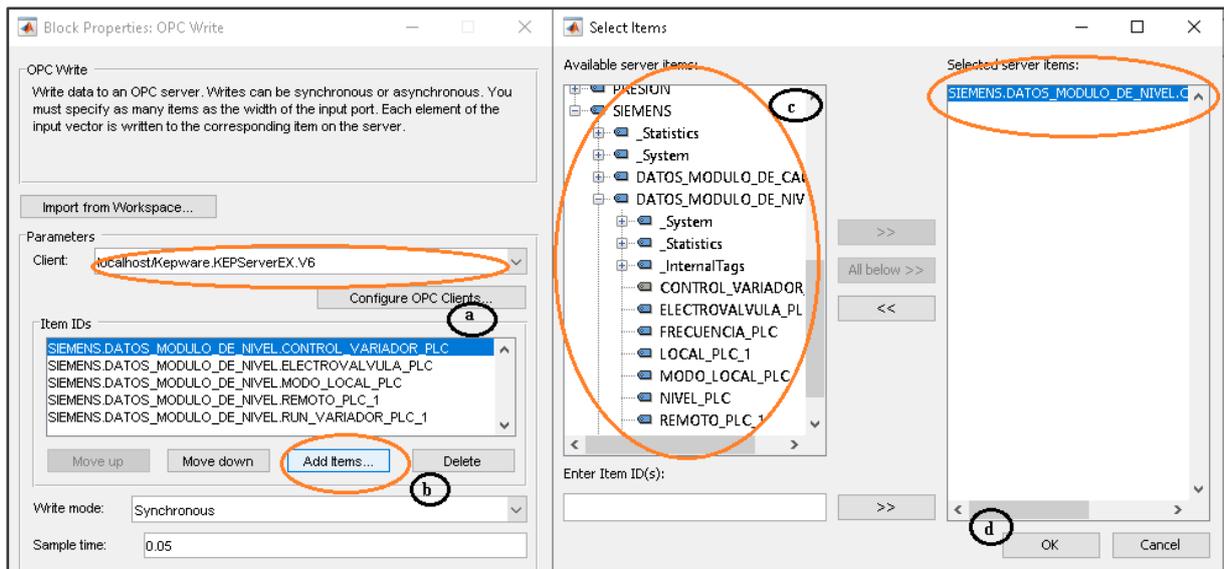


Figura 8.3.21 Configuración del Bloque OPC de escritura

Fuente: Autor

Los pasos para agregar los parámetros del bloque de lectura OPC, se detallan a continuación.

- a) Seleccionar Configure OPC Clients y se realiza la configuración de acuerdo a los literales b, c y d, del paso 12.
- b) Seleccionar Add Items.
- c) Agregar los Items que se utilizan como variables de escritura.
- d) Seleccionar OK y poner el "Sample time" a 0.05ms.

Práctica 4

4.1 Tema: Comunicación del Módulo de presión mediante KEPServerEx y Matlab - Simulink.

4.2 Objetivo general

Configurar los parámetros de comunicación OPC en Matlab-Simulink mediante las variables del módulo de presión en KEPServerEX.

4.3 Objetivos específicos:

- Relacionar al estudiante con la comunicación OCP de KEPServerEx y Matlab-Simulink.
- Crear la comunicación para el módulo presión mediante KEPServer Ex y Matlab Simulink.

4.4 Introducción

KEPServerEX es un software que permite realizar comunicaciones OPC de distintas marcas de PLCs, transfiriendo o adquiriendo datos de un microcontrolador a otro, mientras que Matlab- Simulink es un programa que permite realizar cálculos técnicos, mediante representaciones matemáticas y gráficas de estas, además que a través de este software se puede comunicar diversos programas y tarjetas de comunicación de datos

En esta práctica se realiza la configuración de las variables del módulo de presión para tener una comunicación entre KEEPServer EX y Matlab-Simulink.

4.5 Equipos y materiales

- Computador
- PLC Siemens S7-1200 y PLC Allen Bradley del módulo de presión.
- Software KEEPServerEX
- Software Matlab-Simulink
- Módulo de presión

4.6 Desarrollo

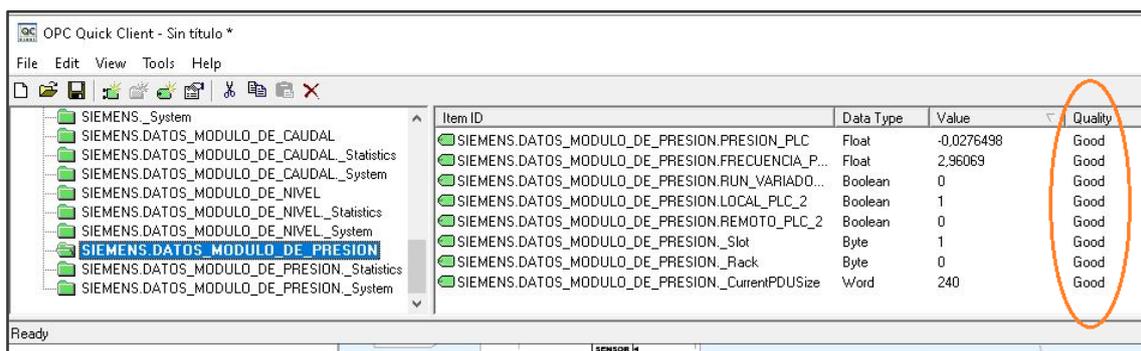
Para el desarrollo de esta práctica se realiza la asociación de las variables mediante una configuración de cliente y servidor en KEPServerEX para controlar al módulo de presión mediante el PLC Siemens S7-1200 y Matlab-Simulink, para ello se siguen los pasos 1 al 16 de la práctica 3, en la cual se obtienen las variables de comunicación de este módulo como se muestra en Tabla 8.4.1. Además, se debe señalar que la dirección IP de este módulo es “192.168.111.10”.

TABLA 8.4.1 VARIABLES DEL MÓDULO DE PRESIÓN

MÓDULO DE PRESIÓN	VARIABLES
	RUN_VARIADOR_PLC2
	REMOTO_PLC2
	LOCAL_PLC2
	PRESION_PLC
	FRECUENCIA_PLC2

Fuente: Autor.

Además, se verifica que las comunicaciones se estén en estado “Good” para asegurar que la comunicación realizada fue un éxito. En la Figura 8.4.1 se muestra la comunicación exitosa del módulo de presión mediante KEPServerEx y el módulo Siemens S7-1200 como tarjeta de adquisición y envío de datos.



Item ID	Data Type	Value	Quality
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.PRESION_PLC	Float	-0.0276498	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.FRECUENCIA_P...	Float	2.96069	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.RUN_VARIADO...	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.LOCAL_PLC_2	Boolean	1	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION.REMOTO_PLC_2	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION_Slot	Byte	1	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION_Rack	Byte	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_PRESION_CurrentPDUSize	Word	240	Good

Figura 8.4.1 Comunicación exitosa de presión utilizando OPC KEPServerEx y el módulo S7-1200.

Fuente: Autor.

Una vez realizadas las comunicaciones necesarias, se realiza la configuración de KEPServerEx en el OPC de Simulink.

1. En la ventana de Simulink, seleccionar la librería OPC Toolbox, seleccionar los bloques OPC de configuración, de lectura y el bloque OPC de escritura como se muestra en la Figura 8.4.2; y finalmente añadir los bloques OPC en un nuevo modelo de Simulink.

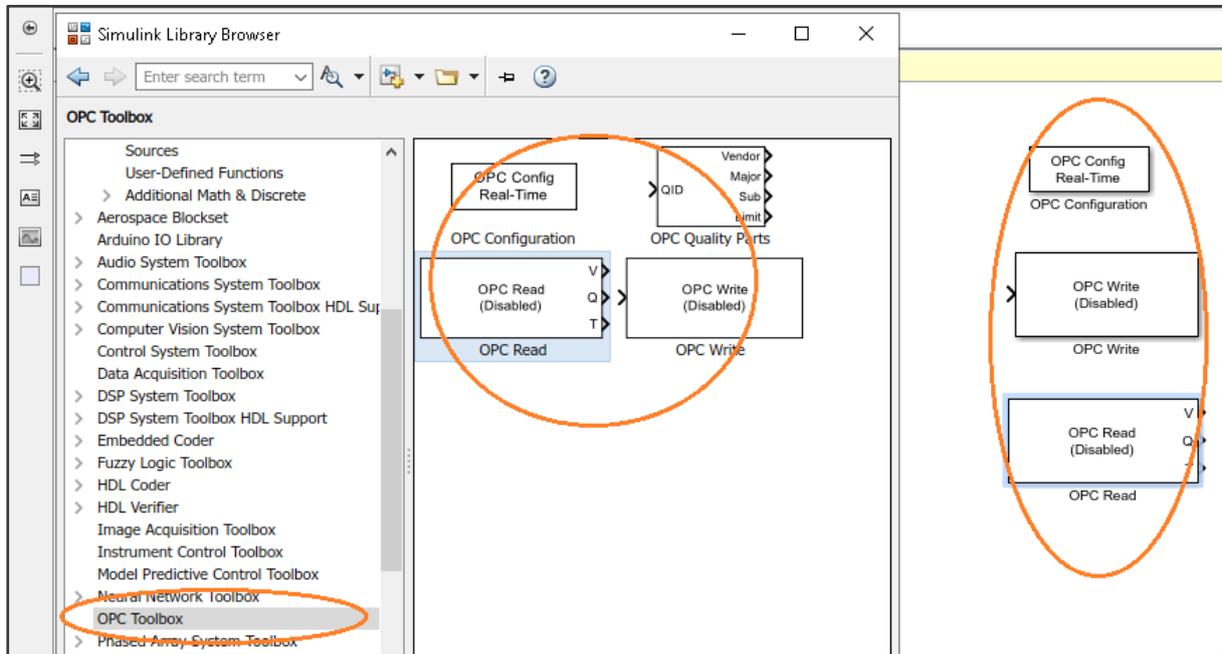


Figura 8.4.2 Bloques OPC dentro de Simulink

Fuente: Autor.

2. Dentro del bloque OPC de configuración definir el cliente OPC utilizado, en este caso el programa KEPServerEx donde se realizan todas las comunicaciones, como se muestra en la Figura 8.4.3.

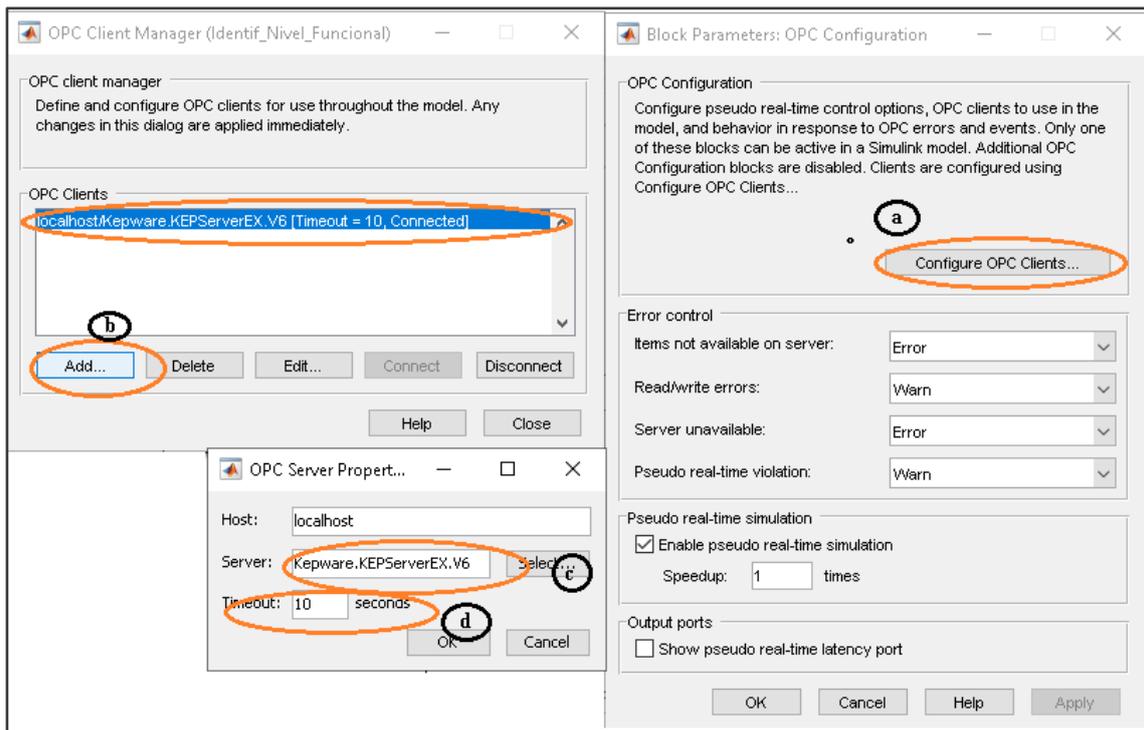


Figura 8.4.3 Bloque de configuración OPC

Fuente: Autor

Los para agregar los parámetros del bloque de configuración OPC, se detallan a continuación.

- a) Seleccionar Configure OPC Clients.
 - b) En la venta OPC Client Manager, seleccionar add.
 - c) Seleccionar el servidor KEPServerEx, generado por el mismo programa.
 - d) Seleccionar OK en cada una de las ventanas abiertas.
3. Dentro del bloque OPC de lectura añadir la variable a controlar (presión), sensor conectado al módulo de presión, como se muestra en la Figura 8.4.4.

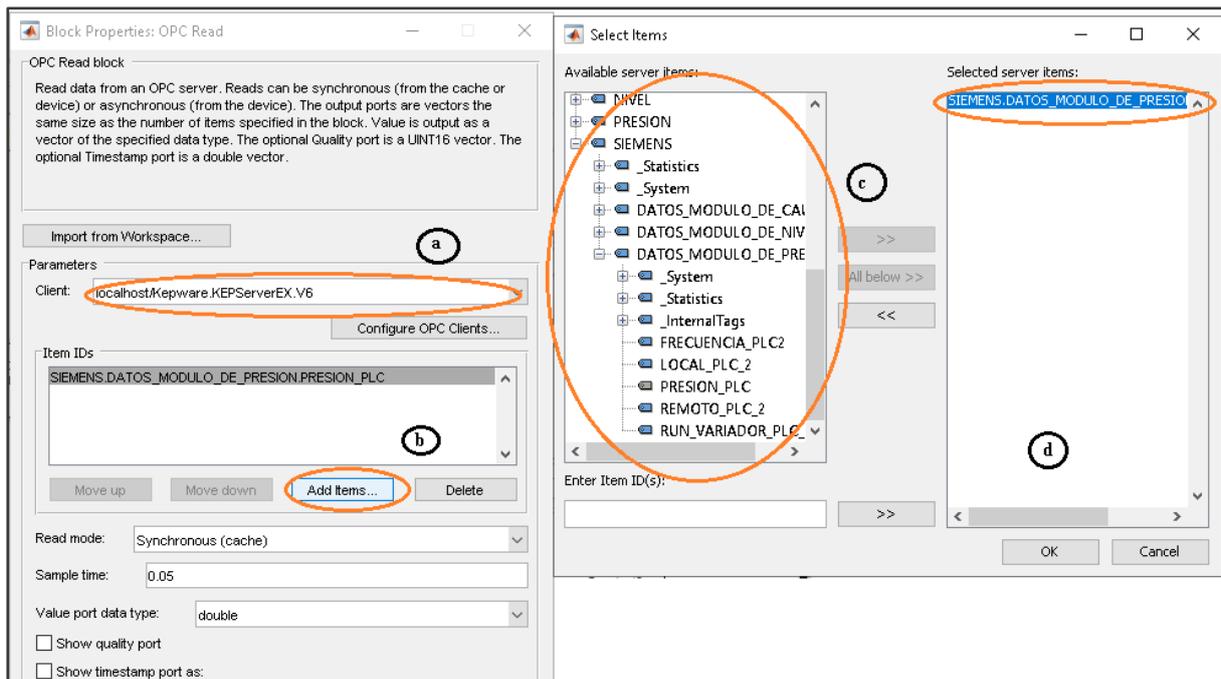


Figura 8.4.4 Configuración del Bloque OPC de Lectura.

Fuente: Autor.

Los pasos para agregar los parámetros del bloque de lectura OPC, se detallan a continuación.

- a) Seleccionar Configure OPC Clients y se realiza la configuración de acuerdo a los literales b, c y d, del paso 2.
 - b) Seleccionar Add Items.
 - c) Agregar los Items que se utilizan como variables de lectura
 - d) Seleccionar OK y poner el "Sample time" a 0.05ms.
4. Finalmente, dentro del bloque OPC de escritura añadir las variables con referencia a actuadores conectados al módulo de nivel como se observa en la Figura 8.4.5.

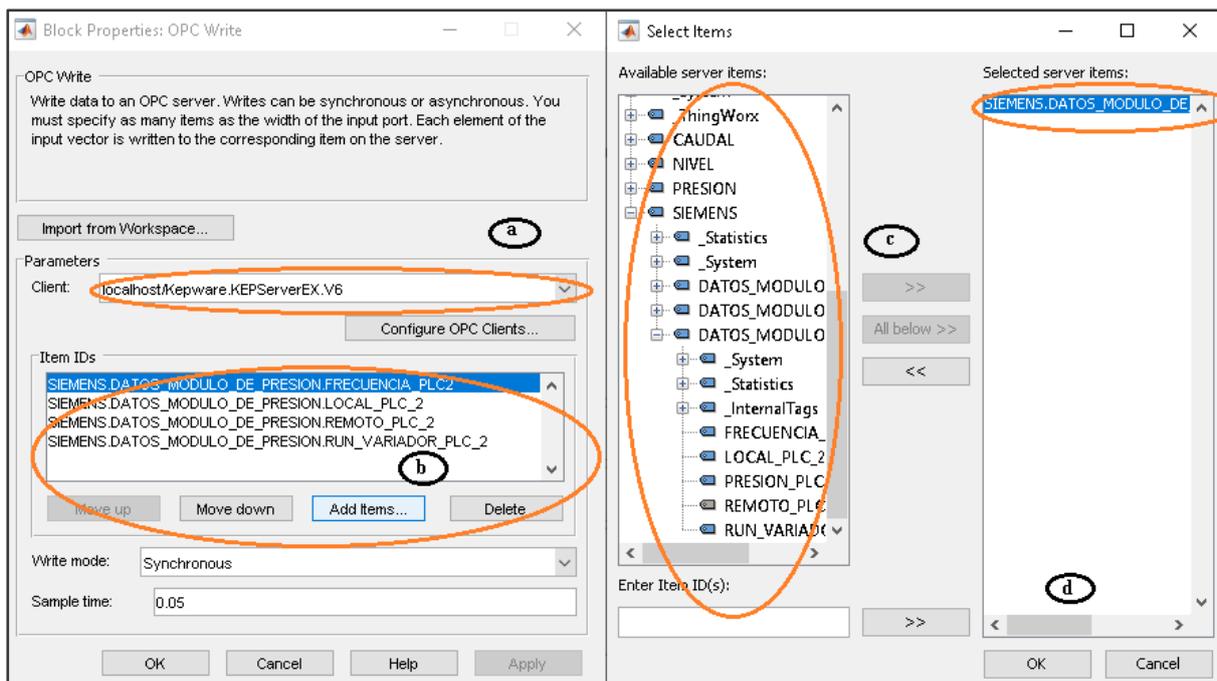


Figura 8.4.5 Configuración del Bloque OPC de escritura.

Fuente: Autor.

Los pasos para agregar los parámetros del bloque de lectura OPC, se detallan a continuación.

- a) Seleccionar Configure OPC Clients y se realiza la configuración de acuerdo a los literales b, c y d, del paso 12.
- b) Seleccionar Add Items.
- c) Agregar los Items que se utilizan como variables de escritura.
- d) Seleccionar OK y poner el "Sample time" a 0.05ms.

Práctica 5

5.1 Tema: Comunicación del Módulo de Caudal mediante KEPServerEx y Matlab-Simulink.

5.2 Objetivo general

Configurar los parámetros de comunicación OPC en Matlab-Simulink mediante las variables del módulo de caudal en KEPServerEX.

5.3 Objetivos específicos:

- Relacionar al estudiante con la comunicación OCP de KEPServerEx y Matlab-Simulink.
- Crear la comunicación para el módulo de caudal mediante KEPServer Ex y Matlab Simulink.

5.4 Introducción

KEPServerEX es un software que permite realizar comunicaciones OPC de distintas marcas de PLCs, transfiriendo o adquiriendo datos de un microcontrolador a otro, mientras que Matlab- Simulink es un programa que permite realizar cálculos técnicos, mediante representaciones matemáticas y gráficas de estas, además que a través de este software se puede comunicar diversos programas y tarjetas de comunicación de datos

En esta práctica se realiza la configuración de las variables del módulo de caudal para tener una comunicación entre KEEPServer EX y Matlab-Simulink.

5.5 Equipos y materiales

- Computador
- PLC Siemens S7-1200 y PLC Allen Bradley del módulo de caudal.
- Software KEEPServerEX
- Software Matlab-Simulink
- Módulo de caudal

5.6 Desarrollo

Para el desarrollo de esta práctica se realiza la asociación de las variables mediante una configuración de cliente y servidor en KEPServerEX para controlar al módulo de presión mediante el PLC Siemens S7-1200 y Matlab-Simulink, para ello se siguen los pasos 1 al 16 de la práctica 3, en la cual se configuran las variables de comunicación de este módulo como se muestra en Tabla 8.5.1. Además, se debe señalar que la dirección IP de este módulo es “192.168.111.20”.

TABLA 8.5.1 VARIABLES DEL MÓDULO DE PRESIÓN

MÓDULO DE CAUDAL	VARIABLES
	RUN_VARIADOR_PLC
	REMOTO_PLC
	LOCAL_HMI_PLC
	LOCAL_PLC
	SER_POINT_PLC
	CAUDAL_MC_PLC

Fuente: Autor.

Además, se verifica que las comunicaciones se estén en estado “Good” para asegurar que la comunicación realizada fue un éxito. En la Figura 8.5.1 se muestra la comunicación exitosa del módulo de presión mediante KEPServerEx y el módulo Siemens S7-1200 como tarjeta de adquisición y envío de datos.

Item ID	Data Type	Value	Quality
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.SER_POINT_PLC	Word	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.RUN_VARIADOR...	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.REMOTO_PLC	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.LOCAL_PLC	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.LOCAL_HMI_PLC	Boolean	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL.CAUDAL_MC_PLC	Float	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL_Slot	Byte	1	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL_Rack	Byte	0	Good
SIEMENS.DATOS_MODULO_DE_CAUDAL_CurrentPDUSize	Word	240	Good

Figura 8.5.1 Comunicación exitosa de caudal utilizando OPC KEPServerEx y el módulo S7-1200.

Fuente: Autor.

Una vez realizadas las comunicaciones necesarias, se realiza la configuración de KEPServerEx en el OPC de Simulink.

1. En la ventana de Simulink, seleccionar la librería OPC Toolbox, seleccionar los bloques OPC de configuración, de lectura y el bloque OPC de escritura como se muestra en la Figura 8.5.2; y finalmente añadir los bloques OPC en un nuevo modelo de Simulink.

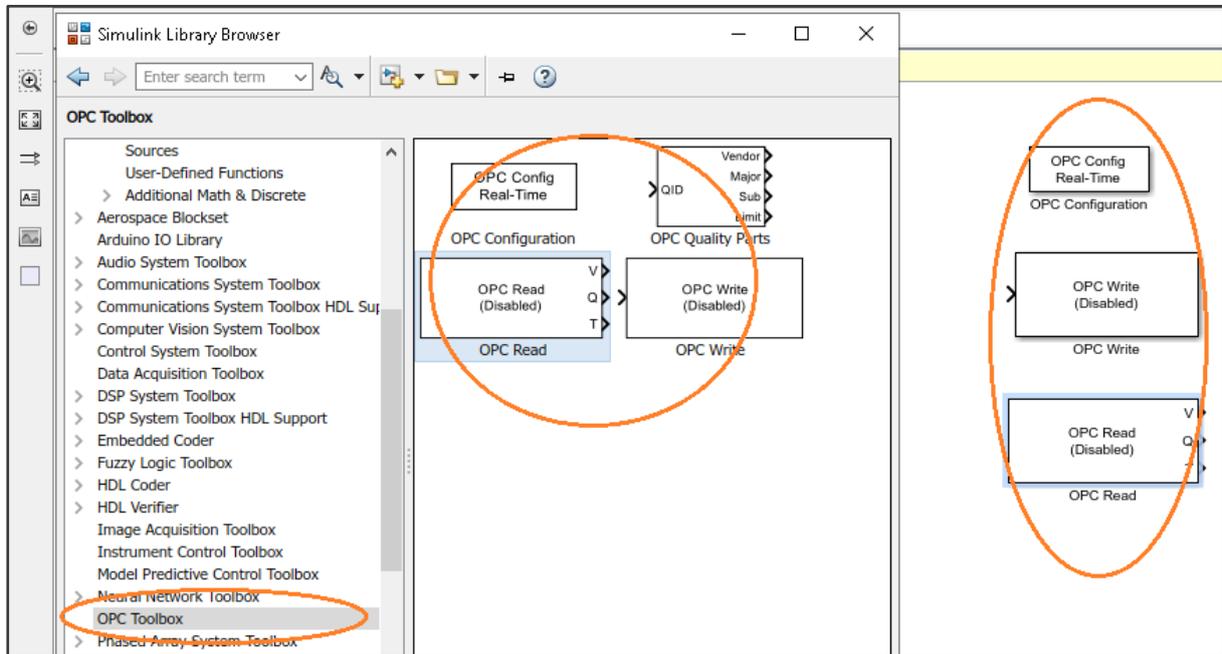


Figura 8.5.2 Bloques OPC dentro de Simulink

Fuente: Autor.

2. Dentro del bloque OPC de configuración definir el cliente OPC utilizado, en este caso el programa KEPServerEx donde se realizan todas las comunicaciones, como se muestra en la Figura 8.5.3.

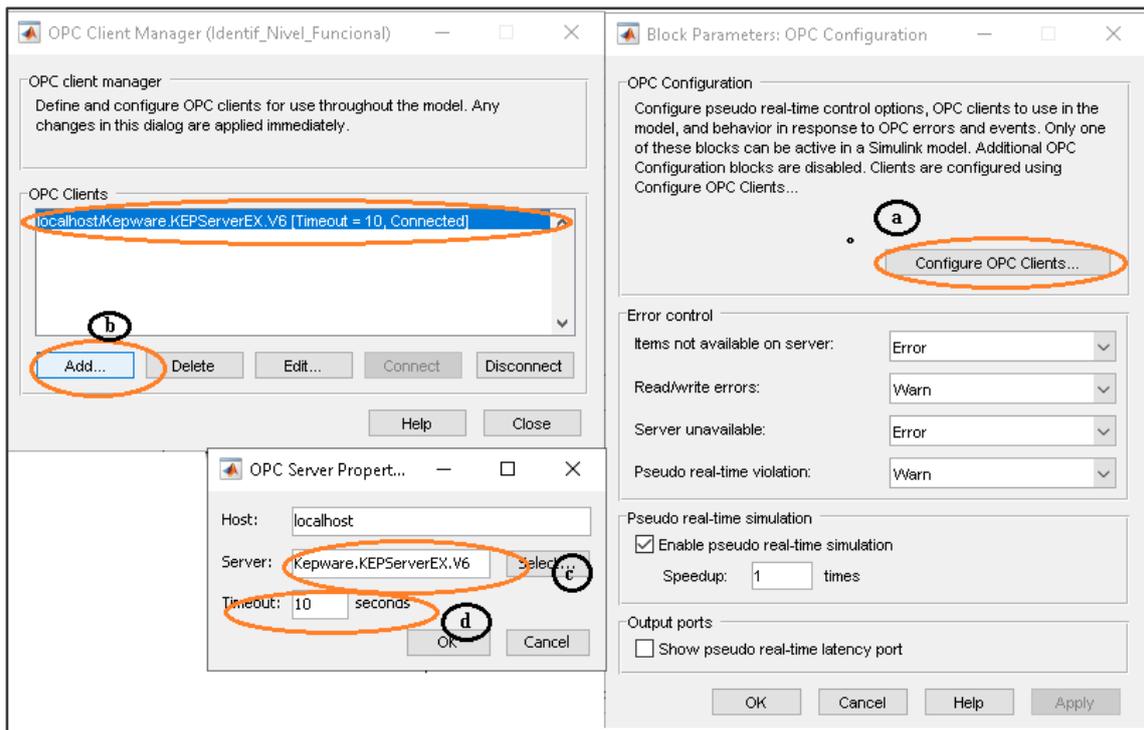


Figura 8.5.3 Bloque de configuración OPC

Fuente: Autor

Los para agregar los parámetros del bloque de configuración OPC, se detallan a continuación.

- e) Seleccionar Configure OPC Clients.
- f) En la venta OPC Client Manager, seleccionar add.
- g) Seleccionar el servidor KEPServerEx, generado por el mismo programa.
- h) Seleccionar OK en cada una de las ventanas abiertas.

3. Dentro del bloque OPC de lectura añadir la variable a controlar (caudal), sensor conectado al módulo de caudal, como se muestra en la Figura 8.5.4.

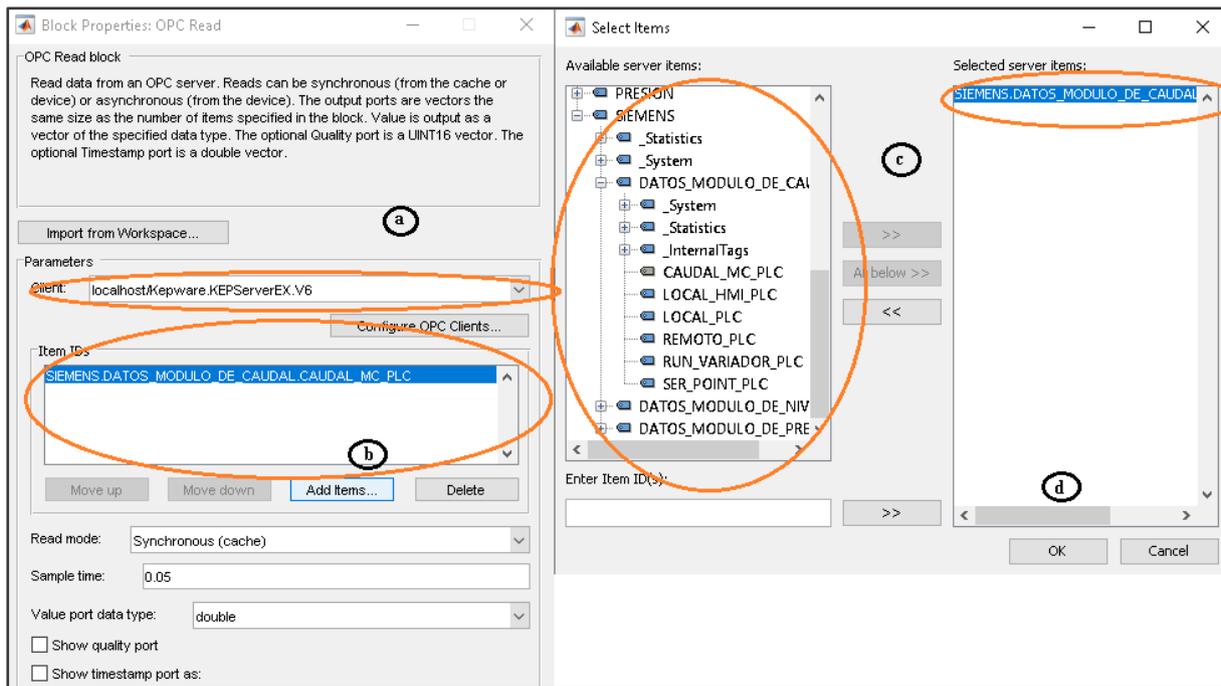


Figura 8.5.4 Configuración del Bloque OPC de Lectura.

Fuente: Autor.

Los pasos para agregar los parámetros del bloque de lectura OPC, se detallan a continuación.

- e) Seleccionar Configure OPC Clients y se realiza la configuración de acuerdo a los literales b, c y d, del paso 2.
- f) Seleccionar Add Items.
- g) Agregar los Items que se utilizan como variables de lectura
- h) Seleccionar OK y poner el "Sample time" a 0.05ms.

4. Finalmente, dentro del bloque OPC de escritura añadir las variables con referencia a actuadores conectados al módulo de nivel como se observa en la Figura 8.5.5.

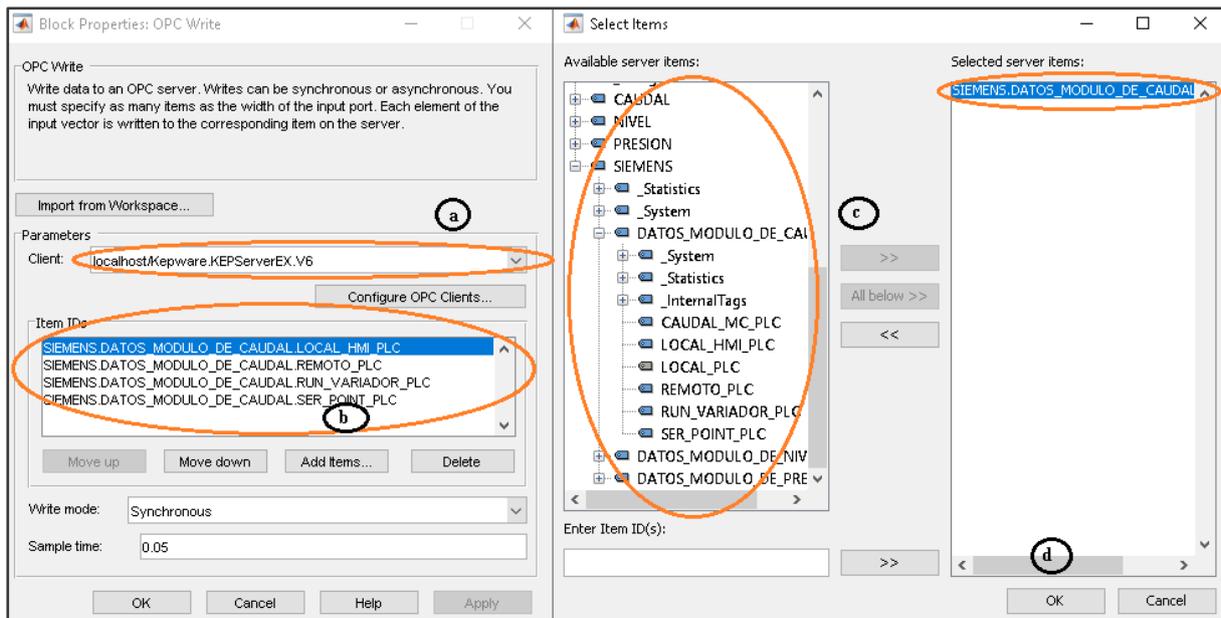


Figura 8.5.5 Configuración del Bloque OPC de escritura.

Fuente: Autor.

Los pasos para agregar los parámetros del bloque de lectura OPC, se detallan a continuación.

- e) Seleccionar Configure OPC Clients y se realiza la configuración de acuerdo a los literales b, c y d, del paso 12.
- f) Seleccionar Add Items.
- g) Agregar los Items que se utilizan como variables de escritura.
- h) Seleccionar OK y poner el "Sample time" a 0.05ms.

Práctica 6

6.1 Tema: Identificación no paramétrica de sistemas mediante Simulink.

6.2 Objetivo general

Realizar la identificación de sistemas no paramétricos a las plantas de nivel, presión y caudal utilizando Simulink.

6.3 Objetivos específicos:

- Relacionar al estudiante con la identificación de sistemas no paramétricos aplicados a sistemas dinámicos reales.
- Crear una interfaz de visualización gráfica del comportamiento de las señales de control deseadas.

6.4 Introducción

La identificación de sistemas no paramétricos, opera mediante funciones y curvas que pueden utilizarse en una aplicación de análisis de señal. Este método de identificación se relaciona con el análisis de correlación y el análisis espectral. El primer análisis aproxima la respuesta del sistema como una entrada idéntica a una señal tipo escalón, mientras que el análisis espectral aproxima la respuesta en el dominio de la frecuencia.

Matlab- Simulink es un programa que permite realizar cálculos técnicos, mediante representaciones matemáticas y gráficas de estas, además que a través de este software se puede comunicar diversos programas y tarjetas de comunicación de datos

En esta práctica se realiza la configuración de las variables utilizadas en Simulink y la Interfaz gráfica creada para analizar el comportamiento de las señales deseadas.

6.5 Equipos y materiales

- Computador
- Variables del módulo de caudal.
- Software Matlab-Simulink

6.6 Desarrollo

Para el desarrollo de esta práctica, primero se realiza una interfaz gráfica en donde se encuentre las variables de activación de los equipos en los módulos de nivel, presión o caudal, además, de las variables de proceso que se desea manipular.

1. Primero, en el programa Matlab abrir la carpeta “Programas Matlab”, después seleccionar la carpeta “SIEMENS_OPC-MATLAB_CONTROLADORES_FUNCIONALES” y en la carpeta “identificación de sistemas” se despliega tres archivos correspondientes a la identificación de sistemas para nivel, presión y caudal como se muestra en la Figura 8.6.1.

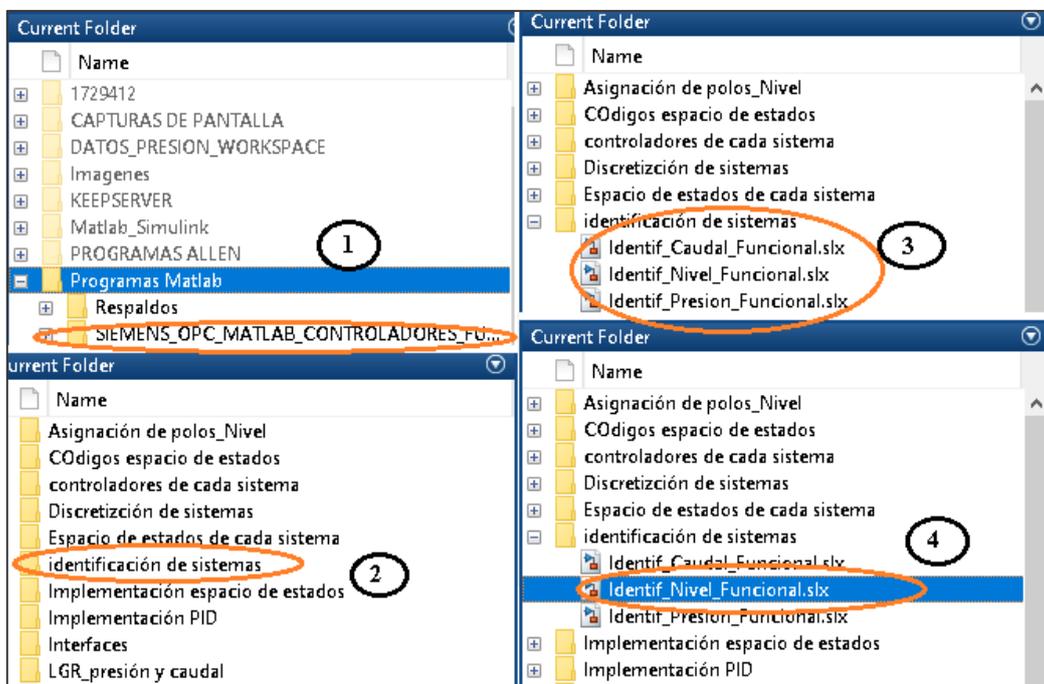


Figura 8.6.1 Pasos para abrir los archivos correspondientes a la identificar sistemas.

Fuente: Autor.

2. Posteriormente se elige cualquiera de las tres interfaces en Simulink, y se realiza la identificación del sistema mediante el método de la pendiente, descrito en el Capítulo II. Para esta práctica seleccionaremos para la planta de nivel. En la Figura 8.6.2 se muestra la interfaz gráfica para interactuar con las variables del módulo de nivel, que, una vez configuradas las comunicaciones se realiza la activación de los equipos para visualizar el comportamiento de la variable de nivel en lazo abierto.

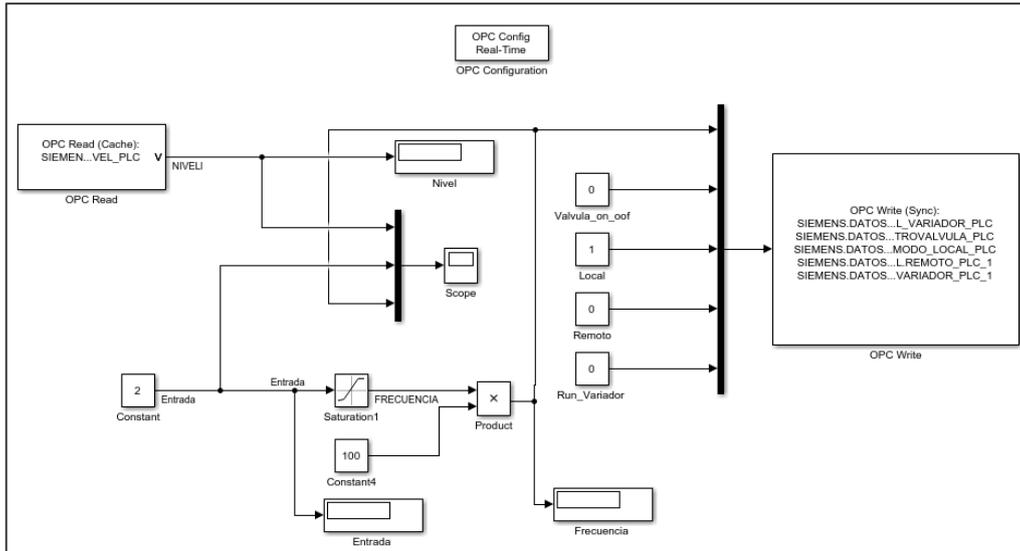
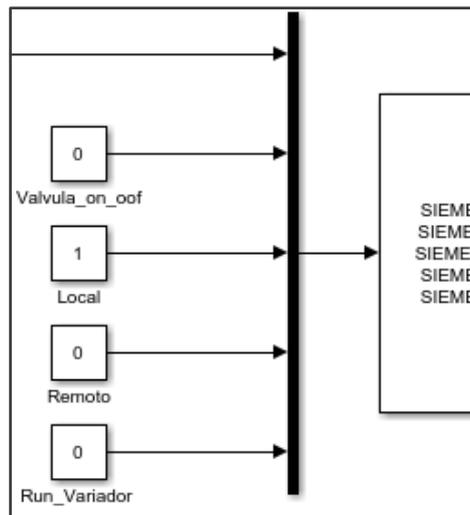


Figura 8.6.2 Algoritmo para la variable de nivel en lazo abierto

Fuente: Autor.

A continuación, se realizan los pasos para poner en activación los equipos y someter al sistema con señales de prueba.

- Se realiza la activación de los equipos mediante las constantes conectadas al OPC "Write". La constante "Local" debe mantenerse en estado 1, mientras que la constante "Remoto" debe mantenerse en 0 antes de correr el programa. Se corre el programa y las constantes "Válvula_On_Off y Run_Variador" deben ser encendidas por el usuario para la activación de los equipos físicos en la planta de nivel como se muestra en la Figura 8.6.3



8.6.3 Activación de los equipos físicos de la planta de nivel.

Fuente: Autor.

4. Una vez activados los equipos físicos, se procede a enviar señales de frecuencia aleatorias mediante la constante "Constant", estas señales pueden ser de 0 a 30 Hz, como se indica en la Figura 8.6.4.

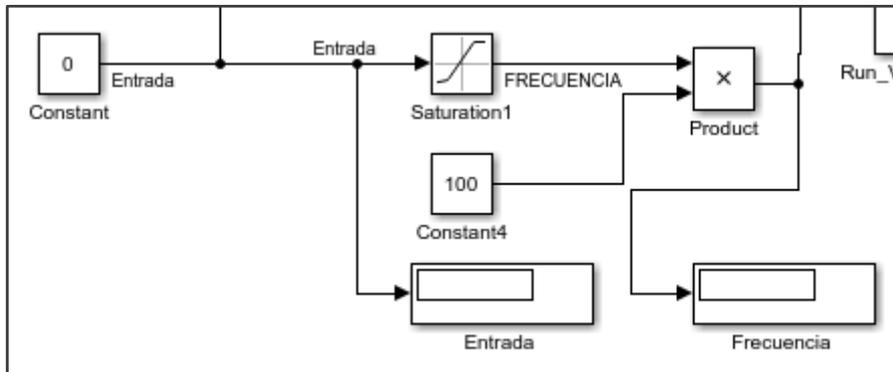


Figura 8.6.4 Constante para enviar señales de frecuencia.

Fuente: Autor.

Finalmente, abrir el osciloscopio y analizar la señal de nivel tras los cambios de frecuencia como se muestra en la Figura 8.6.5.

Analizar los datos y sacar la función de transferencia representativa de la planta de nivel.

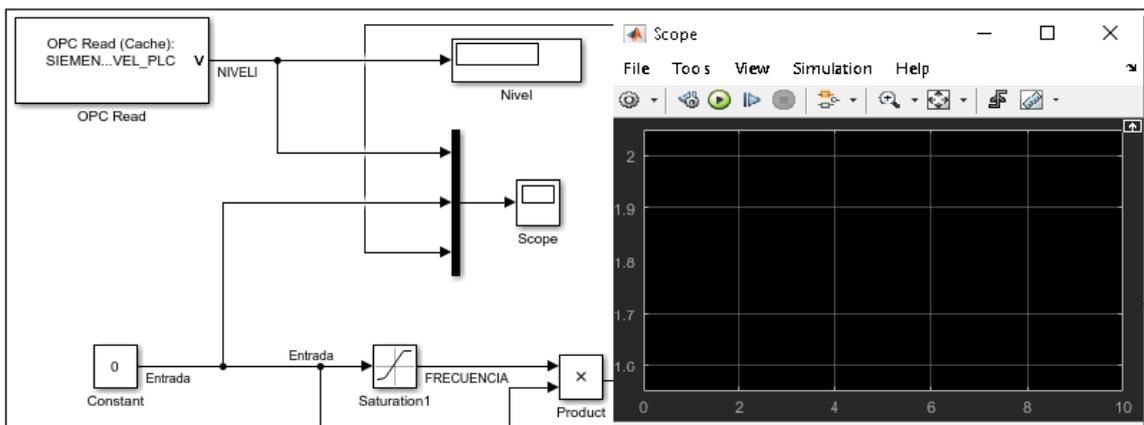


Figura 8.6.5 Ventana del osciloscopio para mostrar las señales de nivel y frecuencia.

Fuente: Autor.

A continuación, en la Tabla 8.6.1 se muestra el estado de las constantes en la interfaz de presión y caudal.

TABLA 8.6.1 ESTADOS DE LAS CONSTANTES EN LA INTERFAZ DE CAUDAL Y PRESIÓN

	Contantes	Antes de correr el programa.	Después de correr el programa
Interfaz de caudal	Local	Estado "1"	-
	Remoto	Estado "0"	-
	Run_variador	-	Estado "1"
	Frecuencia	-	Señales de frecuencia de 0Hz a 50Hz
Interfaz de presión	Constantes		
	Local	Estado "1"	-
	Remoto	Estado "0"	-
	Run_variador	-	Estado "1"
	Frecuencia	-	Señales de frecuencia de 0Hz a 60Hz

Fuente: Autor.

ANEXO 9

Mantenimiento para el módulo S7-1200

El presente manual de mantenimiento para el módulo didáctico S7-1200 trata sobre la importancia que debe tener el estudiante para realizar acciones correspondientes a la conservación de del funcionamiento del equipo y sus componentes a través de su mantenimiento, tiempos de mantenimiento y pasos como realizarlo.

A continuación, en la Figura 9.1 se presentan los diferentes tipos de mantenimientos:



Figura 9.1 Tipos de mantenimiento

Fuente: Autor



MANUAL DE MANTENIMIENTO PARA EL MÓDULO DIDÁCTICO PLC SIEMENS S7-1200 DEL LABORATORIO DE LA CARRERA DE ELÉCTRICIDAD (CIELE)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE (UTN)

Planificación Anual

Frecuencia del mantenimiento

	Equipo	Semanal	Fecha planificada	Mensual	Fecha planificada	Semestral
1	(PLC)	Limpieza usual. Revisión de terminales de conexión. Mantenimiento en pleno uso.	Viernes de cada semana.	Reajuste de bornes. Mantenimiento Preventivo.	Cada fin de mes	Mantenimiento Predictivo. Mantenimiento Correctivo.
2	ENTRADAS DIGITALES PLC	Limpieza usual Revisión de conexiones. Mantenimiento en pleno uso.	Viernes de cada semana.	Reajuste de borneras. Mantenimiento Preventivo.	Cada fin de mes	Mantenimiento Predictivo. Mantenimiento Correctivo.
3	ENTRADAS ANALÓGICAS	Limpieza usual. Revisión de conexiones. Mantenimiento en pleno uso	Viernes de cada semana.	Reajuste de borneras. Mantenimiento Preventivo.	Cada fin de mes	Mantenimiento Predictivo. Mantenimiento Correctivo.
4	BREAKERS a 4 A	Prueba de conexiones Prueba por sobre carga. Mantenimiento en pleno uso.	Viernes de cada semana.	Prueba de funcionamiento mecánico. Mantenimiento Preventivo.	Cada fin de mes	Mantenimiento Predictivo. Mantenimiento Correctivo.
	SALIDAS DIGITALES PLC	Limpieza usual. Revisión de borneras de conexión. Mantenimiento en pleno uso.	Viernes de cada semana.	Reajuste de borneras. Mantenimiento Preventivo.	Cada fin de mes	Mantenimiento Predictivo. Mantenimiento Correctivo.
5	FUENTE 24V	Limpieza usual. Revisión conexión a 24v. Mantenimiento en pleno uso.	Viernes de cada semana.	Reajuste de borneras. Mantenimiento Preventivo.	Cada fin de mes	Mantenimiento Predictivo. Mantenimiento Correctivo.
6	FUSIBLES 1ª	Prueba de conexiones Prueba por sobre carga. Mantenimiento en pleno uso.	Viernes de cada semana.	Prueba de funcionamiento. Mantenimiento Preventivo.	Cada fin de mes	Mantenimiento Predictivo. Mantenimiento Correctivo.
7	PUERTOS ETHERNET	Limpieza usual. Revisión conexión a 24v. Mantenimiento en pleno uso.	Viernes de cada semana.	Reajuste de borneras. Mantenimiento Preventivo.	Cada fin de mes	Mantenimiento Predictivo. Mantenimiento Correctivo.

ACTIVIDADES PARA LA EJECUCIÓN DEL MANTENIMIENTO AL MÓDULO DIDÁCTICO PLC S7-1200 SIEMENS

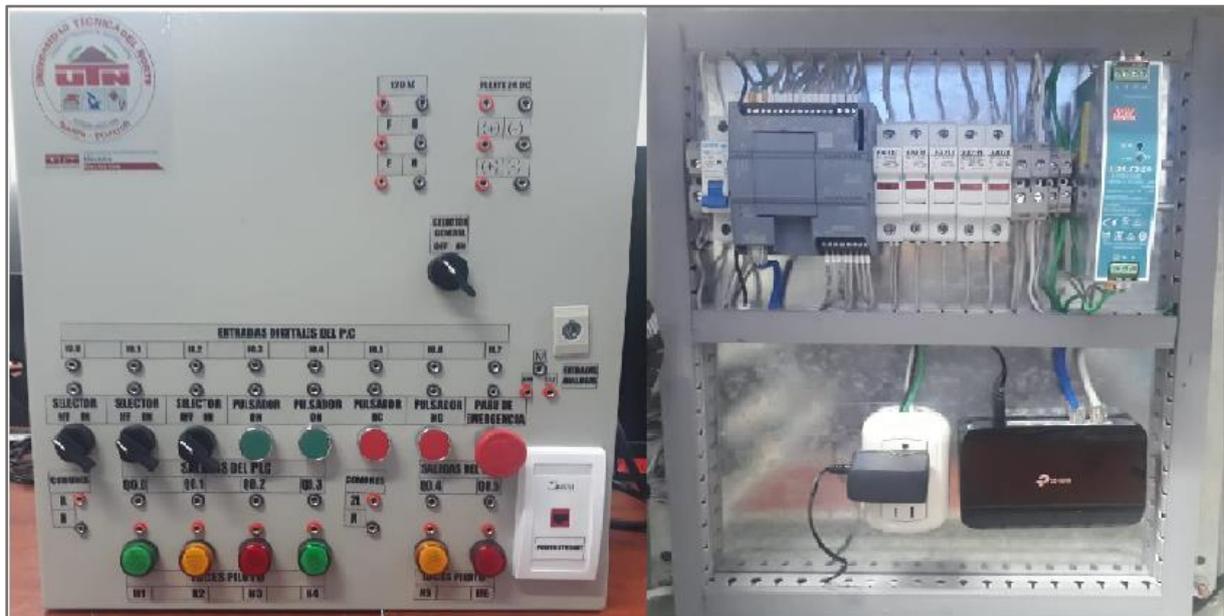


Figura 9.2 Estructura interna y externa del módulo PLC-S7-1200 SIEMENS

Fuente: Autor

Mantenimiento Preventivo Módulo didáctico PLC Siemens S7-1200:

- Limpiar el polvo que se encuentre en el módulo con una brocha, franela, Guaípe, etc.
- Limpiar las borneras de conexión en el módulo con una brocha, franela, soplete, etc.
- Verificar si los fusibles están abiertos con un multímetro.
- Validar el funcionamiento de selectores y pulsadores con un multímetro midiendo continuidad.

Mantenimiento Predictivo Módulo didáctico PLC Siemens S7-1200:

- Verificar si el módulo tiene alguna avería comprobando sus conexiones.
- Verificar si los bornes de conexión están dañados probando la continuidad con un multímetro en ellos.
- Verificar el deterioro de los fusibles.
- Verificar el deterioro de pulsadores y selectores con un multímetro.

Mantenimiento Correctivo Módulo didáctico PLC Siemens S7-1200:

- Si existe daño en las borneras de conexión en el módulo se debe realizar el cambio de estas.

- En caso de que los bornes de conexión estén cortocircuitados, realizar un cambio de bornes.
- Si los fusibles se encuentran abiertos realizar su cambio respectivo.
- Cuando los selectores y pulsadores no estén funcionando correctamente, realizar el cambio respectivo.