



**Implementación de un sistema de control anticipativo en la estación de nivel LabVolt
3503_M2 con un enfoque IOT, en el laboratorio de redes industriales y control de
procesos.**

Cordonez Arias, Jimmy Wilfrido y Morales Pérez, Jenyffer Stephany

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica
y Automatización

Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio

28 de agosto del 2023

Latacunga

Reporte de verificación de contenido



Tesis Cordones Morales.pdf

Scan details

Scan time:
August 25th, 2023 at 13:34 UTC

Total Pages:
82

Total Words:
20356

Plagiarism Detection

Types of plagiarism	Words
Identical	1.2% 252
Minor Changes	0.5% 111
Paraphrased	1.2% 250
Omitted Words	0% 0

3%

AI Content Detection

Text coverage

● AI text

○ Human text

N/A

🔍 Plagiarism Results: (47)

🌐 **Definicion de plc historia y tipos** 0.5%

<https://www.slideshare.net/documentosareas4/definicion-de...>

HomeExploreSubmit Search UploadLoginSignup Definicion de plc historia y tipos Report DocumentosAreas4Follow Mar. 26, 2016-0 ...

🌐 **15444.pdf** 0.5%

<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9814/1/15444...>

Ivan Velastegui;David Fernández de Córdova

UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Diseño e Implementación de la Arquitectura del I...

🌐 **PLC | PDF | Controlador lógico programable | Mem...** 0.4%

<https://www.scribd.com/presentation/324505157/plc>

Open navigation menu Close suggestionsSearchSearch enChange Languageclose menuLanguage English(selected) Español Português Deutsc...

Firma:

Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio

Director



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Implementación de un sistema de control anticipativo en la estación de Nivel Labvolt 3503_M2 con un enfoque IoT, en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos”** fue realizado por el señor **Cordonez Arias, Jimmy Wilfrido** y la señorita **Morales Pérez, Jenyffer Stephany**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 28 de agosto del 2023

Firma:

Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio

C.C.: 0502651003



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Cordonez Arias, Jimmy Wilfrido**, con cédula de ciudadanía n° 0503897977, y **Morales Pérez, Jenyffer Stephany** con cédula de ciudadanía n° 1850762616 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Implementación de un sistema de control anticipativo en la estación de Nivel Labvolt 3503_M2 con un enfoque IoT, en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 28 de agosto del 2023

Firma:

Cordonez Arias, Jimmy Wilfrido

C.C.: 0503897977

Morales Pérez, Jenyffer Stephany

C.C.: 1850762616



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Carrera de Ingeniería en Electrónica y Automatización

Autorización de Publicación

Nosotros, **Cordonez Arias, Jimmy Wilfrido**, con cédula de ciudadanía n° 0503897977, y **Morales Pérez Jenyffer Stephany** con cédula de ciudadanía n° 1850762616, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Implementación de un sistema de control anticipativo en la estación de Nivel Labvolt 3503_M2 con un enfoque IoT, en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 28 de agosto del 2023

Firma:

Cordonez Arias, Jimmy Wilfrido

C.C.: 0503897977

Morales Pérez, Jenyffer Stephany

C.C.: 1850762616

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a Dios por cuidarme a mí y a toda mi familia que con su apoyo pude conseguir este logro académico. A mi madre Consuelo Arias que ha sido un ejemplo que seguir, la motivación de cada día para ser una gran persona y le agradezco que por su apoyo incondicional he logrado alcanzar mis metas propuestas.

A mi padre Trajano Cordonez que gracias a su apoyo y aliento que me ha permitido desarrollar mi experiencia.

A mi hermano David, con quien he compartido momentos y experiencias durante este trayecto de mi vida.

A Jessica que con su apoyo y confianza me ha permitido crecer tanto personal como profesional.

De igual manera quiero dedicar a Kike, Jeny la Patrona, David, José, Juan, Andrés, Milton, Pantusin, Sumba y a todos mis amigos que he conocido en la Universidad, que desde el inicio hemos compartido varios momentos inolvidables y por todo su apoyo durante mis estudios.

Jimmy Wilfrido Cordonez Arias

Agradecimiento

Agradezco a Dios por toda su sabiduría brindada y darme su bendición.

Agradezco a mis padres por brindarme su apoyo, cariño y la oportunidad de prepararme para la vida; por la confianza que me brindaron me ha permitido cumplir una meta propuesta. A mi hermano y a toda mi familia por motivarme a seguir estudiando y guiarme en cada paso de mi desarrollo estudiantil.

Agradezco a mis docentes por sus conocimientos impartidos a lo largo de cada semestre (Ing. Meythaler, Ing. Pruna, Ing. Llanos, Ing. Bucheli, Ing. Rivas, Ing. Parreño).

Al Ing. Edwin Pruna, tutor del presente trabajo, por brindarnos su apoyo, amistad en todo el tiempo de desarrollo de la tesina.

Jimmy Wilfrido Cordonez Arias

Dedicatoria

El culmen de esta etapa se la dedico a mis padres, quienes sin miramiento alguno dedicaron gran parte de su vida en hacer esto posible. A mis queridos abuelos que me acompañan desde el cielo y desde este mundo terrenal. Este logro es para ustedes por brindarme la oportunidad de alcanzar un sueño tan anhelado.

A Dios y la Virgen María, ruego bendigan este triunfo.

Jenyffer Stephany Morales Pérez

Agradecimiento

Un agradecimiento profundo a mis padres, Nelson Olmedo Morales Pérez y Delia Margod Pérez Ortiz, por mostrarme que, aunque la vida se presente como un camino escabroso o hacedero, siempre se lo deberá atravesar con paciencia, perseverancia y coraje. A mi padre un eterno gracias por esas extensas e inolvidables conversaciones que me llenaron de fuerza en todo momento. A mi madre un Dios le pague por su constancia y acompañamiento en todas las etapas de mi vida, por su calidez y ejemplar fortaleza para atravesar la vida. A ustedes gracias y mil veces gracias por formar una buena persona, orgullosa del premio de la vida que Dios y la virgen María me han concedido y fiel creyente de que mi profesión deberá ser usada como una herramienta para alcanzar mis metas sin olvidar la humildad del alma.

A mis queridas hermanas, Cecilia y Jessica, gracias por estar a mi lado en todo momento, por las bonitas anécdotas de infancia y juventud, el constante apoyo a lo largo de mi vida y la infinita paciencia. Gracias también a las selectas personas que formaron parte de esta etapa, dejando gratos recuerdos en la memoria e inolvidables vivencias.

Gracias a todos los docentes con quienes tuve la dicha de realizar toda mi preparación académica, en mi añorada escuela "Macará", Colegio Fiscomisional "Tirso de Molina", Unidad Educativa "Mayor Ambato", Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, quienes supieron compartir el conocimiento y la experiencia que me ha impulsado y seguirá haciéndolo a lo largo de mi vida. Un agradecimiento especial a mi querida licenciada Wilma Játiva por sus consejos y gran ejemplo de bondad; al Ing. Víctor Andaluz PhD. por crear el escenario idóneo para superarme de manera personal alcanzando cada uno de los retos impuesto; finalmente un efusivo agradecimiento a nuestro tutor de tesis, Ing Edwin Pruna Panchi por habernos instruido de manera tan loable, por el acompañamiento a lo largo del desarrollo de este trabajo y por brindarnos su grata amistad.

Jenyffer Stephany Morales Pérez

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Dedicatoria.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenido	10
Índice de figuras	14
Índice de tablas	19
Resumen.....	20
Abstract.....	21
Capítulo I: Introducción	22
Antecedentes	22
Planteamiento del problema y Justificación	23
Hipótesis	24
Objetivos	24
<i>Objetivo General</i>	24
<i>Objetivos específicos</i>	25
Capítulo II: Marco teórico.....	26
Control de procesos	26
Control Automático.....	27
Calderas acuotubulares o de tubos de agua.....	29
Control avanzado de procesos	30

<i>Control en cascada</i>	30
<i>Control Feedforward</i>	31
<i>Control Predictivo</i>	34
Estaciones de Lab-volt	35
<i>Estación de Nivel Labvolt 3503_M</i>	36
Tipos de Procesos Industriales.....	36
<i>Sistema autorregulado</i>	37
<i>Métodos de sintonización para procesos autorregulados</i>	38
Transmisor de caudal TUF 2000M.....	39
<i>Principio de funcionamiento del caudalímetro</i>	40
<i>Características del caudalímetro</i>	41
<i>Instalación del caudalímetro</i>	41
PLC.....	43
<i>Ventajas del PLC</i>	44
PLC S7-1200.....	44
Estrategias de control anticipativo en el PLC S7-1200	45
Sistema HMI-SCADA.....	47
Labview	48
OPC	49
IIOT en control de procesos	50
Módulo IOT 2040.....	51
Protocolo de comunicación MQTT	53
Node red	54
Plataforma IoT ThingsBoard.....	55
PuTTY	55
Capítulo III: Diseño de un controlador anticipativo de nivel en una caldera	56
Mantenimiento correctivo del transmisor de nivel	57
Instrumentación de transmisores de nivel y caudal.....	59

<i>Instalación de los transmisores de caudal</i>	59
<i>Configuración y calibración de los transmisores de caudal</i>	64
<i>Conexión eléctrica de los transmisores de caudal</i>	65
Identificación de la dinámica del proceso	66
<i>Proceso autorregulado caudal</i>	68
<i>Proceso autorregulado de nivel en lazo simple</i>	69
<i>Proceso autorregulado de nivel en cascada</i>	71
Diseño de controladores	73
<i>Controlador Proporcional Integral Derivativo PID</i>	73
<i>Controlador en Cascada</i>	73
<i>Controlador Anticipativo</i>	74
Sintonización de controladores	75
<i>Controlador Proporcional Integral Derivativo PID de caudal</i>	75
<i>Controlador Proporcional Integral Derivativo PID de nivel</i>	76
<i>Controlador en Cascada</i>	77
<i>Controlador Anticipativo</i>	77
Diseño del HMI.....	78
<i>Diagrama de Bloques</i>	79
<i>Pantalla de Inicio</i>	79
<i>Pantalla del proceso emulado en tiempo real</i>	80
<i>Pantalla de Históricos</i>	81
<i>Pantalla del Diagrama P&ID</i>	81
Implementación de la comunicación con la nube.....	82
<i>Instalación del módulo IoT en la Estación de Labvolt 3503_M2</i>	83
<i>Configuración de la imagen en el módulo IoT</i>	84
<i>Configuración de la dirección IP del módulo</i>	86
<i>Configuración de Node red con el módulo IoT</i>	88
<i>Configuración para acceder a los datos desde IoT2000 en protocolo S7</i> ...91	

<i>Creación de una base de datos</i>	91
<i>Activación del permiso de acceso del PLC</i>	93
<i>Configuración de las variables de interés en el módulo IoT</i>	94
<i>Desarrollo de un HMI (dashboard)</i>	99
<i>Creación de la cuenta ThingsBoard</i>	99
Creación del flujo en Node red de la comunicación MQTT	101
Implementación del HMI con los Widgets de ThingsBoard.....	105
Capítulo IV: Análisis de resultados	110
Repetibilidad en la estación de nivel.....	110
Respuesta de los controladores en el sistema de control de nivel.....	111
Respuesta en el sistema de control de nivel ante perturbaciones.....	114
Diagramas P&ID y HMI de la estación.	116
Evaluación de la comunicación del HMI local y remoto.	118
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones	120
Conclusiones.....	120
Recomendaciones	123
Bibliografía	124
Anexos	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Control en lazo abierto asistido por un operario</i>	26
Figura 2 <i>Control en lazo cerrado</i>	27
Figura 3 <i>Diagrama de bloques General de un Control Automático</i>	28
Figura 4 <i>Respuesta típica a un escalón unitario de un sistema de control</i>	28
Figura 5 <i>Calderas acuotubulares</i>	29
Figura 6 <i>Controlador en cascada</i>	31
Figura 7 <i>Controlador Feedforward</i>	32
Figura 8 <i>Configuración del controlador Feedforward</i>	32
Figura 9 <i>Controlador Feedforward, estructura</i>	33
Figura 10 <i>Controlador Predictivo MPC</i>	34
Figura 11 <i>Estación de nivel Lab-Volt 3503-M en funcionamiento</i>	36
Figura 12 <i>Sistemas según su respuesta</i>	37
Figura 13 <i>Respuesta dinámica de un proceso autorregulado</i>	37
Figura 14 <i>Método de sintonía para procesos autorregulados</i>	38
Figura 15 <i>Transmisor de caudal TUF 2000M y dos sondas ultrasónicas</i>	40
Figura 16 <i>Dirección de las ondas ultrasónicas desde el emisor hacia el receptor</i>	41
Figura 17 <i>Instalación de los sensores de caudal en la tubería</i>	42
Figura 18 <i>PLC SIEMENS</i>	43
Figura 19 <i>PLC S7-1200</i>	44
Figura 20 <i>Controlador Feedforward con retroalimentación</i>	45
Figura 21 <i>Controlador Feedforward con retroalimentación Derivativa</i>	46
Figura 22 <i>Controlador Feedforward con 3 elementos</i>	47
Figura 23 <i>Panel frontal de LabVIEW</i>	48
Figura 24 <i>Diagrama de bloques de LabVIEW</i>	49
Figura 25 <i>OPC en el software TOP Server 6</i>	49
Figura 26 <i>Estructura IIoT en procesos Industriales</i>	50
Figura 27 <i>Módulo SIMATIC IoT 2040</i>	51

Figura 28 <i>Vista superior del IoT 2040</i>	51
Figura 29 <i>Vista Frontal del IoT 2040</i>	52
Figura 30 <i>Vista inferior del IoT 2040</i>	52
Figura 31 <i>Ejemplo de conexión MQTT</i>	54
Figura 32 <i>Diagrama P&ID del control anticipativo de nivel</i>	57
Figura 33 <i>Configuración del Calibrador de procesos Fluke 754 Hart</i>	58
Figura 34 <i>a) Tuberías anteriores b) Tuberías remplazadas</i>	59
Figura 35 <i>Esquema de conexión de sondas</i>	60
Figura 36 <i>Diagrama de Conexión del transmisor ultrasónico TUF 2000M</i>	60
Figura 37 <i>Posiciones para la instalación de sensores ultrasónico</i>	61
Figura 38 <i>Método V para la instalación de las sondas</i>	62
Figura 39 <i>Colocación de gel acústico en el sensor ultrasónico de caudal</i>	62
Figura 40 <i>Instalación de sensores</i>	63
Figura 41 <i>Transmisor ultrasónico de nivel</i>	63
Figura 42 <i>Conexión de los transmisores al controlador (PLC)</i>	66
Figura 43 <i>HMI para obtener la dinámica del proceso</i>	67
Figura 44 <i>Diagrama a bloques para obtención de la dinámica de los procesos</i>	67
Figura 45 <i>Lazo abierto para el control de caudal</i>	68
Figura 46 <i>Evolución del caudal ante una acción de control</i>	68
Figura 47 <i>Identificación de la variable de proceso, caudal</i>	69
Figura 48 <i>Lazo abierto para el control de nivel</i>	70
Figura 49 <i>Evolución del nivel ante una acción de control</i>	70
Figura 50 <i>Identificación de la variable de proceso, nivel</i>	71
Figura 51 <i>Lazo abierto para el control de nivel en cascada</i>	71
Figura 52 <i>Evolución del nivel en cascada ante una acción de control</i>	72
Figura 53 <i>Identificación de la variable de proceso, nivel en cascada</i>	72
Figura 54 <i>Lazo cerrado para el control PID de nivel</i>	73
Figura 55 <i>Lazo cerrado para el control en cascada de nivel</i>	74

Figura 56 <i>Esquema de implementación del control Anticipativo</i>	75
Figura 57 <i>Selección de tag mediante el protocolo OPC</i>	78
Figura 58 <i>Diagrama de bloques del HMI</i>	79
Figura 59 <i>Pantalla de inicio del HMI</i>	80
Figura 60 <i>Emulación del proceso en tiempo real</i>	81
Figura 61 <i>Pantalla de históricos</i>	81
Figura 62 <i>Pantalla del diagrama P&ID</i>	82
Figura 63 <i>Red de comunicación entre el módulo IOT – PLC</i>	82
Figura 64 <i>Alimentación del módulo IOT 2040</i>	83
Figura 65 <i>Descomprimir la imagen para la tarjeta microSD del módulo IOT</i>	84
Figura 66 <i>Extraer la imagen para la tarjeta microSD</i>	84
Figura 67 <i>Abrir Win32 Disk Imager para iniciar la imagen en la microSD</i>	85
Figura 68 <i>Escritura de la imagen en la microSD</i>	85
Figura 69 <i>Insertar la microSD en el módulo IOT</i>	85
Figura 70 <i>Pasos para el cambio de la dirección IP Ordenador</i>	86
Figura 71 <i>Conexión vía PuTTY con el módulo IoT</i>	87
Figura 72 <i>Ventana de configuración IoT</i>	87
Figura 73 <i>Ventana de configuración IoT ingreso del usuario</i>	87
Figura 74 <i>Menú de configuración del módulo IoT 2000</i>	88
Figura 75 <i>Cambio de la IP del módulo IoT</i>	88
Figura 76 <i>Ejecución del software Node red en el módulo IoT 2000</i>	89
Figura 77 <i>Ejecución de Node-Red en el menú de comandos</i>	89
Figura 78 <i>Configuración para Autostart de node-RED en el módulo</i>	89
Figura 79 <i>Comprobación de la conexión a Internet del módulo IoT</i>	90
Figura 80 <i>Entorno de la aplicación node-RED</i>	90
Figura 81 <i>Instalación del nodo S7 para la comunicación con el PLC S7-1200</i>	91
Figura 82 <i>Creación de base datos en TIA Portal de las variables de interés</i>	92
Figura 83 <i>Base de datos con las variables de interés del controlador anticipativo</i>	92

Figura 84 <i>Desactivar el Acceso optimizado al bloque de la base de datos creada</i>	92
Figura 85 <i>Identificación de la dirección de cada variable</i>	93
Figura 86 <i>Activación de la conexión PUT/GET</i>	93
Figura 87 <i>Configuración del Nodo S7</i>	94
Figura 88 <i>Configuración de la pestaña de conexión del nodo S7 in</i>	95
Figura 89 <i>Variable de Nivel vinculada al nodo S7</i>	96
Figura 90 <i>Lectura de las variables de interés de la caldera</i>	96
Figura 91 <i>Acondicionamiento del dato con el Nodo Function para su lectura</i>	97
Figura 92 <i>Configuración del Nodo S7 out</i>	97
Figura 93 <i>Configuración de la pestaña de conexión del nodo S7 out</i>	98
Figura 94 <i>Vinculación de las variables de escritura al nodo S7 out</i>	98
Figura 95 <i>Estructura para la escritura de las variables de control</i>	99
Figura 96 <i>Pasos para crear una cuenta en ThingsBoard</i>	100
Figura 97 <i>Creación de un dispositivo nuevo en ThingsBoard</i>	100
Figura 98 <i>Datos informativos del nuevo dispositivo en ThingsBoard</i>	101
Figura 99 <i>Configuración del nodo MQTT OUT</i>	102
Figura 100 <i>Pestaña Connection del nodo MQTT OUT</i>	102
Figura 101 <i>Pestaña Security del nodo MQTT OUT</i>	103
Figura 102 <i>Ingreso del Tópico para cliente publicador</i>	103
Figura 103 <i>Configuración del nodo MQTT IN para cliente suscriptor</i>	104
Figura 104 <i>Flujo de nodos para la lectura y escritura por MQTT</i>	104
Figura 105 <i>Menú y características del dispositivo en ThingsBoard</i>	105
Figura 106 <i>Creación del panel y selección del Widget</i>	106
Figura 107 <i>Vinculación de la variable a un Widget de gráficas</i>	106
Figura 108 <i>Panel de Inicio en ThingsBoard</i>	107
Figura 109 <i>Panel Histórico en ThingsBoard</i>	107
Figura 110 <i>Panel HMI en ThingsBoard</i>	108
Figura 111 <i>Panel de control remoto en ThingsBoard</i>	108

Figura 112 <i>Enlace de acceso al dashboard implementado en ThingsBoard</i>	109
Figura 113 <i>Repetibilidad de la estación de nivel LabVolt 3503 M2</i>	111
Figura 114 <i>Respuesta de los controladores PID, cascada, anticipativo.....</i>	111
Figura 115 <i>Control en cascada en el lazo secundario para la variable de flujo.....</i>	112
Figura 116 <i>Control anticipativo en el lazo secundario para la variable de flujo.....</i>	113
Figura 117 <i>Señales del control de la variable nivel ante la perturbación de V-3.....</i>	114
Figura 118 <i>Control en cascada ante perturbación aplicado en el lazo secundario.....</i>	115
Figura 119 <i>Control anticipativo ante perturbación aplicado en el lazo secundario</i>	116
Figura 120 <i>Evolución de la simulación de la estación de nivel.....</i>	117
Figura 121 <i>Evolución de los históricos</i>	117
Figura 122 <i>Funcionamiento del diagrama P&ID de la estación de nivel.....</i>	118
Figura 123 <i>Históricos del HMI remoto</i>	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Método de sintonía Lambda Robusto y Agresivo</i>	39
Tabla 2 <i>Datos de la Tubería</i>	61
Tabla 3 <i>Rangos de calidad de las sondas del transmisor de caudal</i>	64
Tabla 4 <i>Configuración de los transmisores</i>	64
Tabla 5 <i>Parámetros de sintonía para un controlador anticipativo de nivel</i>	77
Tabla 6 <i>Equivalencia de las direcciones en el nodo S7</i>	95
Tabla 7 <i>Comparación de las estrategias de control para la variable nivel</i>	112
Tabla 8 <i>Comparación de las estrategias de control ante la perturbación de la V-3</i>	115

Resumen

El proyecto de investigación que se desarrolla en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos consiste en implementar un sistema de control anticipativo en la estación de Nivel Labvolt 3503_M2 con un enfoque IoT, que permite el envío de las variables de interés a la nube, proporcionando un controlador de buen desempeño con la finalidad de compensar las perturbaciones existentes del proceso las cuales serán monitoreadas y controladas de forma local y remota. En la instrumentación se implementan 2 transmisores de caudal, uno a la entrada y uno a la salida del sistema, así como también se verifica el funcionamiento del transmisor de nivel y se realizará el mantenimiento correctivo, con el fin de mejorar la repetitividad de este transmisor. Se diseña e implementa la estrategia de control anticipativo, para ello se realiza la medición de la variable principal (nivel) y las variables de perturbación (caudal de entrada y caudal de salida). Para el diseño e implementación del sistema de Control anticipativo, se utiliza un PLC en el cual se implementa esta técnica de control avanzado. Así también se realiza una comparación entre el control de nivel en lazo simple vs el control anticipativo de nivel, para verificar el control que mejor respuesta presente. Se diseña un HMI para el monitoreo y control de nivel en el software LabVIEW, que permite visualizar y controlar las variables de interés. Finalmente se realiza la implementación de una comunicación IoT que permita el envío de las variables de interés a la nube.

Palabras Clave: Mantenimiento correctivo, Control PID, Control Anticipativo, Nube de Industria 4.0 IoT, Nivel de un tanque.

Abstract

The research project developed in the Industrial Networks and Process Control Laboratory consists of implementing an anticipatory control system in the Labvolt 3503_M2 level station with an IoT approach, which allows sending the variables of interest to the cloud, providing a good performance controller in order to compensate the existing disturbances of the process which will be monitored and controlled locally and remotely. Two flow transmitters are implemented in the instrumentation, one at the inlet and one at the outlet of the system, as well as the operation of the level transmitter is verified and corrective maintenance will be performed, in order to improve the repeatability of this transmitter. The anticipatory control strategy is designed and implemented by measuring the main variable (level) and the disturbance variables (inflow and outflow). For the design and implementation of the anticipatory control system, a PLC is used to implement this advanced control technique. A comparison is also made between simple loop level control vs. anticipatory level control, to verify the control with the best response. An HMI is designed for level monitoring and control in LabVIEW software, which allows visualizing and controlling the variables of interest. Finally, an IoT communication is implemented to send the variables of interest to the cloud.

Keywords: Corrective maintenance, PID control, Anticipatory control, Industry 4.0 cloud IoT, Tank level.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

El estudio del control automático de procesos es fundamental debido que en la mayoría de las plantas existen cientos de variables las cuales deben mantenerse en un valor determinado, siendo necesario llevar a cabo el procedimiento para corregir desviaciones. El control automático mediante instrumentos permite el control de variables con la mínima supervisión del usuario. Tiene como objetivo utilizar la variable manipulada para mantener la variable controlada en el punto de operación deseado considerando perturbaciones externas e internas. El diseño del control automático utiliza componentes básicos como sensores, transmisores, controladores y actuadores o elementos de control final que permitan realizar las tres operaciones básicas, medición, decisión y acción, dentro de un sistema de control. Para implementar un control automático primero se debe conocer el proceso.

El control automático no toma en cuenta la dinámica del proceso, el principal controlador utilizado es el control PID que es muy eficiente, pero si existe cambios importantes en la dinámica del proceso aparecen inestabilidades. Teniendo en cuenta que todos los procesos son dinámicos por naturaleza, es decir en ellos siempre ocurren cambios, esto implica un cambio importante en las variables controladas afectando así a la seguridad de la planta, la calidad del producto o a su vez a los índices de producción, esto se puede solucionar implementando un control avanzado que compense aquellas perturbaciones externas.

Con el avance en las técnicas de control aparece el control avanzado que es un conjunto de técnicas y herramientas que permite obtener una respuesta automática a las condiciones cambiantes del proceso, mejorando su estabilidad. Para ello se utilizan técnicas que tengan en cuenta varias entradas y salidas del proceso de forma que las variables controladas importantes sean compensadas y se desvíen la menor cantidad posible de sus valores de referencias. Las consecuencias del control avanzado son la mejora de

rendimientos en los productos, ahorro de energía, incremento de estabilidad, aumento en la capacidad de producción al tener menor nivel de incertidumbre en el control.

El controlador con realimentación ofrece buenas soluciones frente a cambios en la referencia, así como un error nulo en régimen permanente, sin embargo, el principal inconveniente es que no toma en cuenta la influencia de las perturbaciones que se producen y que afectan en el lazo de control. Los sistemas de control por retroalimentación requieren que exista error en la variable del proceso a controlar para ejercer la acción correctiva, lo cual implica un cierto retardo en la acción de control y como consecuencia se obtiene una corrección no del todo eficiente ante perturbaciones externas. Un medio para corregir el efecto de las perturbaciones es el control anticipativo o Feedforward, el cual compensa el efecto de las perturbaciones antes que se produzcan errores en la variable controlada. La idea básica de este controlador es medir las perturbaciones y actuar sobre el proceso inmediatamente que se produzcan sin tener que esperar a que afecten a la variable controlada. Para poder actuar de forma anticipada es necesario conocer cómo se comporta el proceso ante las perturbaciones es decir el control retroalimentado se encarga de compensar las perturbaciones que no se miden y las perturbaciones medibles más significativas las compensa el control anticipativo.

Planteamiento del problema y Justificación

En la actualidad se han desarrollado nuevas técnicas de control avanzado en la industria con la finalidad de mantener estable a los procesos ante perturbaciones que afectan su evolución, este es el motivo por el cual se debe capacitar a los estudiantes de ingeniería a realizar prácticas de implementación de controles avanzados en una estación didáctica que permita adquirir los conocimientos necesarios para desenvolverse de forma eficaz en el control de procesos industriales.

El avance tecnológico y el manejo de datos a través de la nube permite abrir una nueva modalidad de control remoto para la industria, posibilitando la interoperabilidad a grandes distancias como el control y supervisión de forma remota a través de estas

plataformas que le permite al operador conocer el estado de varias variables, a su vez también se puede enviar acciones correctivas todo esto se realiza en tiempo real.

La estación de Nivel Labvolt 3503_M2, es un sistema SISO (entrada simple salida simple), por los años de uso, varios de sus instrumentos industriales han perdido repetibilidad, característica importante en el control de procesos. Lo antes mencionado solo permite realizar el control automático de nivel simple y con una estima de las unidades de ingeniería y no permite implementar la estrategia de control anticipativo.

La principal problemática son las perturbaciones existentes en el proceso, por lo que se requiere un controlador anticipativo que corrige el efecto de las perturbaciones, compensándolas antes que se produzcan errores en la variable controlada, método que se diferencia de un control en lazo simple el cual es eficiente ante cambios de consigna.

Debido a los nuevos requerimientos en el control de procesos industriales y con la finalidad de compensar las perturbaciones tanto internas como externas que afectan al proceso, se va a implementar un sistema de control anticipativo en la estación de nivel 3503_M2 con un enfoque IoT que brinde a los estudiantes de ingeniería el diseño e implementación de un control anticipativo en procesos industriales, permitiéndoles desarrollar prácticas de control, monitoreo y supervisión de forma remota mediante la comunicación por la plataforma IoT.

Hipótesis

¿El diseño e implementación de un sistema de control anticipativo en la estación de Nivel Labvolt 3503_M2 con un enfoque IoT, permitirá comparar la eficiencia del controlador en lazo simple y el control anticipativo?

Objetivos

Objetivo General

- Implementar un sistema de control anticipativo en la estación de Nivel Labvolt 3503_M2 con un enfoque IoT, en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos.

Objetivos específicos

- Verificar el funcionamiento y mantenimiento correctivo del transmisor de nivel.
- Implementar 2 transmisores de caudal a la entrada y salida del sistema respectivamente.
- Implementar la estrategia de control anticipativo en la estación de Nivel Labvolt 3503_M2.
- Comparar el control automático de nivel en lazo simple vs control anticipativo.
- Diseñar un HMI para el sistema de control de nivel en el software Labview que permita el monitoreo y control de las variables de interés.
- Implementar una comunicación IoT que permita el envío de las variables de interés del sistema de nivel a la nube.

Capítulo II

Marco Teórico

Control de procesos

El control de procesos es una disciplina que se ocupa de regular y mantener las variables de un sistema dentro de un rango deseado. El objetivo principal es garantizar que un sistema o proceso funcione de manera eficiente, segura y confiable. Para lograr esto, se utilizan técnicas y estrategias de control que permiten monitorear y ajustar continuamente las variables de interés como la temperatura, presión, flujo, nivel velocidad, entre otras.

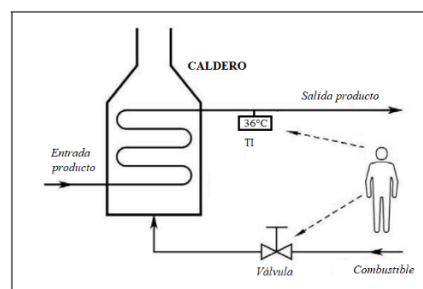
En control de procesos según (Acedo Sánchez, 2003) se basa en el uso de sensores para medir las variables del proceso y actuadores para realizar ajustes en el sistema. Estos ajustes pueden ser automáticos, semiautomáticos o manuales, dependiendo de la complejidad y los requisitos del proceso. Antes de realizar cualquier tipo de control en una planta se debe conocer y entender el proceso.

Para el control existen dos tipos de procesos que se caracterizan porque la información del sistema sea o no retroalimentada al controlador para iniciar la acción correctiva adecuada entre ellos encontramos el control en lazo abierto y en lazo cerrado.

El control en lazo abierto significa que el control es manual y se necesita de un operador, en el sistema el actuador es la mano realiza la acción correctiva abriendo o cerrando la válvula y el ojo humano es el sensor, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Control en lazo abierto asistido por un operario

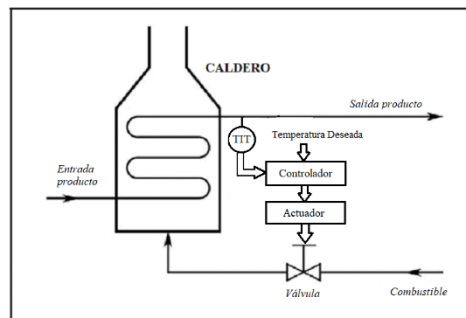


Nota. El gráfico representa un sistema en lazo abierto que necesita de un operador para su acción. Tomado de (Roca, 2014)

El control en lazo cerrado se puede observar en la Figura 2. Para este caso la información captada de temperatura se lleva a cabo por un sensor, el mismo que envía la señal al controlador de forma continua, dentro del controlador se realiza una comparación entre la referencia (valor deseado) y la variable controlada (temperatura) para así obtener el error. El controlador reemplaza la mano del hombre que envía una señal al actuador para aumentar o disminuir la temperatura del líquido en el tanque con la finalidad de corregir el error y así permanecer en el valor deseado.

Figura 2

Control en lazo cerrado



Nota. La figura muestra un sistema de control en lazo cerrado donde el operador fue sustituido por controlador lógico programable el cual es responsable de su control. Tomado de (Roca, 2014)

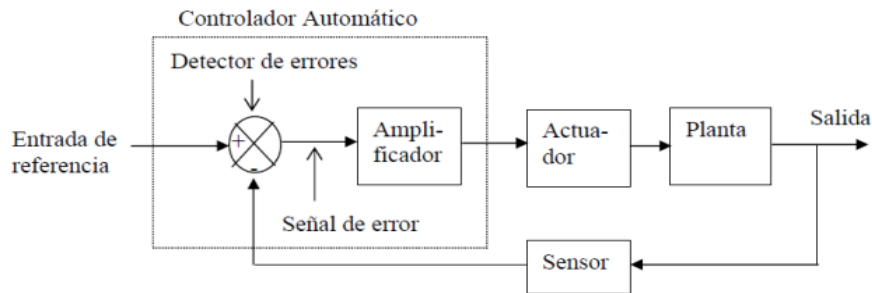
Control Automático

El control automático según (León Huacal & Berrios Silva, 2017) implica monitorear y regular variables clave para asegurar que el proceso se desarrolle de manera estable y eficiente. Un sistema de control automático típico consta de tres componentes principales:

- **Transmisor:** es el encargado de medir las variables del proceso y proporcionar retroalimentación al sistema de control.
- **Controlador:** utiliza la retroalimentación de los transmisores para tomar decisiones y generar señales de control que ajusten los actuadores.
- **Actuador:** actúa sobre el proceso real para realizar cambios y mantener las variables del sistema dentro de los valores deseados.

Figura 3

Diagrama de bloques General de un Control Automático



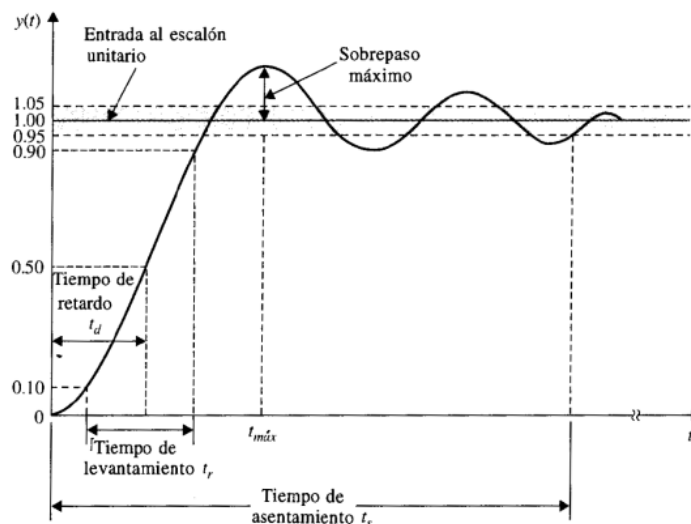
Nota. La figura representa un diagrama de bloques de un control automático simple, tomado de (León Huacal & Berrios Silva, 2017)

El principal controlador utilizado en la industria es el controlador PID el cual es un controlador clásico que calcula una señal de control basada en el error presente, el error acumulado y la tasa de cambio del error. Es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y eficacia en una amplia variedad de aplicaciones.

Para la determinación de la respuesta de control se evalúan parámetros claves tales como: tiempo de retardo, tiempo de levantamiento, tiempo de asentamiento y sobrepaso máximo, donde a cada uno de ellos le corresponde un porcentaje de la evolución de la respuesta, como se indica en la Figura 4.

Figura 4

Respuesta típica a un escalón unitario de un sistema de control.

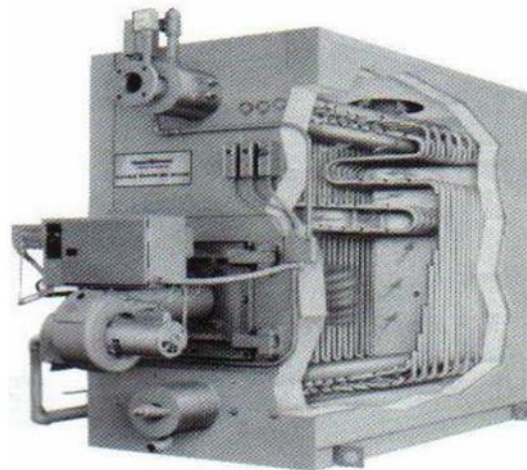


Calderas acuotubulares o de tubos de agua

Según (Rivera, 2006) la caldera está formada por un cuerpo cilíndrico de disposición horizontal, incorpora interiormente un paquete multitubular de transmisión de calor y una cámara superior de formación y acumulación de vapor, el hogar y los tubos están completamente rodeados de agua, la llama se forma en el hogar pasando los humos por el interior de los tubos de los pasos siguientes para finalmente ser conducidos hacia la chimenea. En estas calderas el agua está dentro de los tubos ubicados longitudinalmente en el interior y se emplean para aumentar la superficie de calefacción.

Figura 5

Calderas acuotubulares



Un proceso interesante y desafiante es el control del nivel de líquido en el tambor de una caldera. [...] El control del nivel en el tambor es muy importante. Un nivel alto puede provocar el arrastre de agua, y quizás impurezas, al sistema de vapor; un nivel bajo puede provocar el fallo de los tubos por sobrecalentamiento por falta de agua en las superficies de ebullición. El control del nivel del tambor se consigue manipulando el caudal de agua de alimentación. La idea detrás de este esquema es que la razón principal de los cambios de nivel son los cambios en la demanda de vapor y que, por cada libra de vapor producida, debe entrar en el tambor una libra de agua de alimentación, es decir, debe haber un equilibrio de masas. (Smith, 1985).

Control avanzado de procesos

El control avanzado de procesos se basa en el uso de técnicas y algoritmos más avanzados que van más allá del control PID convencional para mejorar el rendimiento de los sistemas de producción y los procesos industriales que les permite adaptarse a las condiciones cambiantes del proceso.

Existen varias técnicas para realizar control avanzado se pueden encontrar las siguientes:

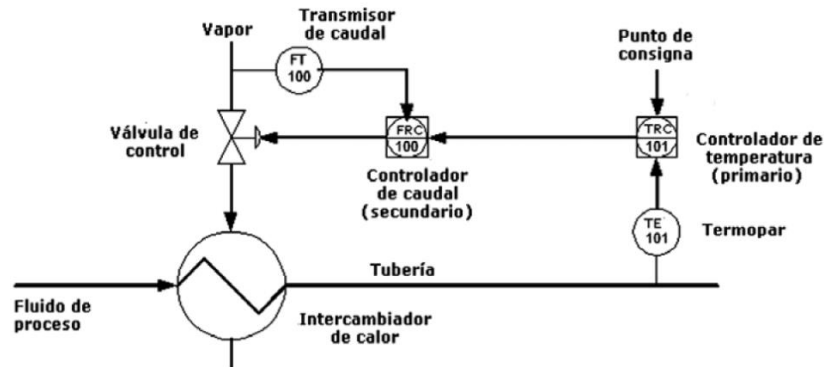
- Control en cascada
- Control Feedforward
- Control predictivo

Según (Acedo Sánchez, 2003) estas estrategias pueden combinar diferentes técnicas y conceptos, y su selección depende de las características del proceso y de su complejidad. Su objetivo principal es optimizar el desempeño del sistema obteniendo:

- Mejoras en la eficiencia del proceso y calidad del producto
- Ahorro de energía
- Seguridad y la rentabilidad del proceso

Control en cascada

El controlador en cascada es una estrategia avanzada de control de procesos que se utiliza para mejorar la precisión y la capacidad de respuesta de un sistema de control. Consiste en utilizar dos o más lazos de control conectados en serie, donde un controlador secundario ajusta la variable de proceso antes de que el controlador principal tome las acciones de control. Es importante que la dinámica del lazo secundario siempre debe ser más rápida que la del primario, en caso contrario no es posible que funcione correctamente (Acedo Sánchez, 2003).

Figura 6*Controlador en cascada*

Nota. Tomado de (Creus, 2008)

En la estructura en cascada, el controlador principal opera en el lazo externo y se encarga de controlar la variable principal del proceso. La salida del controlador principal se determina en función del error entre el valor deseado y el valor medido de la variable principal. Mientras tanto, el controlador secundario actúa sobre la variable secundaria para mantenerla en su punto de ajuste, lo que a su vez ayuda a mejorar la estabilidad y precisión del lazo externo. (Creus, 2008)

Según (Guerrero Valenzuela, 2019) algunos escenarios donde el controlador en cascada puede ser ventajoso incluyen:

- **Procesos con tiempo de retardo significativo**
- **Control de variables secundarias rápidas o difíciles de medir:** puede ser efectivo para proceso difíciles de medir y proporcionar una señal de control más precisa para el lazo principal.
- **Mejora de la estabilidad y precisión:** Se puede lograr una mayor estabilidad y precisión, ya que la acción del controlador secundario ayuda a mitigar las perturbaciones antes de que afecten la variable principal.

Control Feedforward

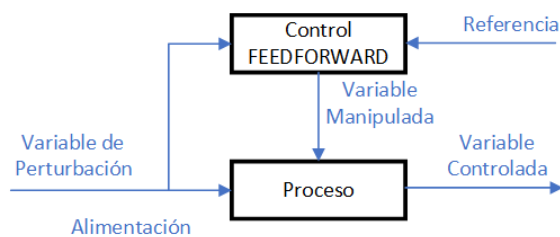
Es una estrategia de control anticipativo que permite predecir y compensar perturbaciones conocidas antes de que afecten al sistema controlado. Al actuar de manera anticipada, mejora la precisión, acelera la respuesta del sistema, ahorra energía y se adapta

a perturbaciones conocidas. Es una herramienta eficaz en diversas aplicaciones industriales para optimizar el rendimiento de los sistemas de control. (Acedo Sánchez, 2003)

A diferencia del control de retroalimentación convencional, que se basa en corregir los errores después de que se produzcan, el control Feedforward actúa de manera anticipada, utilizando información sobre las perturbaciones para ajustar las variables de control antes de que ocurran, su aplicación es teóricamente posible que compense totalmente las perturbaciones, como indica en la Figura 7.

Figura 7

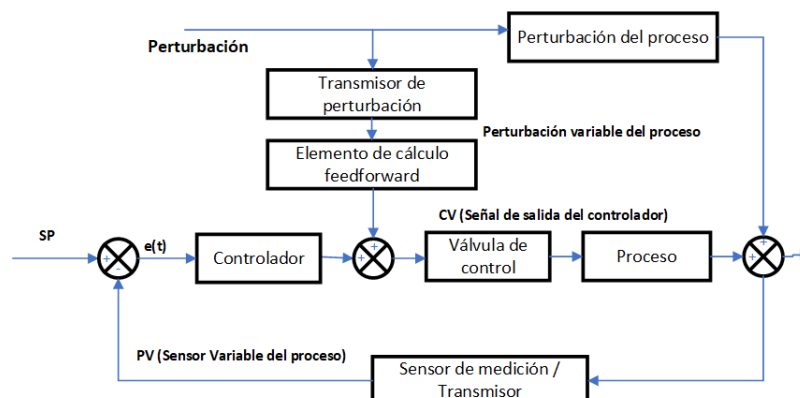
Controlador Feedforward



El controlador Feedforward según (León Huacal & Berrios Silva, 2017) anticipa el impacto de una perturbación medida en el PV y envía acciones de control para contrarrestar la interrupción en el momento oportuno. Esto puede mejorar significativamente el rendimiento de rechazo de perturbaciones, pero solo para la variable de perturbación particular que se está midiendo.

Figura 8

Configuración del controlador Feedforward

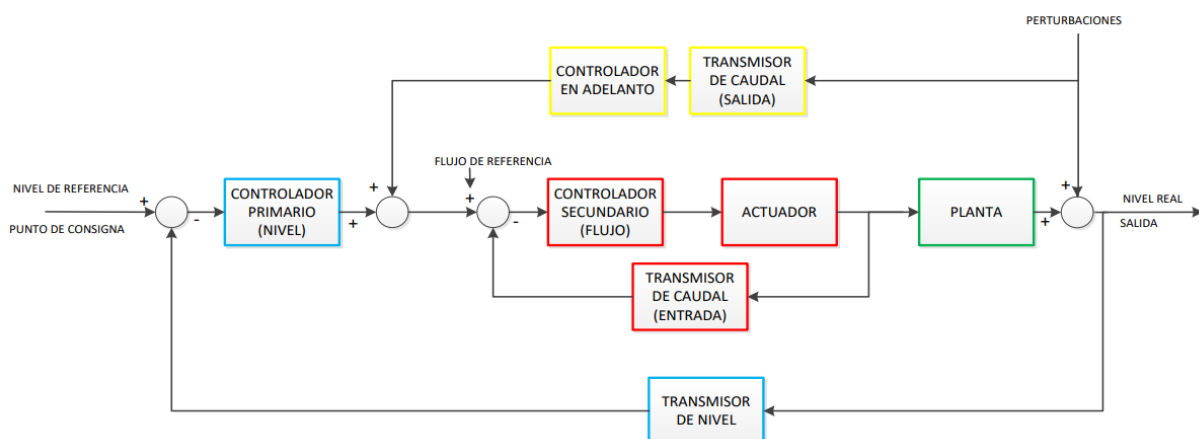


Nota. Tomado de (León Huacal & Berrios Silva, 2017)

Sin embargo, para que este tipo de control sea efectivo, se debe contar con un modelo del proceso que sea lo suficientemente preciso, lo que implica tener un conocimiento completo y cuantitativo del mismo. No obstante, en ocasiones, esto no es factible, y en cambio, se tiende a simplificar el modelo. Así, sin tener en cuenta factores desconocidos como las pérdidas o desajustes en la calibración de los instrumentos. El control anticipativo opera en un sistema de lazo abierto, es decir, actúa directamente sobre la válvula de control sin considerar la variable controlada. Esto resulta en desviaciones inevitables en el valor de dicha variable. Para corregir estas desviaciones, se utiliza un control en realimentación como complemento. Como se muestra en la siguiente Figura 9.

Figura 9

Controlador Feedforward, estructura



Nota. Tomado de (Cárdenas Quintana & Jiménez León, 2018)

El controlador Feedforward es especialmente útil en situaciones donde las perturbaciones son conocidas o pueden ser anticipadas con precisión. Según (Bautista Z, Vargas O, & Domínguez J, 2021) algunos escenarios donde el controlador Feedforward puede ser aplicado con éxito son:

- **Perturbaciones conocidas y repetitivas:** Si el proceso está sujeto a perturbaciones conocidas que ocurren de manera repetitiva (por ejemplo, cambios en la carga en un motor eléctrico), permitiendo anticipar y contrarrestar esas perturbaciones, mejorando la estabilidad y precisión del control.

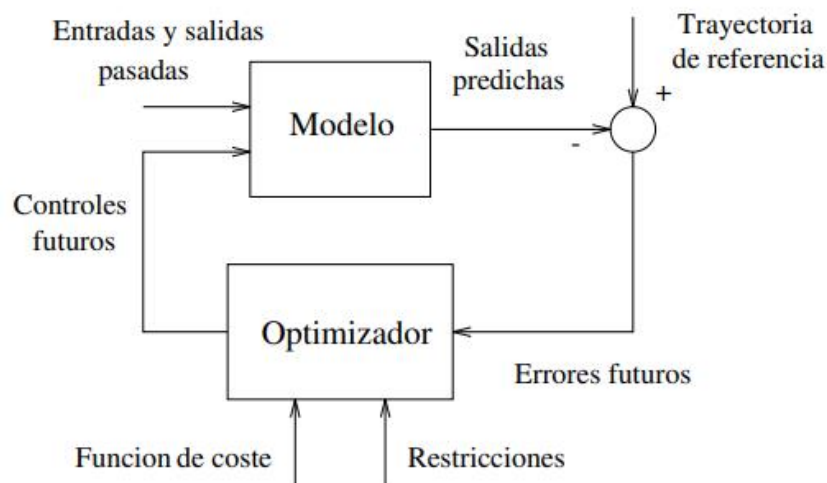
- **Cambios en condiciones de operación:** Cuando se realizan cambios significativos en las condiciones de operación del proceso, como cambios en el flujo de entrada o cambios en la temperatura ambiente.
- **Perturbaciones externas conocidas:** Si existen perturbaciones externas que se pueden medir o predecir con precisión (por ejemplo, ruido externo o vibraciones).
- **Sistemas con alta inercia o tiempo de retardo:** Permite mejorar la respuesta y el rendimiento general del sistema, ya que toma en cuenta las perturbaciones antes de que tengan un impacto significativo.

Control Predictivo

El controlador predictivo (también conocido como controlador MPC, Model Predictive Control) es una técnica avanzada de control utilizada en sistemas de control de procesos. Se basa en la utilización de un modelo matemático del proceso para predecir su comportamiento futuro y tomar decisiones de control óptimas. El controlador predictivo busca optimizar un índice de rendimiento al ajustar la acción de control a lo largo de un horizonte de tiempo futuro. (Camacho & Bordons, 2004)

Figura 10

Controlador Predictivo MPC



Nota. Tomado de (Camacho & Bordons, 2004)

Según (Creus, 2008) la estructura básica del controlador predictivo involucra tres componentes principales:

- **Modelo del proceso:** Se requiere un modelo matemático del proceso que represente adecuadamente el comportamiento dinámico.
- **Optimización:** Utiliza técnicas de optimización para obtener secuencia óptima de acciones de control que minimicen o maximicen es decir una función objetivo.
- **Horizonte de predicción:** Es un horizonte de tiempo que a medida que el tiempo avanza, se recalcula y ajusta continuamente el plan de control para adaptarse a las nuevas condiciones.
- **Horizonte móvil:** Es el tiempo en el que vuelve a calcular las acciones de control en cada predicción.

Según (Camacho & Bordons, 2004) casos donde puede ser útil un controlador predictivo:

- **Sistemas con restricciones:** Cuando el proceso tiene limitaciones o restricciones operativas.
- **Sistemas no lineales o con comportamiento complejo:** Lo hace adecuado para procesos que no pueden ser controlados de manera eficiente mediante técnicas tradicionales.
- **Cambios frecuentes en las condiciones del proceso:** Puede adaptarse rápidamente y ajustar las acciones de control en función de las nuevas condiciones.
- **Optimización de múltiples variables:** es una herramienta poderosa para mejorar la eficiencia y el rendimiento general del sistema.

Estaciones de Lab-volt

Las estaciones de instrumentación y control de procesos fabricados por Lab-Volt son estaciones de trabajo autónomas diseñadas para proporcionar una capacitación práctica en la medición, control y reparación de variables como Presión, Flujo, Nivel y Temperatura. Estas estaciones pueden operar de manera independiente o combinarse para simular procesos complejos. Cada proceso ha sido diseñado para ofrecer una experiencia en "tiempo real", donde se observa el tiempo de retardo y respuesta del proceso. De esta manera, se proporciona un entorno de aprendizaje efectivo y versátil para adquirir

habilidades prácticas en el campo de la instrumentación y el control de procesos. (Lab-Volt, 2000)

Estación de Nivel Labvolt 3503_M

La estación de nivel Lab-Volt 3503-M, consta de varios dispositivos entre ellos se utiliza el transmisor de nivel por presión diferencial Foxboro, bomba, válvula de control, solenoide y varias válvulas manuales para aplicar perturbaciones a la planta.

Figura 11

Estación de nivel Lab-Volt 3503-M en funcionamiento



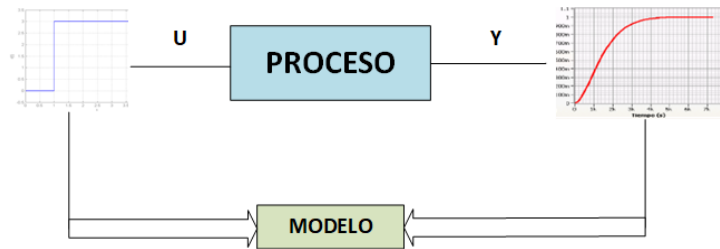
Nota. Tomado de (Ávila Luzuriaga & Salguero Remache, 2014)

Tipos de Procesos Industriales

La naturaleza de un proceso se determina por sus propias dinámicas, y su caracterización implica el análisis de cómo responde ante cambios en las entradas. Para determinar estas características dinámicas en procesos en lazo abierto, se ajusta el valor del actuador (CV) y se mide la respuesta del proceso (PV), es decir se utiliza el método de caja negra para obtener el modelo matemático del proceso (Función de transferencia). En la industria, los procesos pueden ser clasificados según su respuesta como autorregulados, integrantes y sistemas inestables. (King, 2016). Estos tienen como base la información de la curva de reacción del proceso.

Figura 12

Sistemas según su respuesta

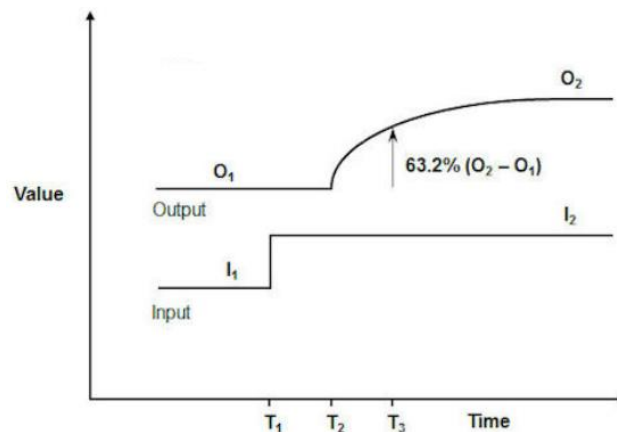


Sistema autorregulado

Son caracterizados por su habilidad de estabilizarse a un valor nuevo de la variable del proceso esto sucede cuando se genera una señal de excitación (Escalón CV), de la misma cuando se presenta un cambio en la entrada la salida disminuye o incrementa según corresponda. Su comportamiento tiene una forma de "S".

Figura 13

Respuesta dinámica de un proceso autorregulado



Nota. Tomado de (Henriquez Novoa & Martinez Rodriguez, 2019)

Para un proceso autorregulado la respuesta se suele aproximar como una función de primer orden, por lo cual se necesita 3 parámetros para poder estimar como son la ganancia estática, constante de tiempo y el tiempo muerto, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-\theta_p s}}{1 + T_p s} \quad (1)$$

Donde:

La ganancia K_p se obtiene a partir de:

$$K_p = \frac{O_2 - O_1}{I_2 - I_1} \quad (2)$$

La constante de tiempo T_p se obtiene a partir de:

$$T_p = T_3 - T_2 \quad (3)$$

El tiempo muerto θ_p se obtiene a partir de:

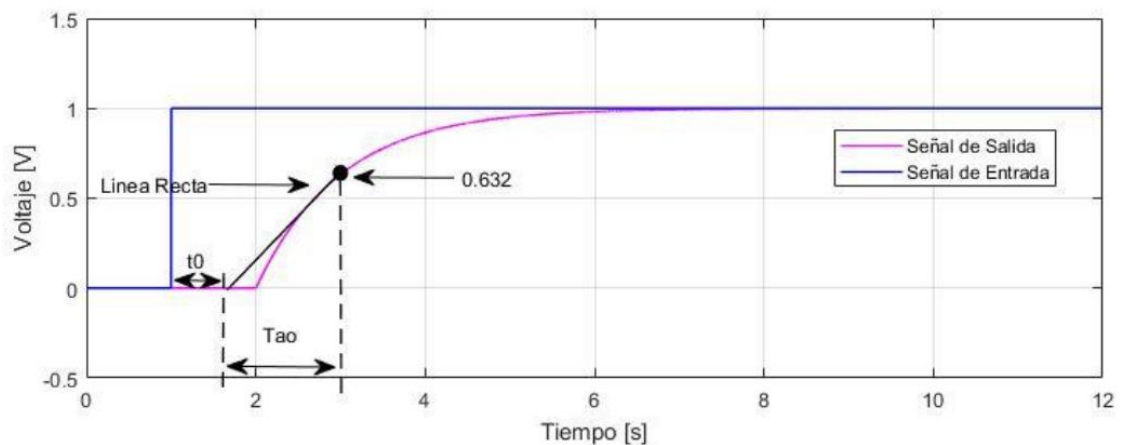
$$\theta_p = T_2 - T_1 \quad (4)$$

Métodos de sintonización para procesos autorregulados

Según (Alfaro Ruíz, 2002) Los controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo) son ampliamente utilizados en sistemas de control debido a su simplicidad y eficacia para mantener una respuesta estable y rápida en diversas aplicaciones industriales. La sintonización de controladores PID es un proceso crucial para lograr un rendimiento óptimo y garantizar que el sistema controlado funcione de manera adecuada. A continuación, se describen algunos métodos comunes de sintonización de controladores PID como Ziegler Nichols, Chien, Hrones y Reswick, Cohen Coon, Lambda, Haalman, entre otros.

Figura 14

Método de sintonía para procesos autorregulados



Nota. Tomado de (Henriquez Novoa & Martinez Rodriguez, 2019)

Existen varias estructuras del controlador PID como son el controlador P, PI, PID y a su vez existen varias formas de sintonía que permite obtener los valores de los parámetros

del controlador como son: la ganancia proporcional (K_c), tiempo integral (T_i) y el tiempo derivativo (T_d). A continuación, se presenta otro método para controladores PI, Y PID.

Sintonía Lambda

"La sintonía lambda es un caso especial de asignación de polos que se utiliza con frecuencia en la industria de procesos." ("PID sintonía Lambda - VSIP.INFO"). El proceso se modelo por el modelo FOTD de la ecuación (1). Existen dos configuraciones como son lambda robusta y agresivo. Donde la elección del T_{cl} es crítica. Una regla heurística muy común es escoger $T_{cl} = 3T$ para un controlador robusto y $T_{cl} = T$ para sintonía agresiva.

Tabla 1

Método de sintonía Lambda Robusto y Agresivo

Método	K_c	T_i
Lambda Robusto PI	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{T}{L+T_{cl}} \right) \therefore T_{cl} = 3T$	T
Lambda Agresivo PI	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{T}{L+T_{cl}} \right) \therefore T_{cl} = T$	T
Lambda Robusto PID	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{L/2+T}{L/2+T_{cl}} \right) \therefore T_{cl} = 3T$	$T + \frac{L}{2}$
Lambda Agresivo PID	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{L/2+T}{L/2+T_{cl}} \right) \therefore T_{cl} = T$	$T + \frac{L}{2}$

Transmisor de caudal TUF 2000M

Es un dispositivo de medición de flujo no invasivo. El cual emplea sensores ultrasónicos colocados externamente, estos se enlazan con una carcasa de plástico que alberga una pantalla LCD y un teclado de ajustes. La pantalla LCD presenta las mediciones

de velocidad y caudal del líquido en las unidades seleccionadas por el usuario. (Chimbo Hidalgo, 2019)

Figura 15

Transmisor de caudal TUF 2000M y dos sondas ultrasónicas.



Nota. Tomado de (Chimbo Hidalgo, 2019)

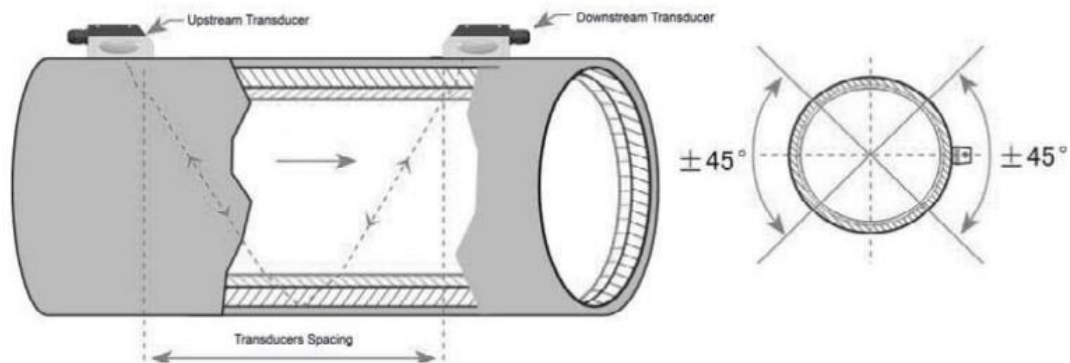
La Figura 15 muestra la pantalla que puede ser anclada a un riel din y los sensores se los coloca en la tubería con la ayuda de abrazaderas o amarras en el caso de ser tubería metálica el mismo sensor se adhiere a la misma debido a que son imantados.

Principio de funcionamiento del caudalímetro

El medidor de flujo cuenta con un par de sensores ultrasónicos que operan en roles de emisor y receptor al mismo tiempo. Estos sensores emiten una señal ultrasónica en una configuración en forma de V, dependiendo del tamaño, espesor y diámetro de la tubería a instalar los mismos. Existen diversas modalidades de emisión de señal que varían según las condiciones ambientales y de la tubería.

Figura 16

Dirección de las ondas ultrasónicas desde el emisor hacia el receptor



Nota. Tomado de (TUF, 2016)

En la Figura 16 se muestra cómo deben ser colocados los sensores ultrasónicos, estos deben estar adheridos a la tubería y con una separación prudente que depende de las características de la tubería y del fluido. La señal emitida viaja en forma de V, una de ellas viaja en el mismo sentido del fluido y la otra en sentido contrario, por ende, la señal que viaja a favor de la dirección del fluido tarda menos tiempo en llegar al receptor, existiendo una diferencia de tiempo entre las señales. A partir de esta diferencia de tiempo, se calcula el caudal y se envía esta información a la pantalla para su visualización.

Características del caudalímetro

El transmisor de caudal presenta una precisión superior al 1%, con una repetibilidad superior al 0,2%. Gracias a 128 ciclos de medición se logra una mayor estabilidad en la lectura de flujo. Equipado con un puerto serie RS485, ofrece tres entradas y una salida analógica de corriente de 4-20 mA. El módulo soporta más de cuatro protocolos de comunicación incluyendo MODBUS y Meter-BUS. Su alimentación está entre 8VDC~36VDC/50mA para su correcto funcionamiento. (LAB.net, 2023)

Instalación del caudalímetro

Según (Chimbo Hidalgo, 2019) se debe colocar al caudalímetro en un sector de la tubería que se encuentre totalmente llena de agua, de lo contrario emitirá valores erróneos de medida. Una vez energizado, hay que setear las condiciones y características a las que va a trabajar el equipo, las cuales son:

- Diámetro de tubería
- Espesor de pared
- Tipo de material
- Velocidad del sonido para el material (de ser necesario)
- Tipo de fluido
- Tipo de sensor
- Posición de sensores

Para instalar las sondas se debe tener en cuenta que cada uno está marcado para colocarlo aguas arriba o aguas abajo. Con la ayuda de abrazaderas se sujetan los sensores a la tubería debido a que es un tipo de tubería no metálica, es importante colocar algún tipo de pasta, grasa, vaselina o silicón entre el sensor y la superficie de la tubería para evitar que la señal ultrasónica se desvíe.

Figura 17

Instalación de los sensores de caudal en la tubería



Nota. Tomado de (LAB.net, 2023)

Es fundamental realizar una prueba de sensores con el código M90, el cual indica la calidad de la señal emitida por los sensores la cual oscila entre 0 a 99, los sensores se deben acercar o alejar entre ellos hasta que se observe que la calidad de señal presente un valor mayor a 60 para garantizar el correcto funcionamiento del equipo, mientras mayor es la calidad de señal el equipo se comporta de mejor manera. (Chimbo Hidalgo, 2019)

PLC

Los Controladores Lógicos Programables (PLC) son autómatas con una unidad central que recibe datos de dispositivos en sus entradas (transmisores), procesa esta información según un programa interno y envía los resultados a las salidas, donde controla actuadores como relés o sistemas de arranque. (Jiménez León & Cárdenas Quintana, 2018)

Según (Castro Yáñez & García Nuñez, 2012) se trata de un equipo electrónico, que, tal como su mismo nombre lo indica, se ha diseñado para programar y controlar procesos secuenciales en tiempo real.

Figura 18

PLC SIEMENS



Nota. Tomado de (SIEMENS, 2023)

Según (Castro Yáñez & García Nuñez, 2012) debido a la gran variedad de gamas de PLC, tanto a sus funciones, capacidad y aspecto físico, es posible clasificar en distintas categorías como son:

PLC Compactos: Tienen incorporados una fuente, CPU y módulos de I/O en un solo módulo principal y permite manejar alrededor de 500 I/O, soportan una gran variedad de módulos especiales como I/O analógicas, contadores rápidos, módulos de comunicaciones, interfaces de operador, expansiones de I/O, entre otras.

PLC Modular: Se encuentra por separado cada parte del controlador que juntas conforman el controlador final consta de Rack, fuente de alimentación, CPU, módulos de I/O. Ejemplo el S7 300 en la familia de Siemens.

Ventajas del PLC

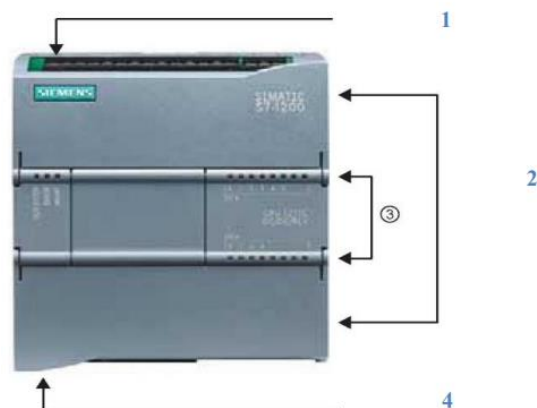
Utilizar un PLC para el control automático de proceso de manufactura le ofrece la flexibilidad de configuración y programación de esta forma reduce costos y espacio además necesita menor cableado facilitando el mantenimiento.

PLC S7-1200

Es un controlador que permite la automatización de procesos industriales, su diseño consta de CPU compacta, profinet (Ethernet), varias I/O digitales y 2 entradas analógicas integradas a su vez permite incluir módulos adicionales para mayor robustez. Este dispositivo permite comunicar instrumentos de medición, actuadores como válvulas, bombas entre otras con el PLC ya sean analógicas o digitales. Además, se complementan con pantallas de visualización que permite el desarrollo de HMI para la interacción con el usuario. Por su diseño compacto, su bajo costo y sus funciones este controlador es ideal para tareas sencillas en el control de proceso. El controlador S7-1200 necesita el software TIA Portal en sus diferentes versiones para su programación, con el compromiso de SIMATIC y la flexibilidad de las herramientas de SETP 7 puede cubrir las diferentes necesidades de automatización. (Muñoz Díaz, 2021)

Figura 19

PLC S7-1200



Nota. Tomado de (SIEMENS, 2023)

Donde:

1. Alimentación del PLC

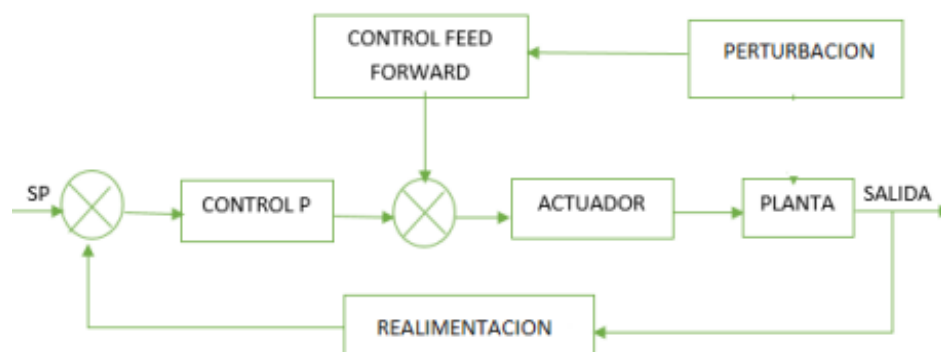
2. Conectores extraíbles y ranura para la MemoryCard (Debajo de la tapa superior)
3. LED de estado para las I/O Integradas
4. Conector profinet (en la parte inferior de la CPU)

Estrategias de control anticipativo en el PLC S7-1200

Las estrategias planteadas para el diseño de un controlador anticipativo Feedforward depende del proceso a controlar y la cantidad de efectos que produce dicha perturbación en el proceso, por este motivo existen varias estructuras del controlador anticipativo entre ellas las más populares para obtener un rendimiento mejorado y un rechazo de las perturbaciones son el control en Feedforward con 3 elementos y el Feedforward con retroalimentación, que pueden ser implementadas en un controlador S7-1200 utilizando operaciones matemáticas (ADD, SUB, MUL y DIV), comparaciones, normalización y escalamiento de las señales que permita el diseño eficiente del controlador anticipativo. La estructura de lazo cerrado con un término anticipativo también conocido como Feedforward con retroalimentación se basa en un controlador feedback de la variable a controlar (Nivel, Temperatura, etc.) y se incorpora un transmisor en el lugar donde se pueda medir la perturbación del proceso, la cual se suma o resta a la salida del controlador feedback para así brindar al controlador el término de anticipación a las perturbaciones medibles. Como se puede observar en la Figura 20.

Figura 20

Controlador Feedforward con retroalimentación

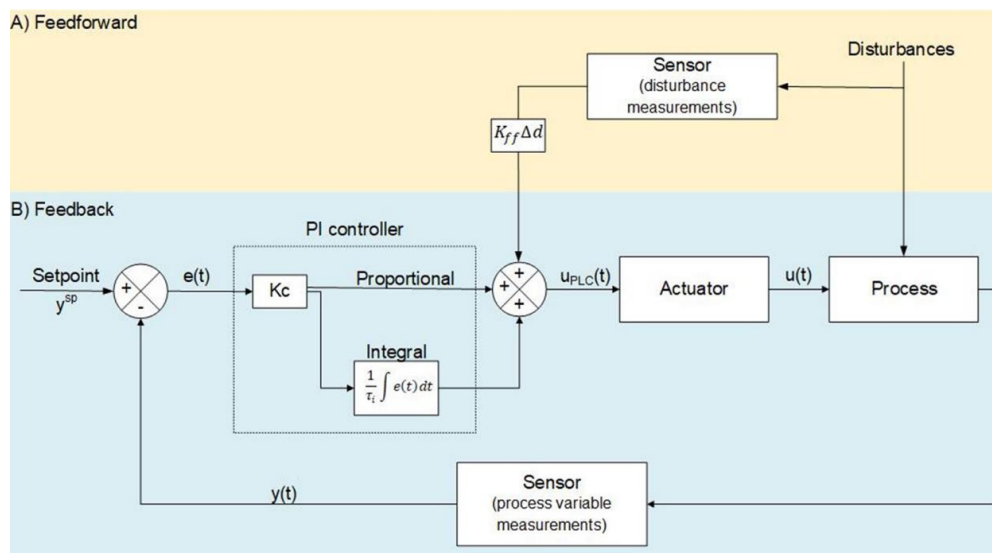


Nota. Tomado de (León Huacal & Berrios Silva, 2017)

Existe varias estructuras en los controladores Feedforward con retroalimentación una variante es por el método de cálculo de la lectura de la perturbación como es la multiplicación de una constante proporcional por la diferencia entre el flujo de salida con el flujo de entrada y este término se considera como la acción derivativa en el controlador PID. La estructura se visualiza en la Figura 21.

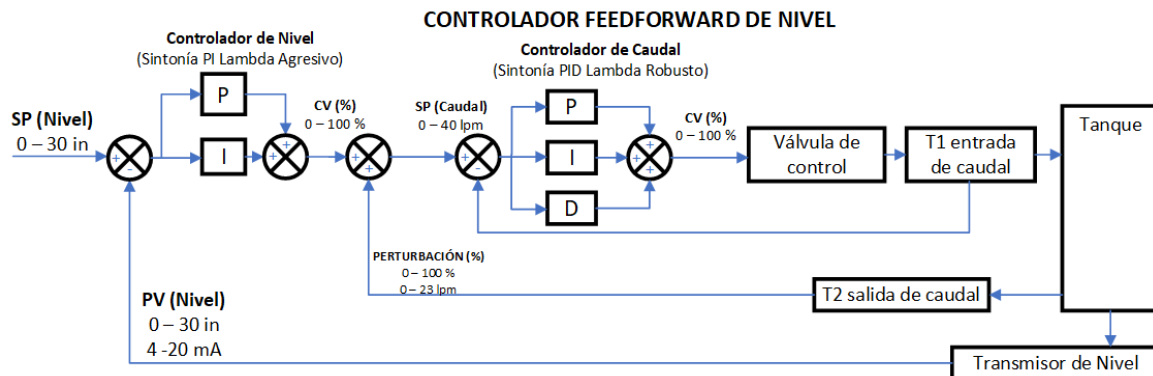
Figura 21

Controlador Feedforward con retroalimentación Derivativa



Nota. Tomado de (Quintanilla, Navia, Moreno, Neethling, & Brito Parada, 2023)

La estructura del Feedforward con tres elementos se basa en un controlador avanzado en cascada de la variable a controlar (Nivel, Temperatura, etc.) y se incorpora un transmisor a la salida del proceso con la finalidad de medir la perturbación que afecta el proceso de esta manera se puede eliminar los efectos en la variable controlada, además por tener un controlador en cascada le da mayor estabilidad, reduce el tiempo de establecimiento y mayor eficiencia del controlador. En la Figura 22, se muestra su estructura.

Figura 22**Controlador Feedforward con 3 elementos**

Esta estructura se le conoce como Feedforward con 3 elementos debido a que se compone de tres transmisores, el primero para el controlador primario, el segundo para el controlador secundario y el tercero sirve para medir la perturbación.

Sistema HMI-SCADA

Un sistema SCADA se define como un acceso de datos remotos, capaz de controlar y supervisar variables en un proceso industrial entre niveles de control al nivel de gestión siendo una aplicación informática en tiempo real que ofrece interfaz gráfica HMI considerando que no todos los HMI son SCADA. (Chiluisa Chiluisa, 2020)

Cada aplicación desarrollada debe contar con las siguientes funciones:

- Opciones de control y supervisión mediante una interface gráfica
- Señales de alerta al operador de fallos
- Registros históricos de las variables
- Gestión de datos y almacenamiento

Ventajas de un sistema SCADA

Según (Cuenca Flores & Delgado Ávila, 2021) en un sistema SCADA se tiene un conjunto de elementos de regulación y control, las ventajas son:

- Permite crear funciones sin necesidad de ser experto en programación
- Proporciona robustez y fiabilidad al sistema de control
- Localización más rápida de errores

- Integración de cualquier dispositivo de campo
- Comunicación remota
- Herramientas de diagnóstico para aumentar calidad de producción

Labview

LabVIEW es una herramienta de programación por bloques, principalmente se utiliza en campos de pruebas y automatización como el control de instrumentos, adquisición de datos, entre otras funciones. Los programas creados en el software de LabVIEW se guardan en ficheros llamados VI, que quiere decir instrumentos virtuales, estos programas son jerárquicos y modulares. Se usan como programas de alto nivel que permite diseñar HMI por medio de bloques y varios subprogramas. (Cárdenas Quintana & Jiménez León, 2018)

Según (Lajara Vizcaíno & Pelegrí Sebastián, 2011) este programa está formado por dos componentes:

- **Panel frontal:** Es la interfaz que interactúa con el usuario cuando el programa está corriendo, el mismo que se compone por controles (entradas del VI) e indicadores (Salidas del VI).

Figura 23

Panel frontal de LabVIEW

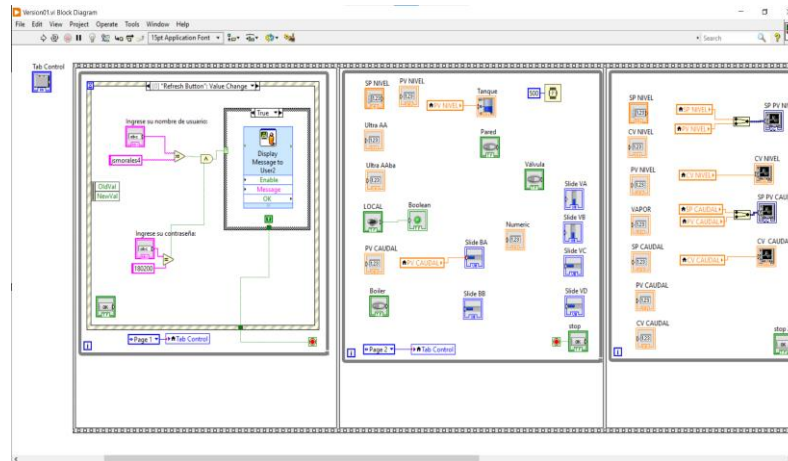


- **Diagrama de bloques** Es la pestaña donde se realiza la programación donde se define la funcionalidad por medio de interconexiones de bloques. En esta pestaña se

implementa las estructuras y funciones, donde los datos se propagan a través de conectores hacia los indicadores.

Figura 24

Diagrama de bloques de LabVIEW



OPC

Es un software que permite la comunicación con cualquier controlador lógico programable (PLC). OLE para control de procesos OPC es el estándar para la comunicación de datos de planta en tiempo real entre varios equipos de control e interfaz HMI. La arquitectura OPC es cliente servidor que generan y administran las variables. Estas aplicaciones permiten integrar varios dispositivos de varias marcas a través de tags para la visualización de las variables de interés. Para crear un OPC se debe crear primero un dispositivo, después un canal y por último se ingresan los tags. (Villegas, y otros, 2008)

Figura 25

OPC en el software TOP Server 6

The image shows the 'TOP Server 6 Configuration' software interface. On the left is a tree view of the project structure, including 'Connectivity', 'S71200', 'CON_CASCADA', 'Aliases', 'Advanced Tags', 'Alarms & Events', 'Data Logger', 'Profile Library', 'Scheduler', and 'SNMP Agent'. On the right is a table listing the configured OPC tags.

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
CV_FLOW	MD24	Float	100	None	
CV_NIVEL	MD58	Float	100	None	
FTdown	MD88	DWord	100	None	
LOCAL	M44.3	Boolean	100	None	
PV_FLOW	MD4	Float	100	None	Medida de caudal
PV_NIVEL	MD50	Float	100	None	
SP_CAUDAL	MD40	Float	100	None	
SP_NIVEL	MD200	Float	100	None	

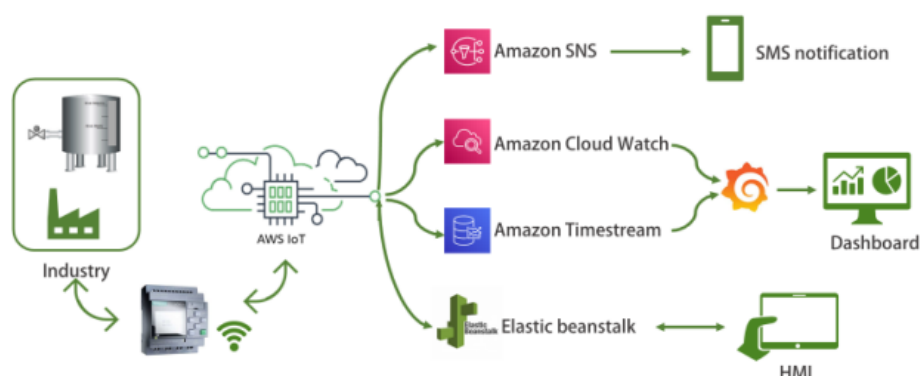
IloT en control de procesos

Debido al avance de las nuevas tecnologías en el área de automatización, y a la importancia del control y monitorización de variables de interés se genera la optimización de recursos, obteniendo una comunicación más ágil por lo cual la digitalización de la información de la industria se utiliza la tecnología IloT debido a la incorporación de varios dispositivos inteligentes que cuentan con acceso a la red y sobre todo se enfoca al ámbito de la industria. De esta forma el avance en el monitoreo de sensores, actuadores se integran a la red de forma inalámbrica sea de forma individual o por medio de un PLC. (Toro, Sánchez, Strefezza, & Granado, 2017)

Según (Macas Rivera, Ramirez Torres, Ñacato Estrella, & Ramirez Torres, 2023) los principales obstáculos y potenciales riesgos del IloT para sistemas de control son la ruta de transmisión, la confiabilidad y la calidad de la señal de Internet a la hora de transmitir y recibir datos de forma simultánea. El reto principal de la comunicación IloT es la seguridad de la información transmitida debido a que terceros puedan interceptarlos y usarlos para algún delito. Para garantizar la confiabilidad del sistema de control es conveniente considerar sistemas redundantes tanto en servidores, controladores, sensores, e incluso redes para evitar pérdidas de datos y obtener así la comunicación en tiempo real que se necesita en la industria en caso de emergencia.

Figura 26

Estructura IloT en procesos Industriales



Nota. Tomado de (Toro, Sánchez, Strefezza, & Granado, 2017)

Módulo IOT 2040

Es un dispositivo de Siemens que presenta una plataforma confiable abierta que permite el almacenamiento, procesamiento y la transferencia de datos en los entornos industriales siendo la pasarela idónea entre la nube, los sistemas de producción. También presenta la disponibilidad de utilizar distintos protocolos de comunicación, y a su vez distintos lenguajes de programación permitiendo desarrollar soluciones personalizadas en base a los requerimientos del usuario. (OI BERDIN GRUPO, 2017)

Figura 27

Módulo SIMATIC IoT 2040



Nota. Tomado de (OI BERDIN GRUPO, 2017)

El módulo SIMATIC IoT2040 se puede integrar a la industria debido que es una solución económica, compacta y de calidad probada para ambientes industriales a largo plazo. En las Figura 28,

Figura 29 y Figura 30 muestran las partes del SIMATIC IoT 2040:

Figura 28

Vista superior del IoT 2040

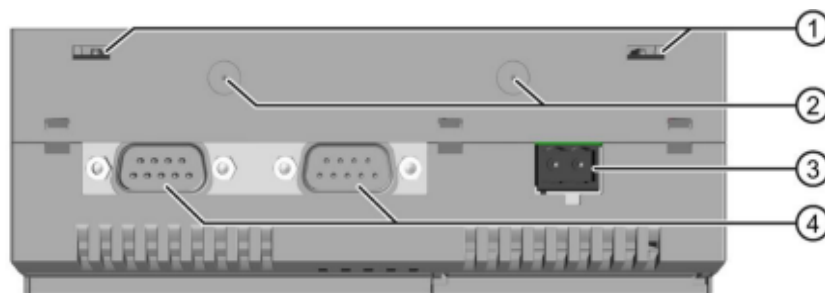
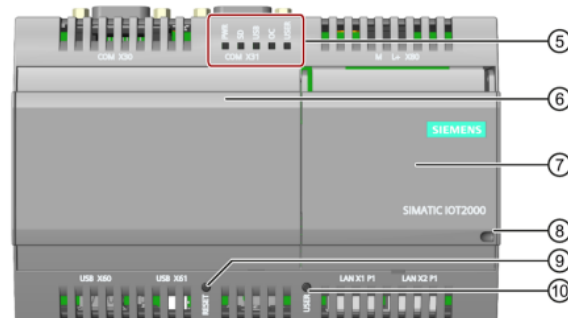


Figura 29*Vista Frontal del IoT 2040***Figura 30***Vista inferior del IoT 2040*

Según (SIEMENS, 2018) la descripción de las partes de la pasarela IoT 2040 son:

1. Aberturas de inserción para montaje en la pared
2. Marcas para la instalación de antenas
3. Conector para la fuente de alimentación
4. Interfaces COM (RS232/422/485)
5. Indicadores LED
6. Cubierta izquierda (Interfaz arduino)
7. Cubierta derecha (Tarjeta microSD, batería)
8. Seguro para el dispositivo
9. Botón RESET para la CPU
10. Botón de usuario USER programable
11. Puerto Ethernet 10/100 Mbps
12. Puerto Ethernet 10/100 Mbps, preparado para PoE
13. Micro USB tipo B
14. USB tipo A

Según (Tigre Chitacpa & Zumba Arichávala, 2022) las características generales del módulo IoT 2040 son:

- Procesador Intel Quark x1020
- Una memoria RAM de 1GB, 2 puertos Ethernet, 2 puertos RS232/485
- Soporte lenguajes Yocto Linux
- Ampliable con módulos Arduino y tarjetas miniPCle
- Programable desde varios lenguajes de alto nivel
- Diseño compacto, montaje de carril DIN

Protocolo de comunicación MQTT

Es un protocolo de comunicación abierta basado en publicación y suscripción caracterizado por su flexibilidad y sencillez, sus siglas significan Message Queuing Telemetry Transport, que ha comienzos fue creado para conectar dispositivos y enviar datos de un sensor a servidores remotos en la industria petrolera. Además, está constituido por clientes y el Broker MQTT con lo que permite la escritura sobre el dispositivo para tareas de control. (Coloma Clavijo, 2018)

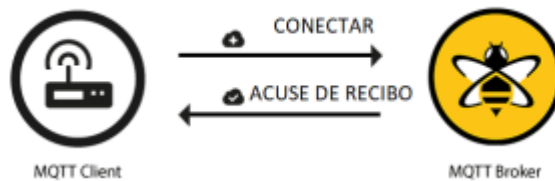
- **Los clientes** son dispositivos que publica y/o se suscribe a un tópico para establecer una conexión con el Broker MQTT a través de la red.
- **El Broker MQTT** es responsable de receptor los mensajes y distribuir a todos los clientes con el mismo tópico.

Según (Vera Martín, 2019) el protocolo se ha desarrollado con los siguientes requisitos:

- Implementación simple
- Entrega de datos de calidad de servicio
- Ancho de banda suficiente
- Debe poder mantener una sesión continua

Figura 31

Ejemplo de conexión MQTT



Nota. Tomado de (HIVEMQ GmbH, 2023)

Node red

Es una herramienta de desarrollo abierto que funciona como intermediario entre un cliente publicador y un cliente suscriptor, basada en programación visual de nodos para la conexión de dispositivos de hardware y servicios en la web por medio de API (Interfaz de programación de aplicaciones) que tiene como objetivo la simplificación de la integración de dispositivos. Las cuales incluyen funciones de MQTT, geolocalización, conversión de protocolos IoT. (OpenJS Foundation, 2023)

Tiene diferentes nodos entre ellos los más utilizados según (Tigre Chitacpa & Zumba Arichávala, 2022) :

- **Contrib S7:** nodo para leer y escribir con PLC's de Siemens S7, se debe descargar previamente.
- **Function:** Permite escribir funciones con JavaScript.
- **Change:** Permite el cambio de string a booleanas, entre otras y agregar nuevas propiedades.
- **Switch:** Sirve para probar una condición con cada resultado.
- **Inject:** Se usa para enviar datos a los flujos.
- **Debug:** permite mostrar el mensaje en el editor del Node red.
- **Slider:** Permite variar un valor real desde un mínimo a un máximo.
- **Json:** Realiza la conversión de string a objetos json para manipular los datos.
- **Mqtt:** Permite crear la comunicación MQTT por medio de cliente publicador y un cliente suscriptor.

Plataforma IoT ThingsBoard

ThingsBoard es una plataforma IoT gratuita para la visualización, procesamiento, geolocalización y manejo de dispositivos consta de una versión gratuita para pruebas y una versión de pago. Esta plataforma utiliza varios protocolos IoT industriales estándar como MQTT, CoAP y HTTP. Presenta gran variedad de Widgets para el diseño de un HMI. Para la conexión utiliza telemetría y comandos RPC que permite enviar llamadas remotas desde aplicaciones del servidor a dispositivos y viceversa. (Velasquí Jaramillo & Fernández de Córdova, 2020)

ThingsBoard consta de un API que utiliza el protocolo MQTT para enviar telemetría la cual se asigna a un dispositivo. Se utilizan este topics predefinido para el envío de datos a la plataforma. (ThingsBoard, 2023)

API para carga de telemetría con este tópico: v1/devices/me/telemetry que permite publicar datos en el nodo del servidor de ThingsBoard.

API RPC permite escribir mensajes MQTT al dispositivo que lo requiera se utiliza el siguiente tópico: v1/devices/me/rpc/request/+ desde ThingsBoard al dispositivo.

PutTY

Es un programa gratuito que facilita en la comunicación con varios servidores remotos, funciona como un cliente SSH. Este programa permite acceder al terminal Yocto Linux por medio de un cable Ethernet conectado del puerto X1PLAN del módulo SIMATIC IoT2040. (Tigre Chitacpa & Zumba Arichávala, 2022)

Capítulo III

Diseño de un controlador anticipativo de nivel en una caldera

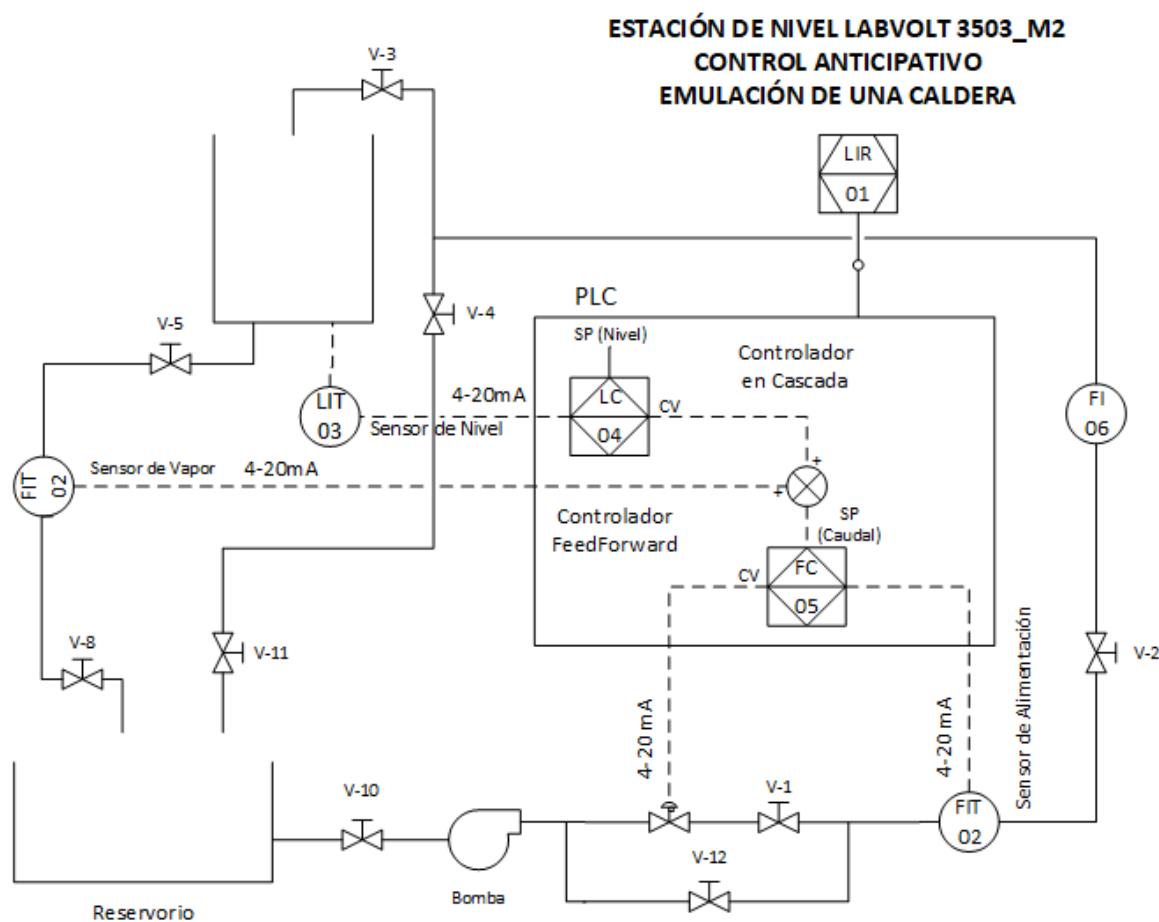
En el presente capítulo se presenta el desarrollo de control anticipativo de una caldera implementado en la estación de nivel LabVolt 3502_M2 , para lo cual fue necesario determinar los modelos matemáticos que representan el comportamiento de cada una de las variables involucradas en el proceso, tales nivel, flujo de agua y flujo de vapor, cuyos resultados fueron adquiridos mediante la comunicación en tiempo real mediante OPC del PLC y el software de National Instruments, LabVIEW, para el registro de los mismos, su posterior tratamiento se llevó a cabo en Matlab.

El control del proceso autorregulado de nivel se lleva a cabo bajo la táctica de control anticipativo, el cual se basa en la integración del modelo de control feedback y Feedforward, en el primer caso se controla como variable secundaria el caudal, al ser las más rápida, mientras que la variable primaria es el nivel, que reacciona con menor velocidad; en segunda instancia para el control Feedforward se considera la medición del flujo en la línea de vapor o a su vez la línea de descarga de agua en la estación Labvolt.

Es importante conocer la planta y sus componentes, además de la ubicación de los sensores y transmisores, por lo cual se describe en la Figura 32. En la línea de alimentación de agua se mide el flujo aguas debajo de la válvula con posicionador, para ello se emplea un sensor/transmisor ultrasónico, posteriormente para la determinación del nivel se emplea un transmisor de presión diferencial que realiza la conversión de presión a nivel, finalmente el último elemento de medida es un sensor/transmisor ultrasónico de flujo colocado en la línea de descarga del tanque, lo que para el control de una caldera representa las líneas de salida de vapor. El elemento de control está constituido por una electroválvula con posicionador, la cual responde con acción de control emitida por el PLC, donde se encuentra programado el control correspondiente.

Figura 32

Diagrama P&ID del control anticipativo de nivel.



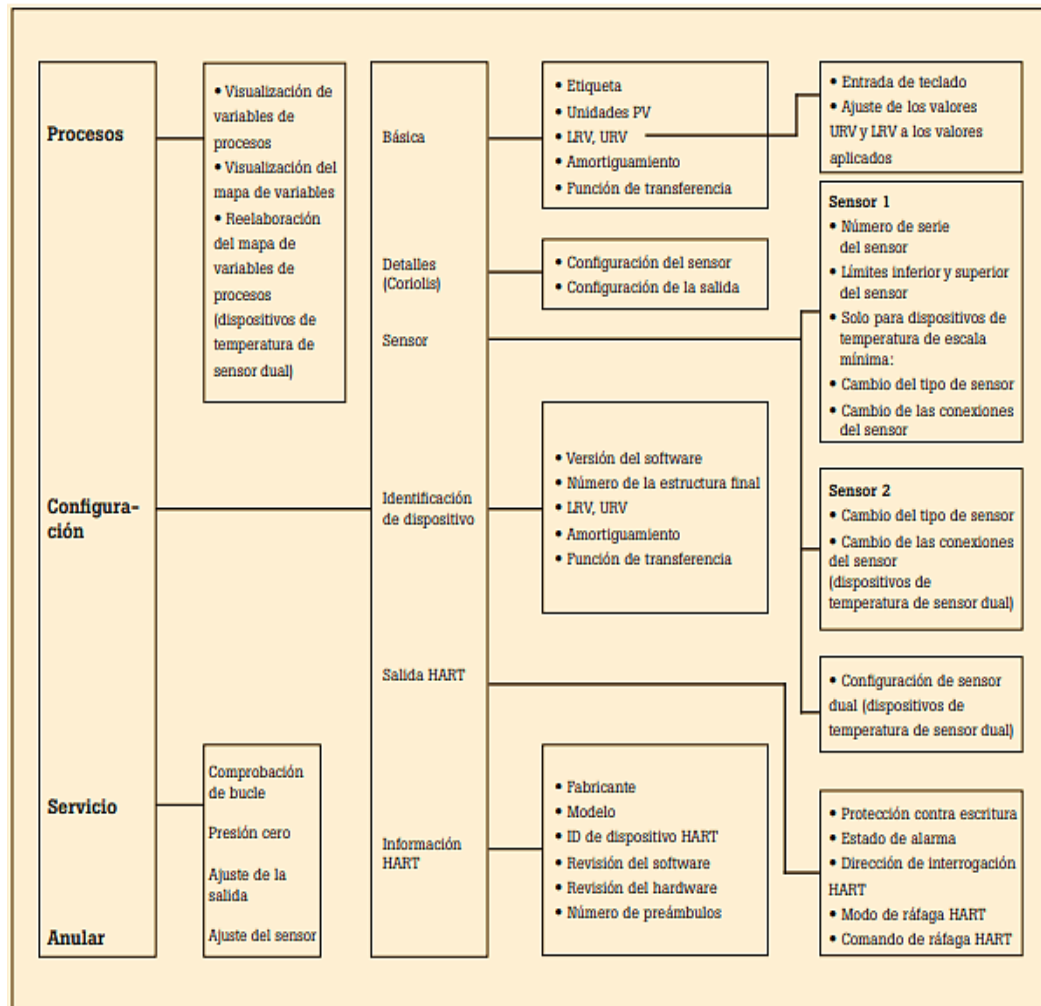
Mantenimiento correctivo del transmisor de nivel

El transmisor de nivel empleado en la planta de Nivel Labvolt 3503 M2, Figura 32 pertenece a la marca Foxboro, serie de presión diferencial IMV25, modelo IAP/IGP/IDP10S, se realizó el respectivo mantenimiento correctivo del mismo, en primera instancia se debe verificar la documentación de respaldo del transmisor de nivel para conocer sus especificaciones técnicas, posteriormente para la determinación de los niveles de referencia del proceso se debe alimentar y conectar el transmisor de nivel al instrumento de medición y control, calibrador Fluke 707Ex, garantizando la repetibilidad de las mediciones del proceso, el rango de operación del transmisor de nivel de presión diferencial LRV es 2389 Pa y URV es 9520 Pa, parámetros determinados al ingresar 4 y 20 mA.

Una vez obtenido los parámetros, se procede a configurarlos empleando el Calibrador de procesos Fluke 754 Hart, siguiendo el siguiente protocolo que se indica en la Figura 33.

Figura 33

Configuración del Calibrador de procesos Fluke 754 Hart



La estación de Nivel Labvolt 3503 M2 consta de tuberías, sensores, piezas, entre otros componentes mecánicos y electrónicos, que posibilitan la emulación de una planta de nivel, debido a los años de uso la estación pierde repetibilidad, Las fugas de agua en las tuberías de la planta Labvolt representan la principal causa de la pérdida de repetibilidad, por lo que es imperativo realizar la colocación de teflón para evitar fugas, permitiendo que el funcionamiento se mantenga, por lo cual se realizó el mantenimiento correctivo, iniciando

con una limpieza y sustituyendo tuberías en mal estado, en la Figura 34 se observa las correcciones realizadas.

Figura 34

a) *Tuberías anteriores* b) *Tuberías remplazadas*



Instrumentación de transmisores de nivel y caudal

Para la implementación de la técnica de control anticipativo en la estación, se requiere tres elementos que recojan los datos de la evolución de la planta, en primera instancia un transmisor de presión diferencial empleado para medir el nivel, además de dos sensores ultrasónicos colocados a la entrada y salida del agua del tanque. A continuación, se detalla la instalación de los transmisores ultrasónicos de caudal en la estación de nivel.

Instalación de los transmisores de caudal

En primera instancia se requiere preparar las sondas, sensores y transmisores de caudal ultrasónico, para ello se requiere cable de fieltro de 10 metros de largo, que consta de 2 polos y con blindaje, terminales tipo U, termo contraíble, herramientas para cortar y asegurar el conexionado. Se inicia dividiendo a la mitad el cable de fieltro, a continuación, se exponen los cables quitando la cubierta y el aislamiento, para anclarlos a terminales tipo u. Una vez listos los cables, se procede a retirar el tornillo de seguridad de las sondas junto con la tapa, e insertar los cables considerando el diagrama de conexión del fabricante, como se indica en la Figura 35.

Figura 35

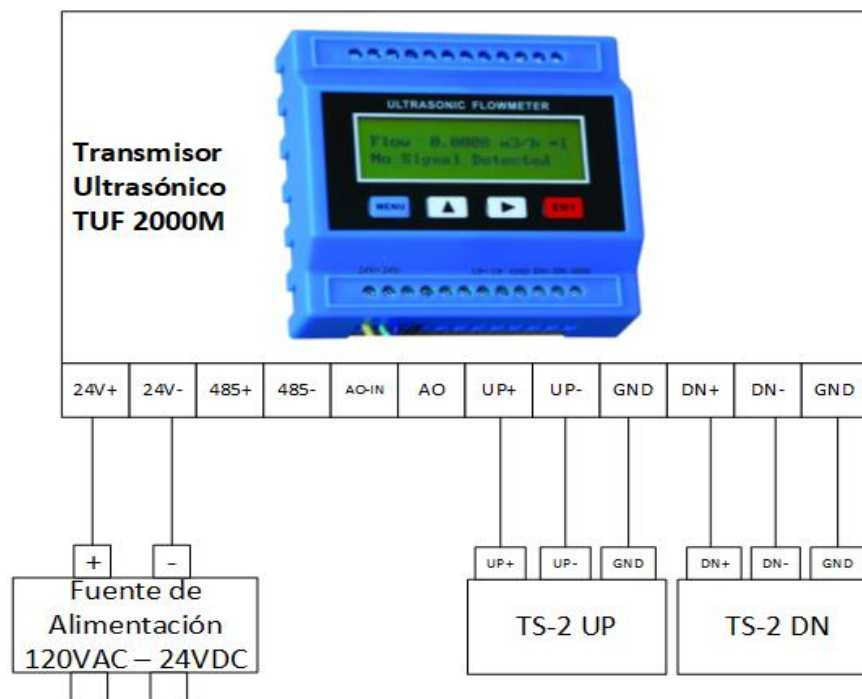
Esquema de conexión de sondas.



Una vez terminada de armar las sondas, verificar en el manual la conexión del transmisor TUF 2000M de caudal los terminales correspondientes a la conexión de cada una de ellas, TS-1 (up_down) y TS-2 (up_down), además de su alimentación.

Figura 36

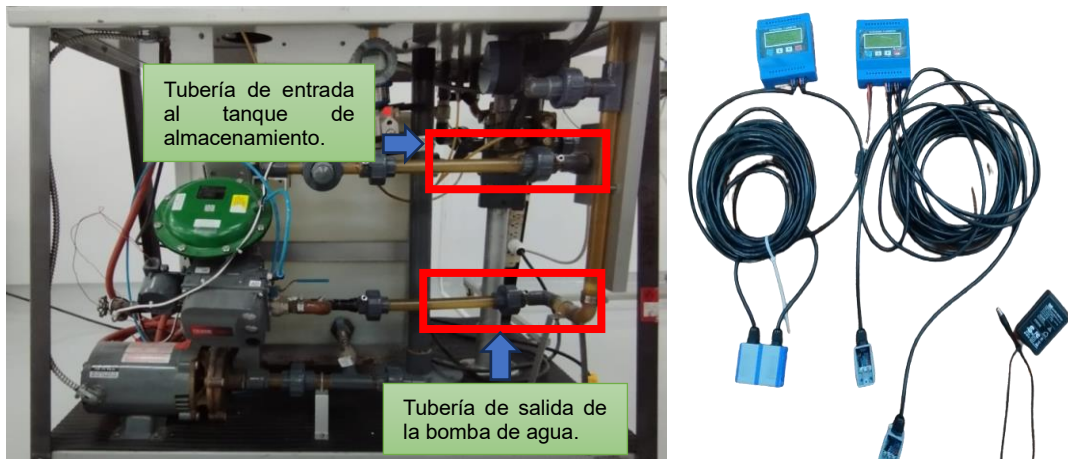
Diagrama de Conexión del transmisor ultrasónico TUF 2000M



Las sondas junto con los transmisores se van a instalar en las siguientes posiciones, la primera se coloca en la tubería de salida de la bomba V1 y la segunda sonda en la tubería correspondiente a la salida del tanque de almacenamiento V8, con la finalidad de medir las perturbaciones, véase la Figura 37.

Figura 37

Posiciones para la instalación de sensores ultrasónico



Para la instalación las sondas se deben colocar horizontalmente para evitar las burbujas de aire que puedan formarse y subir a la parte superior. Además, se debe considerar que el aumento de la trayectoria de la señal ultrasónica aumenta la precisión de la medida del caudal, siempre que la señal no se degrade demasiado hasta llegar al transductor secundario. Es necesario contar con las medidas de la tubería en la cual se colocan, observe la Tabla 2.

Tabla 2

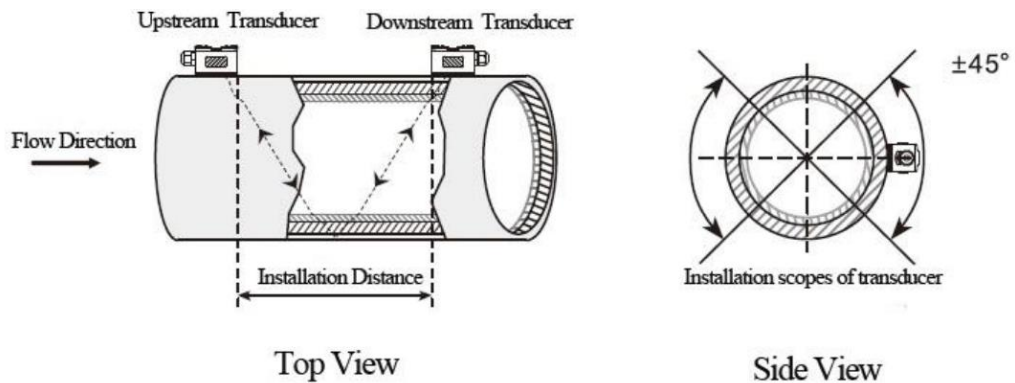
Datos de la Tubería

Datos de la tubería	
Diámetro exterior de tubería	26,9 mm
Espesor de pared	3 mm
Tipo de material	PVC
Tipo de fluido	Agua

De acuerdo con los datos de la tubería tiene un diámetro de 26,9mm por lo que se emplea el método V de instalación, dado que el manual lo recomienda para tuberías con un diámetro entre 15mm y 200mm. En la Figura 38 se indica la ubicación de las sondas según el método mencionado:

Figura 38

Método V para la instalación de las sondas



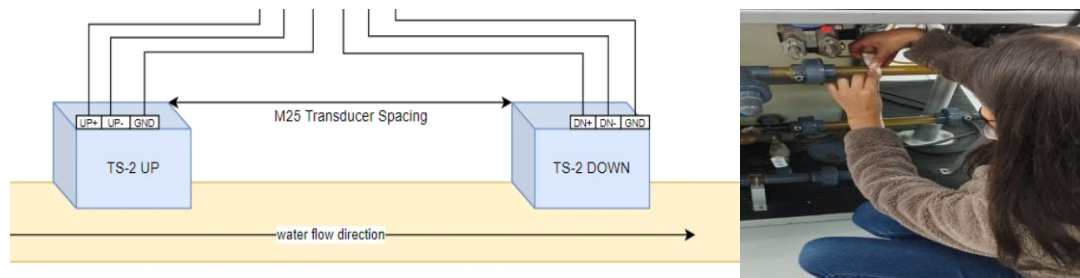
El procedimiento de instalación empieza por limpiar y pulir la superficie de la tubería en la región donde se aplicarán las sondas junto con los sensores UP y DOWN, luego añadida agente de acoplamiento acústico en el sensor, como se indica en la Figura 39. Para la colocación de la pareja de sensores UP y DOWN, se considera la dirección del flujo del líquido que atraviesa la tubería, Up estará colocado aguas arriba, mientras que down aguas abajo.

Figura 39

Colocación de gel acústico en el sensor ultrasónico de caudal



Finalmente sujete ligeramente las sondas a las tuberías aplicando la separación de instalación sugerida por el fabricante, 4.5 cm, teniendo en cuenta el sentido del flujo.

Figura 40*Instalación de sensores.*

Una vez colocados los sensores, instale la pantalla de visualización de cada uno de ellos en el riel din y alimente considerando el esquema de conexión de la Figura 42. Para la navegación de las diferentes ventanas de la pantalla use “MENU” para ingresar a los menús, “▲” al pulsarlo ingresa la numeración desde 0-9, +, -; “▶” se emplea para mover el cursor a la siguiente posición y finalmente “ENT” para finalizar la introducción del menú o entrar en el submenú.

Figura 41*Transmisor ultrasónico de nivel*

Para determinar la calidad de la colocación de los sensores ingrese el comando M90 el cual muestra las intensidades de señal S (una para aguas arriba y otra para aguas abajo), y la calidad de señal Q. La intensidad de la señal se presenta de 00,0 a 99,9; cuanto mayor sea el valor, mayor será la intensidad de la señal y más fiables serán las lecturas y para la relación entre el tiempo total de tránsito medido y el tiempo calculado use M91, si los

parámetros de la tubería se han introducido correctamente y los transductores están bien instalados, el valor de la relación debería estar en el rango de 100 ± 3 . Se fijan los sensores por medio de abrazaderas alrededor de la tubería. Los valores de calidad se pueden visualizar en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3

Rangos de calidad de las sondas del transmisor de caudal

Valor de calidad Q	Evaluación de instalación
< 60	No puede trabajar
60 – 75	Malo
75 – 80	Bueno
> 80	Excelente

Configuración y calibración de los transmisores de caudal

Con el caudalímetro encendido, se procede a configurar e ingresar los datos de la tubería y del fluido a utilizarse por medio de códigos especificados en el manual de usuario del caudalímetro. En la Tabla 4 se muestran los datos que se deben ingresar y sus respectivos códigos.

Tabla 4

Configuración de los transmisores

Configuración	Código	V. tubería
Diámetro exterior de tubería	M11	26,9 mm
Espesor de pared	M12	3 mm
Tipo de material	M14	PVC
Tipo de fluido	M20	Agua
Tipo de sensor	M23	TS-2 Clamp on
Disposición de sensores	M24	0. V
Guardar parámetros	M26	1

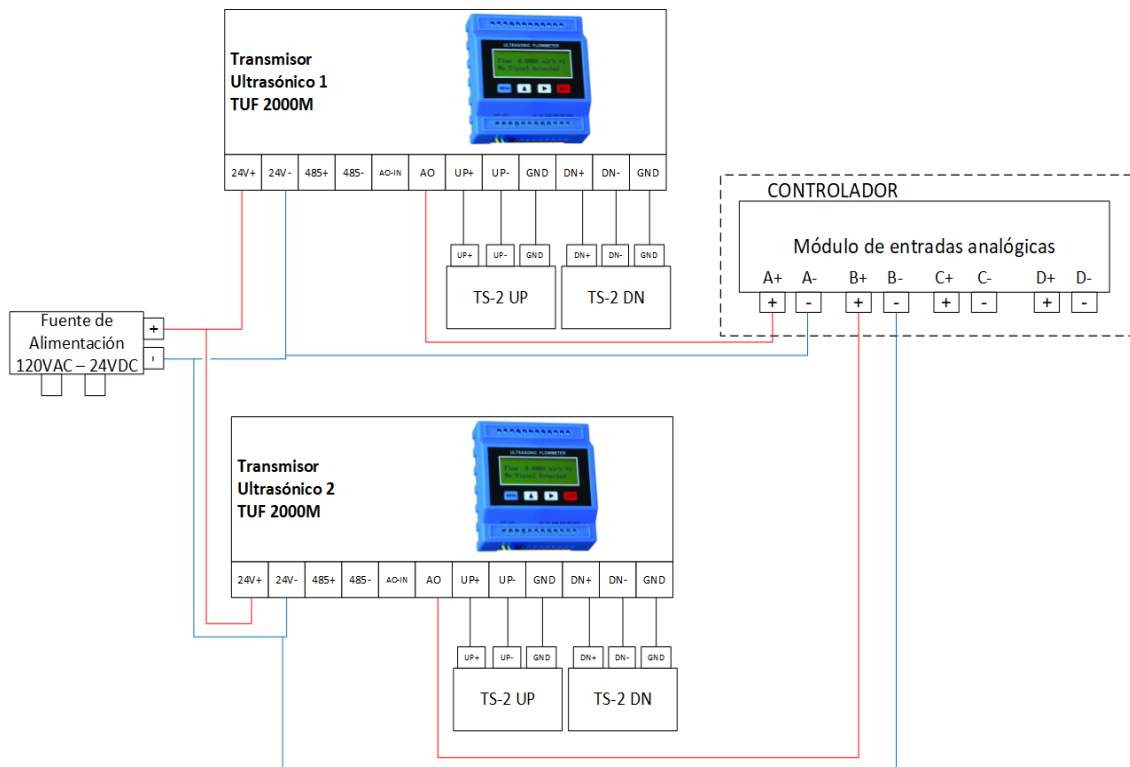
La velocidad del sonido del material se setea únicamente cuando el material de tubería que se utiliza no se encuentra disponible en la librería del caudalímetro. El tipo de sensores que se utilizan son de tipo Clamp On y la disposición de estos son en V, esta disposición es para tuberías con un diámetro de 15 a 200mm, en este caso tenemos una tubería de 3/4 pulgadas o 26,9mm. Una vez configurados todos estos códigos, ingresar al código M26 y presionar ENTER para guardar todas las configuraciones realizadas, se observará que el caudalímetro se reinicia, eso quiere decir que las configuraciones se han guardado con éxito. Para visualizar si esta correctamente configurado y listo para utilizar se revisa el menú M08, con el estado R. Si después de haber calibrado el caudalímetro se visualiza un valor de caudal sin tener flujo de agua, se procede a encerrarlo. Ingresar al código M42 y presionar ENTER, esperar 10 segundos y el caudalímetro mostrara una lectura de flujo igual a 0 lpm. Para el cambio de unidades del transmisor ultrasónico se debe ingresar en el parámetro M31 y colocar Litro por minuto lpm; en la ventana M45 se coloca el factor de escala, en el cual se ingresa 1 dado que el sistema es lineal. Una vez ingresado las unidades de medida y el factor de escala se proceden a seleccionar una de las señales estándares que permite el transmisor en el parámetro M55, para este caso se seleccionan 0: de 4 a 20mA. Después se debe ingresar el rango mínimo de operación en el parámetro M56, en este caso se ingresa 1 litro por minuto. Se ingresa el rango máximo de operación en el parámetro M57, en este caso colocamos 25 litros por minuto para el transmisor agua abajo y 43 lpm para el transmisor aguas arriba. Para verificar que los valores de la salida sean correctos se utiliza el parámetro M59 que permite visualizar los valores de corriente que entrega el transmisor una vez que se encuentra en funcionamiento.

Conexión eléctrica de los transmisores de caudal

Para realizar las conexiones necesarias para la implementación del control se basó en el manual de los equipos, el mismo que utilizando la salida analógica activa del transmisor ultrasónico de caudal, entrega una señal estándar de 4 a 20mA, las conexiones para obtener la señal de salida se deben realizar como se indica en la conexión, mostrada en la Figura 42:

Figura 42

Conexión de los transmisores al controlador (PLC)



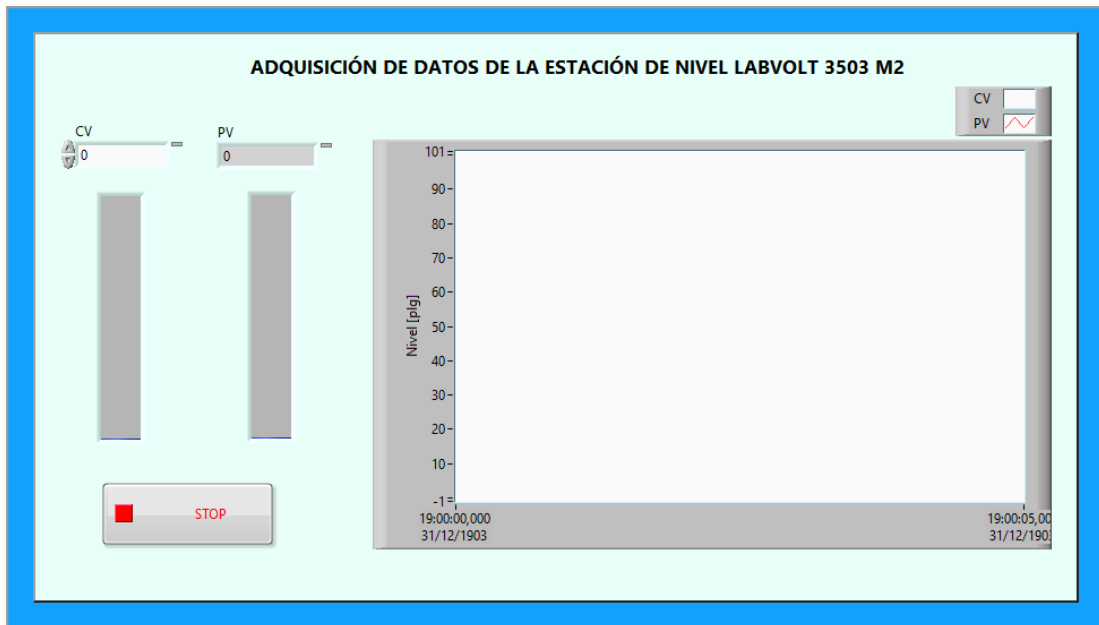
Identificación de la dinámica del proceso

Para el desarrollo de los controladores es necesario conocer la respuesta dinámica de las variables físicas medibles de la estación de nivel en una caldera, cuya válvula V-12 permanece con una apertura de 8 lpm en la toma de datos y control, para ello se excita mediante una entrada escalón, obteniendo una evolución del proceso, dicho comportamiento se representa mediante una función de transferencia con retardo en el tiempo, tanto para nivel como caudal en lazo simple y nivel en cascada con caudal.

Para obtener los datos que se requieren se emplea el software de simulación Labview, el cual se comunica con el PLC mediante el software TOP Server V 6.12, el cual emplea el protocolo de comunicación OPC. Para tal labor se crea una interfaz de usuario con el fin de observar mediante waveform chart y registrar los datos empleando Write Excel, como se observa en la Figura 43.

Figura 43

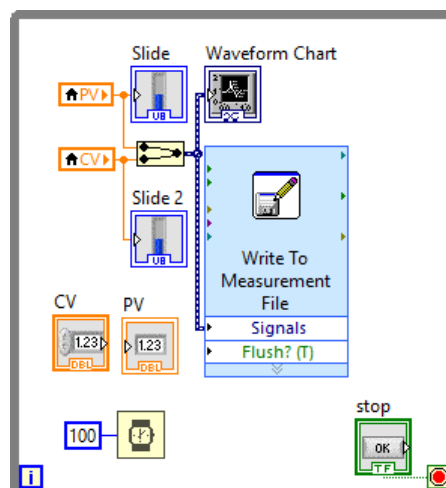
HMI para obtener la dinámica del proceso.



En la Figura 44, se muestra el diagrama de bloques que permite adquirir la dinámica del comportamiento de la planta, además de graficarla y registrarla en un archivo con extensión .xls, muestreado cada 100 ms, lo que garantiza la similitud del comportamiento real vs el adquirido, se realiza mediante el protocolo de comunicación OPC, el cual toma los datos que le entrega el PLC al cual se encuentra conectado mediante la dirección IP.

Figura 44

Diagrama a bloques para obtención de la dinámica de los procesos.

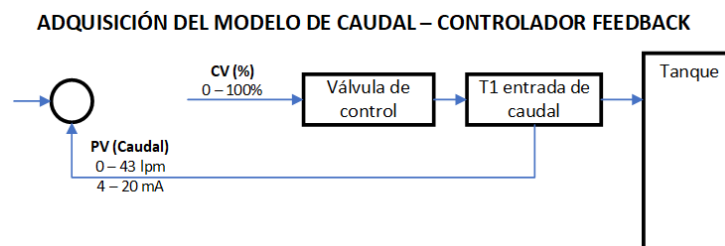


Proceso autorregulado caudal

La variación de datos de la salida vs la entrada del proceso autorregulado de caudal se obtiene mediante la identificación del comportamiento de Control Value (CV) y Process Value (PV), el cual responde ante una entrada escalón, dicha evolución se representa a partir de una función de transferencia con retardo en el tiempo. Para la determinación de CV y PV se considera un lazo de control abierto, como se indica en la Figura 45, con un muestreo de 100 ms.

Figura 45

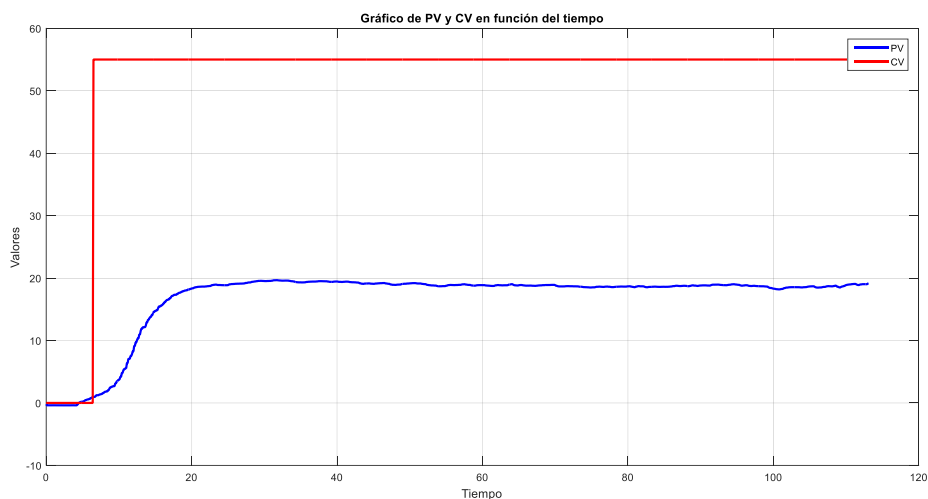
Lazo abierto para el control de caudal



Una vez que se tenga los datos, se los procesa en Matlab, cargando y graficándolos en el espacio de trabajo, verificando que se trata de un proceso autorregulado como se indica en la Figura 46.

Figura 46

Evolución del caudal ante una acción de control.

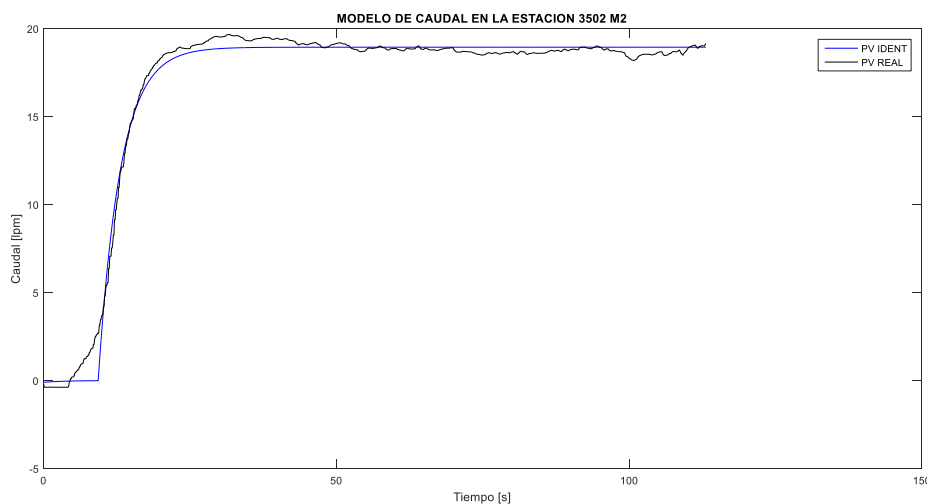


Posteriormente emplea la función "ident" en la ventana de comandos del mismo software, lo que permite ingresar a su apartado de identificación, en primera instancia se

deberá seleccionar “Time Domain Data”, luego en “import data” colocar como entrada CV, salida PV, con tiempo inicial 0 y tiempo de muestreo 0.1 s e importar. En la ventana de “ident” aparecerá cargada “My data”, habilitar la casilla de “Time plot”. Una vez habilitada la casilla se plotean los datos de entrada y salida previamente cargados, se procede a estimar el modelo matemático basado en los datos ingresados. Se estima el modelo matemático de forma computacional, “Model Output”, en este caso particular con un porcentaje de semejanza del 91.9%, como se muestra en la Figura 47.

Figura 47

Identificación de la variable de proceso, caudal.



Se obtiene entonces la función de transferencia, cuyas constantes obtenidas mediante software representan el comportamiento del proceso de flujo, lo que se empleará para simular el proceso industrial y cálculo de los controladores, dicho modelo matemático es el siguiente.

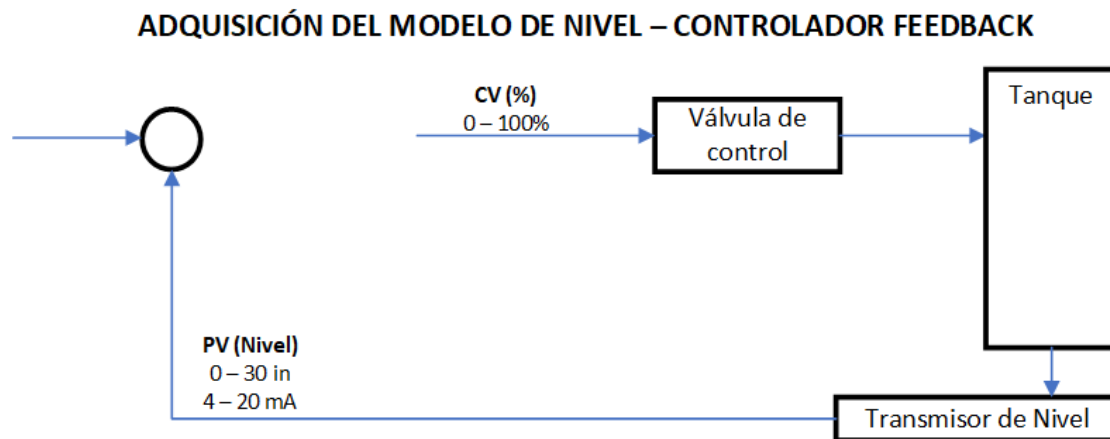
$$G(s) = \frac{0.3444}{3.7939 + 1} e^{-2.8106s}$$

Proceso autorregulado de nivel en lazo simple

Para obtener la evolución de la variable de nivel en la estación LabVolt 3503 M2, se requiere dar un valor a la variable de control CV, el lazo de control se encuentra en configuración de lazo abierto, véase la Figura 48.

Figura 48

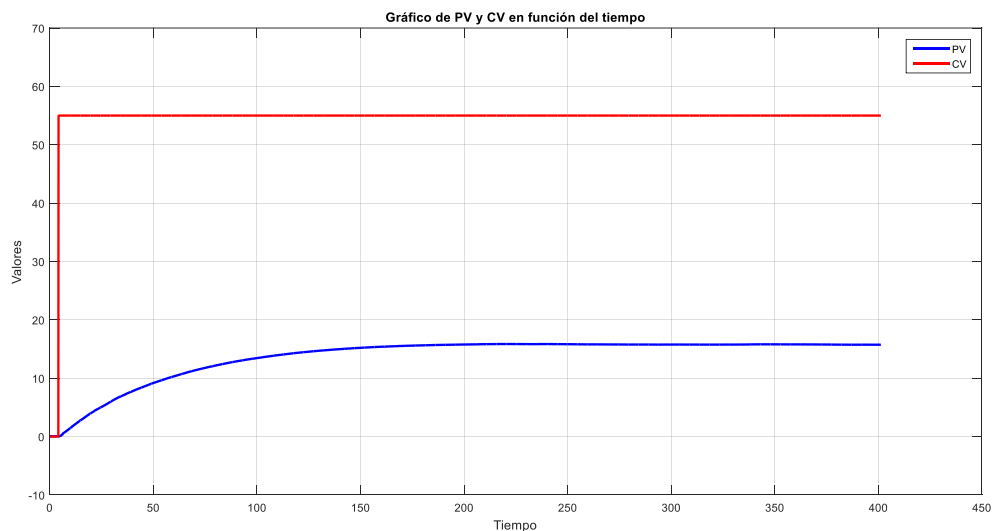
Lazo abierto para el control de nivel



En el escalón CV y la respuesta PV se obtendrá el ascenso de la variable de proceso nivel, notando que el comportamiento corresponde a un proceso tipo autorregulado, como se indica en la Figura 49.

Figura 49

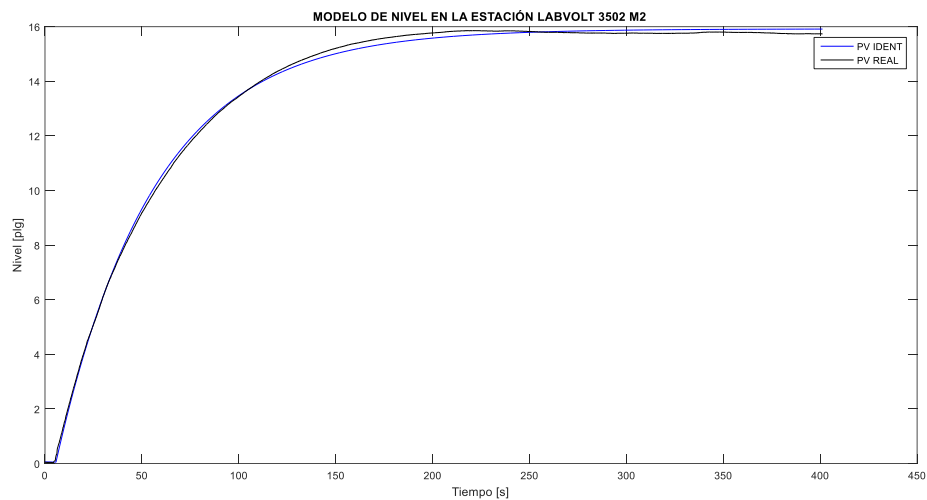
Evolución del nivel ante una acción de control



Los datos obtenidos de la gráfica son procesados en el ident de MatLab, como se mencionó en el apartado anterior para la obtención de la dinámica en procesos autorregulados, el porcentaje de semejanza es del 96.47%, como se muestra en la Figura 50.

Figura 50

Identificación de la variable de proceso, nivel



Por lo tanto, el modelo matemático del proceso nivel en lazo simple será:

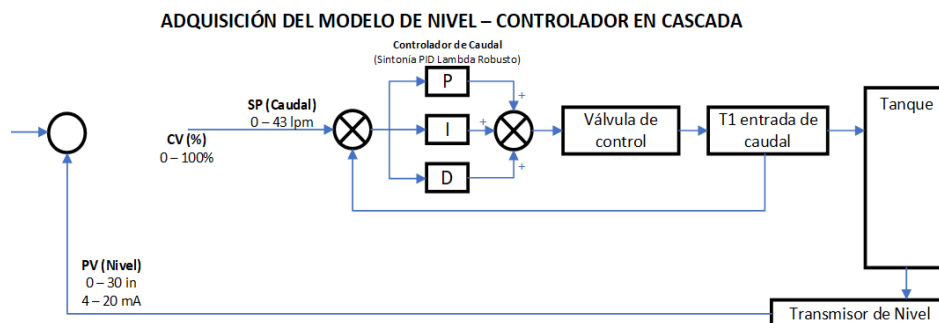
$$G(s) = \frac{0.28946}{50.472s + 1} e^{-1.4712s}$$

Proceso autorregulado de nivel en cascada

La evolución del nivel en la estación LabVolt 3503 M2 tiene un comportamiento ligeramente diferente, pero que debe ser considerado, cuando se la analiza conjuntamente con la etapa en la cual se controla el flujo de la misma, constituyendo un lazo abierto en cascada, por lo cual se recaba datos de valor de control CV y el valor del proceso PV de nivel considerando la configuración de la Figura 51, de modo que se determine el modelo matemático que representa el comportamiento a la planta en cascada.

Figura 51

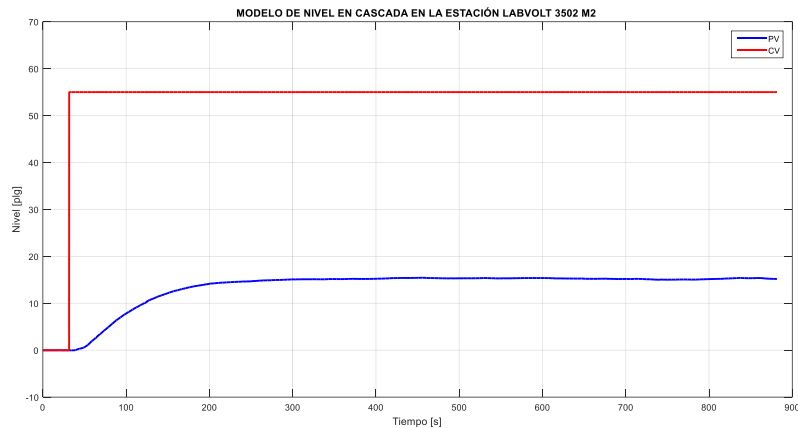
Lazo abierto para el control de nivel en cascada



Una vez obtenidos los datos de la variable manipulada y la evolución en ascenso del nivel en función de esta, se grafican en Matlab, obteniendo lo que se indica en la Figura 52, la cual indica que se trata de un proceso tipo autorregulado.

Figura 52

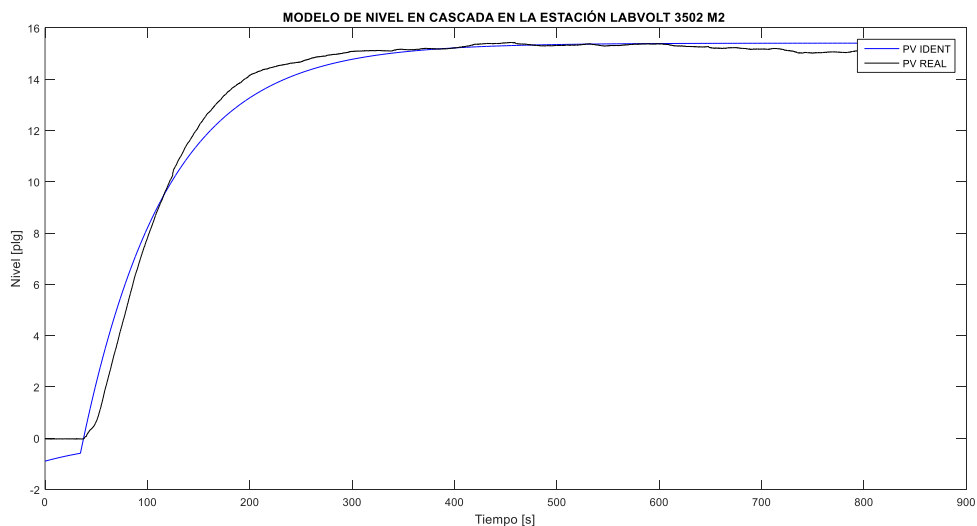
Evolución del nivel en cascada ante una acción de control



La evolución de la variable medida del proceso tiene un comportamiento el cual a partir de la herramienta de identificación de Matlab se puede ajustar a un modelo matemático que la represente, en este caso se tiene un 89.1% de similitud. Véase la Figura 53.

Figura 53

Identificación de la variable de proceso, nivel en cascada



El modelo matemático que representa el comportamiento de la variable nivel, considerándose el lazo abierto en cascada es la siguiente:

$$G(s) = \frac{0.28018}{82.094s + 1} e^{-3s}$$

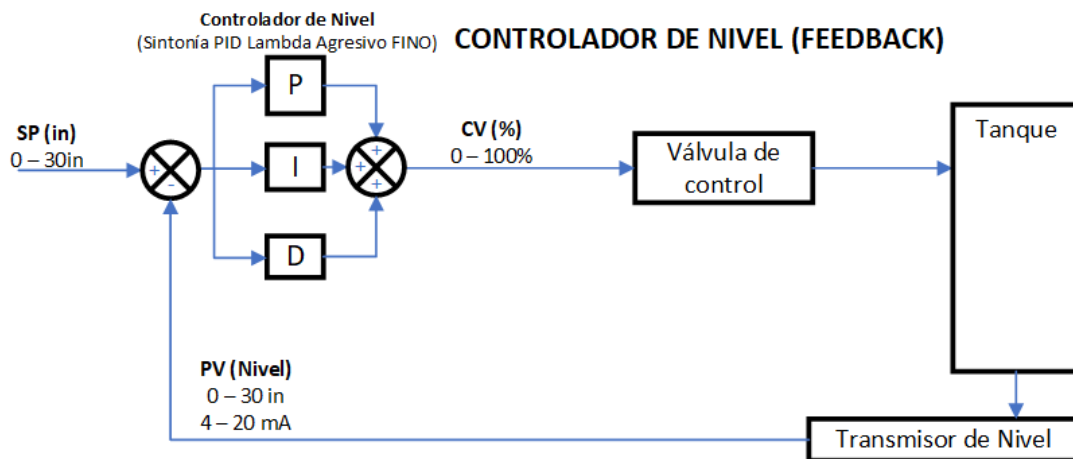
Diseño de controladores

Controlador Proporcional Integral Derivativo PID

Se diseña un lazo de control simple, en el cual intervenga la consigna de referencia, el bloque del controlador, actuador, sensor y sumatoria. Mediante lo cual se analiza la diferencia que existe entre el valor deseado y el valor real en que se encuentra la variable que se pretende controlar. Respondiendo al esquema mostrado en la Figura 54.

Figura 54

Lazo cerrado para el control PID de nivel.



La sintonización del bloque de control PID se realiza a partir de pruebas realizadas al control de la planta en función de varios métodos de sintonía, tales como Ziegler Nichols, Cohen Coon, CHR, Lambda, etc. Es indispensable disponer del modelo matemático que representa el comportamiento de la planta.

Controlador en Cascada

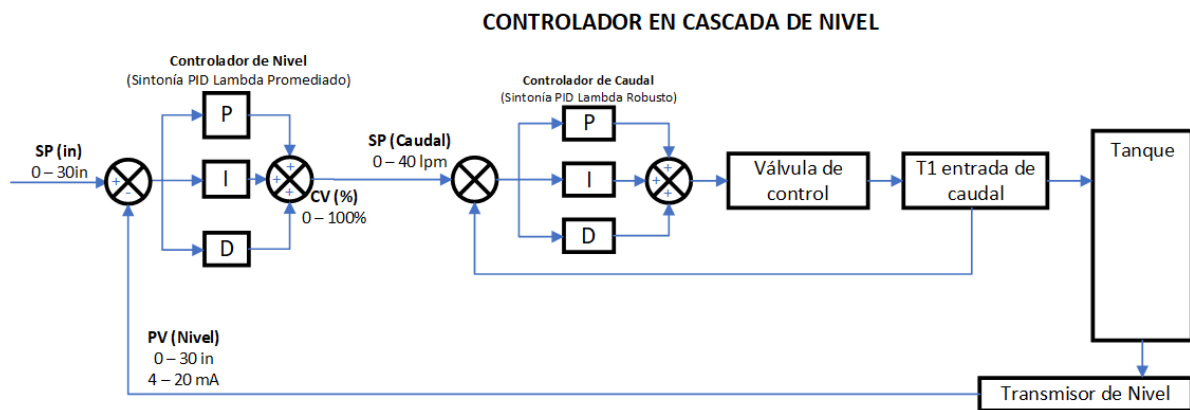
El lazo de control en cascada consta de múltiples lazos de control, ordenados jerárquicamente en función de la rapidez con la cual evoluciona las variables, el lazo secundario o interno se relaciona con la variable de flujo al ser más rápida en su reacción,

tiene como objetivo eliminar las perturbaciones antes de que estas se produzcan y el lazo primario o exterior involucra a la variable nivel, la salida del controlador primario constituye la señal de referencia para el lazo secundario.

Se emplea este tipo de configuración, Figura 55, a pesar de que su implementación sea compleja y requiriera más ajustes, debido a que ofrece mayor precisión, robustez, es menos propenso a oscilaciones, además de que es empleado en sistemas con múltiples variables en el cual se mejora el rendimiento.

Figura 55

Lazo cerrado para el control en cascada de nivel.



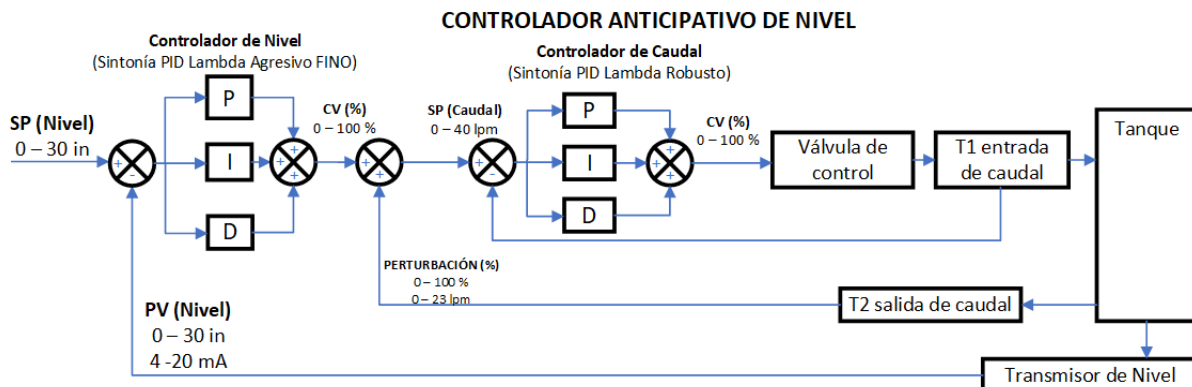
Controlador Anticipativo

Se trata de un lazo de control con anticipación, se utiliza y se anticipa el comportamiento futuro del proceso mediante los sensores ubicados en la línea de carga y descarga del tanque de nivel, lo que permite predecir una carga o descarga anticipada del líquido, que a su vez hace que tome acciones de control antes de que suceda el evento compensando los errores y corrigiendo las perturbaciones. Con respecto a la implementación requiere de un diseño y ajuste más detallado para considerar la anticipación; aumentando la adaptabilidad para anticipar cambios y ajustarse en situaciones cambiantes, obsérvese la Figura 32.

La estructura para la implementación del lazo de control anticipativo se presenta en la Figura 56, en la cual se considera 3 elementos de medida, 2 controladores, etc.

Figura 56

Esquema de implementación del control Anticipativo.



Sintonización de controladores

En el presente apartado se emplea técnicas de sintonización de controladores basadas en el modelo identificado de la planta, ya sea caudal o nivel, en lazo simple o cascada, para cada uno de los casos se utiliza la técnica de sintonía lambda, debido a que presenta mejor respuesta en la evolución del sistema al momento de ser controlado.

Controlador Proporcional Integral Derivativo PID de caudal

Controlador PID – Sintonización Lambda Robusta

donde: $Tcl = 3T$

$$k = \frac{1}{kp} \left(\frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + Tcl} \right)$$

$$Ti = T + \frac{L}{2}$$

$$k = \frac{1}{0.34} * \left(\frac{\frac{2.81}{2} + 3.79}{\left(\frac{2.81}{2} + (3 * 3.79) \right)} \right)$$

$$Ti = 3.79 \text{ s} + \frac{2.81}{2}$$

$$Ti = 5.20 \text{ s}$$

$$k = 1.20$$

$$Td = \frac{TL}{L + 2T}$$

$$Td = \frac{3.79 * 1.8}{2.81 + 2 * 3.79}$$

$$Td = 1.03 \text{ s}$$

Controlador Proporcional Integral Derivativo PID de nivel

a. Controlador PID – Sintonización Lambda Robusta

donde: $Tcl = 3T$

$$k = \frac{1}{kp} \left(\frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + Tcl} \right)$$

$$k = \frac{1}{0.29} * \left(\frac{\frac{1.6}{2} + 50.47}{\frac{1.6}{2} + (3 * 50.47)} \right)$$

$$k = 1.16$$

$$Ti = T + \frac{L}{2}$$

$$Ti = 50.47 \text{ s} + \frac{1.47}{2}$$

$$Ti = 51.20 \text{ s}$$

$$Td = \frac{TL}{L + 2T}$$

$$Td = \frac{50.47 * 1.47}{1.6 + 2 * 50.47}$$

$$Td = 0.73 \text{ s}$$

b. Controlador PID – Sintonización Lambda Agresivo

donde: $Tcl = T$

$$k = \frac{1}{kp} \left(\frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + Tcl} \right)$$

$$k = \frac{1}{0.29} * \left(\frac{\frac{1.6}{2} + 50.47}{\frac{1.6}{2} + (50.47)} \right)$$

$$k = 3.45$$

$$Ti = T + \frac{L}{2}$$

$$Ti = 50.47 \text{ s} + \frac{1.47}{2}$$

$$Ti = 51.20 \text{ s}$$

$$Td = \frac{TL}{L + 2T}$$

$$Td = \frac{50.47 * 1.47}{1.6 + 2 * 50.47}$$

$$Td = 0.73 \text{ s}$$

Para el parámetro de la constante proporcional se realiza una sintonía fina, promediando el resultado de K del método de sintonía robusta y agresiva:

$$k = 2.3087$$

Controlador en Cascada

Controlador PID – sintonización lambda agresivo

donde: $T_{cl} = T$

$$k = \frac{1}{k_p} \left(\frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + T_{cl}} \right)$$

$$T_i = T + \frac{L}{2}$$

$$k = \frac{1}{0.28} * \left(\frac{\frac{3}{2} + 82.10}{\frac{3}{2} + (3 * 82.10)} \right)$$

$$T_i = 82.10 \text{ s} + \frac{3}{2}$$

$$T_i = 83.6 \text{ s}$$

$$k = 3.57$$

$$T_d = \frac{TL}{L + 2T}$$

$$T_d = \frac{82.10 * 3}{3 + 2 * 82.10}$$

$$T_d = 1.47 \text{ s}$$

Controlador Anticipativo

Una vez realizado el cálculo de los controladores PID y cascada, se obtienen los parámetros de sintonización óptimos para el control anticipativo, constituido con un esquema de configuración feedback y Feedforward, dichos parámetros de resumen en la Tabla 5.

Tabla 5

Parámetros de sintonía para un controlador anticipativo de nivel

	Método	K	T _i (s)	T _d (s)
Control de Caudal	PID Robusto	1.20	5.20	1.03
Control de Nivel	PID Agresivo Fino	4.57	83.6	1.47

Diseño del HMI

La presentación del HMI, human machine interface, busca ser intuitiva y fácil de entender para el usuario, el cual tendrá a disposición varias pestañas, a lo largo de las cuales una vez haya accedido con las credenciales, visualizara la evolución de la simulación del proceso en tiempo real, los históricos de las variables controladas y un PID del proceso controlado, con la posibilidad de cambiar la consigna tanto de forma local como remota. Para la creación de la interfaz se emplea el software de simulación LabVIEW, el cual consta de poderosas herramientas que brindan cierto grado de realismo a la representación del proceso y la evolución de las variables, para su funcionamiento emplea programación gráfica.

Para la adquisición de datos en tiempo real se emplea el protocolo de comunicación OPC, vinculando las variables que evolucionan en el PLC hacia el HMI, muestreado cada 100 ms, el procedimiento consiste en crear un canal de comunicación en el software Top Server V6 o similares, con cada una de las empleadas, junto con la dirección asignada en la programación realizada en TIA Portal, posteriormente en la pantalla HMI se vincula un elemento de escritura, lectura, gráfica o registro, accediendo a las propiedades del mismo, data binding, DSTP Server, SW Toolbox TOPServer.V6 y vinculando finalmente con la variable correspondiente, véase la Figura 57, una vez vinculado se observara un recuadro en la parte superior derecha del elemento en el panel frontal, el cual al ejecutar la simulación se mostrara de color verde para indicar la correcta comunicación y de color rojo en el caso contrario.

Figura 57

Selección de tag mediante el protocolo OPC.

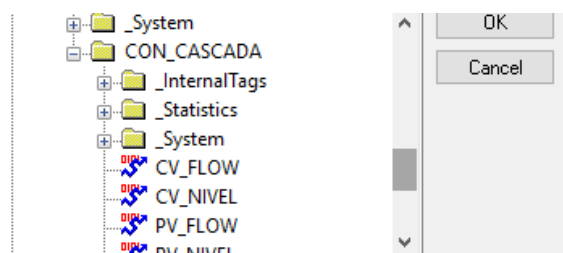
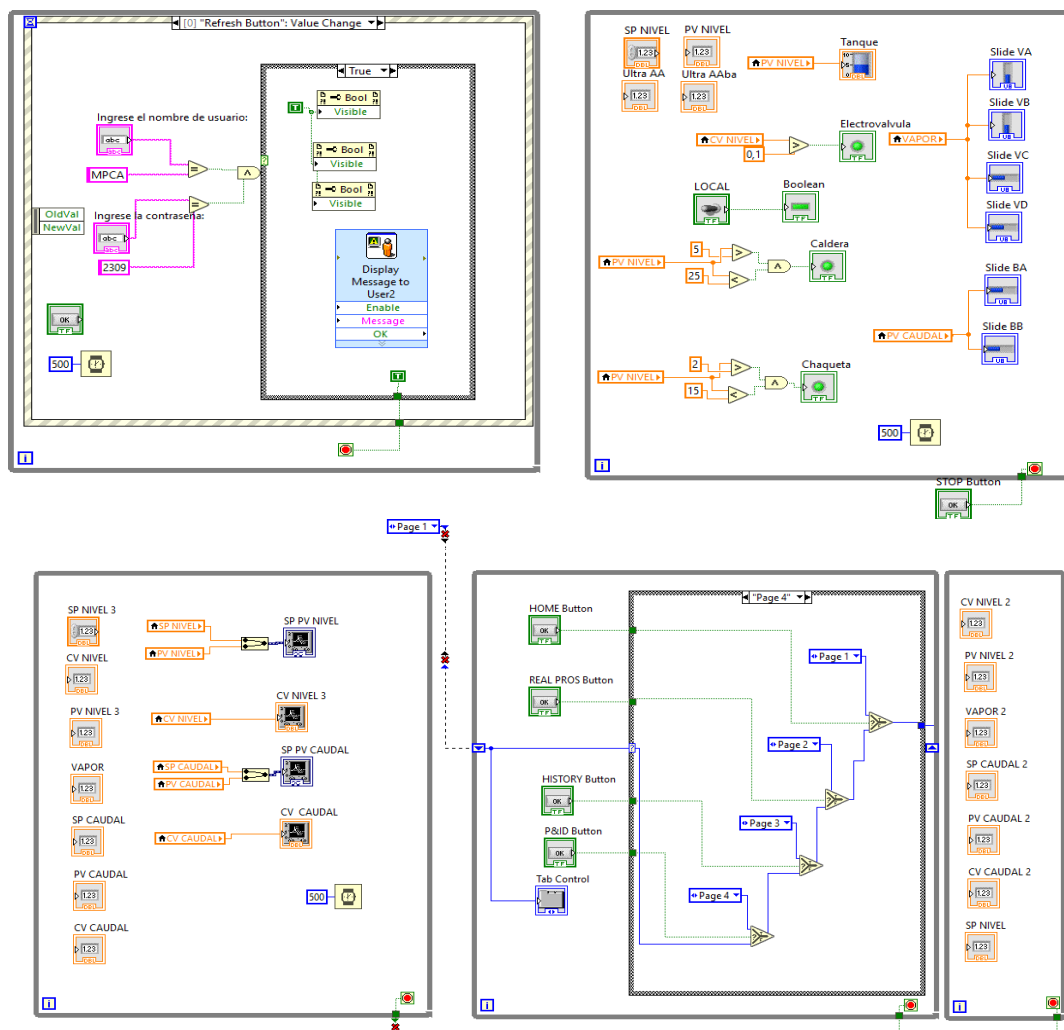


Diagrama de Bloques

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 58 corresponde a las conexiones necesarias realizadas entre elementos de escritura, lectura de datos, pantallas de visualización, variables que representan la evolución, entre otros muchos elementos, los cuales en conjunto permiten visualizar de manera local y remota la ejemplificación de lo que sucede en la estación de nivel, además de las respuestas de control que se está aplicando en tiempo real.

Figura 58

Diagrama de bloques del HMI



Pantalla de Inicio

En primera instancia, el HMI presenta una pantalla de inicio, donde se ingresa el usuario y contraseña para acceder a las siguientes pestañas, como se observa en la Figura

59, además se indica los datos más necesarios para entender el proceso al cual se está adentrando.

Figura 59

Pantalla de inicio del HMI

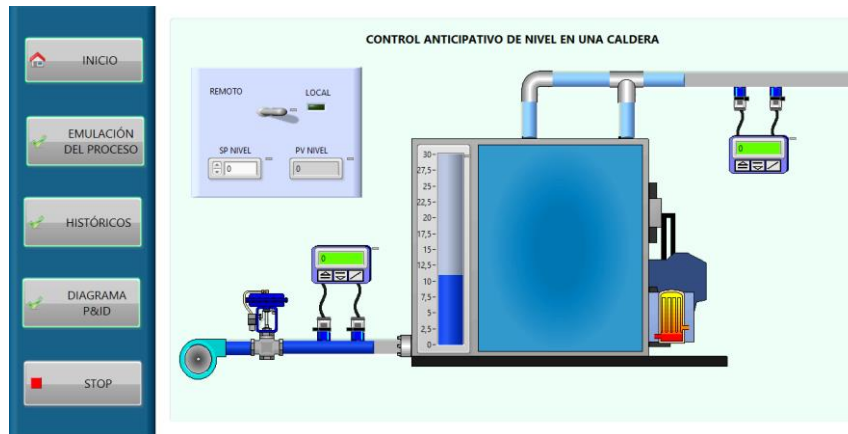


Pantalla del proceso emulado en tiempo real

La simulación del proceso de control de nivel en una caldera consta de una línea de alimentación de agua al tanque, cuyo flujo es monitoreado por un transmisor ultrasónico de caudal, el líquido será calentando mediante chaqueta térmica que envuelve al recipiente, tanto el nivel como la temperatura son variables que se representan gráficamente en el entorno simulado; posteriormente se tiene la línea de vapor o salida del tanque, la cual al igual que la línea de alimentación, están siendo monitorizados por sensores/transmisores ultrasónicos, cuya medida se presenta en pantalla. Además, se visualiza el estado de electroválvula con posicionador, el llenado de las tuberías, el encendido y apagado de la bomba, como se observa en la Figura 60.

Figura 60

Emulación del proceso en tiempo real

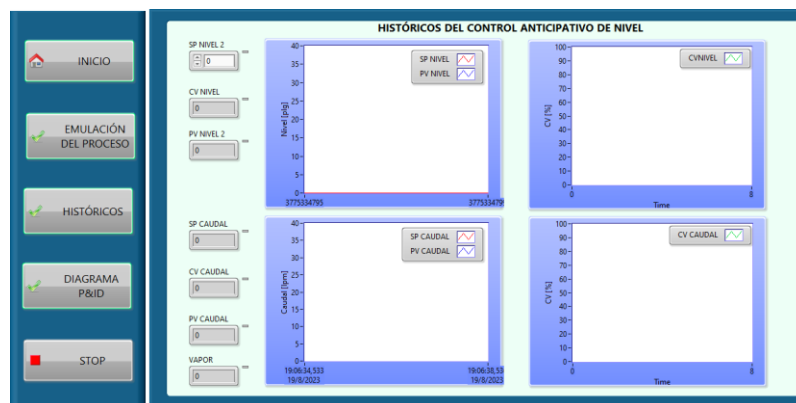


Pantalla de Históricos

La visualización y registro de la variable de proceso conjuntamente con la acción de control se presenta en la Figura 61, correspondiente a la variable nivel y caudal representadas de forma numérica y gráfica, a su vez se encuentran vinculados a un archivo con extensión .xls para su registro y su posterior procesamiento.

Figura 61

Pantalla de históricos.



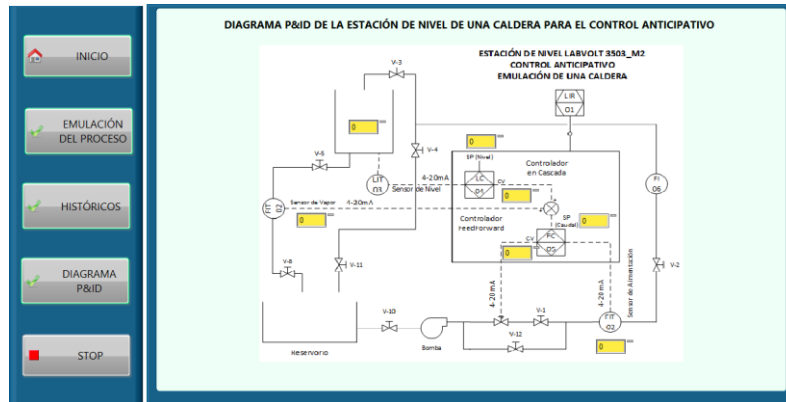
Pantalla del Diagrama P&ID

Cumpliendo con la normativa ISA 5.1, la cual establece la nomenclatura para la realización y etiquetado de diagramas P&ID de procesos, se presenta la Figura 62 que representa el control anticipativo de nivel en una caldera, considerando la estación de nivel

LabVolt 3503 M2, sobre la cual tienen elementos de medida como sensores, control e indicadores.

Figura 62

Pantalla del diagrama P&ID.

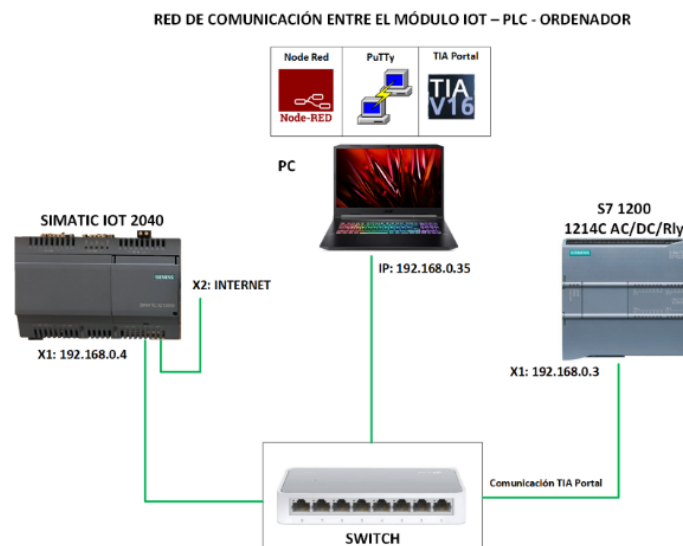


Implementación de la comunicación con la nube

En la siguiente Figura 63 se muestra los dispositivos para la comunicación entre el módulo IOT 2040 y el PLC S7-1200 1214c AC/DC/Rly utilizando Ethernet y un switch que permite interactuar entre todos los dispositivos.

Figura 63

Red de comunicación entre el módulo IOT – PLC



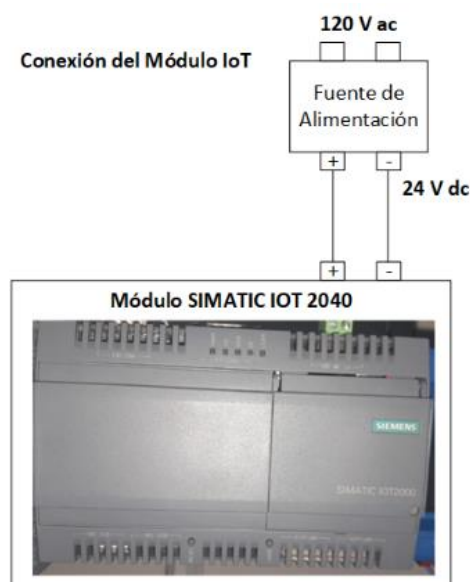
Para formar la red se colocó direcciones IP para identificar a cada dispositivo dentro de la red y así poder comunicarse, a continuación, se detalla la información de cada dispositivo. El **módulo IoT 2040** consta de dos puertos Ethernet, el puerto X1 se conecta al switch con la siguiente dirección IP: 192.168.0.4 y el puerto X2 se conecta al Internet. El **PLC S7-1200 1214c AC/DC/Rly** consta de un puerto Ethernet X1 al cual se le asigna de forma manual la siguiente dirección IP: 192.168.0.3 para la identificación dentro de la red. La **PC**, tiene un puerto Ethernet que va conectado al switch el mismo que se le asigna una dirección IP: 192.168.0.35 de forma manual. En el PC se debe tener instalado previamente los siguientes Software para el desarrollo de la red y su correcta comunicación entre todos los dispositivos: **TIA Portal V16**: Permite configurar, programar y desarrollar aplicaciones para el PLC, **PuTTY**: Permite la configuración del módulo IOT, **Node red**: Permite desarrollar entornos gráficos que se cargan y ejecutan en el módulo IOT.

Instalación del módulo IoT en la Estación de Labvolt 3503_M2

Para la instalación del módulo IoT en el mueble de conexiones, desde la fuente de alimentación se toma el positivo y negativo debido que para su correcta alimentación necesita 24V dc, como se muestra en la Figura 64.

Figura 64

Alimentación del módulo IOT 2040



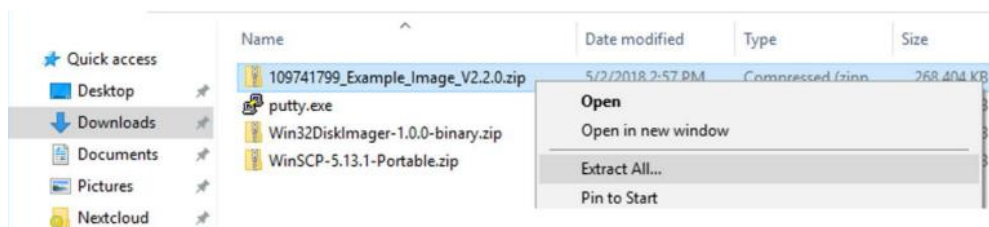
Configuración de la imagen en el módulo IoT

Para iniciar con la configuración del módulo IoT 2000 se debe tener dos softwares que son PuTTY el cual permite la comunicación con el módulo y Win32 Disk Imager el cual permite cargar y descomprimir el software de funcionamiento en la tarjeta MicroSD del módulo. Para ello se debe realizar:

- En el lector de tarjetas SC colocar la microSD
- Descomprima la imagen "109741799_Example_Image_V2.2.0.zip" mediante el menú contextual y "Extraer All..."

Figura 65

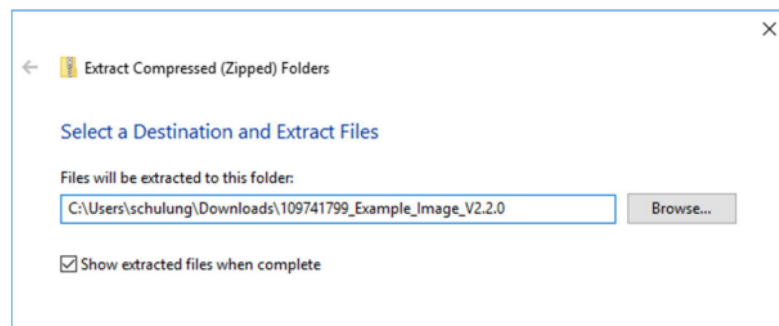
Descomprimir la imagen para la tarjeta microSD del módulo IOT



- Seleccione una ruta de destino y haga clic en "Extraer".

Figura 66

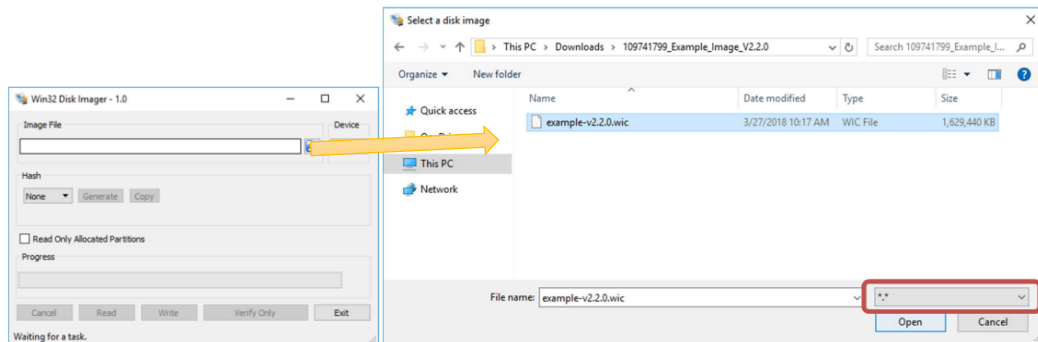
Extraer la imagen para la tarjeta microSD



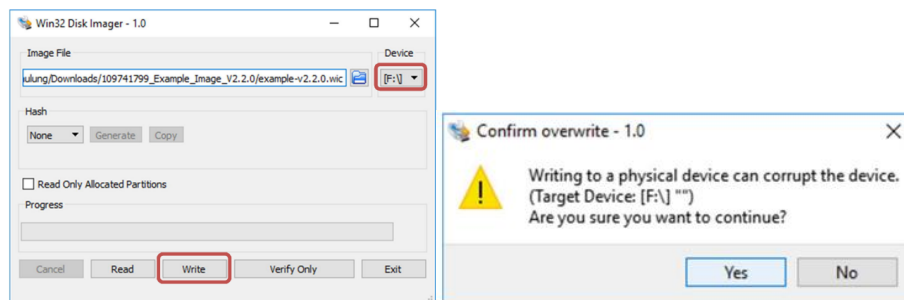
- Inicie Win32 Disk Imager y seleccione la imagen "example-v2.2.0.wic" que acaba de desempaquetar. Asegúrese de seleccionar el tipo de archivo "*.*".
- Seleccione el dispositivo y haga clic en "Escribir" asegurándose de que es la tarjeta microSD, después lea la advertencia y confírmala con "Sí":

Figura 67

Abrir Win32 Disk Imager para iniciar la imagen en la microSD

**Figura 68**

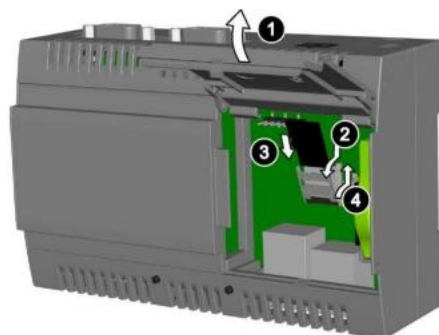
Escritura de la imagen en la microSD



Una vez finalizada la escritura de la imagen se desconecta la tarjeta SD del PC y se insértela en el módulo IOT2000, desconectado la fuente de alimentación. Como se puede observar en la siguiente Figura 69. Finalmente se debe volver a conectar el módulo a la alimentación.

Figura 69

Insertar la microSD en el módulo IOT



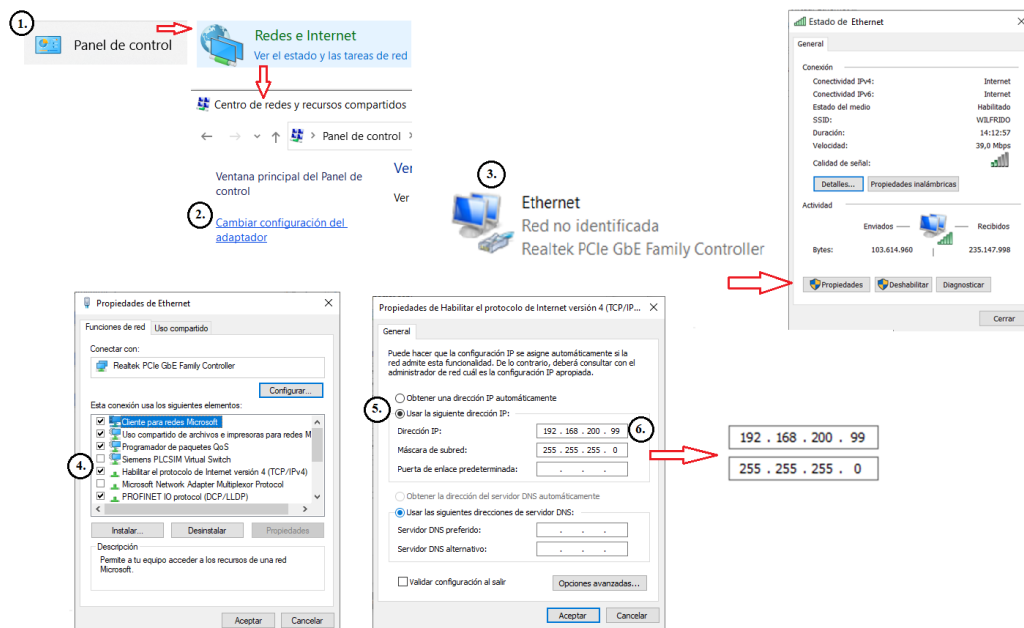
Configuración de la dirección IP del módulo

El módulo IoT 2000 trae por defecto la IP 192.168.200.1 con una máscara de subred 255.255.255.0, para poder comunicarse se debe cambiar la dirección IP del ordenador a una que sea 192.168.200.X, para cambiar la IP del ordenador se debe realizar los siguientes pasos:

1. Ingresar al Panel de control → después ingresar a Redes e internet y seleccionar en centro de redes y recursos compartidos.
2. Acceder a “Cambiar configuración del adaptador”
3. Dar clic en “Conexión de área local” y seleccionar “Propiedades”
4. Dar clic en “Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)”
5. Escoger “Usar la siguiente IP”.
6. Introducir la IP que más le convenga, en este caso vamos a ingresar la IP 192.168.200.99

Figura 70

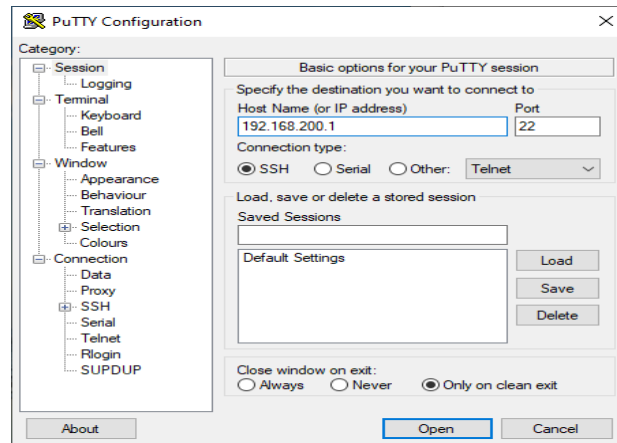
Pasos para el cambio de la dirección IP Ordenador



La conexión al módulo IoT se realiza mediante una conexión SSH, por medio del Software PuTTY y un cable Ethernet al ordenador.

Figura 71

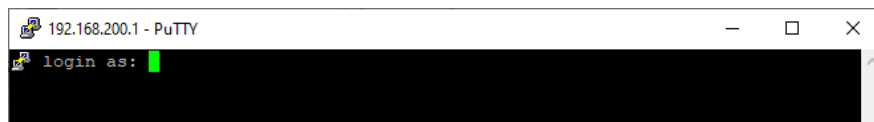
Conexión vía PuTTY con el módulo IoT



Una vez ingresada la dirección IP del módulo en el “Host Name” y dando clic en “Open” se abre la conexión para iniciar la configuración.

Figura 72

Ventana de configuración IoT



Una vez conectado al módulo pide iniciar sesión, colocando en login as: root y password por defecto no se ingresa, pero por cuestión de seguridad se debe configurar en este caso no se necesita.

Figura 73

Ventana de configuración IoT ingreso del usuario



Con el comando “iot2000setup” ingresamos a la configuración del módulo, en este menú se puede cambiar la IP, configuración de los programas y la contraseña del dispositivo.

Figura 74

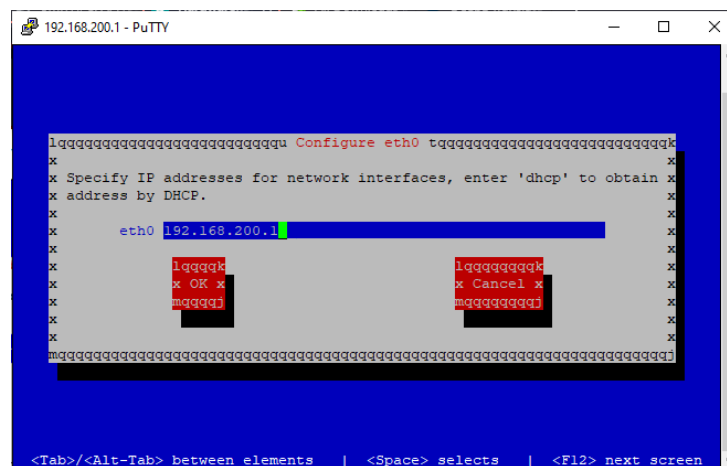
Menú de configuración del módulo IoT 2000



Para modificar la dirección IP se ingresa en la opción “Networking”, Configure Interfaces y se procede a cambiar la dirección IP del módulo a 192,168.0.4 para formar la red.

Figura 75

Cambio de la IP del módulo IoT



Configuración de Node red con el módulo IoT

La forma más sencilla de programar el módulo IoT 2000 es a través del software Node red que permite realizar entornos gráficos por nodos. Para iniciar, se debe ingresar el siguiente comando “node /usr/lib/node_modules/node-red/red &”, el cual permite ejecutar la aplicación.

Figura 76

Ejecución del software Node red en el módulo IoT 2000

```

192.168.0.4 - PuTTY
login as: root
Last login: Tue Aug 8 18:34:53 2023 from 192.168.200.5
root@iot2000:~# node/usr/lib/node_modules/node-red/red

```

Una vez finalizado de cargar se obtiene el siguiente mensaje:

Figura 77

Ejecución de Node-Red en el menú de comandos

```

node-red
added 1 package in 6s
28 packages are looking for funding
  run `npm fund` for details
C:\Users\ASUS\node-red
0 Aug 14:07:23 - [info]
Welcome to Node-RED
=====
0 Aug 14:07:23 - [info] Node-RED version: v2.0.2
0 Aug 14:07:23 - [info] Node.js version: v20.5.0
0 Aug 14:07:23 - [info] Windows_NT 10.0.19045 x64 LE
0 Aug 14:07:24 - [info] Loading palette nodes
0 Aug 14:07:25 - [info] Settings file : C:\Users\ASUS\node-red\settings.js
0 Aug 14:07:25 - [info] Context store : 'default' [module-memory]
0 Aug 14:07:25 - [info] User directory : C:\Users\ASUS\node-red
0 Aug 14:07:25 - [warn] Projects disabled : editorTheme.projects.enabled=false
0 Aug 14:07:25 - [info] Flow file : C:\Users\ASUS\node-red\flows.json
0 Aug 14:07:25 - [info] Creating new flow file
0 Aug 14:07:25 - [warn]
-----
Your flow credentials file is encrypted using a system-generated key.
If the system-generated key is lost for any reason, your credentials
file will not be recoverable, you will have to delete it and re-enter
your credentials.

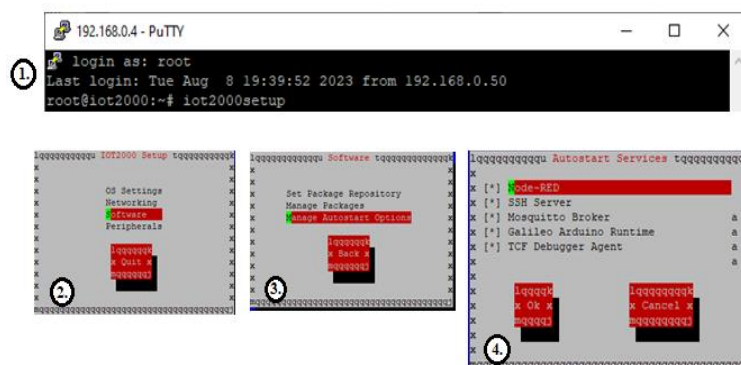
```

En la Figura 78 se realiza las configuraciones, para que la aplicación Node red se active cada vez que se encienda el módulo IoT. Para ello se realiza los siguientes pasos:

1. Colocar el comando `iot2000setup` y escoger la pestaña Software y seleccionar Manage Autostart Options
2. Verificar que se encuentre “[*]” en la opción de Node-RED

Figura 78

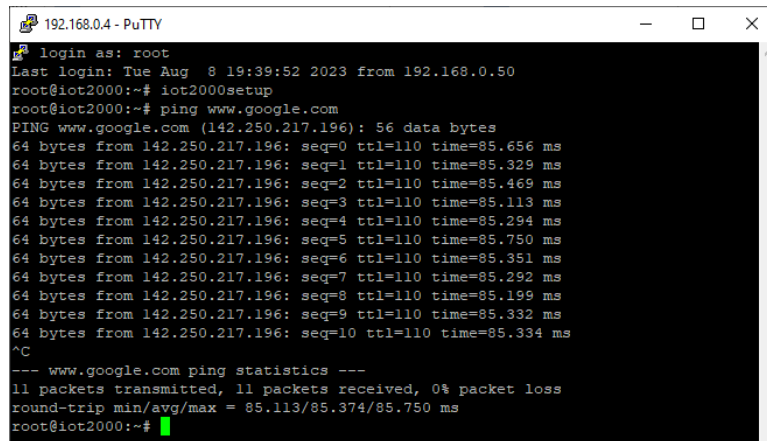
Configuración para Autostart de node-RED en el módulo



Se debe verificar que el módulo esté conectado a Internet por este motivo se realiza ping a www.google.com, como se puede observar en la siguiente Figura 79.

Figura 79

Comprobación de la conexión a Internet del módulo IoT



```

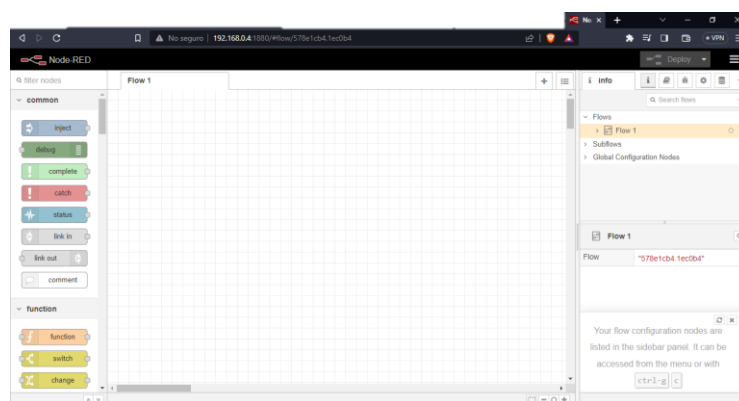
192.168.0.4 - PuTTY
login as: root
Last login: Tue Aug 8 19:39:52 2023 from 192.168.0.50
root@iot2000:~# iot2000setup
root@iot2000:~# ping www.google.com
PING www.google.com (142.250.217.196): 56 data bytes
64 bytes from 142.250.217.196: seq=0 ttl=110 time=85.656 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=1 ttl=110 time=85.329 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=2 ttl=110 time=85.469 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=3 ttl=110 time=85.113 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=4 ttl=110 time=85.294 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=5 ttl=110 time=85.750 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=6 ttl=110 time=85.351 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=7 ttl=110 time=85.292 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=8 ttl=110 time=85.199 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=9 ttl=110 time=85.332 ms
64 bytes from 142.250.217.196: seq=10 ttl=110 time=85.334 ms
^C
--- www.google.com ping statistics ---
11 packets transmitted, 11 packets received, 0% packet loss
round-trip min/avg/max = 85.113/85.374/85.750 ms
root@iot2000:~#

```

Para abrir Node red se debe ingresar a un navegador con la dirección 192.168.0.4:1880 el mismo que consta de varios nodos básicos para el diseño del entorno gráfico, observe la Figura 80.

Figura 80

Entorno de la aplicación node-RED

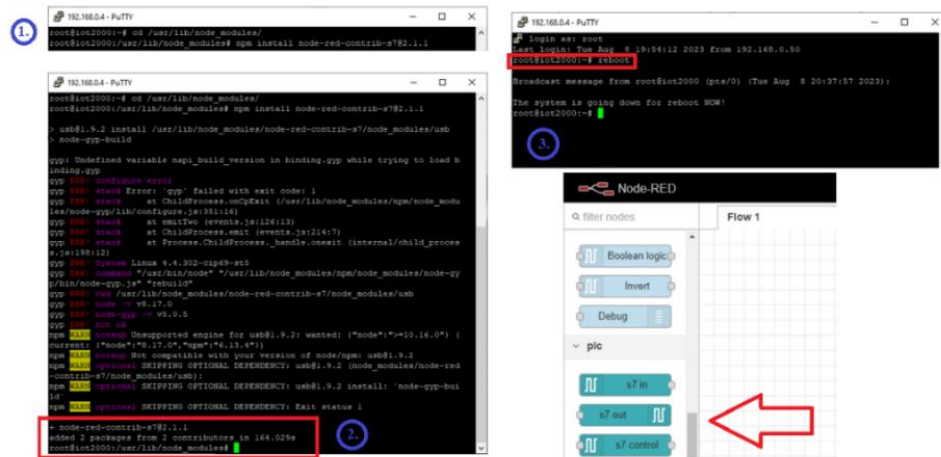


Debido a que se va a recibir y enviar información del PLC S7-1200 con protocolo de comunicación s7, por lo tanto, se debe instalar el nodo s7. Se recomienda que la instalación se realice por consola cuando se utiliza el módulo IoT 2000. Para ello se realiza los siguientes pasos:

1. En la ventana de comandos ingresar `cd /usr/lib/node_modules/` y dar Enter.
2. Ingresar el comando de instalación del nodo `s7 npm install node-red-contrib-s7@2.1.1`
3. Una vez instalado el nodo se debe reiniciar el módulo IoT 2000.
4. Verificar que existan los bloques del nodo S7 en la aplicación Node red.

Figura 81

Instalación del nodo S7 para la comunicación con el PLC S7-1200



Configuración para acceder a los datos desde IoT2000 en protocolo S7

En el programa TIA Portal v16 se desarrolla el control anticipativo de la estación de Nivel Labvolt 3503M en el cual se requiere la lectura y escritura de los tags relevantes del proceso de nivel para ello se indica las configuraciones que hay que realizar para acceder a los datos del PLC desde el módulo IoT 2000. En la configuración se realiza los siguientes pasos:

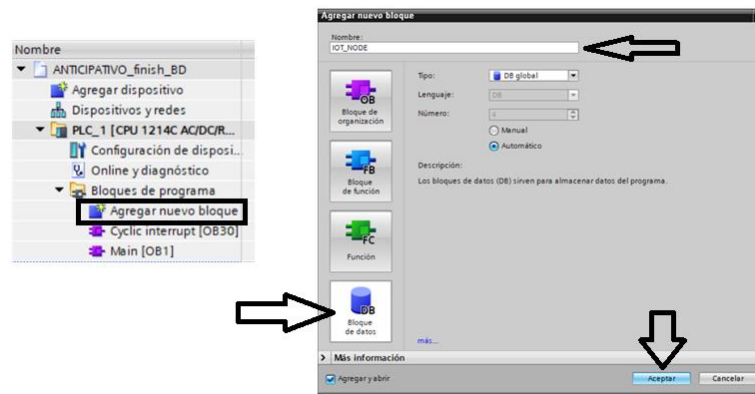
Creación de una base de datos

En la Figura 92 se observa cómo crear una base de datos con las variables de interés del proceso, con la finalidad del monitoreo y control es decir lectura y escritura de tags. Para ello se debe realiza:

- Dar clic en Agregar nuevo bloque
- Seleccionar Bloque de datos, asignar un nombre y por último aceptar.

Figura 82

Creación de base de datos en TIA Portal de las variables de interés



- Una vez creada la base de datos, se ingresan los nombres de los tags de interés y el tipo de datos como se puede observar en la siguiente Figura 83.

Figura 83

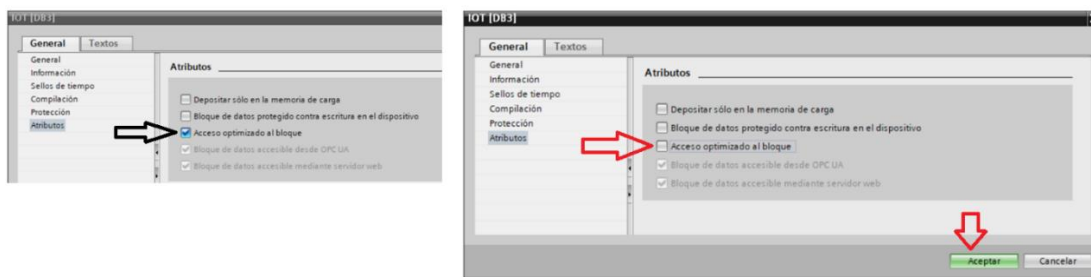
Base de datos con las variables de interés del controlador anticipativo

Nombre	Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arran...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ...	Valor de a...
	1	Static							
	2	NIVEL_PV	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	3	NIVEL_CV	4.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	4	NIVEL_SP	8.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	5	CAUDAL_PV	12.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	6	CAUDAL_CV	16.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	7	SP_REMOTO	20.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	8	REMOTO	24.0	false		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	9	CAUDAL_SP	26.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

- Luego se debe desactivar el Acceso optimizado al bloque, ingresando a las propiedades de la base de datos creada como se muestra en la Figura 84.

Figura 84

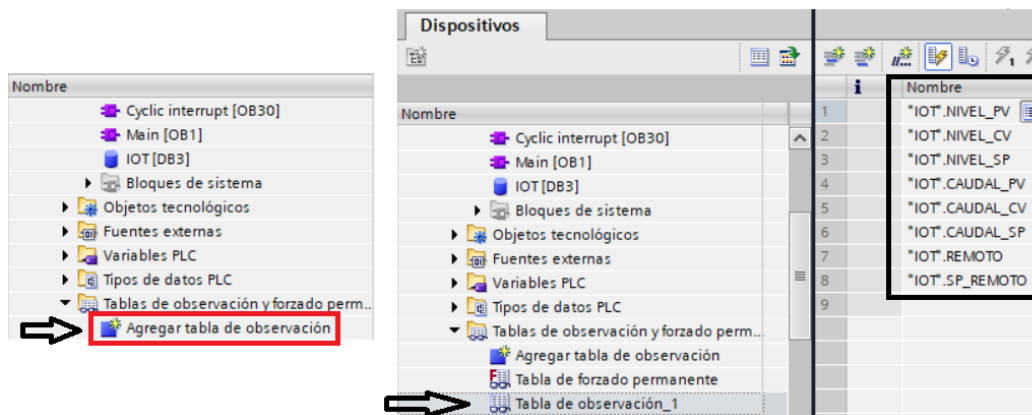
Desactivar el Acceso optimizado al bloque de la base de datos creada



Por último, se debe compilar la base de datos. Además, se debe crear una tabla de observación y forzado con las variables de la base de datos con la finalidad de ver la codificación en la dirección para cada variable, que es necesario para la comunicación del PLC con Node red.

Figura 85

Identificación de la dirección de cada variable

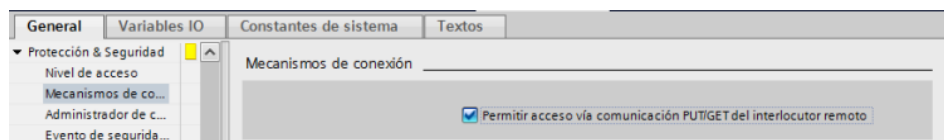


Activación del permiso de acceso del PLC

Se activa el permiso de acceso para los servidores PUT/GET, así permite realizar la operación GET de lectura de datos del PLC hacia el IoT2040 mientras que el servicio PUT realiza la escritura de datos desde IoT2040 hacia el PLC. Esta opción se encuentra dentro de la ventana de **propiedades del PLC**, en la pestaña de **Protección & Seguridad**.

Figura 86

Activación de la conexión PUT/GET



Una vez realizada la configuración en el PLC y cargada en el mismo, el PLC está listo para poder comunicarse con el módulo IoT 2000 mediante el protocolo S7.

Configuración de las variables de interés en el módulo IoT

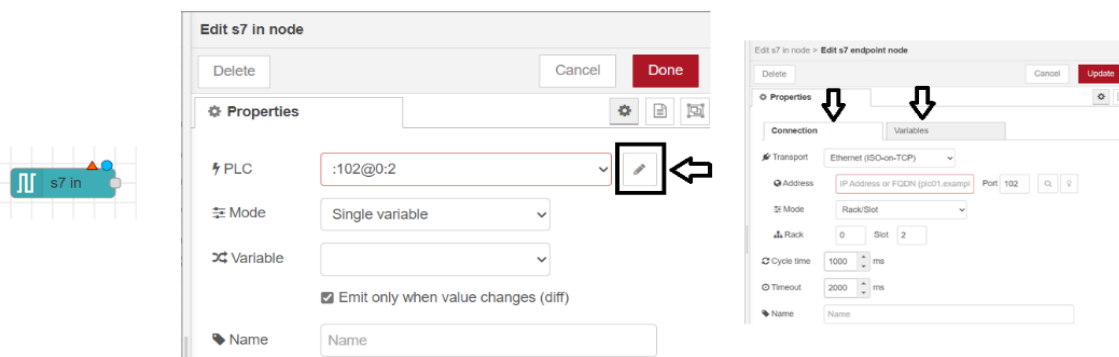
Para configurar la lectura y escritura de las variables de interés del proceso se utiliza la aplicación Node red con los nodos de S7 para la comunicación con el PLC.

- **Configuración de lectura de datos**

La lectura de datos del PLC se realiza a través del nodo **S7 in** junto con cualquier otro nodo que muestre los datos leídos por el IoT2000. Para configurar el nodo se lo realiza por medio de dos pestañas una relacionada con la comunicación con el PLC y otra con las variables a manipular. La Figura 87 muestra el nodo de lectura de una variable del PLC S7-1200.

Figura 87

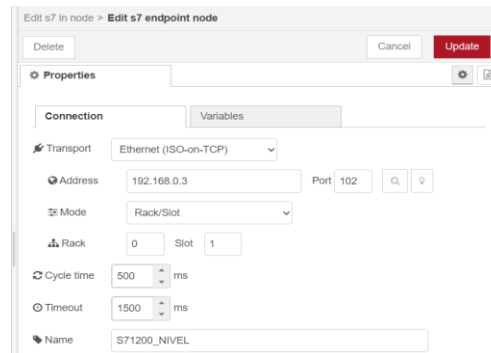
Configuración del Nodo S7



Para la configuración se realiza lo siguiente: En la pestaña de conexión se colocará la IP del PLC de donde se lee los datos solicitados y el puerto reservado para el protocolo S7 es el 102. Se debe ingresar el Rack/Slot del PLC que se puede observar en el programa TIA Portal para este caso es 0/1 respectivamente. Además, permite configurar el tiempo de ciclo y un tiempo muerto que por defecto es 500 milisegundos y un segundo y medio respectivamente, el tiempo muerto es para detener la transmisión cuando no reciba ninguna información.

Figura 88

Configuración de la pestaña de conexión del nodo S7 in



En la pestaña de variables se especifica las variables de interés del proceso que se quiere leer. Para introducir el tipo de variables se basa en el código proporcionado por el nodo S7 y la identificación de cada variable en la base de datos del PLC. En la siguiente tabla, se muestra las direcciones y nombres a introducir para cada variable:

Tabla 6

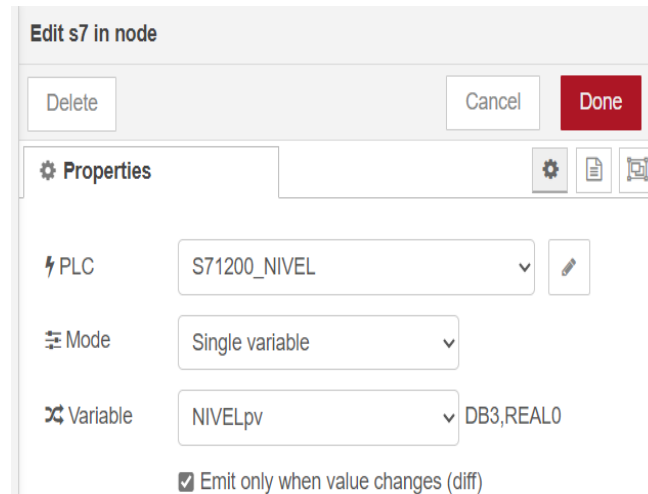
Equivalencia de las direcciones en el nodo S7

Nombre	Dirección Node	Equivalente S7	Tipo de datos
NIVEL_PV	DB3,REAL0	DB3.DBD0	Real
NIVEL_CV	DB3,REAL4	DB3.DBD4	Real
NIVEL_SP	DB3,REAL8	DB3.DBD8	Real
CAUDAL_PV	DB3,REAL12	DB3.DBD12	Real
CAUDAL_CV	DB3,REAL16	DB3.DBD16	Real
CAUDAL_SP	DB3,REAL20	DB3.DBD20	Real
SP_REMOTO	DB3,REAL26	DB3.DBD26	Real
REMOTO	DB3,X24.0	DB3.DBX24.0	Bool

Una vez identificado las direcciones las variable de lectura se procede a vincular cada una con su respectivo nodo S7 in. En la Figura 89 se muestra la configuración:

Figura 89

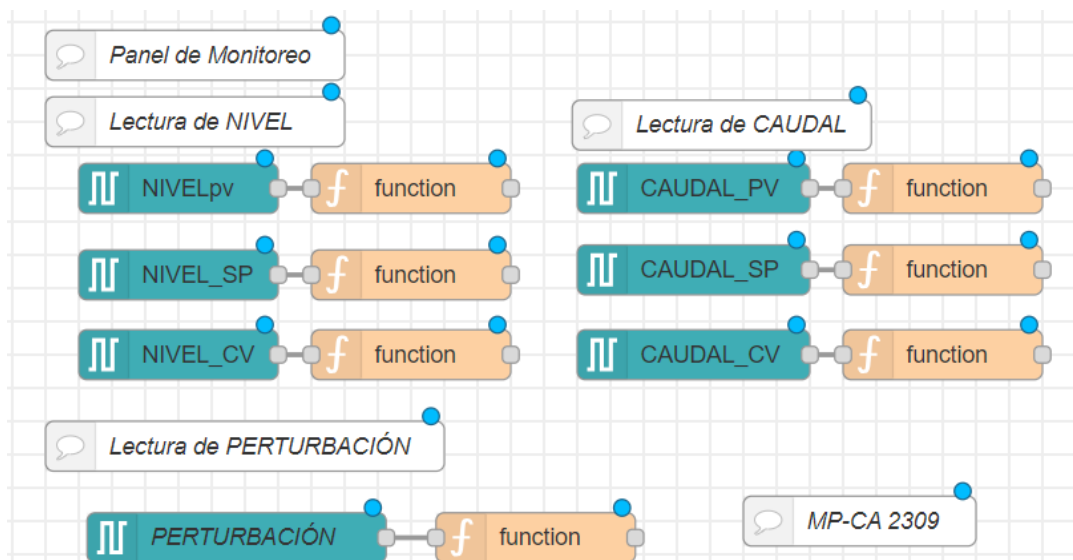
Variable de Nivel vinculada al nodo S7



Con los pasos realizados, se forma el flujo en Node red para permitir la lectura de las 7 variables de interés del proceso (Caldera), como se muestra en la Figura 90.

Figura 90

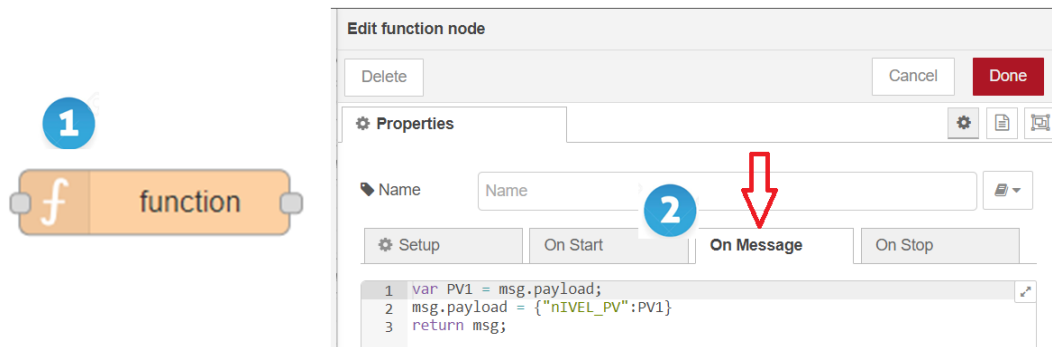
Lectura de las variables de interés de la caldera



En la Figura 91 los nodos de Función se programan para representar cada uno de los datos del PLC leídos por su nombre y valor, otorgando así su identificación única para cada variable en la plataforma IoT.

Figura 91

Acondicionamiento del dato con el Nodo Function para su lectura

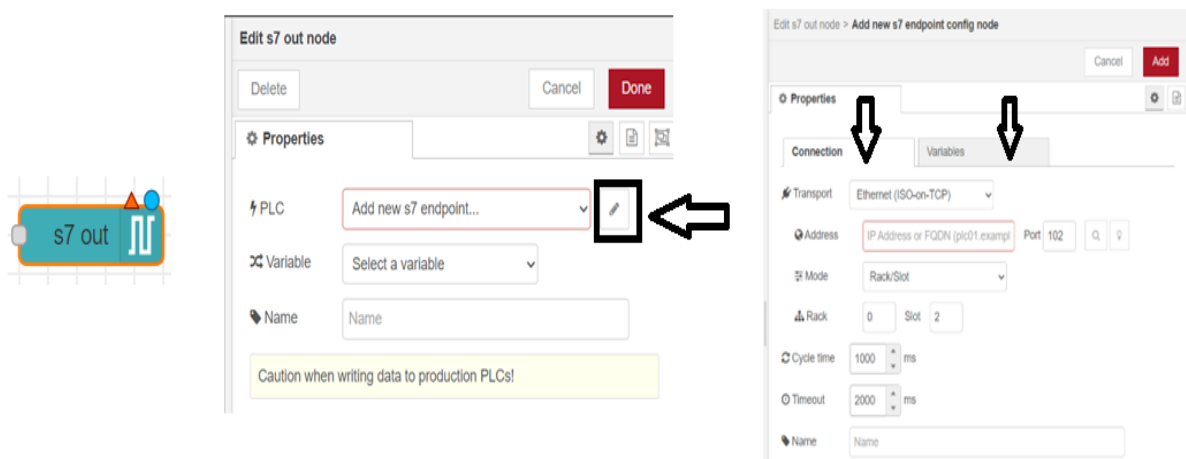


- **Configuración de escritura de datos**

La escritura de datos del PLC se realiza a través del nodo **S7 out** junto a otro nodo que ingrese los datos desde el módulo IoT2000 hasta el PLC. Consta con la pestaña de conexión y variables al igual que el nodo de lectura.

Figura 92

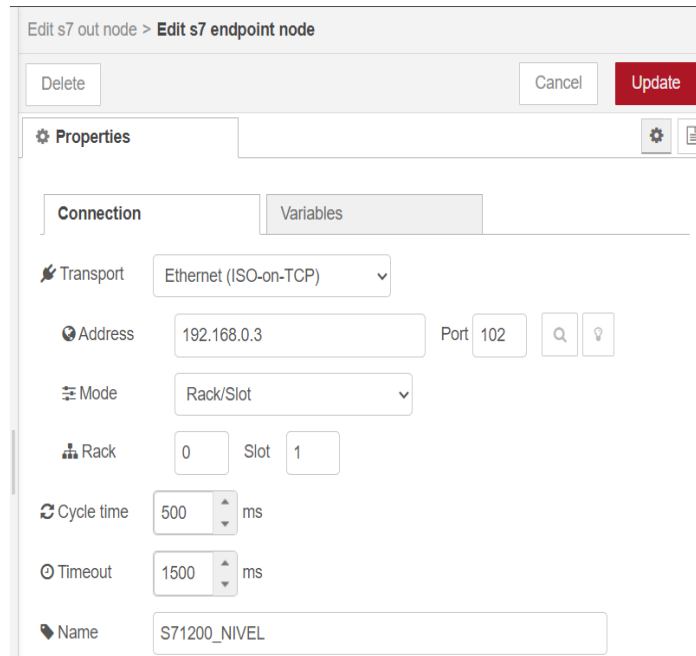
Configuración del Nodo S7 out



En la pestaña de conexión y en la pestaña de variables de la misma forma que el nodo S7 in de lectura como se muestra en la Figura 93.

Figura 93

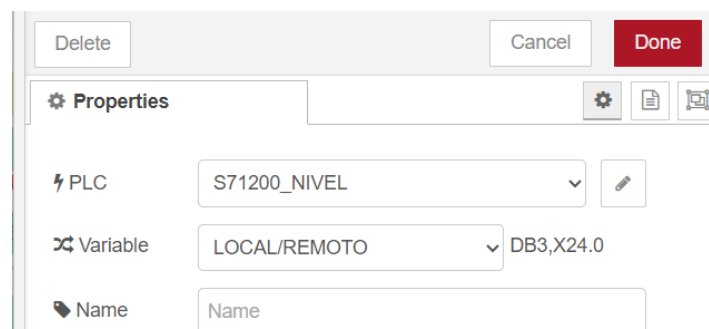
Configuración de la pestaña de conexión del nodo S7 out



Una vez identificado las direcciones las variable de escritura se procede a vincular cada una con su respectivo nodo S7 out. En la Figura 94 se muestra la configuración:

Figura 94

Vinculación de las variables de escritura al nodo S7 out

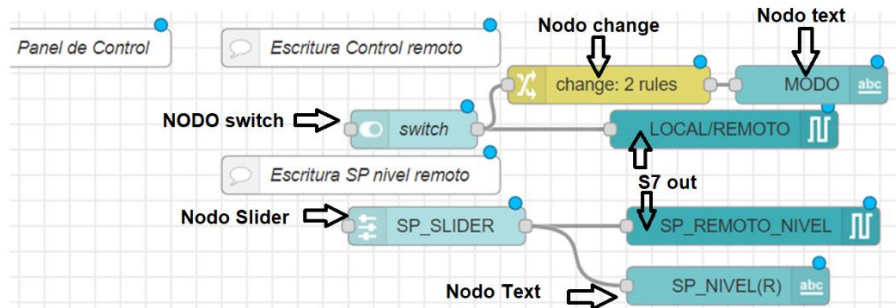


Repetiendo los pasos mencionados se forma el flujo en Node red para la escritura de las 2 variables de control que corresponde al switch de local/remoto y al ingreso del set

point de nivel desde la plataforma IoT por medio de un dispositivo inteligente, como se muestra en la Figura 95.

Figura 95

Estructura para la escritura de las variables de control



- El **Nodo switch** permite enviar una señal booleana (true o false) para encender el modo de control: modo Local o el modo Remoto.

- El **Nodo slider** permite enviar una señal real de 0 a 30 que es el valor de setpoint de nivel deseado de la Caldera.

Ambos nodos se encuentran conectados al S7 out los cuales se encargan de enviar el valor obtenido al PLC S7-1200. El **Nodo change** obtiene un valor booleano y lo convierte en **string** para este caso.

Desarrollo de un HMI (dashboard)

El desarrollo del HMI se realizó en la plataforma IoT ThingsBoard, se utilizó el protocolo MQTT para la comunicación entre la plataforma y Node red de esta manera se permite la lectura y escritura de datos en el PLC desde la nube para realizar el monitoreo y control del proceso.

A continuación, se muestra la configuración de la plataforma IoT ThingsBoard:

Creación de la cuenta ThingsBoard.

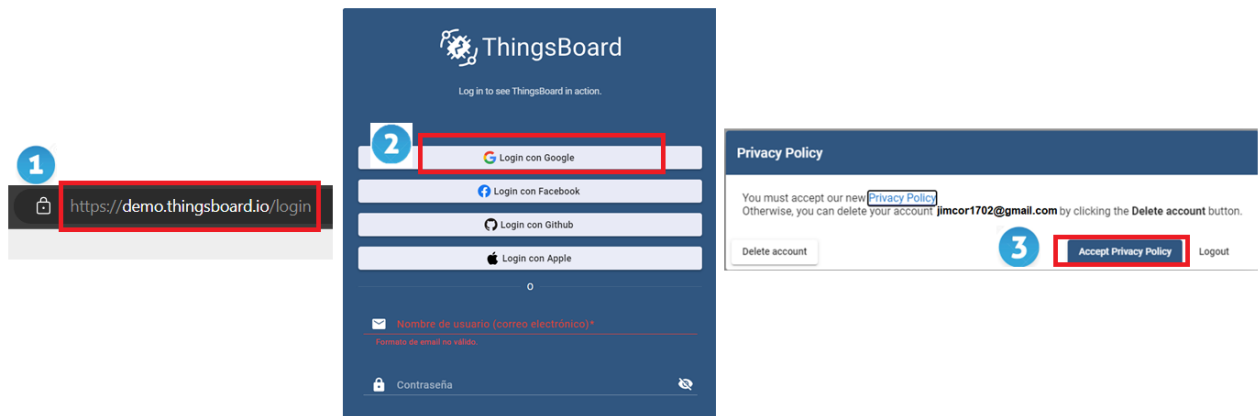
Para crear la cuenta se ingresa en el siguiente enlace:

<https://demo.thingsboard.io/login> que es una plataforma de gratuita que permite realizar la prueba de aplicaciones en desarrollo. ThingsBoard se puede crear con diferentes

plataformas, para este proyecto se creó con una cuenta de Google, aceptando las políticas de privacidad "Accept Privacy Policy" como se indica en la siguiente Figura 96.

Figura 96

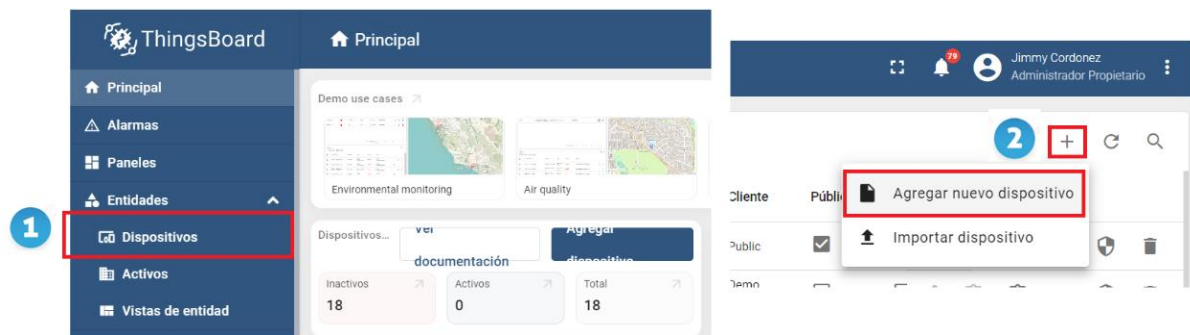
Pasos para crear una cuenta en ThingsBoard



Una vez creado la cuenta de ThingsBoard se abre el menú de la plataforma IoT. Por defecto existen ejemplos creados, en "**dispositivos**" se debe crear un nuevo dispositivo. Por lo tanto, se debe dar clic en "**agregar nuevo dispositivo**", como se muestra en la Figura 97.

Figura 97.

Creación de un dispositivo nuevo en ThingsBoard



Después se despliega una ventana para ingresar los datos de identificación del proyecto como se muestra en la Figura 98.

Figura 98*Datos informativos del nuevo dispositivo en ThingsBoard*

En el cual se edita los siguientes datos del dispositivo:

Nombre: IOT

Etiqueta: IOT2000

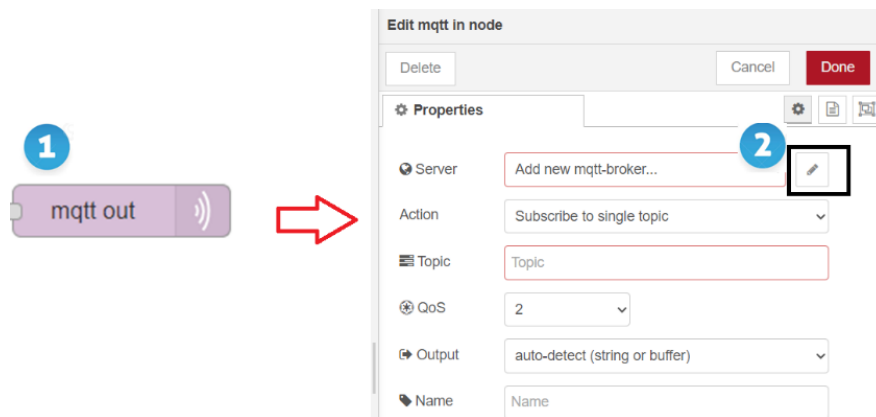
Perfil del dispositivo: default

Luego de realizar la configuración dar clic en "Agregar". Finalmente se puede visualizar el dispositivo creado en la pestaña de dispositivos.

Creación del flujo en Node red de la comunicación MQTT

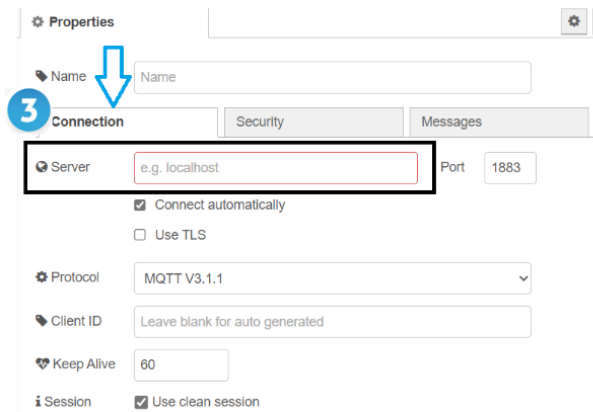
Los nodos MQTT se instalan por defecto en Node red y debido que ThingsBoard consta con un API con MQTT para enviar telemetría, que se asigna a un dispositivo mediante un topic. Para el envío de datos se debe colocar un nodo "MQTT OUT" que permite publicar los datos de telemetría en la plataforma ThingsBoard para lo cual se configura:

1. Dar doble clic sobre el nodo "MQTT OUT"
2. Dar clic en el símbolo de lápiz del Server en las propiedades del nodo.

Figura 99*Configuración del nodo MQTT OUT*

En la pestaña que se despliega luego de realizar los pasos anteriores se debe:

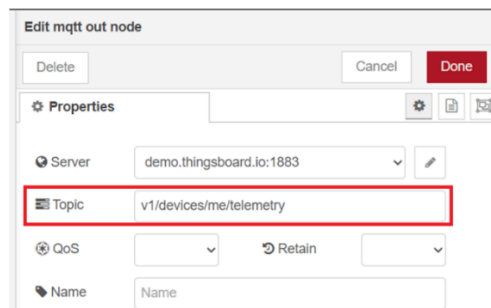
3. Escoger la pestaña Connection y en Server colocar: demo.thingsboard.io, como se muestra en la siguiente Figura 100.

Figura 100*Pestaña Connection del nodo MQTT OUT*

4. En la pestaña de Security se debe pegar el token de la plataforma ThingsBoard que se obtiene como se muestra en la siguiente Figura 101.

Figura 101*Pestaña Security del nodo MQTT OUT*

Por último, se debe colocar el siguiente tópic: `v1/devices/me/telemetry` para ser un cliente publicador como se puede observar en la siguiente

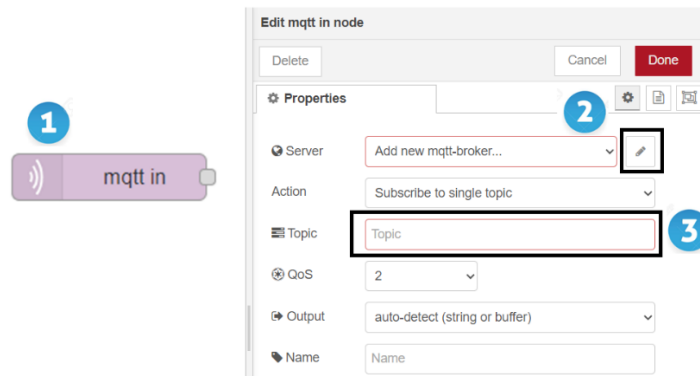
Figura 102*Ingreso del Tópico para cliente publicador*

Para la escritura de datos por telemetría se utiliza los API RPC que son generados desde el servidor (Plataforma ThingsBoard) para poder realizar esta comunicación se debe suscribir a los comandos RPC desde el servidor. En Node red se coloca el nodo “MQTT IN” con la siguiente configuración, como se muestra en la Figura 103:

1. Dar doble clic sobre el nodo “MQTT IN”
2. En la pestaña “Connection” y “Security” se deben configurar de la misma forma que al nodo “MQTT OUT”.
3. En “Topic” se coloca: `v1/devices/me/rpc/request/+` para poder escribir datos por telemetría.

Figura 103

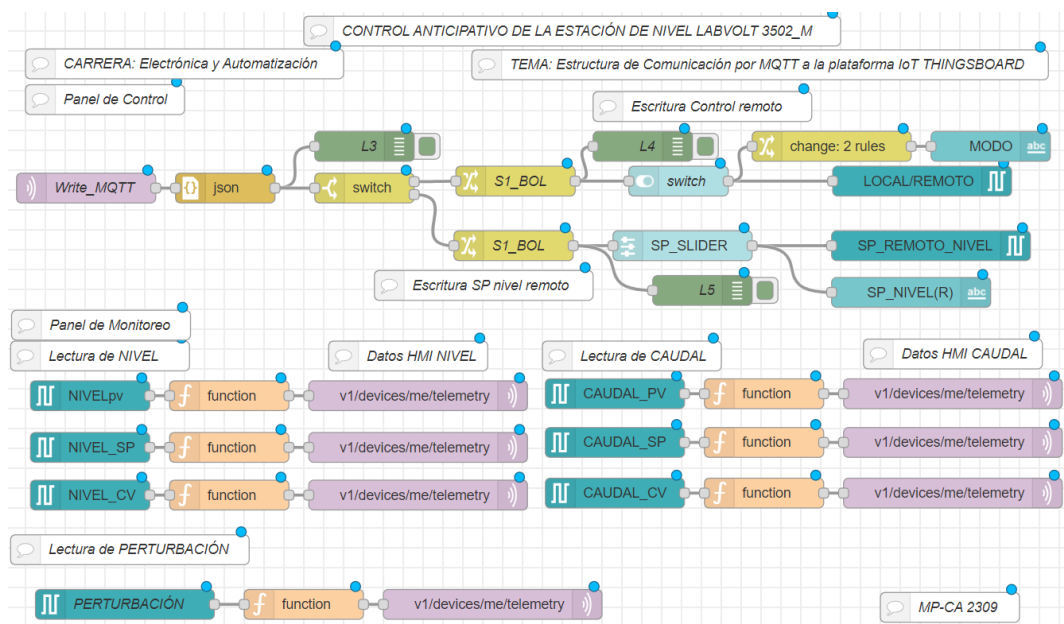
Configuración del nodo MQTT IN para cliente suscriptor



Una vez configurado los nodos de MQTT se debe unir con los nodos S7 de lectura y escritura para realizar la lectura de las variables en la plataforma IoT. A continuación, se desarrolla el flujo de nodos para la comunicación por MQTT entre el PLC, Módulo IoT2040 y ThingsBoard. Como se muestra en la Figura 104.

Figura 104

Flujo de nodos para la lectura y escritura por MQTT



En la escritura se necesita realizar un acondicionamiento de los datos enviados de la plataforma ThingsBoard por este motivo se utiliza el nodo json: para realizar la conversión

de string a un objeto json, después el nodo switch: se lo configura para leer el tipo de método utilizado en la escritura del dato pudiendo tener dos opciones que son:

setValue: Lee los datos booleanos de switch en la plataforma ThingsBoard.

setValue1: Lee los datos reales de la slider que se encuentra en ThingsBoard.

También se utiliza un nodo change con el cual se configura para leer el valor del método seleccionado y mandar a su salida el valor escrito como este se encuentra conectado al nodo switch o slider respectivamente se escribe al PLC S7-1200 según corresponda.

Implementación del HMI con los Widgets de ThingsBoard

Para iniciar con la implementación del HMI se verifica la visualización de las variables de interés de la caldera, enviadas desde el PLC a ThingsBoard por Node red en las cuales se procede a utilizar las variables que se encuentran en la pestaña de "Última telemetría" del dispositivo, por lo que una vez seleccionada la variable a monitorear se debe dar clic en "mostrar en Widget", para añadir un widget de visualización o de control. Como se muestra en la Figura 105.

Figura 105

Menú y características del dispositivo en ThingsBoard

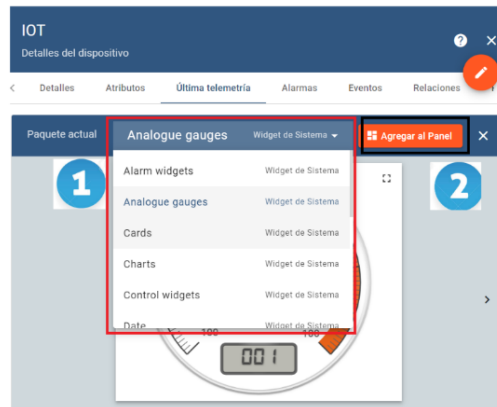
Fecha de creación	Nombre	Perfil de dispositivo
2023-08-09 12:57:20	IOT	default
2023-08-09 12:42:00	Charging Port 2	Charging port
2023-08-09 12:42:00	Charging Port 1	Charging port
2023-08-09 12:42:00	Air Quality Sensor T1	Air Quality Sens
2023-08-09 12:42:00	Air Quality Sensor C1	Air Quality Sens
2023-08-09 12:42:00	Sensor C1	Temperature Se
2023-08-09 12:42:00	Sensor T1	Temperature Se
2023-08-09 12:41:54	Test Device C1	default

Hora de última actualización	Valor
2023-08-17 18:16:03	CAUDAL_CV 0
2023-08-17 18:17:56	CAUDAL_PV 0.5074147582054138
2023-08-17 18:17:56	CAUDAL_SP 1.2061853408813477
2023-08-10 16:27:44	Nivel 0.15463218092918396
2023-08-10 17:17:28	NIVEL 14.355020523071289

Una vez seleccionado se despliega los diferentes tipos de Widgets para la visualización de la variable. Luego se debe crear un nuevo panel como se muestra en la Figura 106.

Figura 106

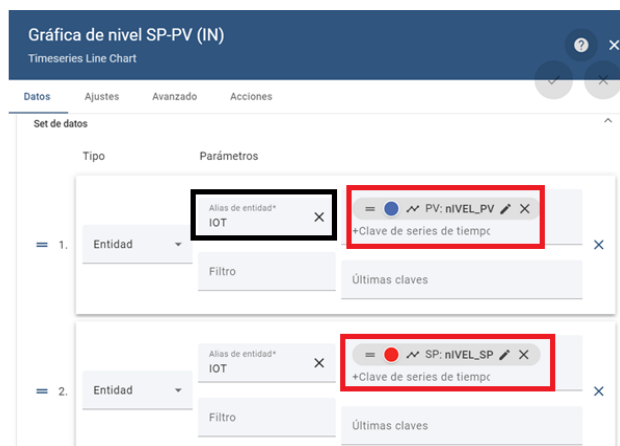
Creación del panel y selección del Widget



La vinculación de las variables a los Widgets de la plataforma IoT se realizan por medio de un alias de entidad en este caso "IOT" y por último se debe seleccionar la variable que se desee asociar al Widget, configurando según sea necesario al proceso como rangos, unidades entre otras para finalizar se debe dar clic en Agregar como se muestra en la Figura 107.

Figura 107

Vinculación de la variable a un Widget de gráficas



De esta manera se crea los siguientes paneles para el control anticipativo de una caldera. A continuación, se muestra los paneles realizados en el dashboard en la plataforma IoT ThingsBoard:

1. **Panel de Inicio:** Consta de una imagen que presenta el controlador anticipativo.

Figura 108

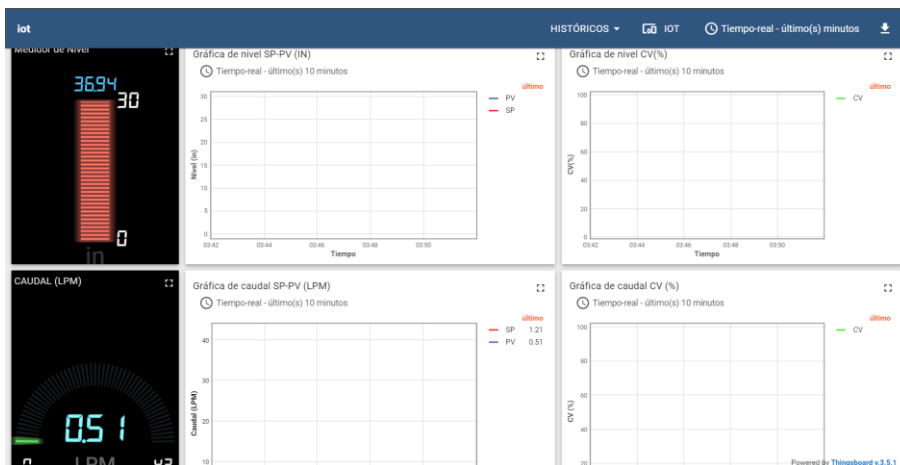
Panel de Inicio en ThingsBoard



2. **Panel de históricos:** permite visualizar las gráficas de SP-PV de nivel, caudal de la caldera y a su vez la salida del controlador CV.

Figura 109

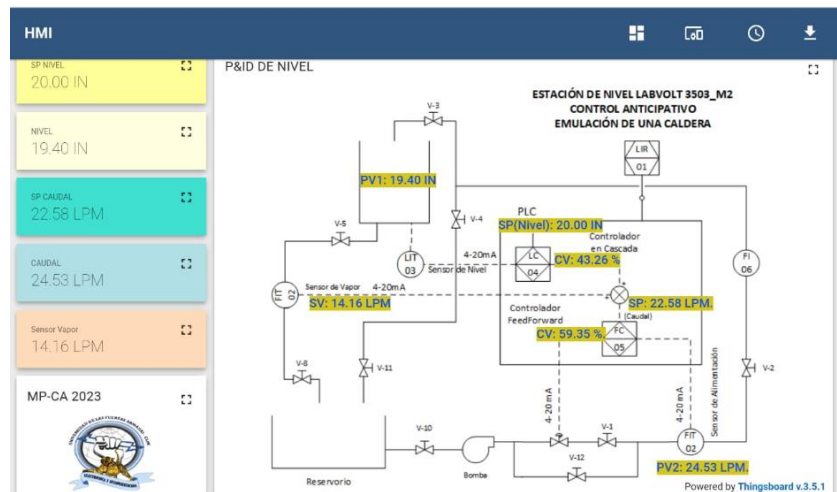
Panel Histórico en ThingsBoard



3. **Panel de HMI:** se colocó el diagrama P&ID del proceso y además se pueden visualizar los valores en tiempo real.

Figura 110

Panel HMI en ThingsBoard



4. **Panel de control remoto:** este consta de un switch que envía una señal booleana y una slider que nos permita enviar datos del SP remoto desde la plataforma IoT hacia el PLC.

Figura 111

Panel de control remoto en ThingsBoard



Para compartir el enlace para la visualización del dashboard en dispositivos inteligentes primero se debe hacer público el dispositivo y también hacer público los paneles. Luego de haberlo hecho se debe mostrar el enlace de acceso para el monitoreo y control del proceso. Como se muestra en la Figura 112.

Figura 112

Enlace de acceso al dashboard implementado en ThingsBoard

CONTROL REMOTO
Detalles del panel

Detalles Registro Auditoría Control de Versión

Abrir panel Exportar panel Hacer panel privado Administrar clientes asignados

Eliminar panel

Copiar ID del panel

Facebook Twitter LinkedIn WhatsApp

Link público
<https://demo.thingsboard.io/dashboard/9e9920c0-3af8-11ee-ab78-536eaffa7025?publicId>

Titulo*
CONTROL REMOTO

Capítulo IV

Análisis de resultados

En el presente capítulo se muestra los resultados obtenidos en lo que se refiere a la respuesta de la estación una vez haya sido realizado el mantenimiento correctivo correspondiente, además se muestra el comportamiento dinámico de la evolución de la variable controlada bajo varias técnicas de control, tales como PID, cascada y anticipativo.

El control de la estación de nivel LabVolt 3503 M2 se lo puede realizar de forma local, empleando el interfaz construido en el software LabView, el cual emplea protocolo de comunicación OPC para la recopilación y presentación de datos en tiempo real; así como de forma remota empleando un dashboard que presenta la evolución de las principales variables del proceso, las cuales se actualizan continuamente dado que los datos del PLC se hallan continuamente siendo subidos a la nube.

Repetibilidad en la estación de nivel

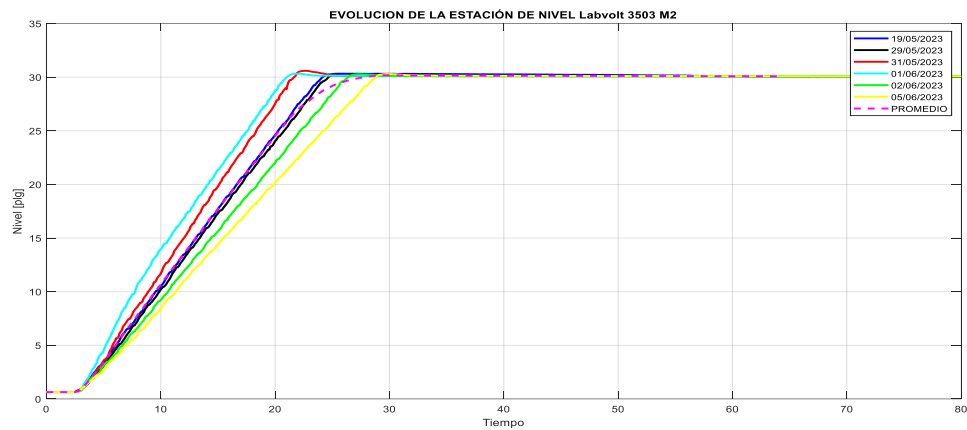
Una vez que se han tomado datos durante 6 días en semanas diferente, con la estación de nivel a punto, se obtiene los datos en unidades de nivel en un rango de 1 a 30 pulgadas, obteniendo las respuestas indicadas a continuación, con lo cual se determinó que la estación de nivel LabVolt 3503 M2 no cuenta con una repetibilidad alta debido a los años de fabricación y uso que posee, sin embargo, al analizar la desviación estándar se afirma que el grado de desviación de los datos está dentro de un rango aceptable.

Los datos obtenidos se tomaron a lo largo de diferentes días y semanas, se éxito la planta con una acción de control en lazo abierto, de modo que se determine la evolución de la variable de interés, considerándose el rango de operación de 1 a 30 lpm, La desviación estándar particular es D19: 7.27; D29: 6.62; D31: 9.66; D01: 6.57; D02: 8.75; D05: 8.92, mientras que la desviación estándar global del comportamiento en Nivel es de 7.965.

Al tratarse de un proceso rápido de nivel, se considera que existe cierta libertad a la hora de generar el rango de aceptabilidad de la desviación de cada uno de los datos tomados con respecto al promedio obtenido en referencia a todos ellos, por lo cual se afirma que la repetibilidad de la planta es aceptable.

Figura 113

Repetibilidad de la estación de nivel LabVolt 3503 M2

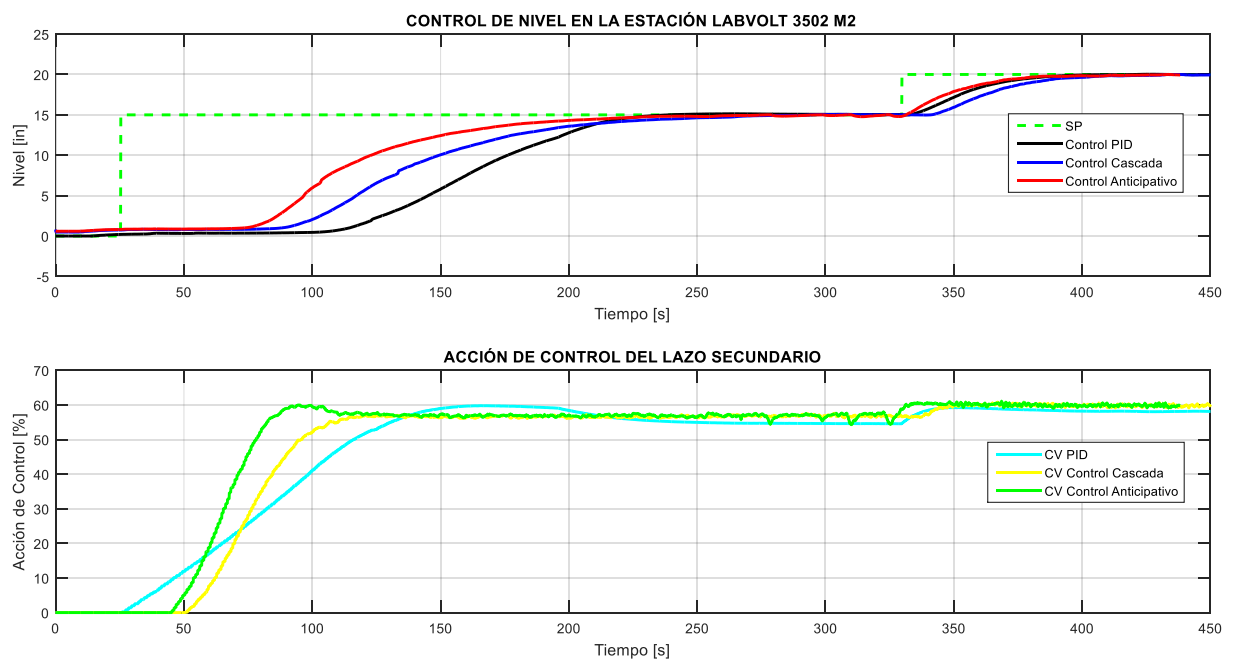


Respuesta de los controladores en el sistema de control de nivel

Una vez que fue determinado el modelo matemático que representa el comportamiento de la planta, se diseñó los controladores PID, cascada y anticipativo, los cuales fueron sintonizados empleando métodos de Lambda robusta y agresiva, ante los cuales se obtiene las respuestas de control ante una consigna inicial y el cambio de ella, como se observa en la Figura 114.

Figura 114

Respuesta de los controladores PID, cascada, anticipativo



Para la determinación del controlador que entrega mejor resultado, se realiza una comparación de parámetros claves en la respuesta, tales como tiempo de retardo, tiempo de levantamiento, sobreimpulso y tiempo de establecimiento, cuyos porcentajes se indican en la Figura 4.

Tabla 7

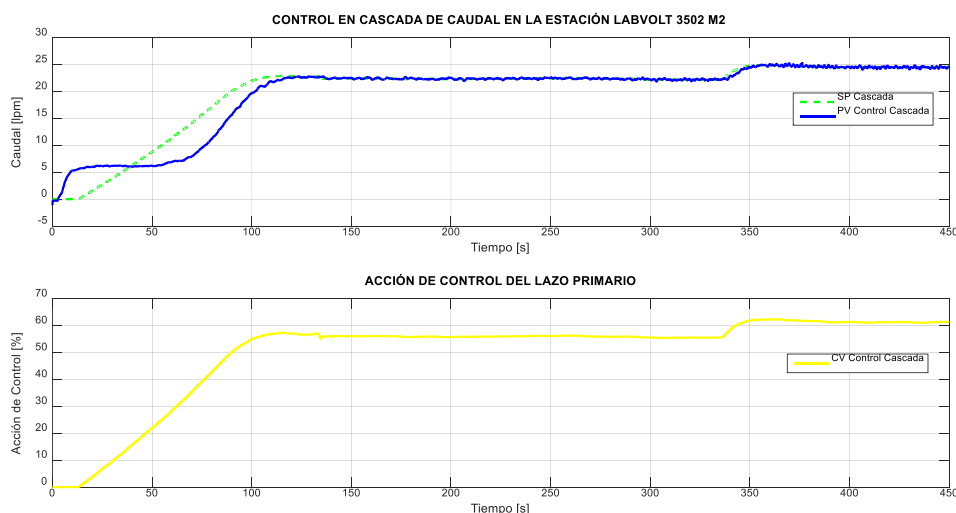
Comparación de las estrategias de control para la variable nivel

Control	Tiempo de retardo [s]	Tiempo de Levantamiento [s]	Sobreimpulso [%]	Tiempo de establecimiento [s]
PID	135.1	87.8	0.86%	190.1
Cascada	106.3	102.7	0.4%	199.5
Anticipativo	81	90.6	0%	172.3

Se observa en la Tabla 7 que en lo que concierne al parámetro del tiempo de retardo el controlador con menor parámetro es el control anticipativo, al igual que el tiempo de asentamiento, sobreimpulso y tiempo de establecimiento, demostrando que el controlador anticipativo brinda una respuesta superior en comparación con el controlador de cascada y PID, cuyos parámetros descriptivos se detallan en la tabla.

Figura 115

Control en cascada en el lazo secundario para la variable de flujo.

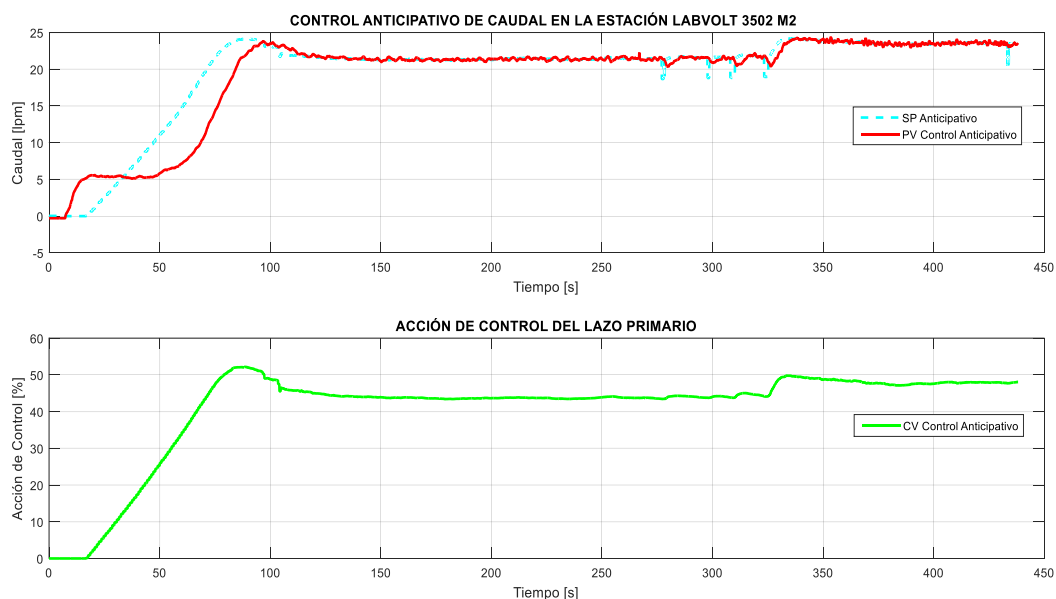


En lo que se refiere al controlador en cascada, su diseño incluye un lazo de control primario y secundario correspondiente a la variable nivel y caudal respectivamente, como se indica en la Figura 55, se analiza el comportamiento de la variable secundaria ante el control aplicado, obteniendo como resultado una acción de control estable, que permite reducir el error de manera rápida entre la consigna deseada y el valor real, dichas curvas de respuesta se grafican en la Figura 115.

Mientras tanto, cuando se emplea la técnica de control anticipativo, consta de dos controladores en configuración feedback y otro feedforward para considerar la perturbación, cuyo diseño se indica en la Figura 56, el lazo de control interno de caudal recibe una consigna a partir de la acción de control del lazo de nivel, sumado en un factor con la medida de la perturbación, su evolución se presenta en la Figura 116, en la cual se denota una acción de control ligeramente oscilatoria debido al aporte que proporciona el sensor de la perturbación, dando como respuesta el seguimiento del valor real a la consigna deseada.

Figura 116

Control anticipativo en el lazo secundario para la variable de flujo.

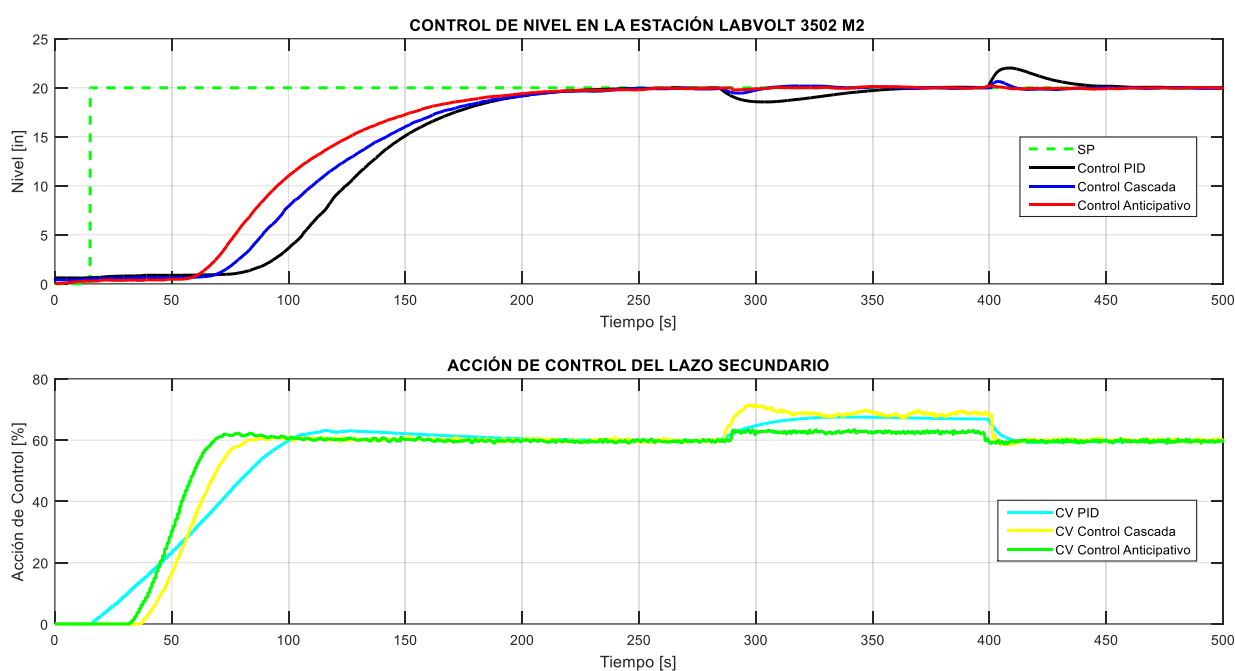


Respuesta en el sistema de control de nivel ante perturbaciones

Para determinar la robustez de los controladores diseñados, se evalúa los diferentes controladores diseñados ante una perturbación, considerando la Figura 32, se aplicó en la válvula V-3 una carga de 45%, ante la cual el controlador PID, cascada y anticipativo reaccionan ejerciendo una acción de control en diferente proporción, por lo cual se diferencian en su accionar ante la perturbación como se observa en la Figura 117.

Figura 117

Señales del control de la variable nivel ante la perturbación de V-3



Se efectúa la comparación de la curva de respuesta ante cada técnica de control, obteniendo como resultado los valores indicados en la Tabla 8, determinando así que el controlador con mejor respuesta es el anticipativo por la composición de su diseño, que incluye tres elementos de medida los cuales muestran el flujo de carga, el nivel del tanque y el flujo de descarga de vapor, por lo cual anticipa la variación de la variable principal realizando compensaciones adelantadas.

Tabla 8

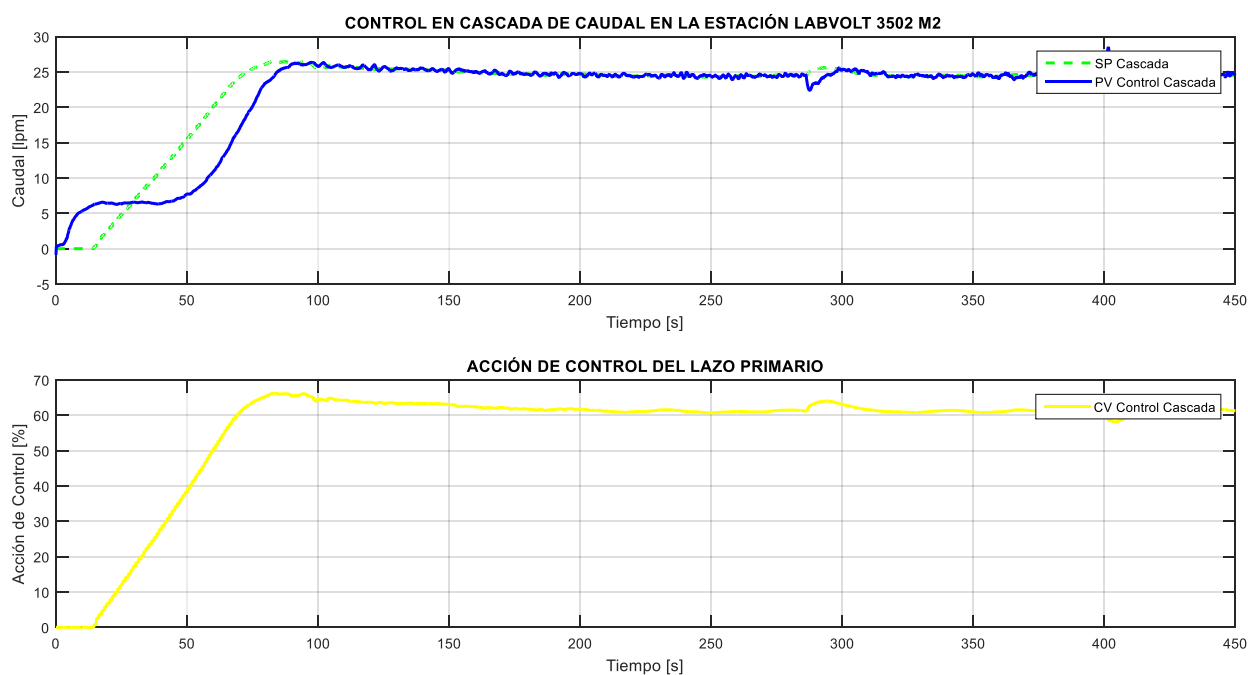
Comparación de las estrategias de control ante la perturbación de la V-3 en el proceso

Control	Tiempo de retardo [s]	Tiempo de Levantamiento [s]	Sobreimpulso [%]	Tiempo de establecimiento [s]
PID	109.6	87.9	0 %	180.3
Cascada	95.3	96.2	0 %	179.4
Anticipativo	80.5	92.8	0 %	168.15

De manera similar al anterior, la respuesta del lazo de control secundario de la variable caudal responde con un comportamiento oportuno ante perturbaciones, como se observa en la Figura 118 permitiendo que la incidencia de estas no se vea reflejada en sobremanera en la variable principal nivel.

Figura 118

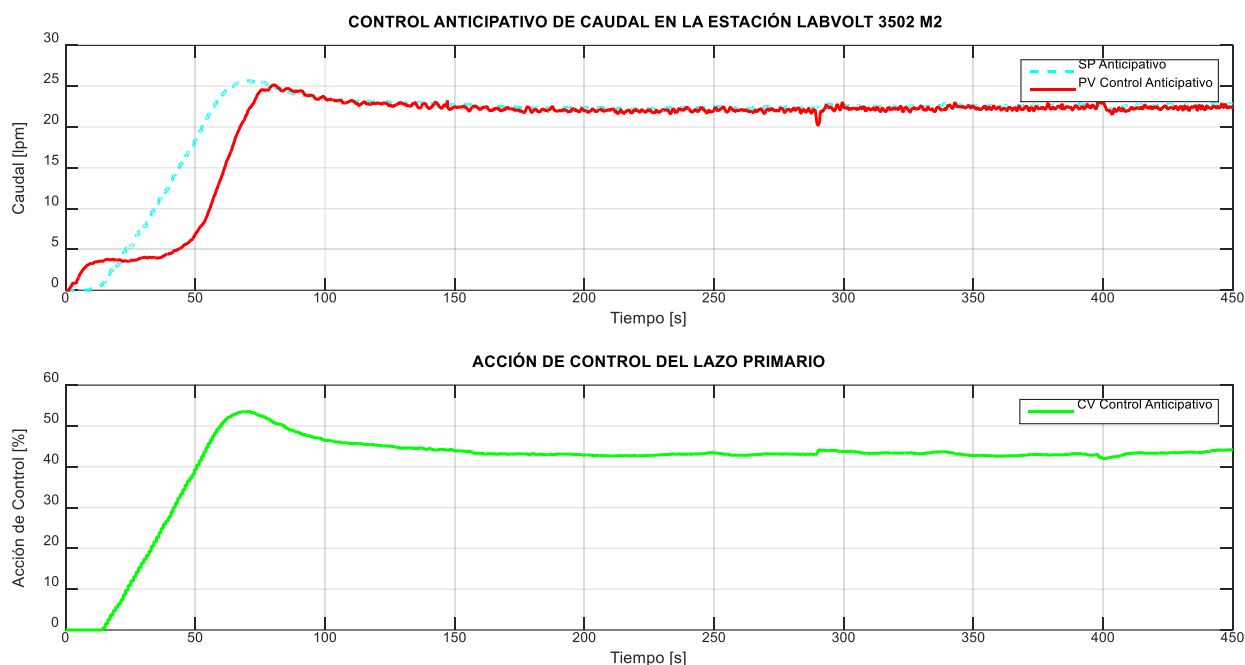
Control en cascada ante perturbación aplicado en el lazo secundario.



El lazo de control interno secundario, en la técnica de control anticipativo responde inmediatamente una vez que se ha producido la perturbación, controlando el caudal para impedir cambios abruptos en el nivel, dado comportamiento se observa en la Figura 119.

Figura 119

Control anticipativo ante perturbación aplicado en el lazo secundario

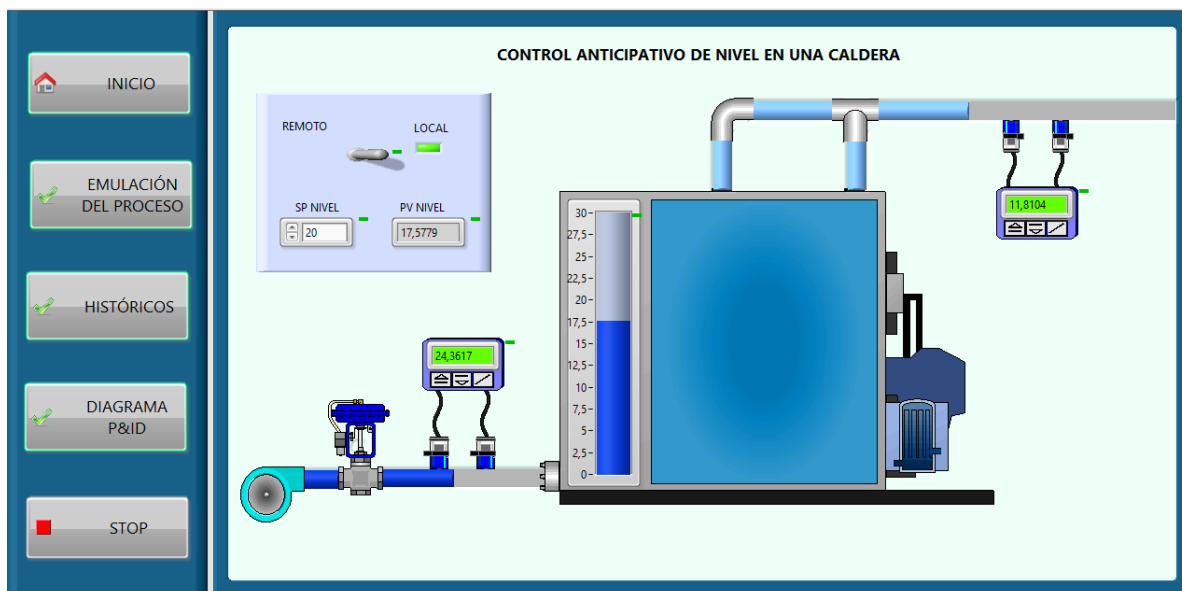


Diagramas P&ID y HMI de la estación.

El interfaz que emula el comportamiento del proceso controlado, donde interviene el control del nivel del tanque de una caldera, en cuya estación se mide el flujo de agua suministrada por la tubería de alimentación, así como el vapor de salida, empleando sensores ultrasónicos de caudal, además de la lectura del nivel mediante un sensor de presión diferencial, con el objetivo de aplicar una acción de control mediante el actuador, se trata de una electroválvula con posicionador. Este comportamiento global ha sido representado de manera gráfica, de modo que se simula el comportamiento real de la planta, como se observa en la Figura 120, donde la estación se encuentra en funcionamiento, en modo local con una consigna de nivel igual a 20 pulgadas.

Figura 120

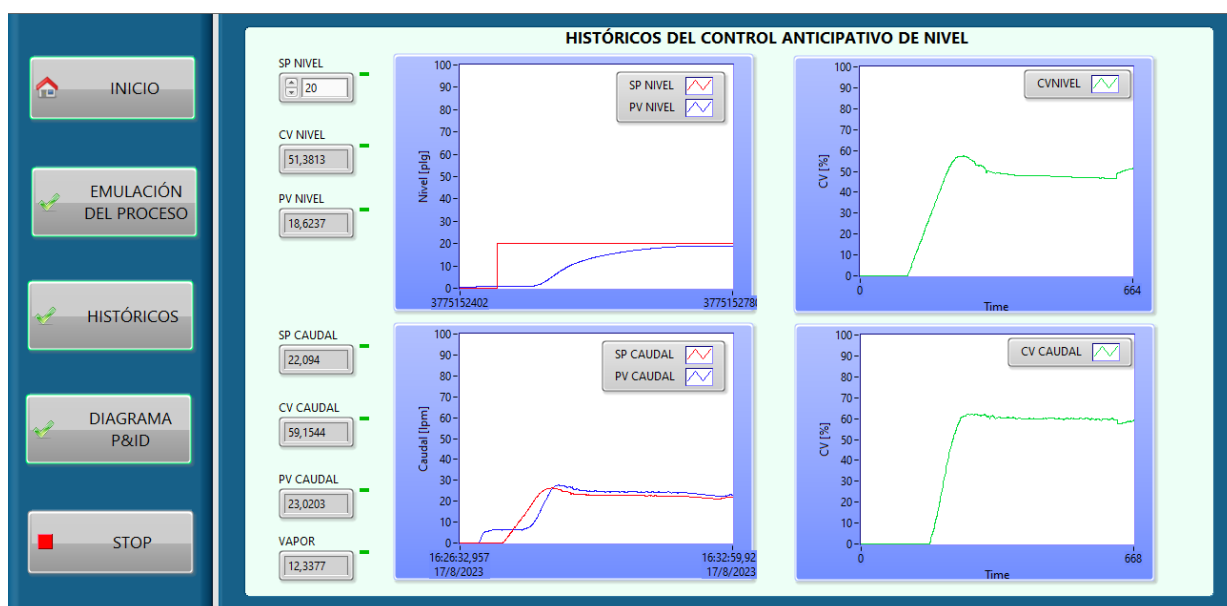
Evolución de la simulación de la estación de nivel.



La evolución de cada una de las variables se registra en históricos representados en tiempo real de manera gráfica y mediante display, misma información que se puede exportar a Excel para su posterior registro o análisis, obsérvese la Figura 121 para mejorar la comprensión.

Figura 121

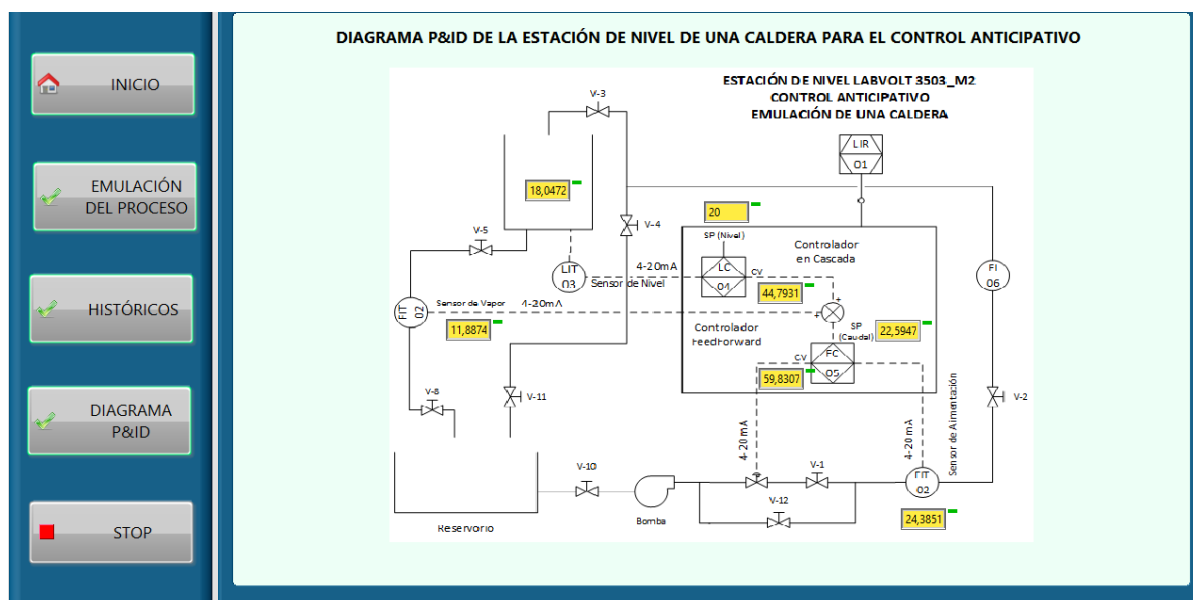
Evolución de los históricos



El diagrama P&ID de la estación es fundamental en un HMI, debido a que simplifica al operario la tarea de visualización de las variables y sus respectivas acciones de control de ser el caso, se trata de un esquema compacto y normado que considera cada uno de los elementos de la planta, como se indica en la Figura 122 donde además se han colocado pantallas que muestren el estado de las variables.

Figura 122

Funcionamiento del diagrama P&ID de la estación de nivel



Evaluación de la comunicación del HMI local y remoto.

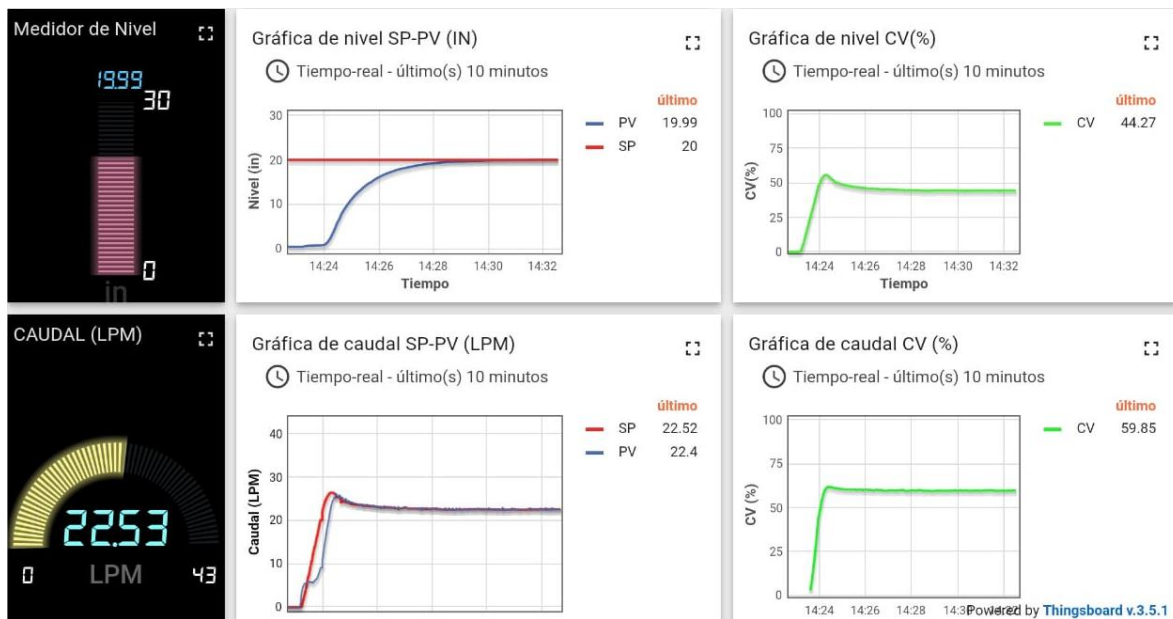
Debido a la creciente evolución de la tecnología y todas las bondades que esta nos brinda, es posible realizar el control de la estación mediante una interfaz de usuario, de manera local o remota, en el segundo caso se visualiza el selector de la Figura 120 posicionado a la izquierda, correspondiente al control remoto, misma situación sucede para el HMI de campo como se indicó en la Figura 108, con la perilla al lado derecho, en los dos casos consta de un switch que envía una señal booleana y una slider que nos permita enviar datos del SP remoto desde la plataforma IoT hacia el PLC.

La recolección de datos en cada una de las pantallas del HMI remoto se efectúa en tiempo real, sin pérdida de datos y la posibilidad de control la estación sin límites de

distancia, con la visualización permanente de la elocucion de cada una de las variables de proceso, de forma visual, en display y graficas que contienen las curvas de respuesta.

Figura 123

Históricos del HMI remoto



Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- La estación de nivel Labvolt posee una repetibilidad con una desviación estándar de 7.965, determinada a partir de la media de cada una de las respuestas tomadas en diferentes fechas, posterior a la realización del mantenimiento correctivo efectuado, que consto del cambio de tuberías en mal estado y aseguramiento de la eliminación de fugas, determinando que la estación de Nivel Labvolt 3503_M2 ha perdido cierto grado de repetibilidad, aun sin salirse de los parámetros aceptables, debido a los años de uso de la misma.
- La implementación de los transmisores ultrasónicos TUF2000M de caudal en la planta se efectuó bajo varios parámetros claves, debido a la constitución de la estación se colocó el primer sensor, confirmado por dos sondas (UP-DOWN) en la línea de alimentación, a la derecha del bypass, con un rango de operación configurado entre 0 a 40 lpm; mientras que el segundo está ubicado en la línea de descarga, posterior a la válvula V-5, con un rango de 0 a 23 lpm; en ambos casos se configuró los parámetros de diámetro exterior de 26.9 mm, espesor del tubo con un valor de 3 mm, material seteado en PVC, el tipo de líquido es agua , tipo de transductor TS2 Clamp On y finalmente el tipo de montaje del transductor corresponde a la configuración V.
- La representación del modelo matemático de la estación de Nivel Labvolt 3503_M2 con una apertura de 8 lpm en el bypass, específicamente válvula V-12; se determinó que tanto la variable caudal como nivel responde a un tipo de proceso auto regulado, el posterior diseño de controladores tales como PID, cascada y anticipativo se realizan en base a las constantes determinadas en la sintonía. El esquema de la implementación del control anticipativo está conformado por un lazo de control secundario para la variable caudal sintonizado con el método de PID lambda

robusto; un lazo de control primario para el nivel con sintonía fina a partir de PID lambda agresivo y una sumatoria a la salida bloque de control con un 15% de la medida del flujo de vapor de la línea de descarga.

- La evaluación de los parámetros de las respuestas de la estación referenciadas a la variable controlada nivel, arrojan como respuesta que el control anticipativo posee un tiempo de retardo de 81 seg, tiempo de levantamiento de 90.6 seg, tiempo de establecimiento de 172.3 seg y no presenta sobreimpulso, parámetros que comparados con el control simple y cascada son menores, lo que significa que se posee una técnica de control superior, que permite que la variable de proceso alcance la consigna rápidamente, con una acción de control estable que posee una amplitud menor al resto de acciones de los otros controladores, lo que incrementa la vida útil del actuador; además ante perturbaciones mantiene el mismo comportamiento, compensando las mismas oportunamente en el lazo secundario de caudal, minimizando su notoriedad en la variable nivel.
- El interfaz humano máquina presenta pantallas indispensables para el operador, se realizó en el software Labview, posee un nivel de seguridad el cual permite acceder a la visualización de la simulación de la estación; históricos de las variables de interés donde se observa gráficamente y en display la consigna, variables de proceso y acción de control; finalmente existe una pantalla que muestra el diagrama P&ID de la estación junto con la variación de cada uno de los parámetros. La comunicación se efectúa en tiempo real mediante el protocolo de comunicación OPC entre el software de adquisición y el PLC, particularmente se empleó Top Server 6.12, donde se crearon las localidades de variables correspondientes a las que se desea emplear.
- El módulo SIMATIC IoT2040 está constituido por Node-Red como software intermediario para la comunicación entre el PLC S7-1200 con la plataforma IoT ThingsBoard utilizando protocolos de comunicación IIoT como MQTT, lo que facilita

el desarrollo de aplicaciones IoT y la conexión de equipos industriales con plataformas web.

- Para cargar los datos de las variables de interés en el módulo SIMATIC IOT2040 se utilizó el Nodo S7 de Node red junto a una base de datos generada en el software TIA Portal V16 con los datos de SP, PV, CV y Perturbación del proceso de nivel y de caudal respectivamente. Además, se guarda la memoria para la selección del control remoto o local y del cambio de setpoint por medio de un dispositivo inteligente conectado a la plataforma ThingsBoard.
- Para establecer comunicación con el PLC S7-1200 con la plataforma IoT ThingsBoard con el protocolo de comunicación MQTT, para ello debe existir un cliente publicador y un cliente suscriptor, que se identifica la función de cada cliente por medio del tópico de telemetría `v1/devices/me/telemetry` y el tópico de mensajes RPC `v1/devices/me/rpc/request/+` respectivamente en los nodos MQTT de Node red de esta forma se establece la comunicación permitiendo el control y monitoreo del proceso.
- La interfaz HMI realizada en ThingsBoard permitió el control y monitoreo de las variables de interés como SP, PV y CV mediante el desarrollo de 4 paneles, el panel de inicio, el panel de HMI, el panel de los Histórico y el panel de control remoto del proceso de nivel en una Caldera en tiempo real, mediante dispositivos inteligentes en cualquier parte del mundo siempre y cuando estén conectados al internet.

Recomendaciones

- Verificar y de ser necesario calibrar los parámetros LRV y URV del transmisor de presión diferencial de nivel, de tal manera que coincidan con el rango de operación perteneciente a la estación.
- La implementación de los transmisores ultrasónicos de caudal debe cumplir con parámetros de calidad en base al tipo de montaje realizado, verificar que los mismo se cumplan para garantizar una medida fiable.
- La técnica de control anticipativo considera un tercer elemento de medida, de cuyo valor se emplea un porcentaje para ser sumado a la acción de control anterior, de manera que no cause sobreimpulso.
- La comparativa de los controladores se debe realizar ceteris paribus en la estación de nivel, además de tiempos homogéneos para el cambio de consigna o aplicación de perturbación.
- Para obtener un proceso acercado a la realidad en cuanto al HMI es posible utilizar herramientas de diseño como DCS, una librería de imágenes y gráficos de elementos de control y medida, los cuales se personalizar para que evoluciones conforme varia la planta real.
- Antes de trabajar con el módulo SIMATIC IoT2040 se debe comprobar la conexión a internet por medio del comando ping www.google.com.
- Para utilizar la base de datos en el TIA Portal V16 se debe deshabilitar el Acceso optimizado al bloque y habilitar el permiso de acceso para los servidores PUT/GET.
- Antes de probar la comunicación entre el PLC S7-1200 con la plataforma ThingsBoard se debe copiar el token de acceso API del dispositivo creado en la plataforma IoT y vincular a los nodos MQTT en Node red.
- Para evitar interferencia en los datos en el modo local y remoto se realizó un swicheo que permita enviar datos desde el HMI local o del HMI remoto de la plataforma ThingsBoard y no al mismo tiempo.

Bibliografía

- Acedo Sánchez, J. (2003). *Control Avanzados de procesos teoría y práctica*. Madrid: Díaz de Santos.
- Alfaro Ruíz, V. M. (2002). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores. *Revista de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica*, 21-36.
- Ávila Luzuriaga, D. I., & Salguero Remache, V. O. (2014). *Diseño e implementación de un sistema SCADA, utilizando Ethernet industrial y Bluetooth con tecnología SCHNEIDER ELECTRIC para el monitoreo, control y supervisión de las estaciones de nivel y presión en el laboratorio de redes industriales*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/8179>
- Bautista Z, I. B., Vargas O, A. G., & Domínguez J, A. M. (2021). *Control y Automatización de una Planta Piloto de pruebas de producción de Oxietileno Control and Automation of an Oxyethylene production tests Pilot Plant*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Oa-Vargas/publication/353200745_Control_and_Automation_of_an_Oxyethylene_production_tests_Pilot_Plant/links/60f76eca1e95fe241a7a4050/Control-and-Automation-of-an-Oxyethylene-production-tests-Pilot-Plant.pdf
- Camacho, E. F., & Bordons, A. C. (2004). Control predictivo: Pasado, presente y futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 5-28.
- Cárdenas Quintana, A. I., & Jiménez León, I. P. (2018). *Diseño e implementación de un sistema didáctico para el desarrollo de prácticas sobre control avanzado de procesos industriales*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/15362/T-ESPEL-ENI-0427.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castro Yáñez, J. A., & García Nuñez, D. D. (2012). *Implementación de un banco de pruebas de sistemas industriales didáctico mediante un plc s7-1200, en el laboratorio de ingeniería electromecánica de la universidad técnica de Cotopaxi periodo 2011*. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1314>

- Chiluisa Chiluisa, C. E. (2020). *Implementación de un sistema automatizado con control HMI-SCADA para el proceso de embotellado de líquidos*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13936/1/108T0325.pdf>
- Chimbo Hidalgo, I. X. (2019). *Obtención de energía eléctrica mediante un generador de imanes permanentes de flujo axial a partir de rotobombas con turbinas Pelton y Michell Banki disponibles en el laboratorio de la Ficm*. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/30153/1/Tesis%20I.%20M.%20556%20-%20Chimbo%20Hidalgo%20Israel%20Xavier.pdf>
- Coloma Clavijo, R. A. (2018). Desarrollo de un sistema de monitoreo basado en herramientas IoT para analizar los parámetros de un transformador de potencia. *Universidad Politécnica Salesiana*, 23-25.
- Creus, A. (2008). *Simulación y control de procesos por ordenador*. México: D.F.:Marcombo.
- Cuenca Flores, D. J., & Delgado Ávila, A. (2021). *Diseño e implementación de un módulo didáctico para procesos industriales electro neumáticos, mediante un PLC S7-1200 e interfaz HMI*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21964>
- Guerrero Valenzuela, B. D. (2019). *Modernización del módulo de control de nivel, con transmisor de nivel ultrasónico, plc s7-1200 y pantalla hmi, para el control de las variables: nivel y flujo*. Obtenido de https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/2293/T030_09378709_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Henriquez Novoa, J., & Martinez Rodriguez, W. J. (06 de 08 de 2019). *Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración*. Obtenido de <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/5557/Identificaci%c3%b3n%20y%20sintonizaci%c3%b3n%20de%20controladores%20PID%20para%20procesos%20de%20integraci%c3%b3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- HIVEMQ GmbH. (2023). *Reliable Data Movement for Connected Devices*. Obtenido de <https://www.hivemq.com/>

- Jiménez León, I. P., & Cárdenas Quintana, A. I. (2018). *Diseño e implementación de un sistema didáctico para el desarrollo de prácticas sobre control avanzado de procesos industriales*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/15362/T-ESPEL-ENI-0427.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- King, M. (2016). *Process Control A Practical Approach*. UK: John Wiley & Sons.
- LAB.net. (2023). *Field report: Ultrasonic flowmeter TUF-2000M*. Obtenido de <https://www.libe.net/en-flowmeter>
- Lab-Volt. (2000). *Mobile instrumentation and process control training system, series 3500*. Obtenido de <https://www.yumpu.com/en/document/read/15377428/mobile-instrumentation-and-process-control-training-lab-volt>
- Lajara Vizcaíno, J. R., & Pelegrí Sebastián, J. (2011). *LabVIEW Entorno gráfico de programación*. Barcelona: Marcombo.
- León Huacal, F. I., & Berrios Silva, O. J. (2017). *Sistema de Riego Controlado con FEED-FORWARD utilizando Energía Solar en la localidad Solar de la Trocha-Jayanca*. Obtenido de <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/1066>
- Macas Rivera, K. D., Ramirez Torres, M. A., Ñacato Estrella, D. R., & Ramirez Torres, P. A. (2023). Control IIoT de un sistema automatizado para el montaje de dos cuerpos Base - Tapa - Pasador mediante la pasarela Wecon V-Box. *Revista científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 521-538.
- Muñoz Díaz, C. A. (2021). *Diseño y simulación de un sistema de monitoreo para un proceso de control de temperatura mediante PLC e IoT para la empresa Educatia*. Obtenido de <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/4958/1/TG2021-1%20CAMILLO%20MU%c3%91OZ.pdf>
- O'dwyer, A. (2009). *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. World Scientific.
- OI BERDIN GRUPO. (12 de 01 de 2017). *SIMATIC IoT2040, La pasarela de IoT Industrial*. Obtenido de <https://www.berdin.com/actualidad/simatic-iot2040-la-pasarela-para-soluciones-de-iiot-industrial/>

- OpenJS Foundation. (2023). *Node-RED Browser-based flow editing*. Obtenido de <https://nodered.org/>
- Quintanilla, P., Navia, D., Moreno, F., Neethling, S. J., & Brito Parada, P. R. (2023). A methodology to implement a closed-loop feedback-feedforward level control in a laboratory-scale flotation bank using peristaltic pumps. *MethodsX*, 10.
- Roca, A. (2014). *Control automático de procesos industriales con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC*. Diaz de Santos.
- SIEMENS. (2018). *Configuración del módulo IOT 2000*. Obtenido de <https://www.automation.siemens.com/sce-static/learning-training-documents/tia-portal/hw-config-iot2000/sce-014-101-hardware-configuration-iot2000edu-r1806-en.pdf>
- SIEMENS. (2023). *SIEMENS PLC S7-1200*. Obtenido de <https://www.siemens.com/global/en.html>
- ThingsBoard. (2023). *ThingsBoard IoT platform*. Obtenido de <https://thingsboard.io/>
- Tigre Chitacpa, K. E., & Zumba Arichávala, J. D. (2022). *Estudio de la pasarela inteligente IoT 2040 de SIEMENS y desarrollo de un manual de prácticas de laboratorio orientadas al aprendizaje de los sistemas de automatización*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23821>
- Toro, A., Sánchez, G., Strefezza, M., & Granado, E. (2017). IIoT y sistemas de control: oportunidades, desafíos y arquitecturas. *Revista Ciencia e Ingeniería Universidad de Los Andes*, 209-214.
- TUF. (2016). *Ultrasonic Flow Meter User Manual - TUF 2000M*. Obtenido de <https://github.com/gambit-labs/challenge/blob/master/docs/tuf-2000m.pdf>
- Velasteguí Jaramillo, I. F., & Fernández de Córdova, D. (2020). Diseño e implementación de la Arquitectura del Internet Industrial de las cosas para la recolección de datos en un proceso de manufactura. *Universidad del Azuay Facultad de ciencia y Tecnología* , 90 - 95.

Vera Martín, A. M. (2019). Entorno de control de sistemas IIOT basado en MQTT implementado en LabVIEW.

Villegas, A., Herrera, I., Gómez, G., Rodríguez, J., Lugo, E., & Pacheco, J. (2008). Aplicación para el monitoreo y control de procesos industriales basada en el estándar de comunicaciones OPC. *Revista de Ingeniería UC*, 7-18.

Anexos