



Diseño e implementación de paneles remotos y control automático de los procesos de caudal y nivel, utilizando micro autómatas en el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos.

Padilla Méndez, Iván David y Palomo Urrutia, Wilson Enrique

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en
Electrónica e Instrumentación

Dr. Acosta Núñez, Julio Francisco

Latacunga, 17 de marzo del 2021



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PANELES REMOTOS Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LOS PROCESOS DE CAUDAL Y NIVEL, UTILIZANDO MICRO AUTÓMATAS EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS”** fue realizado por los señores **PADILLA MÉNDEZ IVÁN DAVID, PALOMO URRUTIA WILSON ENRIQUE** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 17 de marzo del 2021

.....
ACOSTA NÚÑEZ, JULIO FRANCISCO

C.C.:050151949-0

REPORTE DE VERIFICACIÓN



Document Information

Analyzed document TesisPadillaPalomo.docx (D98564670)
 Submitted 3/17/2021 4:50:00 PM
 Submitted by Acosta Nuñez Julio Francisco
 Submitter email jfacosta@espe.edu.ec
 Similarity 10%
 Analysis address jfacosta.espe@analysis.arkund.com




JULIO FRANCISCO ACOSTA NUÑEZ

(f) JULIO FRANCISCO ACOSTA NUÑEZ

Sources included in the report

	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Proyecto de titulación Liliana Cayo y Andrés Pílicita.pdf	
SA	Document Proyecto de titulación Liliana Cayo y Andrés Pílicita.pdf (D97660950) Submitted by: epruna@espe.edu.ec Receiver: epruna.espe@analysis.arkund.com	1
W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10590/1/T-ESPEL-ENI-0367.pdf Fetched: 7/16/2020 8:53:34 AM	3
	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS GUATEMAL JORGE.docx	
SA	Document TESIS GUATEMAL JORGE.docx (D78747664) Submitted by: jwguatemala@espe.edu.ec Receiver: laflores5.espe@analysis.arkund.com	2
W	URL: http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/22765/4/T-ESPEL-ENI-0441.pdf Fetched: 11/30/2020 11:47:15 AM	2
	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Trabajo de titulación Geovanna Balladares y Hugo Teneda.pdf	
SA	Document Trabajo de titulación Geovanna Balladares y Hugo Teneda.pdf (D81894974) Submitted by: epruna@espe.edu.ec Receiver: epruna.espe@analysis.arkund.com	1
W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8192/1/T-ESPEL-ENI-0318.pdf Fetched: 1/26/2021 9:38:47 AM	1
W	URL: http://dspace.unl.edu.ec:9001/jspui/bitstream/123456789/11998/1/Castillo%20Ojeda%20... Fetched: 1/16/2021 9:11:40 AM	1
	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Proyecto de investigación Alulema Mora.docx	
SA	Document Proyecto de investigación Alulema Mora.docx (D41022070) Submitted by: epruna@espe.edu.ec Receiver: epruna.espe@analysis.arkund.com	1
	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Proyecto de investigación - Mauricio Rosero, Rai Pogo.pdf	
SA	Document Proyecto de investigación - Mauricio Rosero, Rai Pogo.pdf (D40606124) Submitted by: epruna@espe.edu.ec Receiver: epruna.espe@analysis.arkund.com	13



.....

ACOSTA NUÑEZ, JULIO FRANCISCO
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **PADILLA MÉNDEZ IVÁN DAVID, PALOMO URRUTIA WILSON ENRIQUE**, con cédulas de ciudadanía 0503832222 y 1804419693, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PANELES REMOTOS Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LOS PROCESOS DE CAUDAL Y NIVEL, UTILIZANDO MICRO AUTÓMATAS 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, 17 de marzo del 2021

.....
PADILLA MÉNDEZ IVÁN DAVID

C.C.: 0503832222

.....
PALOMO URRUTIA WILSON ENRIQUE

C.C.: 1804419693



**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **PADILLA MÉNDEZ IVÁN DAVID, PALOMO URRUTIA WILSON ENRIQUE**, con cédulas de ciudadanía 0503832222 y 1804419693, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PANELES REMOTOS Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LOS PROCESOS DE CAUDAL Y NIVEL, UTILIZANDO MICRO AUTÓMATAS EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 17 de marzo del 2021

.....
PADILLA MÉNDEZ IVÁN DAVID

C.C.: 0503832222

.....
PALOMO URRUTIA WILSON ENRIQUE

C.C.: 1804419693

Agradecimiento

A Dios por ser nuestra fortaleza en los momentos de debilidad y ser guía a lo largo de nuestra carrera, brindándonos una vida llena de aprendizaje.

A nuestras familias por brindarnos todo su amor y comprensión, por guiarnos en nuestros caminos de la vida y ser nuestra fuente de motivación e inspiración.

A todos los docentes de nuestra carrera, quienes nos brindaron gratos momentos en nuestra formación académica, fomentando nuestro aprendizaje y llenando nuestras mentes de conocimiento.

Un agradecimiento especial a nuestros tutores de tesis Ing. Julio Acosta e Ing. Edwin Pruna; quienes nos guiaron en nuestro proyecto de investigación; brindándonos sus conocimientos y experiencias.

Dedicatorias

Dedico este trabajo de titulación a mi padre y mi madre, quienes fueron pilar fundamental en mi formación profesional y me enseñaron el correcto camino de superación personal, a mis hermanos y familiares quienes día a día llenaron mi camino de alegría y fueron participes de mi crecimiento individual, a todos mis amigos que supieron acompañarme en mis momentos de soledad y me extendieron un cálido abrazo fraternal.

Wilson Palomo.

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, quienes me brindaron su apoyo y amor incondicional en todas mis victorias y fracasos a lo largo de mi vida, por inculcarme valores y guiarme siempre por el camino del bien, por eso pido a Dios, salud y muchos años más de vida para ellos.

Iván Padilla.

Tabla de contenidos.

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Agradecimiento.....	6
Dedicatorias.....	7
Índice de tablas.....	11
Índice de figuras.....	12
Índice de ecuaciones.....	15
Resumen.....	16
Abstract.....	17
Introducción.....	18
Planteamiento del problema.....	18
Antecedentes.....	18
Justificación e importancia.....	20
Objetivos.....	20
<i>Objetivo general.....</i>	<i>20</i>
<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>20</i>
Marco teórico.....	21
Control de procesos.....	21
Controladores pi.....	22
Sintonía de controladores para procesos autorregulados.....	23
<i>Cohen-coon.....</i>	<i>23</i>
<i>Ziegler-nichols.....</i>	<i>24</i>
Primer método.....	24
Segundo método.....	25
<i>Haalman.....</i>	<i>26</i>
<i>Chien, Hrones y Reswick.....</i>	<i>27</i>
Paneles remotos.....	28
Smart factory.....	28

Web server	29
Modbus TCP/IP.....	29
Micro autómeta logo!.....	30
Diseño e implementación	31
Diseño e implementación del sistema.....	31
<i>Diseño del panel frontal.</i>	31
<i>Diseño de panel interno.</i>	33
<i>Implementación del sistema.</i>	35
Construcción primera etapa.	35
Construcción segunda etapa.....	36
Construcción tercera etapa.....	37
Construcción cuarta etapa.....	39
Calibración de los transmisores/instrumentos de campo.	40
<i>Transmisor magnético georg fischer 8550</i>	40
<i>Transmisor de nivel de radar rosemount 5402</i>	43
Obtención de los modelos matemáticos de los procesos de caudal y nivel	49
Diseño de los controladores pi basado en métodos de sintonía	56
<i>Método de sintonía cohen-coon.</i>	57
Caudal	57
Nivel.....	57
<i>Método de sintonía ziegler-nichols</i>	58
Caudal	58
Nivel.....	59
<i>Método de sintonía haalman.</i>	59
Caudal	60
Nivel.....	60
<i>Método de sintonía chien,rones y reswick</i>	61
Caudal	61
Nivel.....	62
Implementación del controlador pi en el micro autómeta logo.	63
<i>Programación del micro autómeta.</i>	63
Direccionamiento ip de los micro autómetas.	64
Programación de ventanas en logo! Tde	67
Programación para escalar y segmentar entradas análogas	68

Programación control pi y entradas/salidas digitales.....	70
Creación de udf (función definida por el usuario).....	72
Mapeado vm.....	75
Creación del proyecto de red.....	76
Implementación de controladores	78
Diseño e implementación de los HMI local y remoto	80
<i>Diseño del HMI local.</i>	80
<i>Diseño del hMI remoto.</i>	83
Implementación de los HMI	87
Resultados obtenidos	91
Pruebas y resultados del control pi de las estaciones de caudal y nivel.	91
<i>Caudal.</i>	92
<i>Nivel.</i>	97
Pruebas y resultados de la red industrial.	102
Pruebas y resultados del sistema de supervisión, control local y remoto.	104
Análisis de resultados.	108
<i>Caudal.</i>	108
<i>Nivel.</i>	110
Análisis costo-beneficio entre micro autómatas logo y controladores lógicos programables s7-1200.	112
Conclusiones y recomendaciones.....	114
Conclusiones.	114
Recomendaciones.	116
Bibliografía.....	117
Anexos	118

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Parámetros del controlador del método de Cohen-Coon.</i>	24
Tabla 2 <i>Ecuaciones para el primer método.</i>	25
Tabla 3 <i>Ecuaciones para el segundo método.</i>	25
Tabla 4 <i>Ecuaciones sin sobreelongación CHR.</i>	27
Tabla 5 <i>Ecuaciones para obtener a y L.</i>	27
Tabla 6 <i>Elementos del tablero exterior.</i>	32
Tabla 7 <i>Elementos del tablero interior.</i>	34
Tabla 8 <i>Código de colores normativa NEC-SB-IB.</i>	37
Tabla 9 <i>Formulas PI para Cohen-Coon.</i>	57
Tabla 10 <i>Formulas PI para Z&N.</i>	58
Tabla 11 <i>Formulas PI para Haalman.</i>	60
Tabla 12 <i>Formulas PI para CHR sin sobreelongación.</i>	61
Tabla 13 <i>Constantes de sintonía para el controlador PI de caudal y nivel.</i>	62

Índice de figuras

Figura 1 <i>Lazo cerrado de control.</i>	21
Figura 2 <i>Diagrama de bloque de un controlador PI.</i>	22
Figura 3 <i>Smart factory.</i>	28
Figura 4 <i>Micro autómatas LOGO!</i>	30
Figura 5 <i>Diseño del panel frontal.</i>	32
Figura 6 <i>Diseño final del panel frontal.</i>	33
Figura 7 <i>Diseño del panel Interior.</i>	34
Figura 8 <i>Diseño final del panel interior.</i>	35
Figura 9 <i>Implementación primera etapa del panel de control.</i>	36
Figura 10 <i>Implementación segunda etapa del panel de control.</i>	37
Figura 11 <i>Implementación tercera etapa del panel de control.</i>	38
Figura 12 <i>Implementación cuarta etapa del panel de control.</i>	39
Figura 13 <i>Menú principal.</i>	40
Figura 14 <i>Menú de calibración.</i>	41
Figura 15 <i>Selección de parámetros.</i>	42
Figura 16 <i>Modificación de los valores de los parámetros.</i>	42
Figura 17 <i>Salida del menú de calibración.</i>	43
Figura 18 <i>Conexión transmisor Rosemount 5402.</i>	43
Figura 19 <i>Selección del protocolo de comunicación.</i>	44
Figura 20 <i>Ventana de inicio del software Rosemount Radar Master.</i>	44
Figura 21 <i>Ventana selección de dispositivo.</i>	45
Figura 22 <i>Selección de dispositivo.</i>	45
Figura 23 <i>Ventana Guided Setup.</i>	46
Figura 24 <i>Ventana Guided Setup.</i>	47
Figura 25 <i>Configuración de etiqueta.</i>	47
Figura 26 <i>Unidades y geometría del tanque.</i>	48
Figura 27 <i>Cálculo de Volumen.</i>	48
Figura 28 <i>Finalización de asistente.</i>	49
Figura 29 <i>Modelo matemático.</i>	49
Figura 30 <i>Adquisición de datos con LabVIEW.</i>	51
Figura 31 <i>Datos en Excel.</i>	52
Figura 32 <i>Entorno Matlab.</i>	53
Figura 33 <i>Asistente para crear modelos matemáticos.</i>	54
Figura 34 <i>Estimación del modelo matemático.</i>	55
Figura 35 <i>Visualización de la función de transferencia.</i>	55
Figura 36 <i>Entorno del software LOGO! Soft Comfort.</i>	63

Figura 37 Programación KPOP de LOGO! Soft Comfort.....	64
Figura 38 Programación FUP de LOGO! Soft Comfort.	64
Figura 39 Configuración de micro autómatas.	65
Figura 40 Configuración offline de LOGO.	65
Figura 41 Configuración Online de LOGO.	66
Figura 42 Configuración de LOGO.	66
Figura 43 Programación de LOGO! Soft Comfort.	67
Figura 44 LOGO TDE.	67
Figura 45 Bloque de conteo.	68
Figura 46 Bloque OR y AND.	68
Figura 47 Programación punto decimal para LOGO! Soft Comfort.	69
Figura 48 Bloque de conversión.	69
Figura 49 Bloque de operador aritmético.	70
Figura 50 Bloque de amplificación.	70
Figura 51 Programación de controlador PI.	71
Figura 52 Tabla de verdad de luces piloto.	71
Figura 53 Bloque de controlador PI.	72
Figura 54 Creación de UDF.	73
Figura 55 Bloque de UDF.	73
Figura 56 Creación de UDF.	74
Figura 57 Configuración de UDF.	74
Figura 58 Bloque de UDF.	75
Figura 59 Ventana de herramientas Logo Soft Comfort.	75
Figura 60 Ventana de mapeo VM en Logo Soft Comfort.....	76
Figura 61 Proyecto de RED.	77
Figura 62 Intercambio de variables.	77
Figura 63 Proyecto de red.	78
Figura 64 Propiedades del bloque PI.	79
Figura 65 Entorno LabVIEW.	80
Figura 66 Paleta de controladores.	81
Figura 67 Paleta de controladores.	81
Figura 68 Imagen navigator.	82
Figura 69 HMI local de un proceso.	82
Figura 70 Diseño pagina web.	83
Figura 71 Paleta de componentes de LWE.....	84
Figura 72 Paleta de propiedades de LWE.	84
Figura 73 Graph Library de LWE.	85

Figura 74 <i>Upload files de LWE.</i>	86
Figura 75 <i>Utilidades de LWE.</i>	86
Figura 76 <i>Carga de pagina web a los micro autómatas.</i>	87
Figura 77 <i>Implementación HMI local.</i>	88
Figura 78 <i>Ventana de programación de LabVIEW.</i>	89
Figura 79 <i>Implementación página web.</i>	90
Figura 80 <i>Proceso de nivel página web.</i>	90
Figura 81 <i>Respuesta del controlador, T_m, T_s de Cohe-Coon Caudal.</i>	92
Figura 82 <i>Respuesta del controlador, T_m, T_s de Z&N Caudal.</i>	93
Figura 83 <i>Respuesta del controlador, T_m, T_s de Haalman Caudal.</i>	94
Figura 84 <i>Respuesta del controlador, T_m, T_s de CHR Caudal.</i>	96
Figura 85 <i>Respuesta del controlador, T_m, T_s de Cohe-Coon Nivel.</i>	97
Figura 86 <i>Respuesta del controlador, T_m, T_s de Z&N Nivel.</i>	98
Figura 87 <i>Respuesta del controlador, T_m, T_s de Haalman Nivel.</i>	100
Figura 88 <i>Respuesta del controlador, T_m, T_s de CHR Nivel.</i>	101
Figura 89 <i>Red industrial.</i>	103
Figura 90 <i>Sistema de supervisión.</i>	104
Figura 91 <i>Estación de caudal y panel remoto.</i>	105
Figura 92 <i>Estación de caudal y panel remoto.</i>	106
Figura 93 <i>Pantalla de Logo TDE en el tablero principal.</i>	107
Figura 94 <i>Diagrama P&ID del proceso de caudal.</i>	108
Figura 95 <i>Gráfica a la respuesta de una perturbación externa.</i>	109
Figura 96 <i>Diagrama P&ID del proceso de nivel.</i>	110
Figura 97 <i>Grafica a la respuesta de una perturbación externa.</i>	111

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 <i>Formula del controlador PI en dominio del tiempo.</i>	23
Ecuación 2 <i>Formula del controlador PI en dominio de la frecuencia.</i>	23
Ecuación 3 <i>Proceso de primero orden en el dominio de la frecuencia.</i>	24
Ecuación 4 <i>Formula de lazo Haalman.</i>	26
Ecuación 5 <i>Modelo de controlador Haalman.</i>	26
Ecuación 6 <i>Modelo de primer Orden.</i>	50
Ecuación 7 <i>Función de Transferencia de Proceso Caudal.</i>	56
Ecuación 8 <i>Función de Transferencia de Proceso Nivel.</i>	56
Ecuación 9 <i>Formulas de las constantes K_p y T_i de Caudal (Cohen-Coon).</i>	57
Ecuación 10 <i>Formulas de las constantes K_p y T_i de Nivel (Cohen-Coon).</i>	58
Ecuación 11 <i>Formulas de las constantes K_p y T_i de Caudal (Z&N).</i>	59
Ecuación 12 <i>Formulas de las constantes K_p y T_i de Nivel (Z&N).</i>	59
Ecuación 13 <i>Formulas de las constantes K_p y T_i de Caudal (Haalman).</i>	60
Ecuación 14 <i>Formulas de las constantes K_p y T_i de Nivel (Haalman).</i>	60
Ecuación 15 <i>Formulas de las constantes K_p y T_i de Caudal (CHR).</i>	62
Ecuación 16 <i>Formulas de las constantes K_p y T_i de Nivel (CHR).</i>	62

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se propone la implementación de un sistema de control automático de las estaciones de Caudal AP-1511 y Nivel ND-0704 con la utilización de micro autómatas de bajo costo, obtención de los modelos matemáticos de los procesos de caudal y nivel del laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos; diseño de los controladores PI con los métodos de sintonía Cohen-Coon, Ziegler-Nichols, Haalman y Chien-Rones-Reswick, se procederá a implementar el algoritmo de control a través de la programación FUB (Funktionsplan) en el software LOGO *Soft Comfort* proporcionado por la marca Siemens; diseño e implementación una red industrial para la comunicación entre los micro autómatas, pantallas HMI y estaciones remotas, a través del protocolo Modbus TCP/IP; diseño e implementación un sistema de supervisión local desarrollado en un computador mediante software de alto nivel y orientación industrial, el cual contendrá: tendencias, históricos, alarmas, visualización de variables de importancia y almacenamiento de información; diseño un sistema de supervisión remota (Paneles remotos), con la utilización de software propietario, el cual contendrá: visualización de variables de importancia, alarmas y parámetros esenciales que adecúen la aplicación a: teléfonos móviles inteligentes, tabletas y cualquier dispositivo inteligente con acceso a un navegador web; finalmente se realizará un comparativo costo-beneficio entre los micro autómatas y los Controladores Lógicos Programables utilizados en el control de procesos, es decir se comparará los micro autómatas LOGO con respecto a los autómatas S7-1200 utilizados para el control automático de las estaciones de caudal y nivel.

Palabras clave:

- **WEB SERVER**
- **PLC LOGO**
- **CONTROL AUTOMÁTICO**
- **AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

ABSTRACT

In this degree work, the implementation of an automatic control system of the Flow stations AP-1511 and Level ND-0704 is proposed with the use of low-cost micro automata, obtaining the mathematical models of the flow processes and level of the Industrial Networks and Process Control laboratory; design of the PI controllers with the Cohen-Coon, Ziegler-Nichols, Haalman and Chien-Rones-Reswick tuning methods, the control algorithm will be implemented through the FUB (Funktionsplan) programming in the LOGO Soft Comfort software provided by the Siemens brand; design and implementation of an industrial network for communication between micro automata, HMI screens and remote stations, through the Modbus TCP / IP protocol; design and implementation of a local supervision system developed on a computer using high-level software and industrial orientation, which will contain: trends, historical, alarms, visualization of important variables and information storage; design a remote supervision system (remote panels), with the use of proprietary software, which will contain: visualization of important variables, alarms and essential parameters that adapt the application to: smart mobile phones, tablets and any smart device with access to a web browser. Finally, a cost-benefit comparison will be made between the micro automata and the Programmable Logic Controllers used in process control, that is, the LOGO micro automata will be compared with the S7-1200 automata used for the automatic control of flow and level stations.

Key words:

- **WEB SERVER**
- **PLC LOGO**
- **AUTOMATIC CONTROL**
- **AUTOMATION AND CONTROL**

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad la utilización de dispositivos de control, como PLC's (controlador lógico programables) son una pieza clave en la automatización de procesos industriales, es por ello que se debe analizar con mucha cautela los costos de implementación de los mismo, sin caer en paradigmas de sobre dimensionamiento y gastos innecesarios.

. Actualmente existen equipos de automatización conocidos como micro autómatas (equipos industriales de bajo costo y gran beneficio, sin pérdida de robustez en sus lazos de control) que son utilizados para pequeños procesos. En este contexto el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos no cuenta con un sistema de supervisión y control que cuente con la utilización de micro autómatas, fomentando a los estudiantes a la utilización de nuevas tecnologías que apunten a nuevos paradigmas de conectividad, y permitan al operador estar pendiente de las variables de los procesos, desde cualquier lugar y a cualquier hora.

1.2 Antecedentes

La industria nace desde el momento en que el ser humano siente la necesidad de obtener productos derivados de los recursos naturales, y el término proceso se incluye en las técnicas ocupadas para obtener dichos derivados, a mediados del siglo XVIII surge la primera revolución industrial cuyo propósito era en parte mecanizar la industria. En 1769 se sustituye la energía humana por la hidráulica y surge la máquina a vapor, con el paso de los años crece la demanda de más productos lo que obligó el desarrollo de la industria, de aquí surge la segunda revolución industrial que se caracterizó por creación de sistemas de producción en masa, líneas de ensamblado y la electrificación de las fábricas. En 1881 se construye la primera planta de generación de energía eléctrica y por tanto la creación de motores eléctricos como fuente de energía para las máquinas de las fábricas, finalmente en el siglo XX surge la tercera Revolución Industrial, la de los Ordenadores, época donde se generó más desarrollo tecnológico que en todos los siglos pasados juntos, aquí se crean las computadoras PLC's y empieza la aparición

de robots de forma masiva, muchos de estos desarrollos dieron origen a la automatización (ITA, 2017).

En los primeros tiempos de la industrialización el control de procesos era realizado de forma manual, es decir, cuando el hombre interviene sobre el elemento de control, la acción de este es la que actúa siempre sobre el proceso, a medida que la industria desarrolla, fue mucho más complejo realizar el control de los procesos de forma manual, ya que esto implicaba más gastos y la necesidad de más mano de obra, por esta razón nace el concepto de control automático de procesos cuyo propósito es mantener en un valor deseado las variables del proceso. Este control exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin la intervención humana, donde ya se incluyen los transmisores utilizados para la medición del valor existente, comparándolo con el valor deseado y utilizando esta diferencia para que el controlador tome las decisiones necesarias para conseguir el valor deseado. Hay que aclarar que esto se realizaba de forma local. Actualmente estamos en la cuarta revolución conocida como Industrial 4.0, ésta es de los datos e incluye puntos clave como la sensórica¹ que se encarga de la medición y entrega de datos, el almacenamiento masivo de los mismos a muy bajo costo y con capacidad de accesibilidad a ellos desde cualquier punto mediante la topología Web Server², permitiendo que los dispositivos puedan realizar conexiones remotas mediante una red local o global donde el usuario puede recibir o transferir datos de los diversos procesos dentro de la industrial para su supervisión y control automático (Talks, 218).

Se debe mencionar que los micro autómatas en el control industrial, se los utiliza para el control automático de procesos sencillos, tales como nivel, caudal o presión y son una alternativa de bajo costo y gran eficiencia, a comparación de sus homólogos los PLC's convencionales, los cuales no brindan al usuario una interacción directa y sencilla a la creación de paneles remotos para la supervisión y control continua de los procesos, desde cualquier parte del mundo a través de servidores Web².

¹ Sensórica es un concepto genérico que hace referencia a diferentes tipos de sensores. Bajo esta palabra de sensorica se entiende tanto las unidades que emite una señal analógica, como las unidades que emite una señal binaria (encendido o apagado).

² Un servidor web (server) es un ordenador de gran potencia que se encarga de "prestar el servicio" de transmitir la información pedida por sus clientes (otros ordenadores, dispositivos móviles, impresoras, personas, etc.)

1.3 Justificación e Importancia

En la actualidad, el mundo está en constante evolución, la tecnología avanza día tras día, los mecanismos de supervisión y control tienen mayor relevancia si interactúan directamente con el usuario en varias plataformas digitales y con soporte web, es decir, el interés del individuo por participar directamente con el proceso en un entorno mucho más amigable y accesible generan un mayor beneficio hacia la eficiente supervisión del mismo.

Hoy en día, el conocimiento adquirido por los estudiantes tiene gran importancia si este es fuertemente enlazado con el conocimiento práctico, es por ello que la implementación de un sistema de control y supervisión de bajo costo, representan un gran beneficio en la formación teórico/práctico de los nuevos profesionales, capacitándolos para los nuevos retos que se enfrentarán en el futuro con las nuevas tecnologías que se van descubriendo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar e Implementar paneles remotos y controlar los procesos de caudal y nivel, utilizando micro autómatas en el laboratorio de redes industriales y control de procesos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar el control automático de las estaciones de caudal y nivel, mediante el método analítico.
- Diseñar la red industrial e implementar las conexiones necesarias de los equipos industriales.
- Diseñar el HMI de los paneles remotos y estación central, basados en normas y estándares internacionales.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos, mediante pruebas de operación de los sistemas en condiciones normales y extremas.
- Comparar funcionalidad y costo de los micro autómatas con referencia a los Controladores lógicos programables, para la supervisión y control de las variables caudal y nivel.

CAPÍTULO II

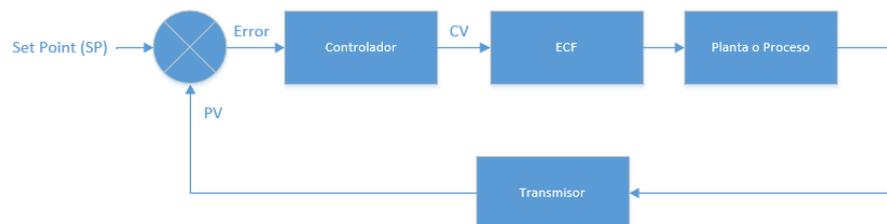
2. Marco teórico

2.1 Control de Procesos

El objetivo del control automático de procesos es mantener en un punto de consigna generalmente llamado Set Point (SP), a las variables del proceso (PV), comúnmente nivel, temperatura, presión y caudal, con lo que se busca que la diferencia entre el PV y SP sea lo mínimo posible, idealmente cero, a esta diferencia se la conoce como error.

Figura 1

Lazo cerrado de control.



Nota. En esta imagen se muestran los componentes básicos de un sistema de control.

La importancia de estos componentes, Figura 1, es realizar las 3 operaciones básicas que deben estar presente en todo sistema de control, son las siguientes:

1. **Medición:** Esta operación la realiza en sí el Transmisor, el cual se encarga de medir la variable que se controla.
2. **Decisión:** En función del error el controlador tomará las medidas necesarias para mantener al PV en el punto de consigna deseado o SP, este generará una señal de control o CV.
3. **Actuación:** Según la decisión tomada por el controlador, debe efectuar una acción sobre el sistema o proceso, esta acción la realiza el Elemento de control final o ECF.

Es necesario definir algunos términos que se usan dentro del campo del control de procesos. El primer término es **variable controlada**, se debe mantener o controlar dentro de algún valor deseado, El segundo término es **variable manipulada**, que se utiliza para mantener a la variable controlada en el punto de consigna, por ejemplo para controlar el nivel de un tanque (nivel es la variable controlada) y mantener este en el punto de consigna deseado aplicará el control de caudal, donde este será la variable manipulada (Smith, 1991).

Razones principales del control de procesos:

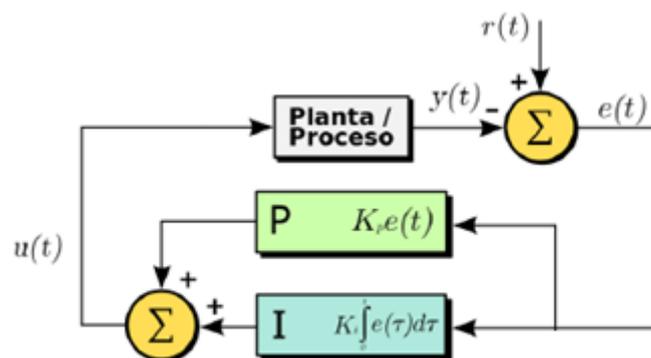
1. Evitar lesiones al operador de planta o daños al equipo.
2. Mantener la calidad del producto en un nivel continuo y costo mínimo.
3. Mantener la tasa de producción de la planta.

2.2 Controladores PI

Un controlador PI (controlador proporcional, integral) es un mecanismo de control simultáneo por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial. Este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado.

Figura 2

Diagrama de bloque de un controlador PI.



Nota. Diagrama por bloques para la representación de un controlador PI.

El algoritmo del control PI consta de dos parámetros distintos: el proporcional y el integral. El valor proporcional depende del error actual, mientras que el integral depende de los errores pasados. La suma de estas dos acciones es usada para ajustar el proceso por medio de un elemento, como la posición de una válvula de control o la potencia suministrada a un calentador.

Matemáticamente el Bloque de control de la Figura 2 se lo puede describir como:

Ecuación 1 *Formula del controlador PI en dominio del tiempo.*

$$u(t) = Kp \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right)$$

Donde Kp y T_i son parámetros que se pueden modificar con diversos métodos de sintonía según las necesidades del sistema. La función de transferencia para el bloque PI:

Ecuación 2 *Formula del controlador PI en dominio de la frecuencia.*

$$G(s) = Kp \left(\frac{1}{T_i \cdot s} + 1 \right)$$

2.3 Sintonía De Controladores Para Procesos Autorregulados

Sintonizar un controlador, es buscar los valores adecuados y óptimos para las constantes del control, a continuación se presenta algunos métodos de sintonización:

2.3.1 Cohen-Coon

Este método se basa en un modelo de primer orden con retardo de tiempo y en el rechazo de las perturbaciones de carga. Para control PI y PID se maximiza la ganancia integral $k_i = \frac{K}{T_i}$. Esto corresponde a la minimización de la integral del error IE, debido a una perturbación de carga de un escalón unitario (Astrom, 2019)

Las ecuaciones están planteadas en función del tiempo muerto L y el tiempo integral T de los procesos en análisis, Tabla 1.

Tabla 1

Parámetros del controlador del método de Cohen-Coon.

Controlador	aK	$\frac{T_i}{L}$	$\frac{T_d}{L}$
P	$1 + \frac{0,35\tau}{1 - \tau}$		
PI	$0,9 \left(1 + \frac{0,092\tau}{1 - \tau} \right)$	$\frac{3,3 - 3,0\tau}{1 + 1,2\tau}$	
PID	$1,35 \left(1 + \frac{0,18\tau}{1 - \tau} \right)$	$\frac{2,5 - 2,0\tau}{1 - 0,39\tau}$	$\frac{0,37 - 0,37\tau}{1 - 0,81\tau}$

Nota. Los parámetros $a = \frac{K_p L}{T}$ y $\tau = \frac{L}{(L+T)}$ se usan en esta tabla para facilitar la comparación con la sintonía de Ziegler-Nichols.

2.3.2 Ziegler-Nichols

Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada.

Primer método. En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental.

Ecuación 3 *Proceso de primero orden en el dominio de la frecuencia.*

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S. Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta, para obtener los valores de las constantes se utiliza las ecuaciones de la Tabla 2.

Tabla 2

Ecuaciones para el primer método.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Nota. Esta tabla representa las ecuaciones utilizadas para la obtención de las constantes de sintonización para el primer método de Ziegler-Nichols.

Segundo método. En este no es necesario obtener el modelo matemático de la planta a diferencia del método anterior, primero se fija $T_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando solo la acción de control proporcional, se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico K_{cr} , en donde la salida presenta oscilaciones sostenidas. (Si la salida no las presenta para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces este método no se puede aplicar.). Así, la ganancia crítica K_{cr} y el periodo P_{cr} correspondiente se determinan experimentalmente, para obtener los valores de las constantes se utiliza las ecuaciones de la Tabla 3.

Tabla 3

Ecuaciones para el segundo método.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Nota. Esta tabla representa las ecuaciones utilizadas para la obtención de las constantes de sintonización para el primer método de Ziegler-Nichols.

2.3.3 HAALMAN

Para sistemas con un retardo de tiempo L , Haalman ha sugerido seleccionar la función de transferencia del lazo.

Ecuación 4 *Formula de lazo Haalman.*

$$G_{1(s)} = P_{(s)}C_{(s)} = \frac{2}{3Ls} e^{-sL}$$

El valor $2/3$ se encontró minimizando el error cuadrático medio para un cambio en escalón en el punto de consigna. Esta elección da una sensibilidad $M_s = 1,9$, que es un valor razonable. Observar que es solo el retardo de tiempo del proceso lo que influye sobre la función de transferencia del lazo. Todos los otros polos y ceros del proceso se cancelan, lo que puede conducir a dificultades.

Aplicando el método de Haalman a un proceso con la función de transferencia:

$$P_{(s)} = \frac{K_p}{1 + sT} e^{-sL}$$

El controlador es:

Ecuación 5 *Modelo de controlador Haalman.*

$$C_{(s)} = \frac{2(1 + sT)}{3K_p L s} = \frac{2T}{3K_p L} \left(1 + \frac{1}{sT}\right)$$

donde $K = \frac{2T}{3K_p L}$ y $T_i = T$. Estos parámetros pueden compararse con los valores $K = 0,9 \frac{T}{L}$ y $T_i = 3LT_i$ obtenidos por el método de la respuesta a un escalón de Ziegler-Nichols.

Comparando el método de Haalman con la sintonía lambda se determina que los tiempos integrales son los mismos que las ganancias, si se selecciona $T_{cl} = \frac{L}{2}$. Como la sintonía Lambda se basa en aproximaciones del retardo de tiempo parece más razonable usar el método de Haalman cuando L es grande.

2.3.4 CHIEN, HRONES Y RESWICK

Este método está basado en la información que utiliza Ziegler-Nichols para la obtención de las constantes de sintonía de los controladores, pero modificando sus coeficientes, logrando así un sistema de lazo cerrado con una mejor robustez (Astrom, 2019)

Tabla 4

Ecuaciones sin sobreelongación CHR.

Controlador	aK	$\frac{T_i}{L}$	$\frac{T_d}{L}$
P	0,3		
PI	0,6	4,0	
PID	0,95	2,4	0,42

Nota. Parámetros del controlador obtenidos de la respuesta a perturbaciones en la carga del método de CHR.

Para sintonizar el controlador con este método, los parámetros a y L , Tabla 4, del modelo del proceso se determinan primero de la misma forma que para el método de la respuesta en escalón de Ziegler-Nichols, Tabla 5.

Tabla 5

Ecuaciones para obtener a y L.

Controlador	aK	$\frac{T_i}{L}$	$\frac{T_d}{L}$	$\frac{T_p}{L}$
P	1			4
PI	0,9	3		5,7
PID	1,2	2	$\frac{L}{2}$	3,4

Nota. Parámetros del controlador para el método de la respuesta a un escalón de Ziegler-Nichols.

2.4 Paneles remotos

Hoy en día la mayor parte de los procesos industriales son automáticos con el fin de optimizar la producción y la supervisión de dichos procesos se lo realiza en un panel de control de forma local, donde el operador asignado está obligado a permanecer constantemente en un solo lugar, la idea de un panel remoto es permitir que el operador pueda supervisar un proceso desde cualquier parte del mundo con ayuda de servidores web.

2.5 Smart Factory

La idea de la fábrica inteligente es que sea la culminación de todo lo que engloba la Industria 4.0. Una de las características de una fábrica inteligente es su conectividad, los sensores y los dispositivos IoT son fundamentales. Se utilizan para vincular los datos de las máquinas, sistemas y personas para poder tomar decisiones en tiempo real, Figura 3 (*3R Fourth Industry, 2018*).

Figura 3

Smart factory.



Nota. La figura representa la importancia que poseen los dispositivos inteligentes dentro de Smart Factory.

2.6 Web Server

Los Servidores web (Web Server) componente que se dedica a “prestar el servicio” de transmitir la información pedida por sus clientes (otros ordenadores, dispositivos móviles, impresoras, personas, etc.), es decir su principal función es almacenar información, en web hosting, archivos propios de una página web (texto, imagen, video, etc.) y los muestra a los clientes a través de los navegadores. Utiliza el protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol). (Class & Souza, 2019).

Para saber de su funcionamiento, primero se toma en cuenta el conocimiento que web server está permanentemente en espera de una solicitud de información. Por lo tanto, se intuye que toda computadora, smartphone, o tablet tienen una dirección IP única e irreplicable que lo identifica de otro dispositivo en la red, direccionando la información enviada a la dirección solicitada. (Class & Souza, 2019).

2.7 Modbus TCP/IP

MODBUS TCP/IP es una variante de la familia MODBUS de protocolos de comunicación simples y neutrales para la supervisión y el control de equipos de automatización. Específicamente, cubre el uso de la mensajería MODBUS en un entorno 'Intranet' o 'Internet' utilizando los protocolos TCP/IP. El uso más común este momento es para la conexión Ethernet de PLC's, módulos de E/S y "puertas de enlace" a otros buses de campo o redes de E/S simples. Modbus TCP / IP también se conoce como Modbus-TCP (*Logicbus, 2019*).

2.8 Micro Automata Logo!

El Logo de Siemens es un módulo lógico, es decir, un controlador programable que permite que sin intervención humana, las máquinas hagan un trabajo, Figura 4.

Figura 4

Micro automática LOGO!



Nota. La figura representa al micro automático LOGO!

Básicamente funciona de la siguiente manera: el micro automático LOGO! recibirá una serie de señales de entrada, las cuales serán procesadas y brindarán una serie de datos a la salida., (Masvoltaje, 2014).

Las ventajas son muchas:

- Son aparatos asequibles en precio.
- Por ser programable, es flexible y versátil.
- Ahorra mucho cableado.
- Es mucho más fácil de mantener en caso de tener que realizar modificaciones.
- Es escalable: se pueden añadir más o menos entradas y salidas.
- Puede tener una pantalla asociada de mando.

CAPÍTULO III

3. Diseño e implementación

Capítulo que presentará el diseño e implementación del tablero de control para las estaciones de Caudal AP-1511 y Nivel ND-0704 del laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armada ESPE, Sede Latacunga, con la utilización de micro autómatas LOGO e implementación de paneles remotos con Web Server.

3.1 Diseño e Implementación del sistema

Los paneles de control son el cerebro de todo sistema industrial automatizado y son de vital importancia para el apropiado desempeño y funcionamiento de procesos industriales. De ser requerido, los tableros pueden ser ensamblados con todos los dispositivos de control, dispositivos de potencia y sistemas de seguridad, ajustándose a las especificaciones y requerimientos necesarios. Al ser esenciales para sistemas de automatización y control, estos manejan varios desafíos de implementación y mejoramiento; es por ello que, al pasar los años, la utilización de Ethernet/IP es parte fundamental en dichos desafíos, tomando en cuenta que deben llegar a ser dispositivos conectados en red.

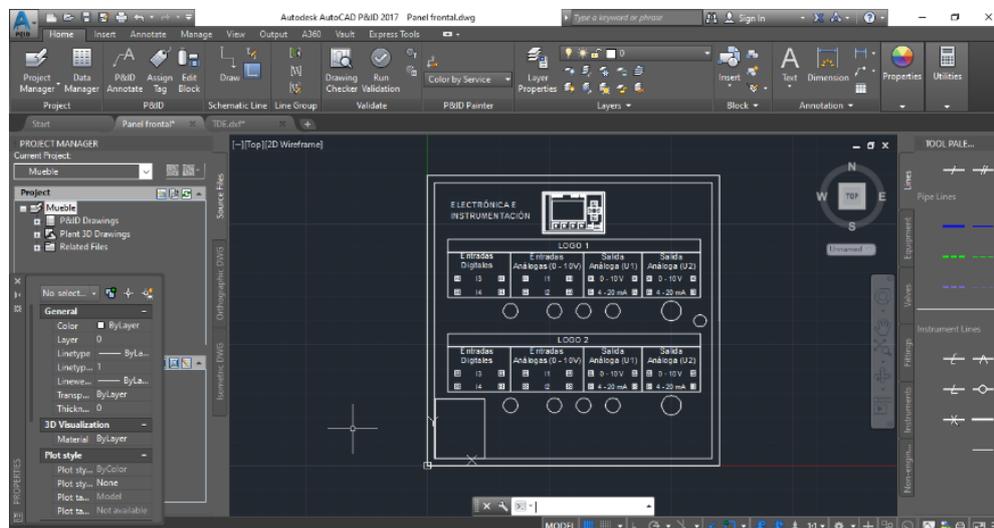
3.1.1 Diseño del Panel Frontal.

El diseño del Panel Frontal, se basa en la necesidad de construir un tablero de control que posea un aspecto didáctico hacia el usuario, sin perder su esencia industrial; es decir debe poseer pulsadores, luces pilotos y una pantalla HMI que ayude a la fácil interacción de los usuarios con el tablero de control, además se debe tomar en cuenta que cada uno de estos elementos, debe estar correctamente etiquetado y referenciado a los terminal del micro autómatas utilizado.

Es por ello que con la ayuda del software AutoCAD, se diseñó la infraestructura externa del tablero de control, tal como se visualiza en la Figura 5, y se determinó los elementos necesarios para su posterior implementación, tal como se lista en la Tabla 6.

Figura 5

Diseño del panel frontal.



Nota. En la imagen se puede apreciar el diseño del tablero exterior de control, desarrollado con AutoCAD.

Tabla 6

Elementos del tablero exterior.

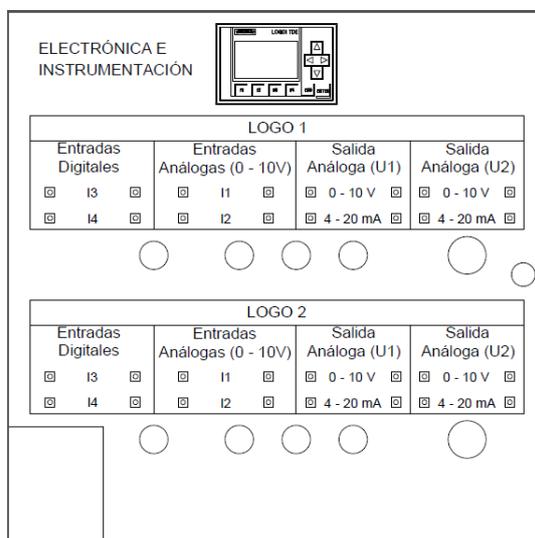
ELEMENTO	NÚMERO
LOGO TDE	1
LUCES PILOTO	6
JACK BANANA HEMBRA	32
PLACAS DE ETIQUETADO	2
PULSADORES	2
PULSADOR PARO GENERAL	2

Nota. La tabla, detalla los elementos utilizados para la construcción del panel frontal del tablero de control.

El diseño de la infraestructura externa de la Figura 5 y el listado de elementos de la Tabla 6, cumpliendo con los requisitos de diseño, dieron como resultado el boceto del panel frontal que se visualiza en la Figura 6.

Figura 6

Diseño final del panel frontal.



Nota. En la imagen se aprecia el diseño final del tablero exterior de control.

3.1.2 Diseño de Panel Interno.

El diseño del Panel Interno, se basa en la necesidad de construir un tablero de control que posea un aspecto didáctico hacia el usuario, sin perder su esencia industrial; es decir debe estar segmentado en tres diferentes segmentos:

El primer segmento corresponde a la etapa de potencia, la cual deberá contenga los elementos o dispositivos de protección de los instrumentos, siendo estos breakeres, fusibles, fuentes de alimentación, borneras, entre otros.

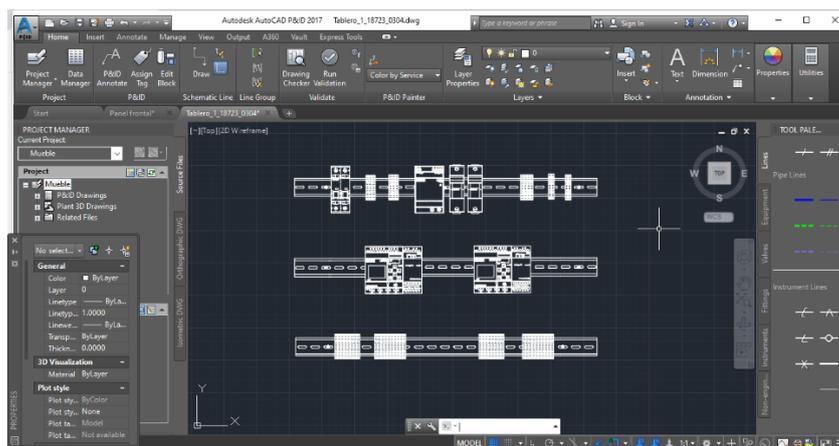
El segundo segmento, corresponde a la etapa de control, la cual deberá contener los elementos o dispositivos de control de las variables de entrada y salida de o hacia los instrumentos, siendo estos los micro autómatas y los módulos de ampliación.

El tercer segmento, corresponde a la etapa de conexión de las entradas y salida de los elementos de control con los puntos de conexión del tablero frontal, es decir la segmentación de las borneras con cada una de las variables de interacción física.

Es por ello que con la ayuda del software AutoCAD, se diseñó la infraestructura interna del tablero de control, tal como se visualiza en la Figura 7 y se determinó los elementos necesarios para su posterior implementación, tal como se lista en la Tabla 7.

Figura 7

Diseño del panel Interior.



Nota. En la imagen se observa el diseño interior final del tablero de control.

Tabla 7

Elementos del tablero interior.

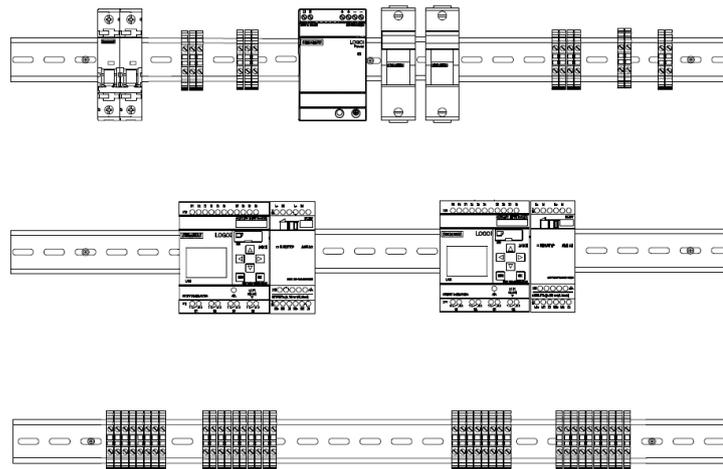
ELEMENTO	NÚMERO
BREAKER	1
FUENTE LOGO	1
PLC LOGO	2
MÓDULO AQ	2
PORTA FUSIBLES	2
BORNEARAS	78
RIEL	3
CABLE	100 m Aprox.
PUNTAS DE CABLE	200

Nota. La presenta tabla, detalla los elementos utilizados para la construcción del panel frontal del tablero de control.

El diseño de la infraestructura interna de la Figura 7 y el listado de elementos de la Tabla 7, cumpliendo con los requisitos de diseño, dieron como resultado el boceto del panel interno que se visualiza en la Figura 8.

Figura 8

Diseño final del panel interior.



Nota. En la imagen se puede apreciar el diseño interior final del tablero de control, el cual se lo desarrolló en el software AutoCAD.

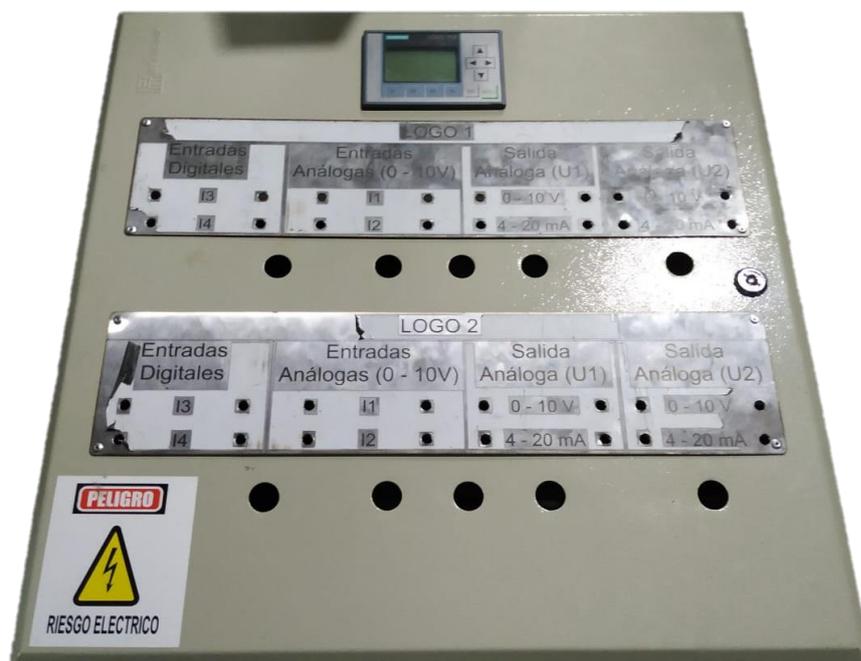
3.1.3 Implementación del Sistema.

3.1.3.1 Construcción Primera Etapa.

Con el objetivo de implementar un panel de control que cumpla con las características de diseño y presente una construcción de gran durabilidad, se procedió a realizar la impresión láser de láminas en acero inoxidable que cumplan con la función de etiquetado de cada una de las entradas y salidas a los módulos de control PLC LOGO. De la misma forma se procedió a colocar el dispositivo MÓDULO TDE que con el objetivo de cumplir en ser una interface humano-máquina que ayuden a la visualización de los parámetros necesarios en el control del proceso. Figura 9.

Figura 9

Implementación primera etapa del panel de control.



Nota. La imagen representa la construcción de la primera etapa del panel exterior de control.

3.1.3.2 Contrucción Segunda Etapa.

La implementación final de la infraestructura externa, cumpliendo con las características de diseño fue el producto de perforar, ubicar y asegurar correctamente los 4 pulsadores, las 6 luces pilotos y los 32 Jack banana, tal como se lista en la tabla 6, los cuales servirán para la conexión didáctica con las estaciones de procesos industriales del laboratorio de redes industriales y control de procesos. Figura 10.

Figura 10

Implementación segunda etapa del panel de control.



Nota. La imagen representa la construcción de la Segunda etapa del panel exterior de control.

3.1.3.3 Construcción Tercera Etapa.

Se ha utilizado la norma NEC-SB-IB; que en su apartado “Instalaciones de conductores”, fue base referente para la utilización del código de colores implementado en el cableado interno del tablero de control, Tabla 8.

Tabla 8

Código de colores normativa NEC-SB-IB.

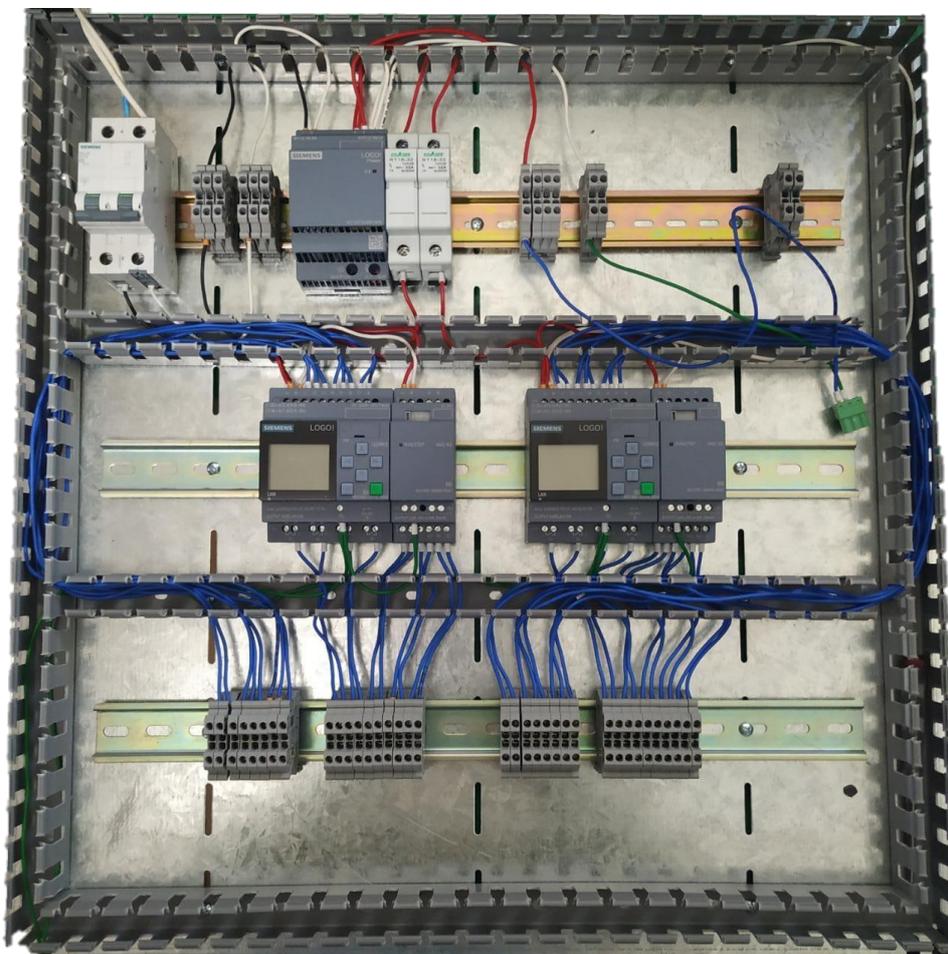
CÓDIGO DE COLORES	
CONDUCTOR	COLOR
Neutro	Blanco
Tierra	Verde, Verde con franja amarilla
Fase	Rojo azul, negro, amarillo o cualquier otro color diferente a neutro y tierra

Nota. La tabla, detalla el código de colores utilizados para la instalación de tableros eléctricos, según la normativa NEC-SB-IB.

De esta forma, se realizó el conexionado entre los dispositivos: PLC LOGO, Módulo AQ, LOGO TDE y fuente de Alimentación hacia las borneras correspondientes; de tal forma que presenten un entorno intuitivo de conexión hacia los usuarios del panel de control, facilitando el etiquetado y direccionamiento de cada uno de los cables internos con la etapa saliente del panel frontal. Dando como resultado la implementación de la primera etapa de construcción y conexionado interno, como se visualiza en la Figura 11.

Figura 11

Implementación tercera etapa del panel de control.



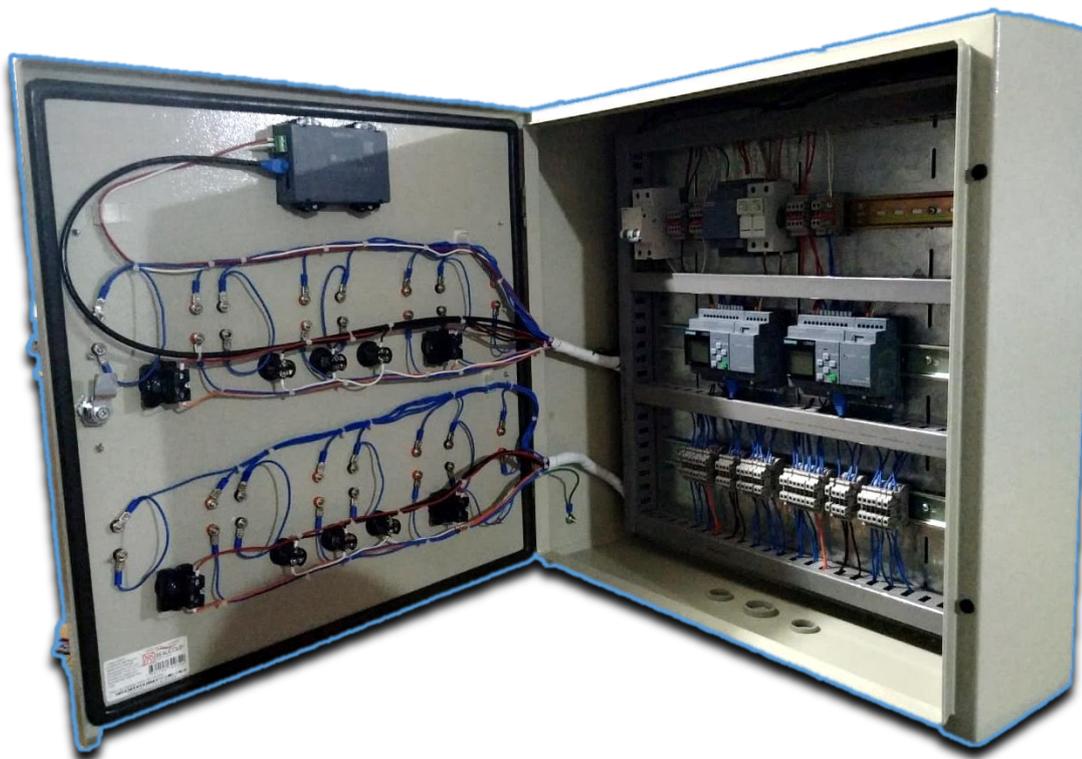
Nota. La imagen representa la implementación de la tercera etapa de construcción del panel de control.

3.1.3.4 Contrucción Cuarta Etapa.

El objetivo final de la implementación realizada en el panel de control fue: unir, cablear y conectar cada una de las entradas del panel frontal (Entradas Análogas, Salidas Análogas, Entradas Digitales y Salidas Digitales), con la finalidad de complementar el conexionado interno a las borneras y hacia los respectivos módulos o dispositivos de control, dando como resultado un cableado normado, ordenado y de fácil localización de conexión a los dispositivos, el cual contempla ser un entorno amigable e intuitivo hacia los usuarios del panel de control (Figura 12), cumpliendo con las características de diseño y tomando en cuenta el listado de la Tabla 7

Figura 12

Implementación cuarta etapa del panel de control.



Nota. La imagen representa la implementación de la Cuarta etapa de construcción del panel de control.

3.2 Calibración de los transmisores/instrumentos de campo.

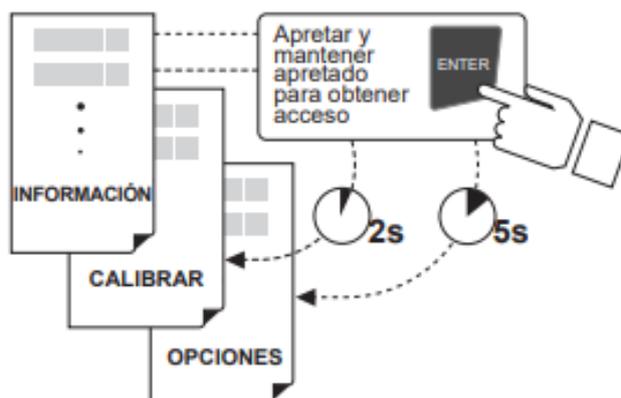
3.2.1 Transmisor Magnético Georg Fischer 8550

Es necesario ajustar el transmisor de flujo Georg Fisher 8550 a los parámetros requeridos por el proceso, para que brinde un mejor rendimiento en la etapa de control.

Debe mantenerse presionado el botón ENTER por 2 segundos y se requiere acceder al menú de Calibración o mantenerlo pulsado por 5 segundos para acceder al menú de opciones. Figura 13.

Figura 13

Menú principal.

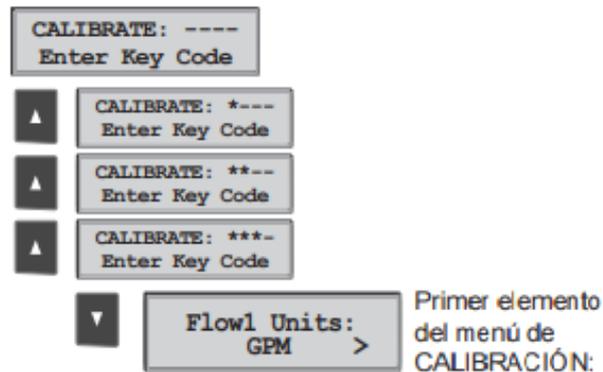


Nota: La imagen visualiza el menú principal del transmisor Georg Fischer 8550 (Fischer G., Signet 8550, 2016)

Ingresar el código de acceso en forma secuencial, es decir presionar tres veces la tecla arriba y una la tecla abajo, para obtener acceso. Figura 14.

Figura 14

Menú de calibración.



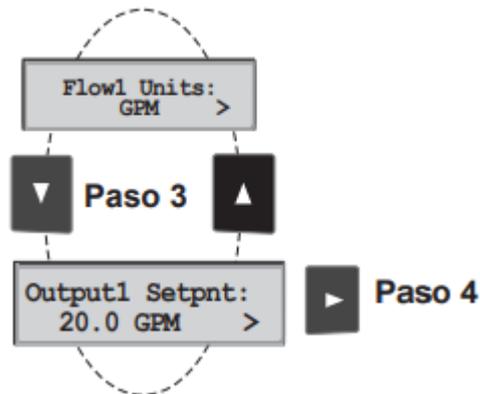
Nota. La imagen muestra el menú de calibración del transmisor GF 8550 (Fischer G., Signet 8550, 2016).

Presionar la tecla de abajo y desplazarse a “Flow Units”, presionar la tecla derecha para ingresar a la variable y cambiar el valor con las teclas de arriba/abajo, tomando en cuenta que los tres primeros caracteres fijan las unidades de medida del caudal y no surten efecto en los cálculos. Pueden ser cualquier carácter, en mayúsculas o minúsculas. El último carácter fija la base de tiempo del caudal: Seleccionar S (segundos), M (minutos), H (horas) o D (días).

Presionar la tecla abajo y desplazarse a “Loop Range: GPM”, presionar la tecla derecha para ingresar a la variable y cambiar el valor con las teclas de arriba/abajo, seleccionar los valores mínimo y máximo para la salida del circuito de corriente de 4-20 mA. El 8550 permitirá cualquier valor de 0.0000 a 99999. En este caso se fija el valor de 4 mA a 2GPM y 20 mA a 10 GPM. Figura 15.

Figura 15

Selección de parámetros.

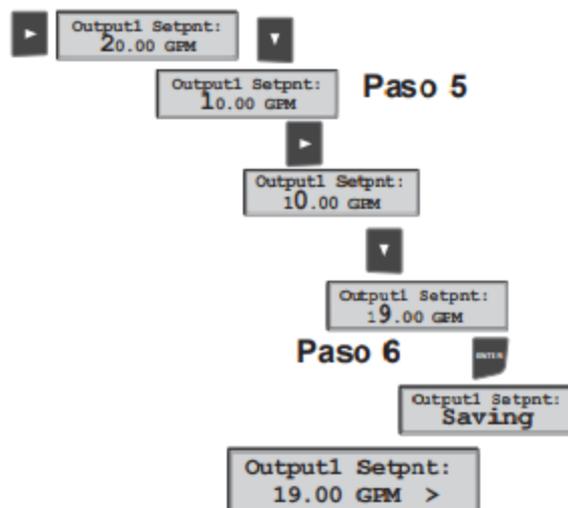


Nota. Menú selección de parámetros del transmisor GF 8550(Fischer G., Signet 8550, 2016

Pulsar la tecla abajo y desplazarse a “Loop Ajust”, presionar la tecla derecha para ingresar a la variable y seleccionar con las teclas de arriba/abajo. Ajustar la salida de corriente mínima y máxima. Usar este ajuste para hacer corresponder la salida del sistema con cualquier dispositivo externo. El valor de la pantalla representa la salida de corriente precisa. Figura 16.

Figura 16

Modificación de los valores de los parámetros.



Nota. Menú para la modificación de valores del transmisor GF 8550 (Fischer G., Signet 8550, 2016

Presionar a la vez las teclas de arriba y abajo como se indica en la Figura 17, para salir del menú de calibración y regresar a la puesta en servicio normal.

Figura 17

Salida del menú de calibración.



Nota. Botones de salida de los menús del transmisor GF 8550 (Fischer G., Signet 8550, 2016).

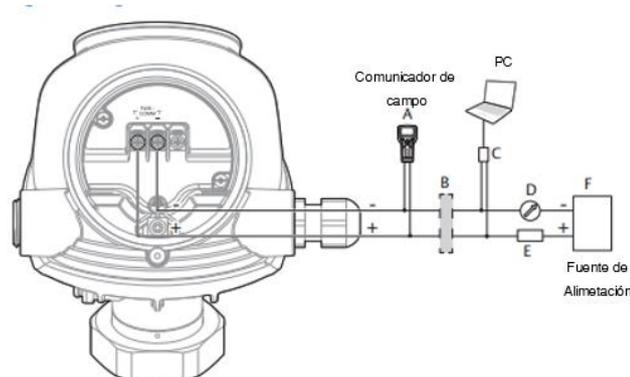
3.2.2 Transmisor De Nivel De Radar Rosemount 5402

Se debe ajustar el transmisor de nivel Rosemount 5402 a los parámetros requeridos por el proceso, para que este brinde un mejor rendimiento en su etapa de control.

Para la configuración, calibración y ajuste del transmisor, se utiliza el software Rosemount Radar Master y se debe conectar el transmisor Rosemount 5402 como se muestra en la Figura 18.

Figura 18

Conexión transmisor Rosemount 5402.



Nota. Esquema de conexión al transmisor Rosemount 5402 (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

Seleccionar el tipo de comunicación que se va a utilizar para la comunicación con el dispositivo. Utilizará el protocolo de comunicación HART, previamente se debe haber cambiado la dirección POLL del transmisor para que exista comunicación mediante el protocolo mencionado. Figura 19.

Figura 19

Selección del protocolo de comunicación.

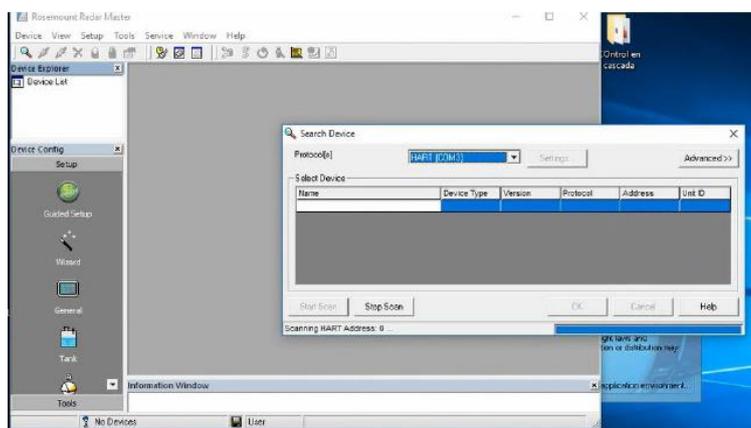


Nota. Ventana de selección del protocolo de comunicación para el transmisor Rosemount 5402 (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

Seleccionado el protocolo de comunicación, iniciará el software y mostrará la ventana que aparece en la Figura 20 donde seleccionará el puerto, que se encuentra conectado el cable HART.

Figura 20

Ventana de inicio del software Rosemount Radar Master.

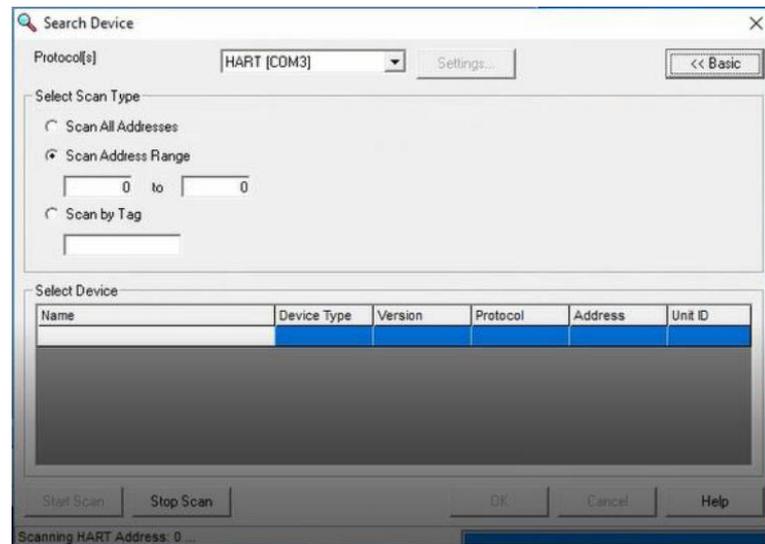


Nota. La imagen visualiza la ventana de inicio del software Rosemount Radar Master (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

Para realizar la búsqueda del dispositivo conectado realizar un clic en el botón “Advanced” y aparecerá la ventana de la Figura 21.

Figura 21

Ventana selección de dispositivo.

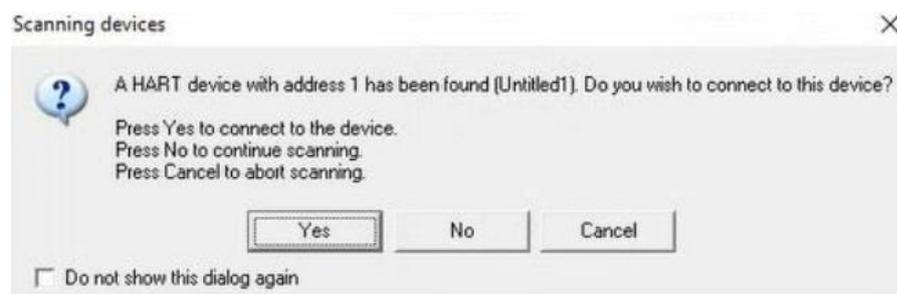


Nota. Ventana de búsqueda de dispositivo del software Rosemount Radar Master (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

En esta ventana seleccionará “Scan Address Range” para ingresar el rango de búsqueda de dispositivos, una vez ingresado el rango de búsqueda presionar el botón “Start Scan” para iniciar la búsqueda de dispositivos. Si está conectado adecuadamente aparecerá el mensaje mostrado en la Figura 22 indicando que el dispositivo ha sido encontrado.

Figura 22

Selección de dispositivo.

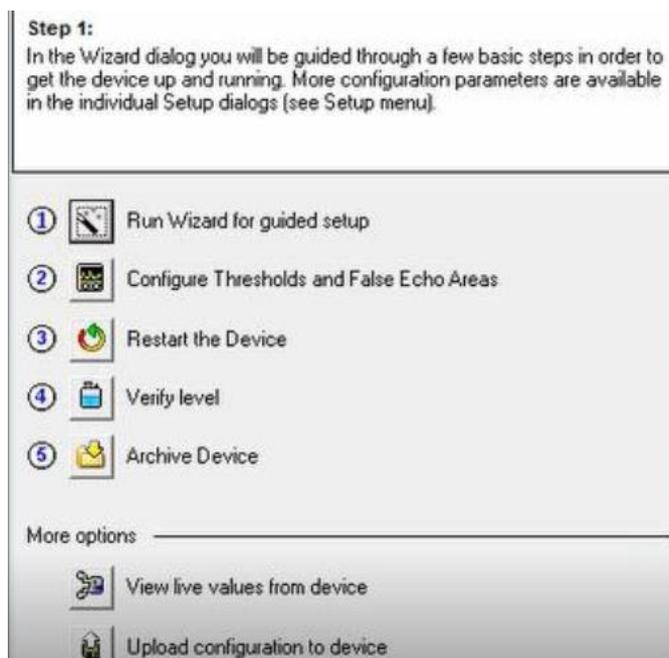


Nota. Ventana flotante de búsqueda de dispositivo del software Rosemount Radar Master (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

Una vez conectado con el dispositivo aparecerá automáticamente la ventana Guided Setup, para la configuración del dispositivo. Es importante seguir el orden indicado en la ventana. Figura 23.

Figura 23

Ventana Guided Setup.

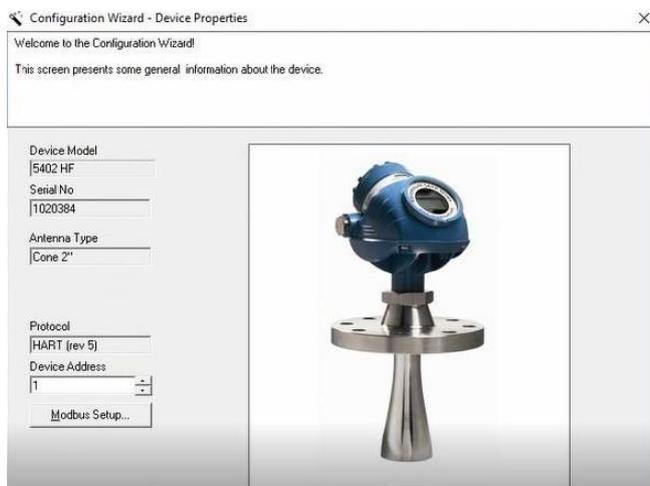


Nota. Ventana de guía básica de los pasos a seguir para poner el dispositivo en marcha dentro del software de Rosemount Radar Master (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

Deberá hacer clic en el botón "Run Wizard for guided setup". Seguir las instrucciones correspondientes a "Basic Configuration" donde el usuario será guiado a través de un breve procedimiento de instalación del transmisor. Iniciado el Run Wizard for guided setup aparecerá la ventana con la información general del dispositivo. Figura 24

Figura 24

Ventana Guided Setup.

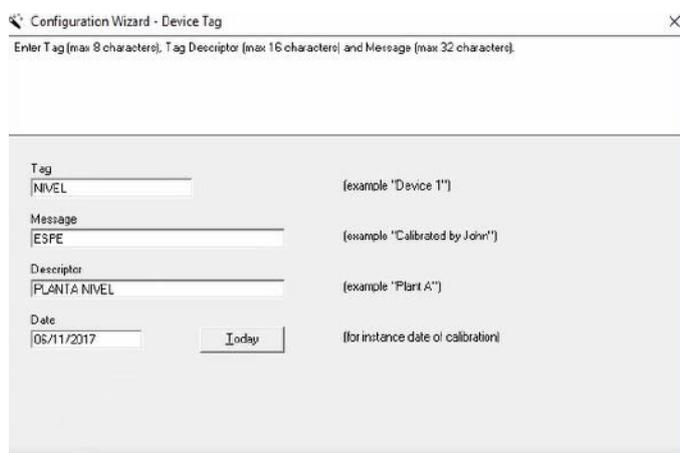


Nota. Ventana de búsqueda de configuración de las características del dispositivo en el software Rosemount Radar Master (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

Verificada la información del dispositivo dar clic en el botón Next, luego aparecerá la ventana mostrada en la Figura 25 donde podrá ingresar una etiqueta (Tag), una descripción de esta, un mensaje y la fecha.

Figura 25

Configuración de etiqueta.

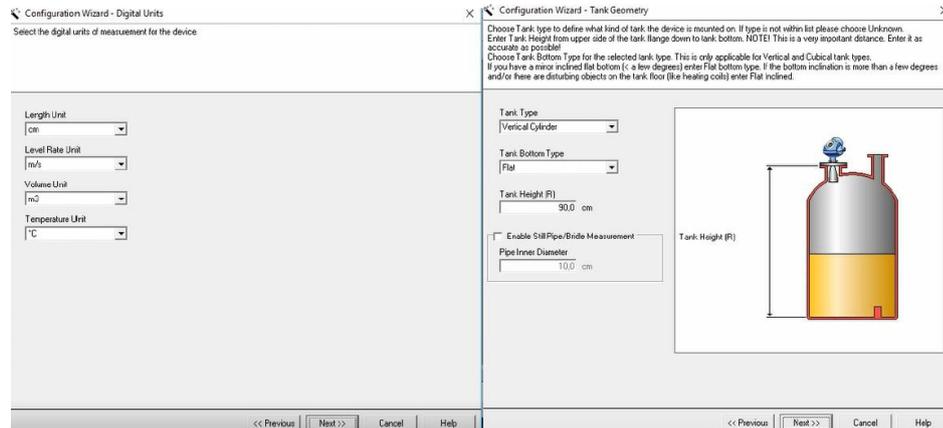


Nota. Ventana de configuración de tag del dispositivo del software Rosemount Radar Master (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

Configurar las unidades de medida para el dispositivo y seleccionar el tipo de tanque utilizado para el proceso. Figura 26.

Figura 26

Unidades y geometría del tanque.

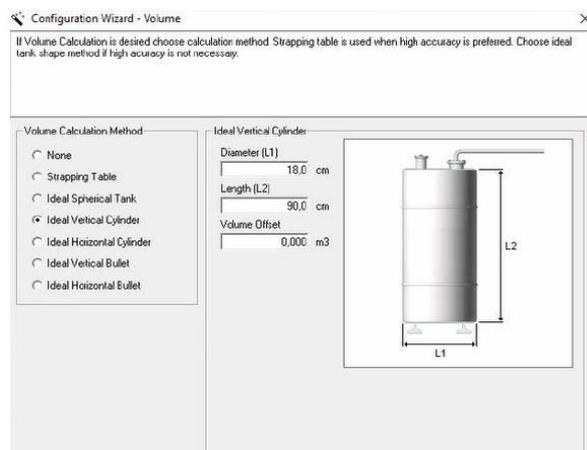


Nota. Ventanas de configuración de unidades y deometría del tanque al transmisor Rosemount del software Rosemount Radar Master (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

Aparecerá la ventana donde si se desea calcular el volumen se debe elegir un método de cálculo definido previamente, de acuerdo con la forma del depósito. Si no desea calcular el volumen, elegir **None**. Figura 27.

Figura 27

Cálculo de Volumen.

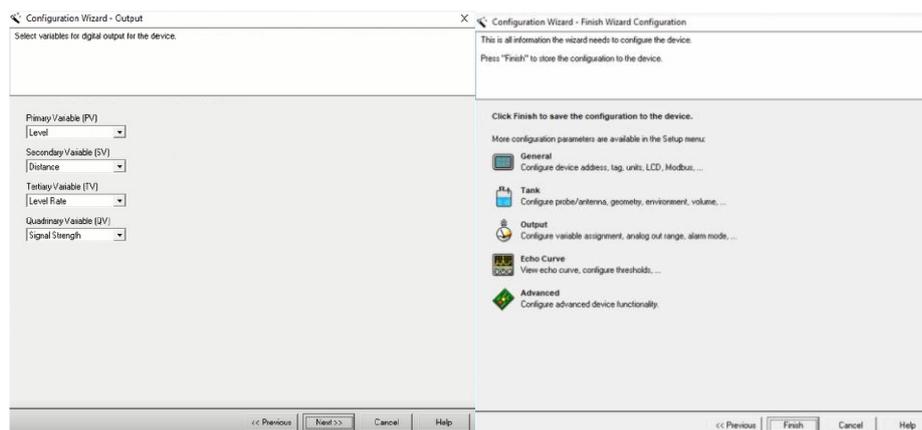


Nota. Ventana de configuración del volumen del tanque en el software Rosemount Radar Master (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

Aparecerá la ventana de la Figura 28 que permite seleccionar las variables para la salida digital del dispositivo y al finalizar mostrará la ventana de finalización del asistente.

Figura 28

Finalización de asistente.



Nota. Ventanas del asistente de configuración del software Rosemount Radar Master (Rosemount, User Manual 5400, 2016)

3.3 Obtención de los modelos matemáticos de los procesos de caudal y nivel

Un modelo matemático representa la relación entre dos o más variables mediante una ecuación, la cual permitirá comprender el comportamiento del proceso.

En este caso se obtendrá la relación entrada-salida de los procesos de caudal y nivel, llamada función de transferencia, donde se llevará desde este momento al CV o entrada como $R_{(s)}$, al PV o salida como $C_{(s)}$ y al proceso como $G_{(s)}$, Figura 29.

Figura 29

Modelo matemático.



Nota. En la imagen se observa la representación de un proceso en diagrama de bloques el cual posee una entrada y una salida.

Para facilidad matemática se trabaja con la Transformada de Laplace en el dominio de la frecuencia, donde los modelos matemáticos de los procesos de caudal y nivel se llevarán a la forma de una función de transferencia de primer orden:

Ecuación 6 *Modelo de primer Orden.*

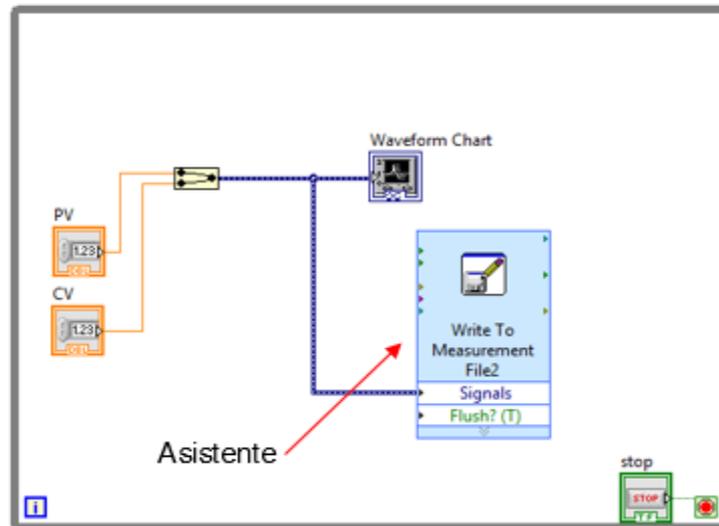
$$G_{(s)} = \frac{C_{(s)}}{R_{(s)}} = \frac{K}{T_p * s + 1} * e^{-T_d * s}$$

Donde K se denomina constante de ganancia, T_p constante de tiempo, y T_d tiempo muerto.

Para obtener el modelo matemático se empieza por la adquisición de datos de la respuesta del proceso $C_{(s)}$, ante una excitación a la entrada $R_{(s)}$, previamente se debe comprobar que $R_{(s)}$ y $C_{(s)}$ estén en cero, se usara la herramienta Labview para dicho propósito, Figura 30.

Figura 30

Adquisición de datos con LabVIEW.



Nota. En la imagen se observa el diagrama de bloque, donde el asistente Write To Measurement se encargará de guardar los datos en un archivo Excel para su posterior tratamiento, se debe realizar la adquisición durante unos 5 minutos aproximadamente, ya que a futuro se necesitará calcular el tiempo de muestreo.

Una vez concluido el tiempo de adquisición se abre el archivo Excel para comprobar que el proceso fue realizado correctamente, Figura 31.

Figura 31

Datos en Excel.

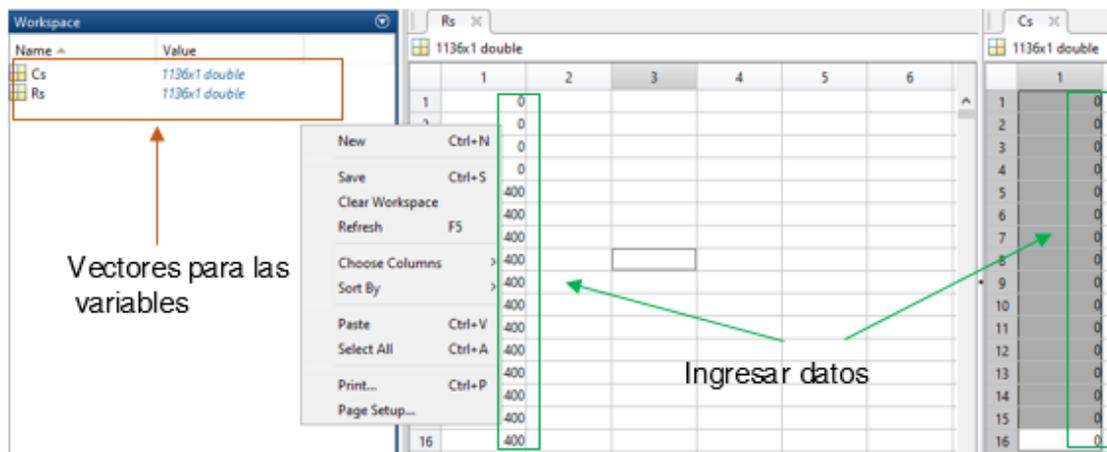
Valores Iniciales	0	0
	0	0
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
Tiempo muerto	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	0	400
	114	400
	119	400
	137	400

Nota. El archivo Excel muestra dos columnas con los datos de $R_{(s)}$ y $C_{(s)}$ donde ambas variables inician en cero, posteriormente se observa que se da un escalón $R_{(s)} = 400$ y después de un tiempo $C_{(s)}$ comienza a reaccionar a dicha entrada escalón, el tiempo desde el momento que se da la excitación hasta el momento donde empieza a reaccionar $C_{(s)}$ se lo conoce como T_d o tiempo muerto.

Ahora con ayuda de Matlab se obtendrá el modelo matemático del proceso, primero se crean dos vectores, R_s y C_s en la ventana del Workspace y se copian los datos correspondientes a cada variable, Figura 32.

Figura 32

Entorno Matlab.



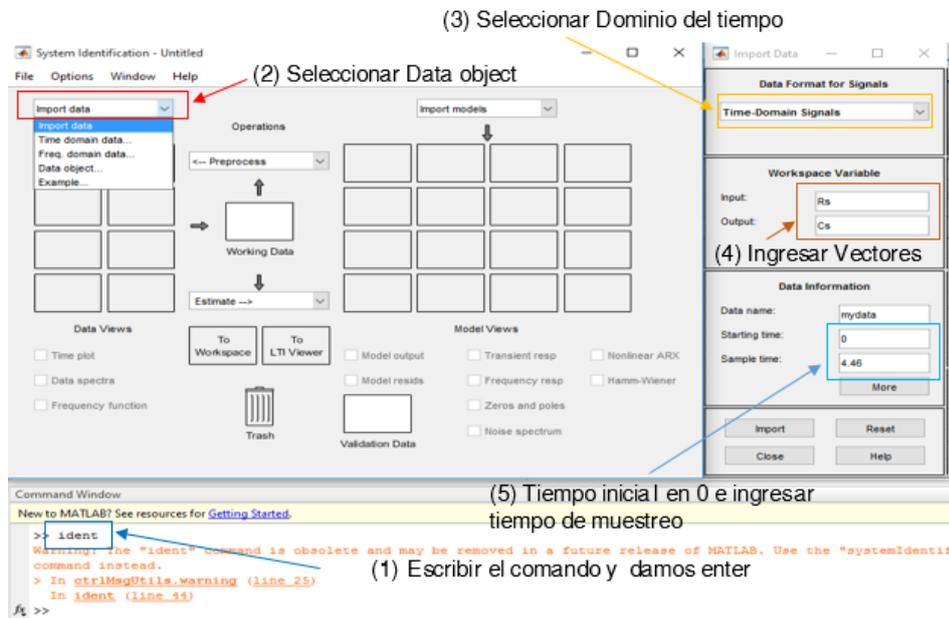
Nota. La imagen muestra cada una de las ventanas del entorno de Matlab, para crear un nuevo vector, dar click derecho sobre el **Workspace** y seleccionar **New**, adicional, se debe asegurar que el orden de los vectores sea igual, caso contrario Matlab arrojará un error.

Una vez creados los vectores en **Command Windows** se procede a digitar el comando **ident**, y se da enter, se espera a la carga de todos los complementos necesarios y automáticamente se abrirá el asistente para generar el modelo matemático.

Dentro del asistente importar los vectores Cs y Rs, para ello en la pestaña **Import data** seleccionar **Data object** y se abrirá una ventana donde en **Data Format for Signals** se debe escoger **Time-Domain Signals** e ingresar los parámetros solicitados, Figura 33.

Figura 33

Asistente para crear modelos matemáticos.

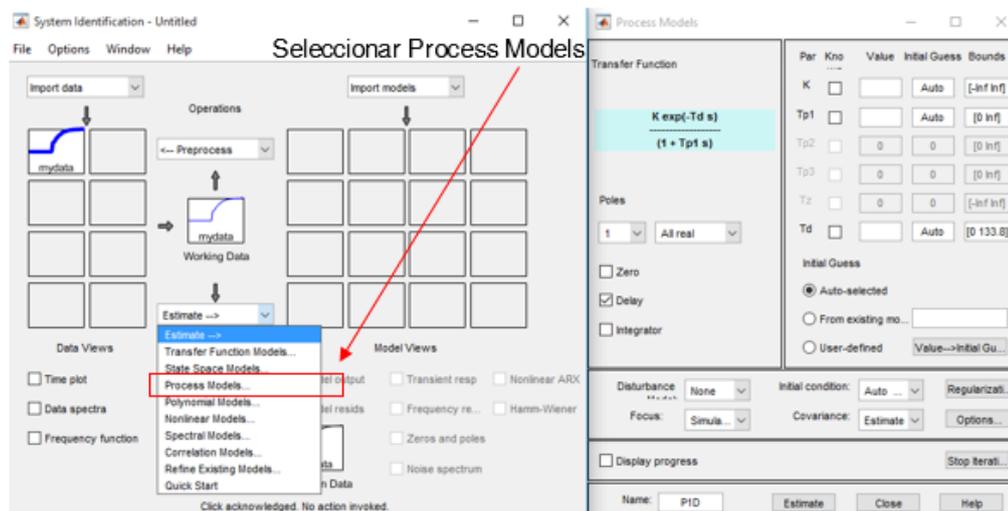


Nota. La figura muestra los pasos a seguir de forma ordenada, para calcular el tiempo de muestreo y hace la relación del número total de muestras entre el tiempo en segundos que se demoró en la adquisición, al final dar en el botón Import.

A continuación, dentro del menú **Estimate**, se selecciona **Process Models**, se abrirá una ventana automáticamente y dar en el botón **Estimate**, Figura 34.

Figura 34

Estimación del modelo matemático.

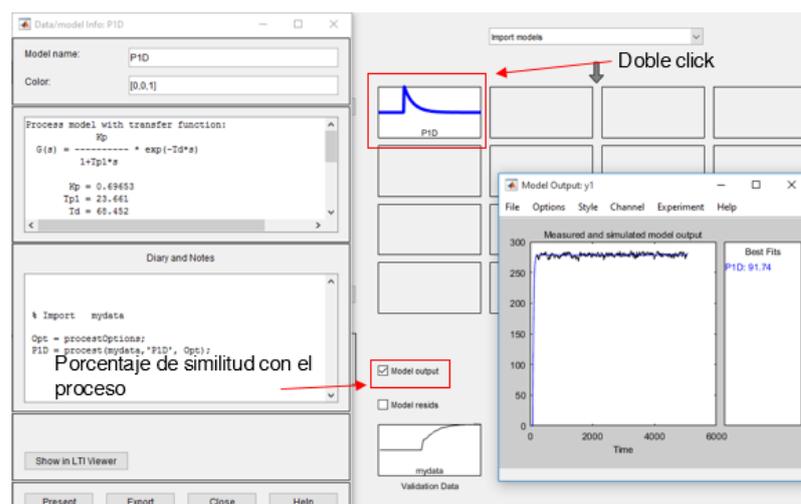


Nota. Asegurarse que la casilla Delay este activada.

Estos son todos los pasos para generar el modelo matemático de un proceso, para ver la función de transferencia se dará doble click sobre la gráfica estimada y si se desea ver el porcentaje de similitud del modelo con respecto a la planta se selecciona la casilla **Model output**, Figura 35.

Figura 35

Visualización de la función de transferencia.



Nota. Las constantes que proporciona el modelo se utilizarán en los cálculos de sintonización de controladores más adelante.

El método explicado anteriormente sirve para procesos autorregulables, es decir que al excitarse con un valor en la entrada la salida tiende a enclavarse en un valor determinado a diferencia de un proceso integral, el cual la salida tiende al infinito, considérese infinito como el valor máximo del proceso.

Mencionado todo lo anterior y aplicando el método para las estaciones de caudal y nivel se tienen las siguientes funciones de transferencia:

Ecuación 7 *Función de Transferencia de Proceso Caudal.*

$$G_{(s)} = \frac{C_{(s)}}{R_{(s)}} = \frac{0,6992}{133,8s + 1} * e^{-63,241s}$$

Ecuación 8 *Función de Transferencia de Proceso Nivel.*

$$G_{(s)} = \frac{C_{(s)}}{R_{(s)}} = \frac{0,68124}{4134,8s + 1} * e^{-131,67s}$$

3.4 Diseño de los controladores PI basado en métodos de sintonía

Un método de sintonización tiene como objetivo calcular el valor de las constantes de un controlador, en este caso la constante proporcional y el tiempo integral para el controlador PI de las estaciones de caudal y nivel.

Hay que considerar que no existe un método universal de sintonización de controladores para todos los procesos industriales, por lo que se debe probar con diferentes métodos y determinar cuál es el más adecuado para dicho proceso considerando parámetros como robustez, tiempo muerto, velocidad de respuesta, error en estado estable, entre otros factores.

3.4.1 Método de sintonía Cohen-Coon.

Tabla 9

Formulas PI para Cohen-Coon.

Controlador	K_p	T_i
PI	$\frac{T_p}{KT_d} \left(0,9 + \frac{T_d}{12T_p} \right)$	$\frac{T_d(30T_p + 3T_d)}{9T_p + 20T_d}$

Nota. La tabla muestra las ecuaciones para un controlador PI.

3.4.1.1 Caudal

Las constantes proporcionadas por el modelo matemático de caudal son:

$$K = 0,6992$$

$$T_p = 133,8 \text{ seg}$$

$$T_d = 63,241 \text{ seg}$$

Se Procede a Reemplazar los valores en las formulas del método de sintonización Cohen-Coon.

Ecuación 9 Formulas de las constantes K_p y T_i de Caudal (Cohen-Coon).

$$K_p = \frac{133,8 \text{ seg}}{(0,6992)(63,241 \text{ seg})} \left(0,9 + \frac{63,241 \text{ seg}}{12(133,8 \text{ seg})} \right) = 2,84$$

$$T_i = \frac{63,241 \text{ seg}(30(133,8 \text{ seg}) + 3(63,241 \text{ seg}))}{9(133,8 \text{ seg}) + 20(63,241 \text{ seg})} = 107,67 \text{ seg}$$

$$= 1 \text{ min} - 47 \text{ seg}$$

3.4.1.2 Nivel

Las constantes proporcionadas por el modelo matemático de Nivel son:

$$K = 0,68124$$

$$T_p = 4134,8 \text{ seg}$$

$$T_d = 131,67 \text{ seg}$$

Se procede a reemplazar los valores en las fórmulas del método de sintonización Cohen-Coon.

Ecuación 10 Formulas de las constantes K_p y T_i de Nivel (Cohen-Coon).

$$K_p = \frac{4134,8 \text{ sg}}{(0,68124)(131,67 \text{ sg})} \left(0,9 + \frac{131,67 \text{ sg}}{12(4134,8 \text{ sg})} \right) = 41,61$$

$$T_i = \frac{131,67 \text{ seg}(30(4134,8 \text{ seg}) + 3(131,67 \text{ seg}))}{9(4134,8 \text{ seg}) + 20(131,67 \text{ seg})} = 411,9 \text{ seg}$$

$$= 6 \text{ min} - 51 \text{ seg}$$

3.4.2 Método de sintonía Ziegler-Nichols.

Este método está basado en las características de respuesta transitoria del proceso.

Tabla 10

Formulas PI para Z&N.

Controlador	K_p	T_i
PI	$0,9 \frac{T_p}{T_d}$	$\frac{T_d}{0,3}$

Nota. Estas fórmulas corresponden al primer método de sintonía de Z&N donde la única condición es que la respuesta del proceso ante una excitación de entrada sea una curva con forma de S.

3.4.2.1 Caudal

Las constantes proporcionadas por el modelo matemático de caudal son:

$$K = 0,6992$$

$$T_p = 133,8 \text{ seg}$$

$$T_d = 63,241 \text{ seg}$$

Se procede a reemplazar los valores en las fórmulas del método de sintonización Z&N.

Ecuación 11 Formulas de las constantes K_p y T_i de Caudal (Z&N).

$$K_p = 0,9 \frac{133,8 \text{ seg}}{63,241 \text{ seg}} = 1,90$$

$$T_i = \frac{63,241 \text{ seg}}{0,3} = 210 \text{ seg} = 3 \text{ min} - 31 \text{ seg}$$

3.4.2.2 Nivel

Las constantes proporcionadas por el modelo matemático de Nivel son:

$$K = 0,68124$$

$$T_p = 4134,8 \text{ seg}$$

$$T_d = 131,67 \text{ seg}$$

Se procede a reemplazar los valores en las formulas del método de sintonización Z&N.

Ecuación 12 Formulas de las constantes K_p y T_i de Nivel (Z&N).

$$K_p = 0,9 \frac{4134,8 \text{ seg}}{131,67 \text{ seg}} = 28,26$$

$$T_i = \frac{63,241 \text{ seg}}{0,3} = 438,9 \text{ seg} = 7 \text{ min} - 19 \text{ seg}$$

3.4.3 Método de sintonía Haalman.

Para procesos que presentan un retardo de tiempo T_d Haalman plantea la siguiente función de transferencia de lazo:

$$G_{(s)}C_{(s)} = \frac{2}{3T_d s} e^{-T_d s}$$

Reemplazando la función de transferencia del proceso $G_{(s)}$ se tendrá:

$$C_{(s)} = \frac{2T_p}{3KT_d} \left(1 + \frac{1}{T_p s} \right)$$

Donde:

Tabla 11

Formulas PI para Haalman.

Controlador	K_p	T_i
PI	$\frac{2T_p}{3KT_d}$	$T_i = T_p$

Nota. La tabla muestra las ecuaciones para un controlador PI.

3.4.3.1 Caudal

Las constantes proporcionadas por el modelo matemático de caudal son:

$$K = 0,6992$$

$$T_p = 133,8 \text{ seg}$$

$$T_d = 63,241 \text{ seg}$$

Se procede a reemplazar los valores en las fórmulas del método de sintonización Haalman.

Ecuación 13 Formulas de las constantes K_p y T_i de Caudal (Haalman).

$$K_p = \frac{2(133,8 \text{ seg})}{3(0,6992)(63,241 \text{ seg})} = 2,02$$

$$T_i = 133,8 \text{ seg} = 2 \text{ min} - 14 \text{ seg}$$

3.4.3.2 Nivel

Las constantes proporcionadas por el modelo matemático de Nivel son:

$$K = 0,68124$$

$$T_p = 4134,8 \text{ seg}$$

$$T_d = 131,67 \text{ seg}$$

Se procede a reemplazar los valores en las fórmulas del método de sintonización Haalman.

Ecuación 14 Formulas de las constantes K_p y T_i de Nivel (Haalman).

$$K_p = \frac{2(4134,8 \text{ seg})}{3(0,68124)(131,67 \text{ seg})} = 30,73$$

$$T_i = 4134,8 \text{ seg} = 69 \text{ min}$$

3.4.4 Método de sintonía Chien, Rones y Reswick.

El método Chien, Hrones y Reswick (CHR) da un sistema en lazo cerrado con una robustez ligeramente mejor que Z&N.

Tabla 12

Formulas PI para CHR sin sobreelongación.

Controlador	K_p	T_i
PI	$\frac{0,6}{a}$	$4L$

Nota. Relacionando CHR y Z&N se tiene que: $a = \frac{T_d}{T_p}$ y $L = \frac{T_d}{0,9}$.

3.4.4.1 Caudal

Las constantes proporcionadas por el modelo matemático de caudal son:

$$K = 0,6992$$

$$T_p = 133,8 \text{ seg}$$

$$T_d = 63,241 \text{ seg}$$

Se Calcula las constantes a y L.

$$a = \frac{T_d}{T_p} = \frac{63,241 \text{ seg}}{133,8 \text{ seg}} = 0,4727$$

$$L = \frac{T_d}{0,9} = \frac{63,241 \text{ seg}}{0,9} = 70,27 \text{ seg}$$

Se procede a reemplazar los valores en las fórmulas del método de sintonización CHR.

Ecuación 15 Formulas de las constantes K_p y T_i de Caudal (CHR).

$$K_p = \frac{0,6}{0,4727} = 1,269$$

$$T_i = 4(70,27 \text{ seg}) = 281,08 = 4 \text{ min} - 41 \text{ seg}$$

3.4.4.2 Nivel

Las constantes proporcionadas por el modelo matemático de Nivel son:

$$K = 0,68124$$

$$T_p = 4134,8 \text{ seg}$$

$$T_d = 131,67 \text{ seg}$$

Se calcula las constantes a y L.

$$a = \frac{T_d}{T_p} = \frac{131,67 \text{ seg}}{4134,8 \text{ seg}} = 0,031844$$

$$L = \frac{T_d}{0,9} = \frac{131,67 \text{ seg}}{0,9} = 146,3 \text{ seg}$$

Se procede a reemplazar los valores en las fórmulas del método de sintonización CHR.

Ecuación 16 Formulas de las constantes K_p y T_i de Nivel (CHR).

$$K_p = \frac{0,6}{0,031844} = 18,8418$$

$$T_i = 4(146,3 \text{ seg}) = 585,2 = 9 \text{ min} - 45 \text{ seg}$$

Tabla 13

Constantes de sintonía para el controlador PI de caudal y nivel.

Método / Proceso	Caudal		Nivel	
	K_p	T_i	K_p	T_i
Cohen-Coon	2,84	1 min - 47 seg	41,61	6 min - 51 seg
Z&N	1,90	3 min - 31 seg	28,26	7 min - 19 seg
Haalman	2,02	2 min - 14 seg	30,73	69 min
CHR	1,269	4 min - 41 seg	18,8418	9 min - 45 seg

Nota. El T_i se expresa en min-seg ya que dentro del bloque PI de Logo pide ingresar dichas constantes en ese formato.

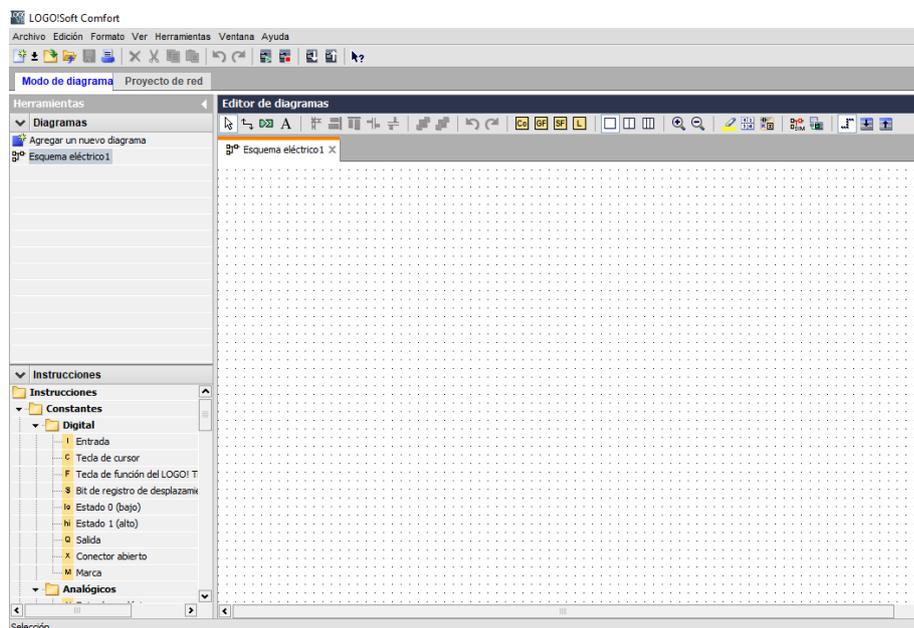
3.5 Implementación del Controlador PI en el micro autómatas LOGO.

3.5.1 Programación del Micro autómatas.

El software LOGO! Soft Comfort es un entorno de programación que brinda al usuario la experiencia de manipular los parámetros de entrada y salida de un micro autómatas con la facilidad de delimitar las funciones realizadas por el mismo. Figura 36.

Figura 36

Entorno del software LOGO! Soft Comfort.



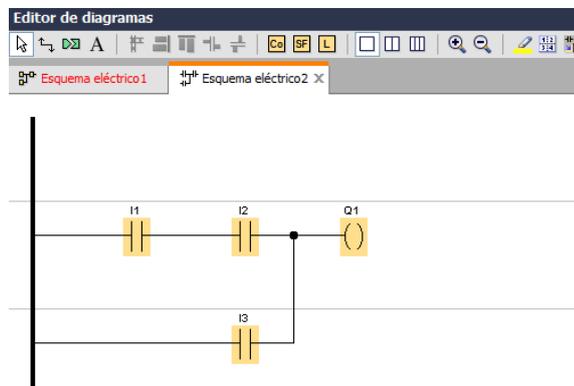
Nota. La imagen representa el entorno del Software LOGO! Soft Comfort, utilizada para la programación del micro autómatas.

LOGO!Soft Comfort brinda al usuario dos entornos de programación:

- El primero es el entorno KOP (esquema de contactos), donde es indispensable tener conocimientos sobre lógica de contactores como se muestra en la Figura 37.
- El segundo es el entorno FUP (Diagrama de Funciones), aquí es necesario conocer sobre lógica del álgebra booleana como se muestra en la Figura 38. La programación de esta tesis se realizó en el entorno FUP.

Figura 37

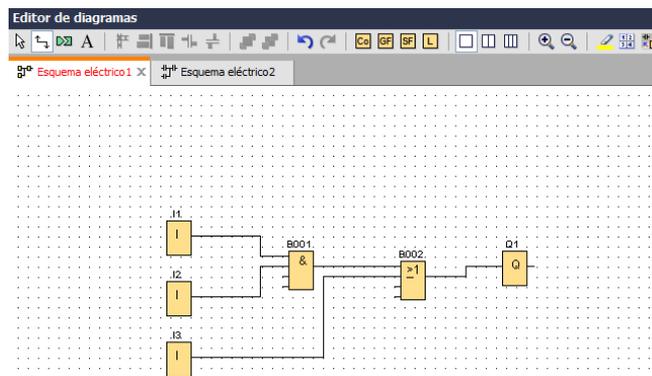
Programación KPOP de LOGO! Soft Comfort.



Nota. La imagen representa la programación KPOP dentro del software LOGO! Soft Comfort.

Figura 38

Programación FUP de LOGO! Soft Comfort.



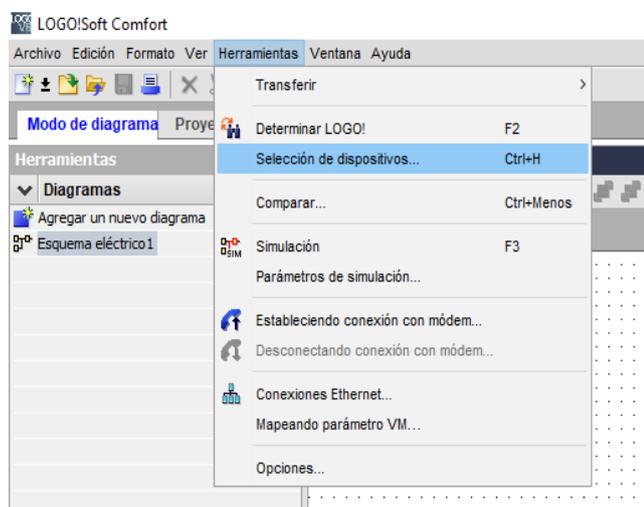
Nota. La imagen representa la programación FUP dentro del software LOGO! Soft Comfort.

3.5.1.1 Direccionamiento Ip De Los Micro Automatas.

LOGO! soft Comfort en su pestaña de herramientas, posee un sub menú que contiene la opción "Selección de Dispositivos", el cual ayudará al usuario a determinar las características que posee el micro autómatas a programar. Figura 39.

Figura 39

Configuración de micro autómeta.

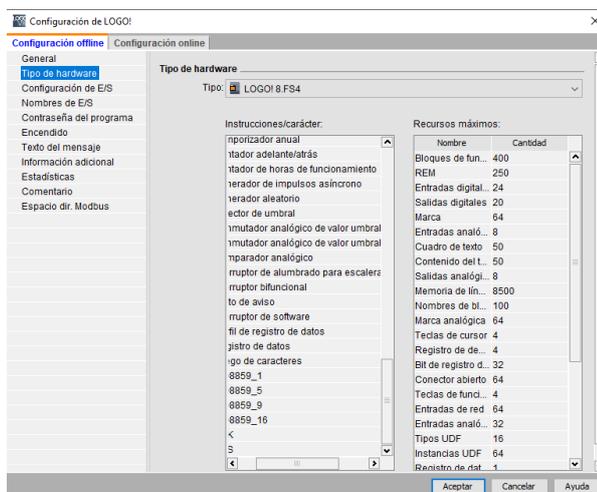


Nota. La imagen muestra la barra de accesos del Software LOGO! Soft Comfort, direccionando a la selección de dispositivos.

Dentro de la configuración offline del dispositivo, se podrá seleccionar el tipo de micro autómeta que se desea programar, inmediatamente se actualizarán todas las características que este poseen, facilitando al usuario los parámetros, variables y funciones máximas que posee el dispositivo. Figura 40.

Figura 40

Configuración offline de LOGO.

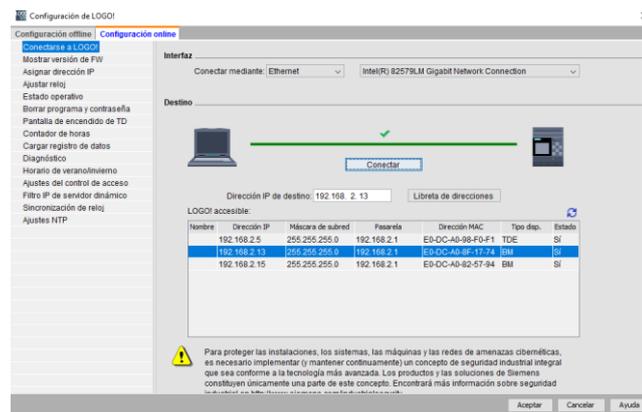


Nota. La imagen visualiza la ventana de configuración del Software LOGO! Soft Comfort, en la cual se puede escoger la versión o modelo del micro autómeta.

Dentro de la configuración online del dispositivo, seleccionar el adaptador de red al cual está conectado el micro autómatas y realizar una breve búsqueda de los dispositivos que se encuentren en red. De esta forma, se selecciona el dispositivo para programar y se selecciona conectar. Figura 41.

Figura 41

Configuración Online de LOGO.

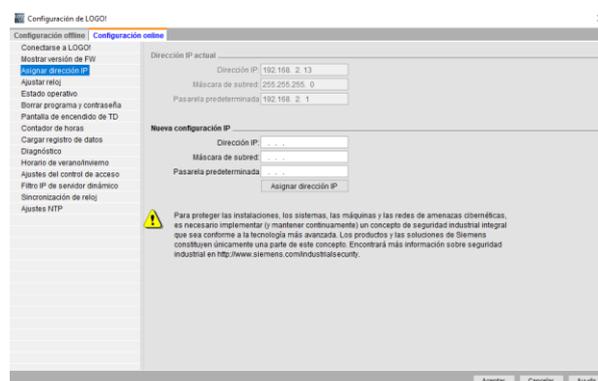


Nota. La ventana muestra la configuración online de los micro autómatas LOGO, apuntando a sus direcciones IP.

Si se desea cambiar la dirección IP del dispositivo, se procede a seleccionar "Asignar dirección IP", en el menú de la parte izquierda de la ventana y se procede a cambiar los parámetros de la nueva configuración IP. Figura 42.

Figura 42

Configuración de LOGO.



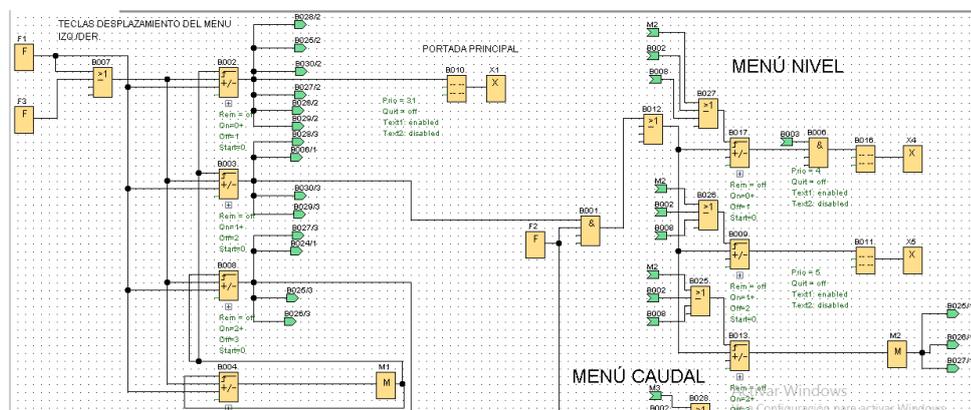
Nota. La ventana muestra los parámetros de configuración online del micro autómatas LOGO, dando direccionamiento IP.

3.5.1.2 Programación De Ventanas En Logo! Tde

La idea del programa que se muestra en la Figura 43 es permitir al usuario desplazarse entre las ventanas de los procesos de Nivel y Caudal con ayuda de las teclas de función F1, F2 y F3 del LOGO! TDE, véase en la Figura 44 la pantalla del LOGO! TDE.

Figura 43

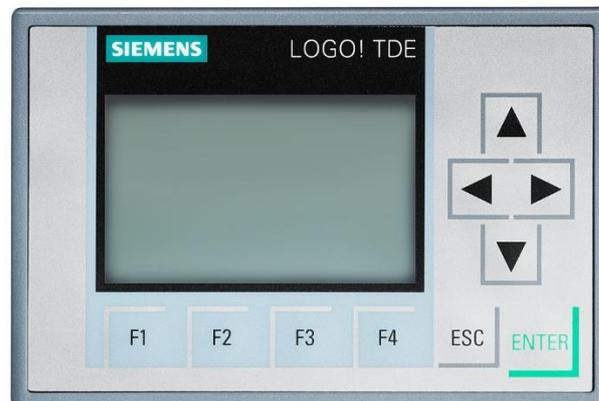
Programación de LOGO! Soft Comfort.



Nota. Se puede observar la programación de bloques, dentro del software LOGO! Soft Comfort.

Figura 44

LOGO TDE.

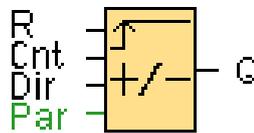


Nota. La imagen ilustra el dispositivo LOGO TDE, que sirve como enlace HMI para la representación de las variables del proceso.

Dentro del programa se ocupará el bloque de contador adelante/atrás, Figura 45, y los bloques lógicos AND y OR, Figura 46, también se configuró las teclas de función F1 y F3 para desplazarse a la izquierda o derecha respectivamente y elegir entre 3 ventanas (Portada, Menú Nivel y Menú Caudal), la tecla de función F2 se configuró para seleccionar las variables a visualizar dentro del proceso de Nivel o Caudal.

Figura 45

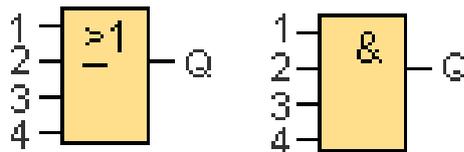
Bloque de conteo.



Nota. La imagen ilustra un bloque de programación dentro de LOGO! Soft Comfort, el cual sirve para realizar un Contador Adelante/Atrás.

Figura 46

Bloque OR y AND.



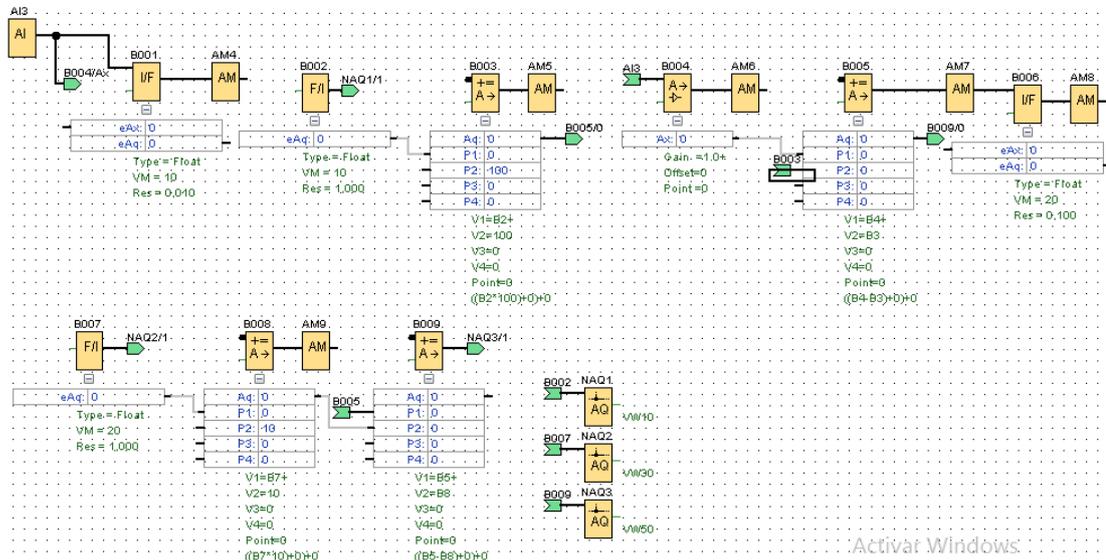
Nota. La imagen ilustra dos bloques de programación dentro de LOGO! Soft Comfort, el cual sirve como compuertas lógicas OR y AND respectivamente.

3.5.1.3 Programación Para Escalar Y Segmentar Entradas Analógicas

Este programa, Figura 47, se crea por el problema que tiene LOGO al representar el punto decimal en el Servidor Web, por lo que se decidió separar la unidad, decena y el decimal de la entrada análoga.

Figura 47

Programación punto decimal para LOGO! Soft Comfort.

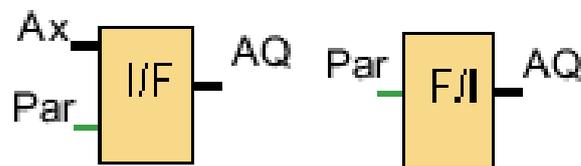


Nota. Se puede observar la programación de bloques para escalamiento y segmentación, dentro del software LOGO! Soft Comfort.

Para la programación se ocupó los bloques de conversión I/F y F/I, Figura 48, el bloque de instrucción aritmética, Figura 49, el bloque de amplificador análogo, Figura 50.

Figura 48

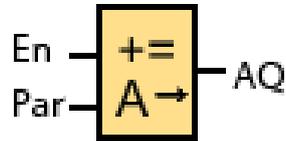
Bloque de conversión.



Nota. La imagen ilustra un bloque de programación dentro de LOGO! Soft Comfort, el cual sirve para realizar una conversión I/F y F/I.

Figura 49

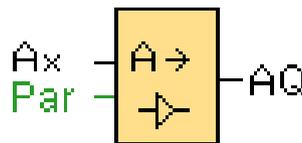
Bloque de operador aritmético.



Nota. La imagen ilustra un bloque de programación dentro de LOGO! Soft Comfort, el cual sirve para realizar operaciones aritméticas.

Figura 50

Bloque de amplificación.



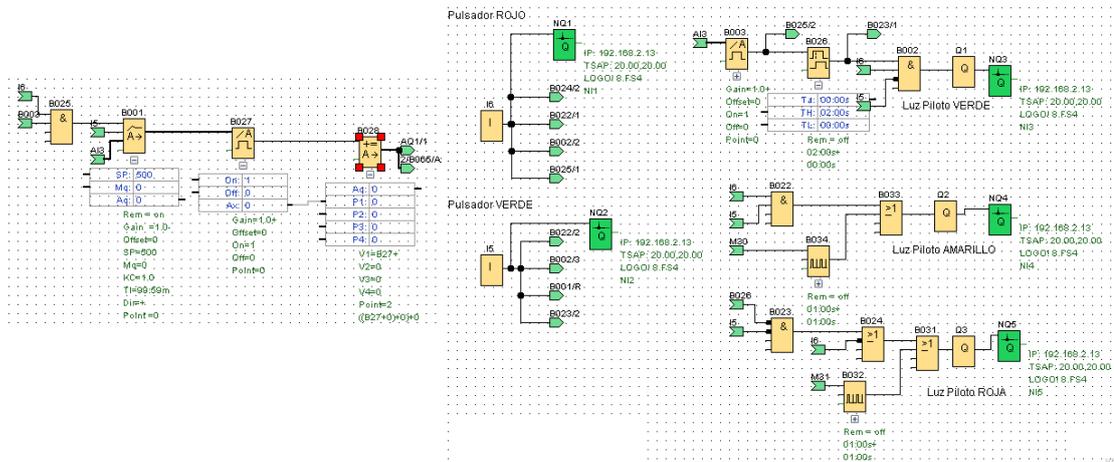
Nota. La imagen ilustra un bloque de programación dentro de LOGO! Soft Comfort, el cual sirve para realizar amplificaciones a datos análogos.

3.5.1.4 Programación Control Pi Y Entradas/Salidas Digitales

Se programa el controlador, Figura 51, también se configura los pulsadores de paro general y reset del controlador PI de cada proceso, asignados en las entradas digitales I6 e I5 respectivamente, también se configuran las luces pilotos verdes, amarillas y rojas a las salidas Q1, Q2 y Q3 respectivamente, la programación en las luces piloto se realizó con ayuda de la tabla de verdad mostrada en la Figura 52.

Figura 51

Programación de controlador PI.



Nota. Programación del controlador PI dentro del software LOGO! Soft Comfort, con la utilización de programación tipo FUP.

Figura 52

Tabla de verdad de luces piloto.

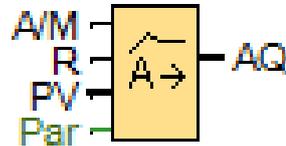
I6	I5	A13	Q1	Q2	Q3
0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	0	1
0	1	1	0	0	1
1	0	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0

$Q1 = (I6) \cdot (I5) \cdot (A13)$
 $Q2 = (I6) \cdot (I5)$
 $Q3 = (I6) + (I5) \cdot (A13)$

Nota. Tabla de verdad para el control de las luces piloto, las cuales representan alarmas, estado del proceso y funcionamiento. Los parámetros del bloque PI se puede visualizar en la Figura 53.

Figura 53

Bloque de controlador PI.



Nota. La imagen ilustra un bloque de programación dentro de LOGO! Soft Comfort, el cual sirve para realizar reguladores PI de control.

3.5.1.5 Creación De Udf (Función Definida Por El Usuario).

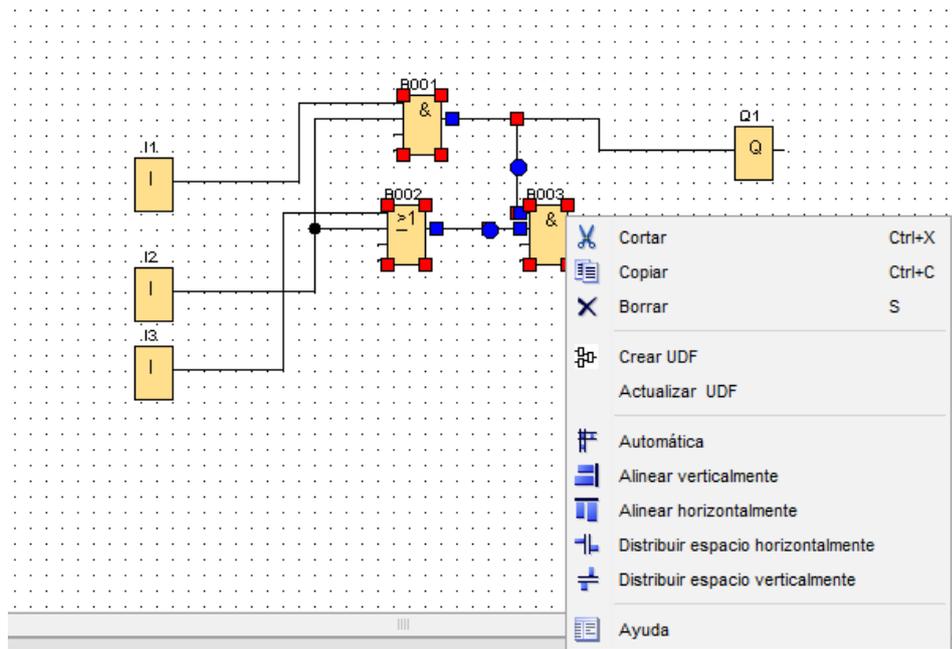
Cuando un conjunto de bloques de funciones es repetitivo, en un mismo programa o en diferentes programas se crea un UDF, donde dicho conjunto de bloques de funciones se encapsula para formar un único bloque de función para usarlo donde se lo requiera, de esta forma, se ahorra espacio y es más legible el programa. Se puede entender a un UDF como un subprograma del programa principal.

Dentro de esta tesis para la visualización de los datos en el servidor web se creó un UDF, para ser más exactos, la programación para escalar y segmentar entradas análogas, detallado en el apartado, "Programación Para Escalar Y Segmentar Entradas Análogas".

Para crear un UDF en LOGO!Soft Comfort se debe seleccionar todos los bloques a encapsular excepto las entradas y salidas, dar click derecho y seleccionar Crear UDF, Figura 54.

Figura 54

Creación de UDF.

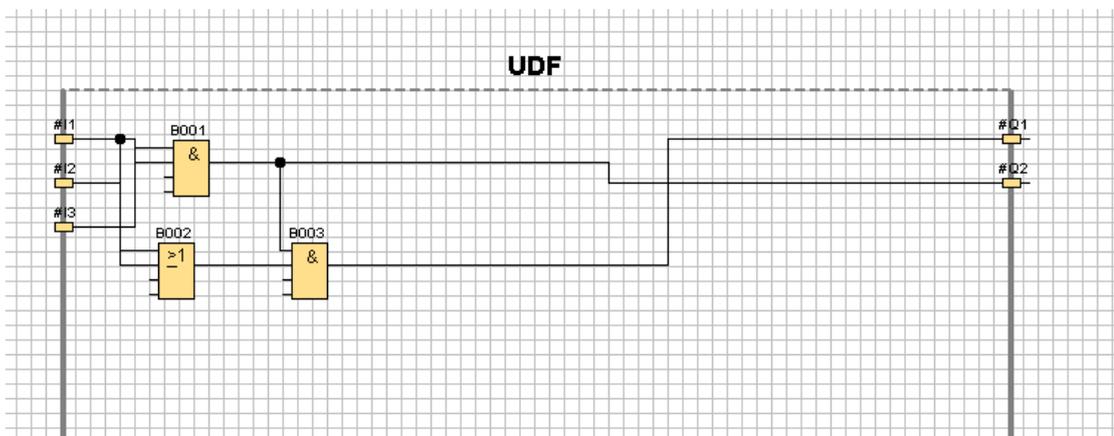


Nota. La imagen ilustra la creación de UDF dentro del software LOGO! Soft Comfort.

Se abrirá una ventana, Figura 55, verificar las conexiones, entradas, salidas y se procede a guardar.

Figura 55

Bloque de UDF.

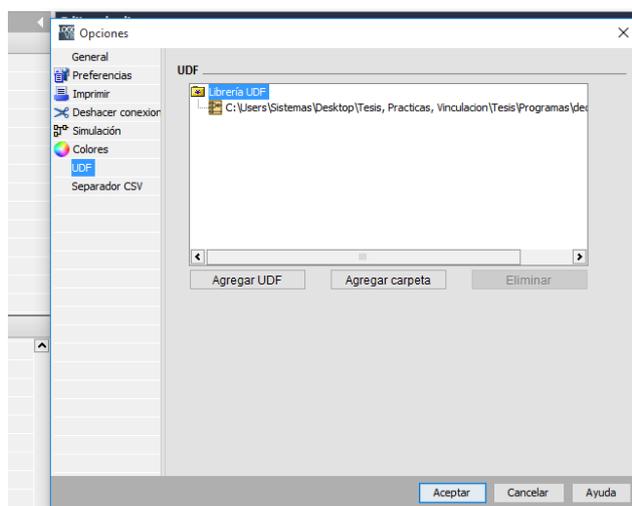


Nota. La imagen ilustra la creación de UDF dentro del software LOGO! Soft Comfort.

Abrir la pestaña Herramientas y entrar en opciones, se abrirá la ventana presentada en la Figura 56, en el menú General se selecciona UDF y buscar la dirección donde se guardó el archivo, finalmente comprobar en la ventana de instrucciones que se haya cargado el bloque de función dentro de la carpeta UDF, Figura 57.

Figura 56

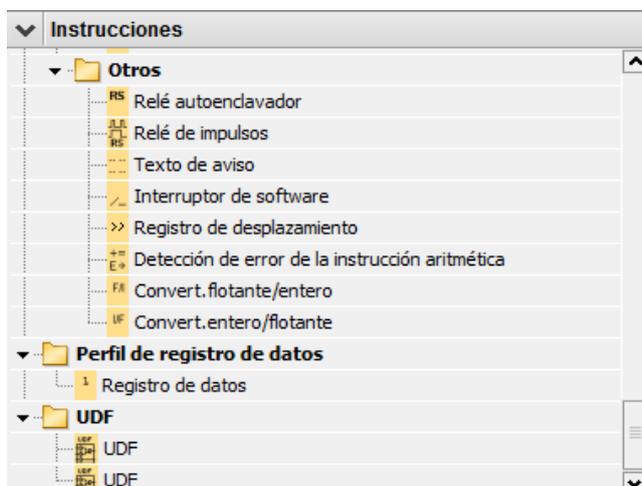
Creación de UDF.



Nota. La imagen ilustra la creación de UDF dentro del software LOGO! Soft Comfort.

Figura 57

Configuración de UDF.

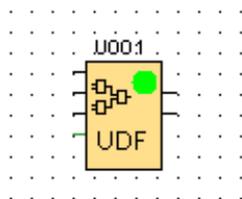


Nota. La imagen ilustra la creación de UDF dentro del software LOGO! Soft Comfort.

Todo el conjunto de bloques de funciones de la Figura 55 se transforma en un solo bloque de función, Figura 58.

Figura 58

Bloque de UDF.



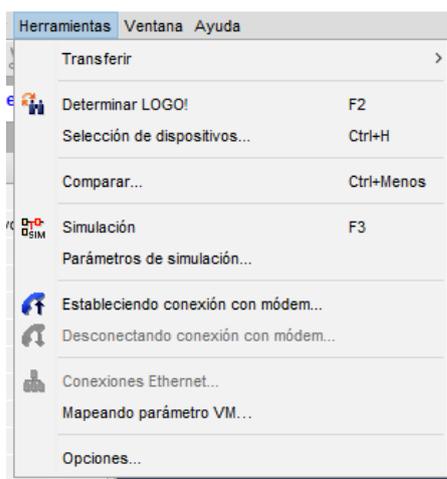
Nota. La imagen ilustra el Bloque de UDF dentro del software LOGO! Soft Comfort.

3.5.1.6 Mapeado Vm.

LOGO! Soft Comfort brinda una herramienta de mapeado de variables la cual ayuda al manejo de variables globales que van a ser utilizadas para la conexión de las diferentes plataformas de interacción con el individuo, siendo estos HMI local o remoto. Esta herramienta, se la localiza en la barra de accesos como Herramientas → Mapeando Parámetros VM tal como se visualiza en la Figura 59.

Figura 59

Ventana de herramientas Logo Soft Comfort.

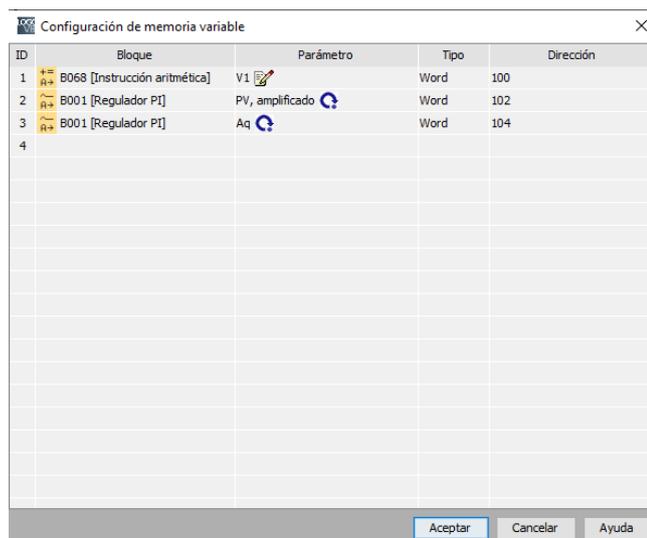


Nota. La imagen ilustra la ventana de Herramientas dentro del software LOGO! Soft Comfort.

Se procede a la configuración de la memoria variable y se seleccionan los bloques de los cuales se obtendrán las variables, dándoles un tipo de dato y una dirección; la cual servirá como puerta de enlace entre la programación del micro autómatas y la aplicación de lectura y escritura de datos, Figura 60.

Figura 60

Ventana de mapeo VM en Logo Soft Comfort.



ID	Bloque	Parámetro	Tipo	Dirección
1	B068 [Instrucción aritmética]	V1	Word	100
2	B001 [Regulador PI]	PV, amplificado	Word	102
3	B001 [Regulador PI]	Aq	Word	104
4				

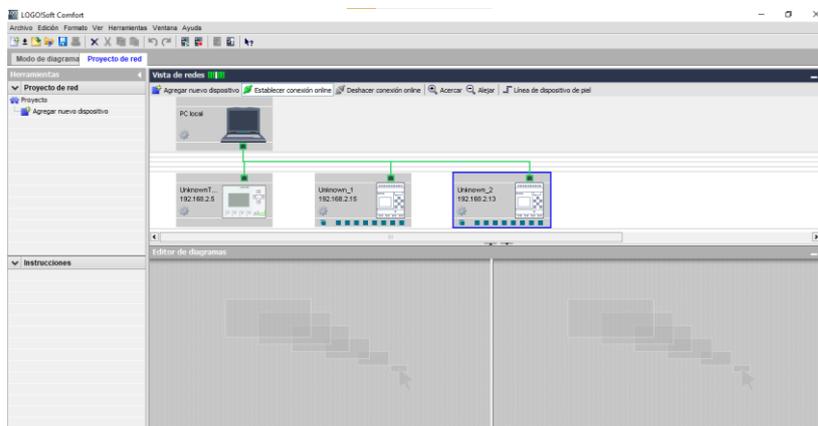
Nota. La imagen ilustra la ventana de Mapeo VM dentro del software LOGO! Soft Comfort

3.5.1.7 Creación Del Proyecto De Red.

El propósito de crear una red es permitir la comunicación entre dispositivos, para ello en la ventana Proyecto de red establecer conexión con los micro autómatas conectados y automáticamente LOGO!Soft Comfort los detectará con las direcciones IP previamente asignadas, Figura 61.

Figura 61

Proyecto de RED.

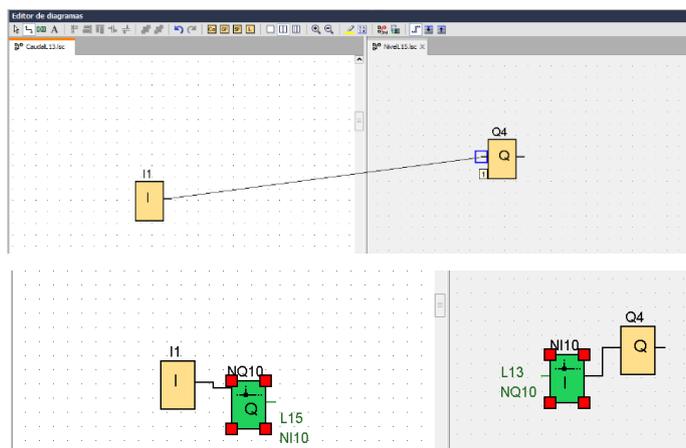


Nota. Proyecto de red entre 2 micro autómatas LOGO, una PC local y los enlaces de red para el intercambio de variables.

A partir de la versión 8 de LOGO es mucho más cómodo y fácil el comunicar datos entre dispositivos, con el método arrastrar y soltar las variables que se quieren compartir entre los diagramas de los dispositivos, creándose automáticamente variables de entrada y salida de red especificando la dirección a la que apuntan, Figura 62.

Figura 62

Intercambio de variables.

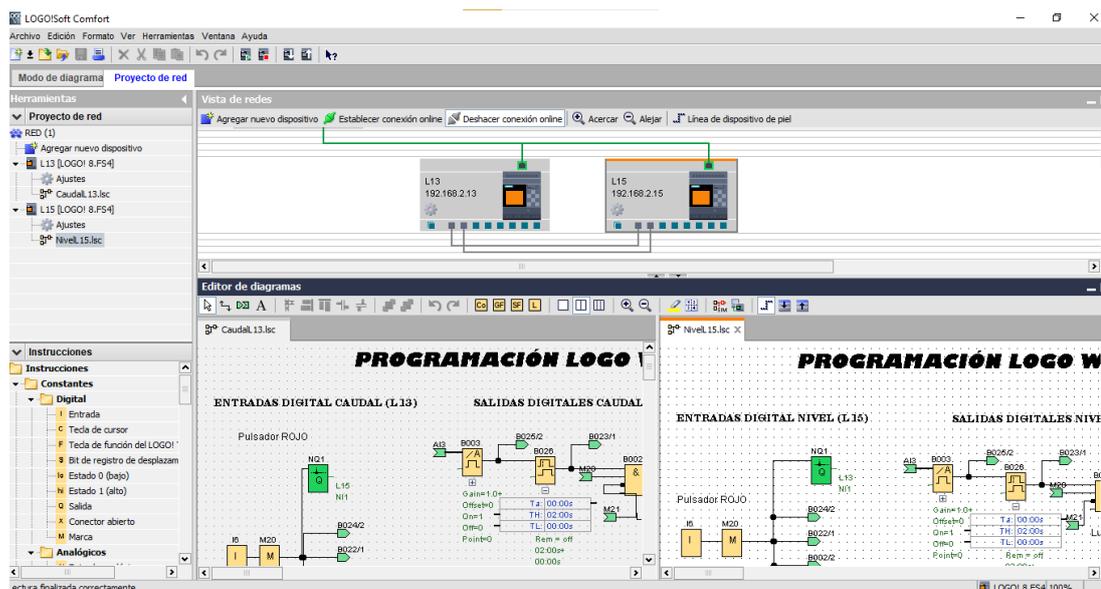


Nota. Comunicación de datos entre dispositivos, para el envío vía RED de las variables necesarias para la visualización de los controladores.

De esta forma se logra enlazar la programación de cada uno de los micros autómatas a una red de conexión que facilite la comunicación entre los dispositivos programables, la pantalla TDE y los entornos de supervisión y control locales o remotos de tipo HMI. Figura 63.

Figura 63

Proyecto de red.



Nota. Comunicación de red entre los micro autómatas LOGO de las estaciones de Nivel y Caudal.

3.6 Implementación de Controladores

Una vez obtenidos los valores de las constantes de sintonización de los controladores, como se visualiza en la Tabla 10, se procede a la carga de las constantes K_p y T_i al bloque del controlador PI de cada uno de los micros autómatas. Tomar en cuenta que la constante T_i , ingresa en minutos y segundos respectivamente. Figura 64.

Figura 64

Propiedades del bloque PI.

The screenshot shows a ladder logic diagram in the Logo Soft Comfort software. A central block labeled "REGULADOR PI" (B001) is highlighted. A context menu is open over this block, showing options like "Propiedades del bloque...", "Cortar", "Copiar", "Borrar", "Seleccionar todo", and "Ayuda".

The properties dialog box for "B001 [Regulador PI]" is open, showing the following parameters:

- Salida:**
 - Consigna (SP): B067 [Instrucción aritmé...]
 - Salida manual (Mq): 0
- Parámetro:**
 - Juego de parámetros: Usuario definido
 - Ganancia del regulador (KC): 2,84
 - Tiempo integral (TI): 1 : 47 Minutos (m:s)
 - Sentido (Dir): Hacia arriba (+) Hacia abajo (-)

Nota. Dando clic derecho al bloque PI dentro de la programación del software Logo Soft Comfort, se accede a las propiedades del bloque, donde se procede a la carga de parámetros del controlador.

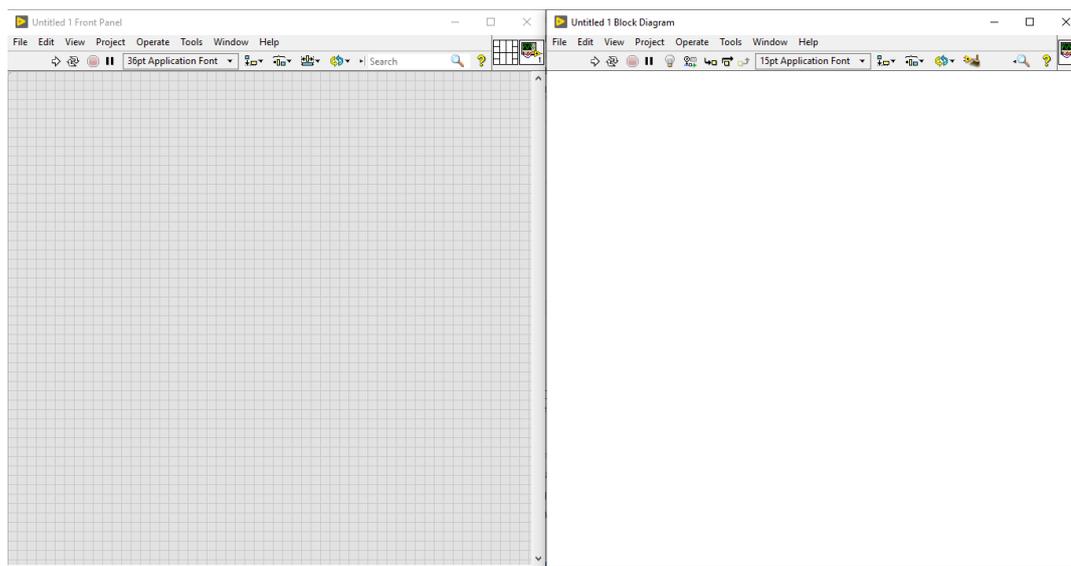
3.7 Diseño e implementación de los HMI local y remoto

3.7.1 Diseño del HMI local.

LabVIEW ofrece al usuario la capacidad de programar un entorno de interacción entre el micro autómatas y el operador, facilitando la tarea de adquisición y representación de datos del proceso o las estaciones de control. Los programas de LabVIEW, también llamados instrumentos virtuales o VIs, (Por su semejanza a los instrumentos físicos como osciloscopios o multímetros), son los elementos de enlace para la adquisición, visualización y almacenamiento de datos, mediante direccionamiento entre las entradas y salidas del LOGO. Figura 65.

Figura 65

Entorno LabVIEW.



Nota. La imagen representa el entorno del Software LabVIEW, utilizada para la creación del HMI local.

El software LabVIEW, en su ventana de panel frontal al acceder a View → Controls Palette o al dar clic derecho en la superficie de su panel se desplegará una paleta de controladores que contiene los controles o indicadores que se utilizarán para crear o programar el panel. Figura 66.

Figura 66

Paleta de controladores.



Nota. Representación de la paleta de controladores del panel frontal en el entorno LabVIEW.

LabVIEW posee una ventana llamada 'Diagrama de Bloque', la cual sirve para añadir código necesario en la programación de las funciones que darán control a los objetos del panel frontal. De la misma forma, al acceder a View → Controls Palette o al dar clic derecho en la superficie de la ventana se desplegará una paleta funciones que contiene las funciones y constantes que se utilizarán para interactuar con las variables y cumplir con todas las necesidades de programación necesarias en el enlace entre el panel local y el micro autómatas. Figura 67.

Figura 67

Paleta de controladores.

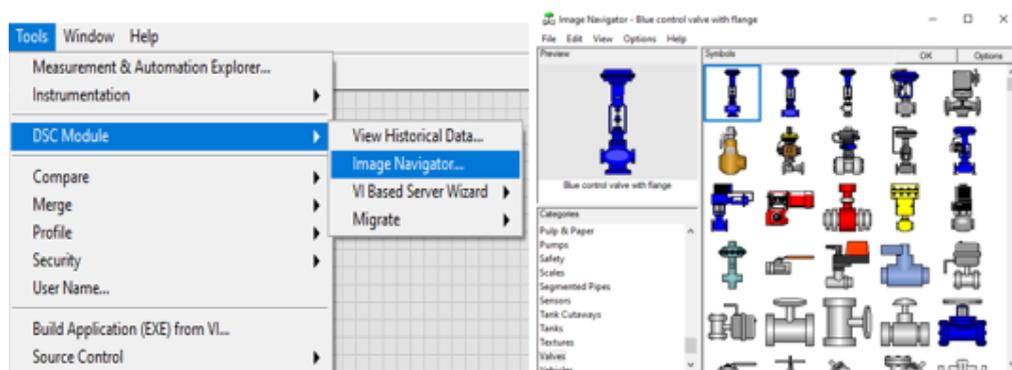


Nota. La imagen representa la paleta de funciones del diagrama de bloque en el entorno LabVIEW.

LabVIEW en su barra de herramientas al acceder en Tools → DCS Module → Image Navigator, nos desplegará una ventana de imágenes que servirá para la representación de ciertos elementos dentro del proceso, tales como bombas, válvulas, tuberías, alarmas, entre otros. Figura 68.

Figura 68

Imagen navigator.

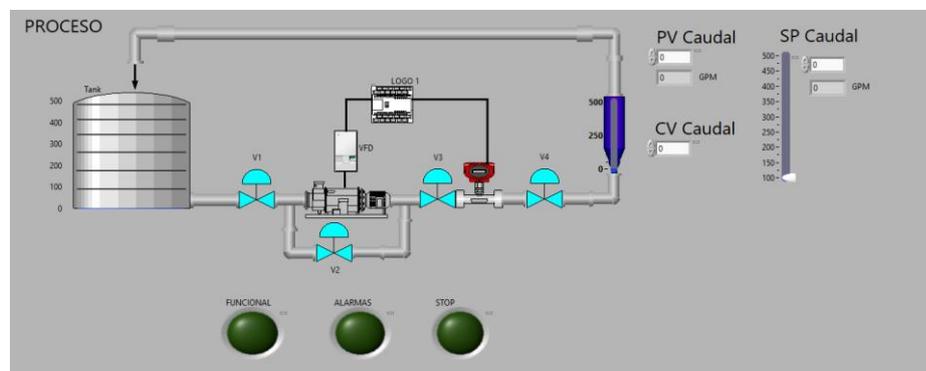


Nota. La imagen representa la herramienta de navegación del panel frontal en el entorno LabVIEW.

Todas estas utilidades dentro del software LabVIEW, sirven para la creación del HMI local que interactuarán directamente a las variables del micro autómatas LOGO y las reflejarán hacia los diferentes paneles remotos, dentro de la red industrial. Figura 69.

Figura 69

HMI local de un proceso.



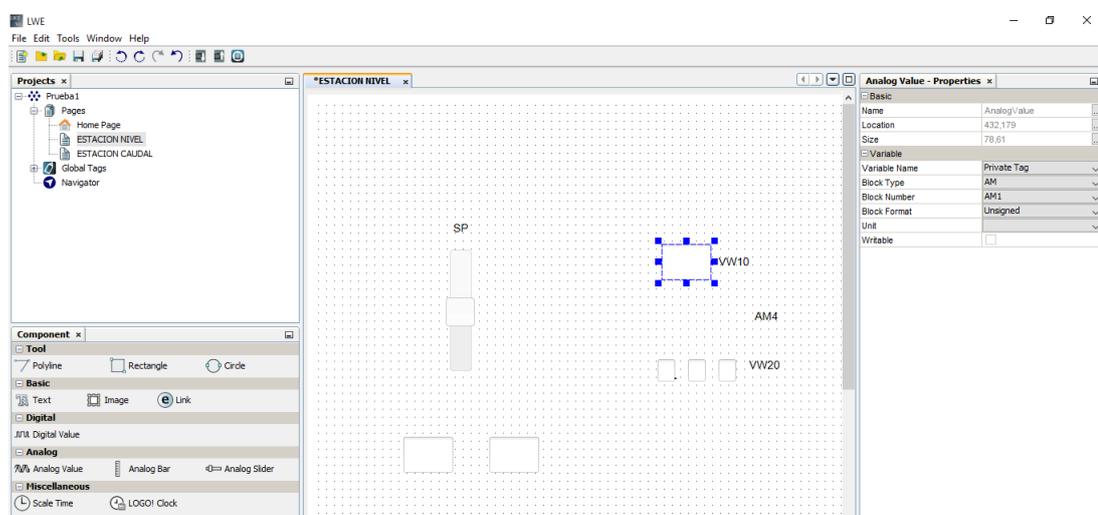
Nota. Representa el HMI local de la estación de caudal, realizado en el entorno LabVIEW, con todos los parámetros necesarios para la supervisión del proceso.

3.7.2 Diseño del HMI remoto.

El diseño de la página web se realizó en el software LWE (Logo Web Editor), Figura 70, el cual se limita únicamente en la transmisión/recepción de datos mediante direccionamiento o actuando directamente en las entradas y salidas del LOGO.

Figura 70

Diseño página web.

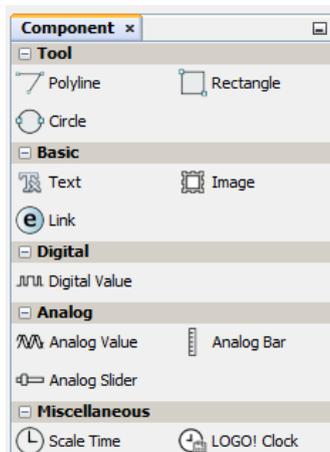


Nota. La imagen muestra el software, Logo Web Editor el cual sirve como entorno gráfico de programación gráfica, para el diseño de páginas Web.

Logo Web editor, brinda una paleta de componentes para el diseño y creación del entorno gráfico hacia el usuario o HMI, conteniendo parámetros representados por valores análogos, digitales, formas, imágenes, figuras entre otros. Figura 71. Ayudando al usuario a fácil manejo del entorno y mayor comprensión del mismo.

Figura 71

Paleta de componentes de LWE.

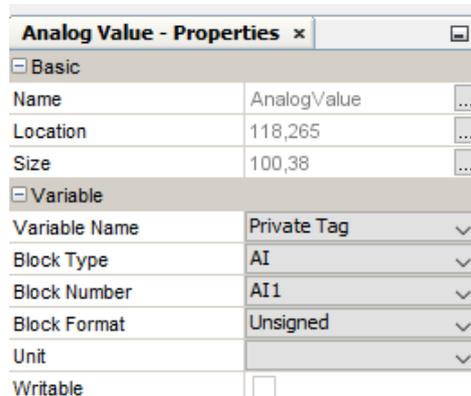


Nota. La imagen muestra la paleta de los componentes dentro del software Logo Web Editor, para el diseño de los paneles remotos o páginas Web.

Cada uno de estos parámetros a su vez, poseen un sub menú que contiene todas las propiedades que se pueden cambiar o modificar dependiendo del tipo de dato. Por ejemplo, en la Figura 72, se puede observar los parámetros modificables de un valor análogo, tales como tipo de dato, formato de bloque, unidades, entre otros.

Figura 72

Paleta de propiedades de LWE.

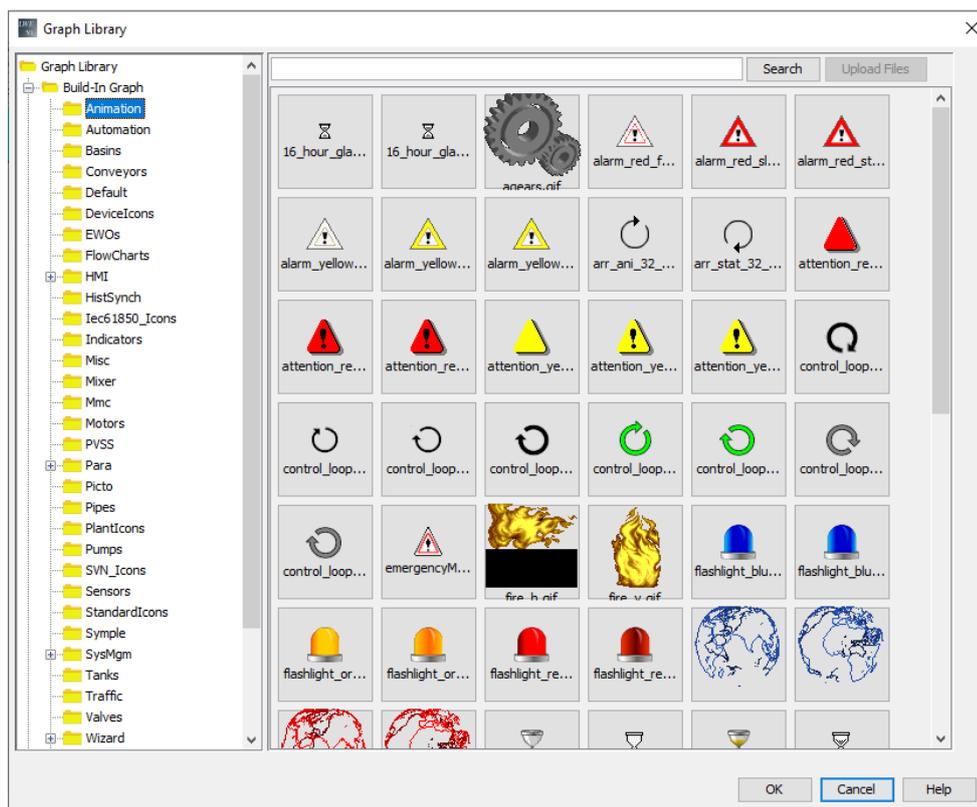


Nota. La imagen muestra la paleta de propiedades de una variable análoga dentro del software Logo Web Editor, para el diseño de los paneles remotos o páginas Web.

Logo Web Editor, en las propiedades de imagen posee una librería de gráficos, el cual posee un sin número de elementos los cuales nos ayudarán a la representación de ciertos elementos dentro del proceso, tales como bombas, válvulas, tuberías, alarmas, entre otros. Figura 73.

Figura 73

Graph Library de LWE.

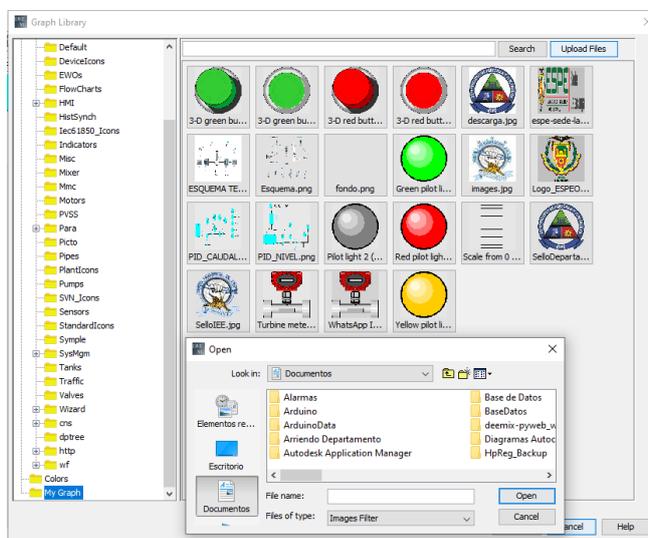


Nota. Librería de gráficos del software Logo Web Editor, para el diseño de los paneles remotos o páginas Web.

Si los elementos dentro de la librería de gráficos, no llegasen a ser suficientes para la representación del proceso; Logo Web Editor posee un botón de “upload files” con el propósito de cargar gráficos externos, tomar en cuenta que el programa LWE debe ser arrancado en modo Administrador dentro del entorno Windows. Figura 74.

Figura 74

Upload files de LWE.

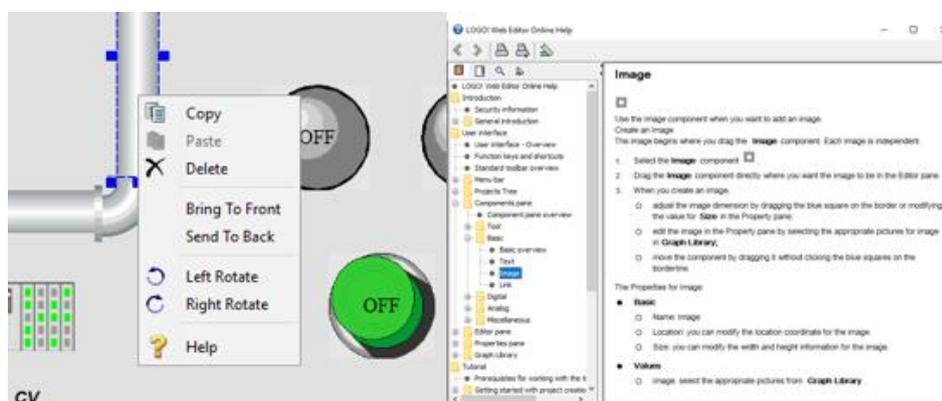


Nota. La imagen muestra la carga de nuevas figuras en la librería de gráficos del software Logo Web Editor, para el diseño de los paneles remotos o páginas Web.

Otra utilidad dentro de LWE, es poder utilizar los accesos rápidos de su paleta de utilidades, dando clic derecho en cada uno de los elementos. De la misma forma se podrá ingresar a la utilidad “Help”, la cual nos guiará a una pantalla flotante que contiene la información del elemento y como este puede ser utilizado dentro del entorno. Figura 75.

Figura 75

Utilidades de LWE.

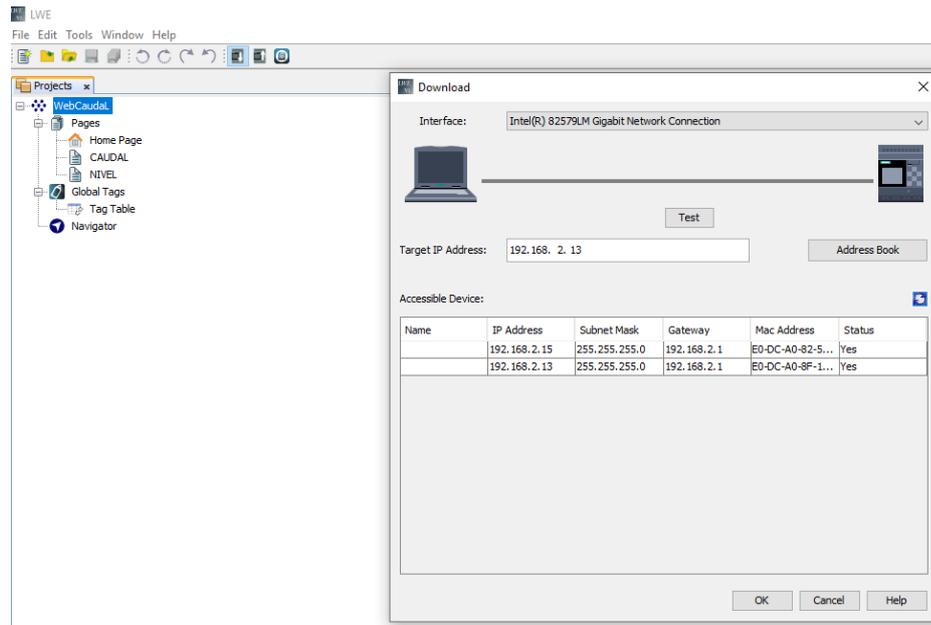


Nota. La imagen muestra la paleta de utilidades y la ventana de ayuda del software Logo Web Editor, para el diseño de los paneles remotos o páginas Web.

Culminado el diseño del panel remoto en el entorno LWE, se procede a guardar el archivo para su posterior carga en el micro autómatas, con la búsqueda del dispositivo vía red hacia su direccionamiento IP, tal como se lo realizó en el entorno Logo! Soft Comfort. Figura 76.

Figura 76

Carga de Pagina web a los micro autómatas.



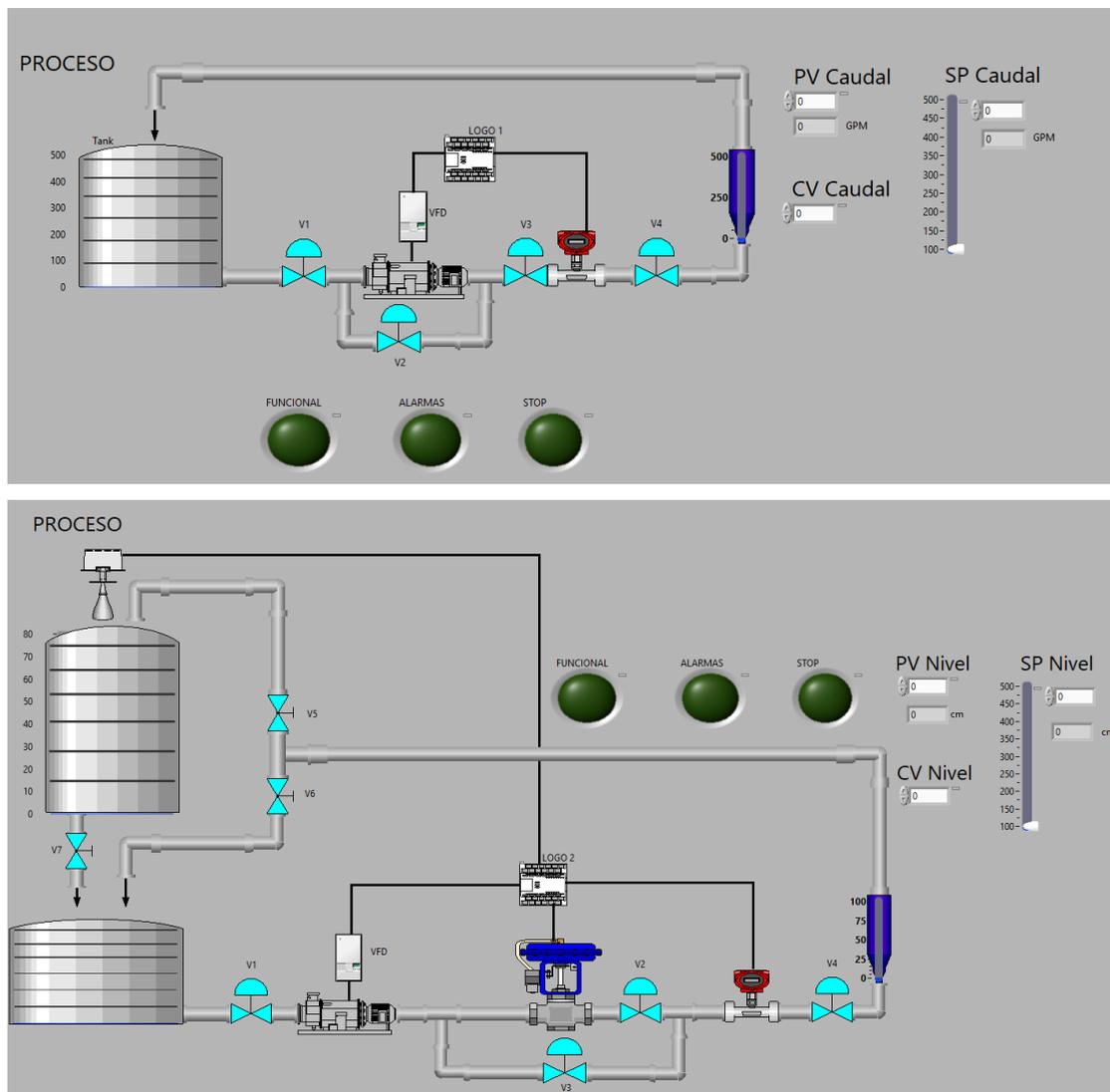
Nota. La imagen muestra la ventana de descarga de la programación hacia los micro autómatas del software Logo Web Editor, para el diseño de los paneles remotos o páginas Web.

3.7.2 Implementación de los HMI

El VI diseñado en LabVIEW 2019 correspondiente a las estaciones de Caudal y Nivel, realizado para el enlace entre los micro autómatas LOGO y el interface de usuario, solventa las necesidades de adquisición de datos y parámetros necesarios para su representación local. Es por ello que se toma en cuenta y se hace énfasis en las variables primordiales del proceso; tales como: Control Value (CV), Process Value (PV) y Set Point (SP), las cuales están previamente escaladas y representados en el panel frontal. Figura 77.

Figura 77

Implementación HMI local.

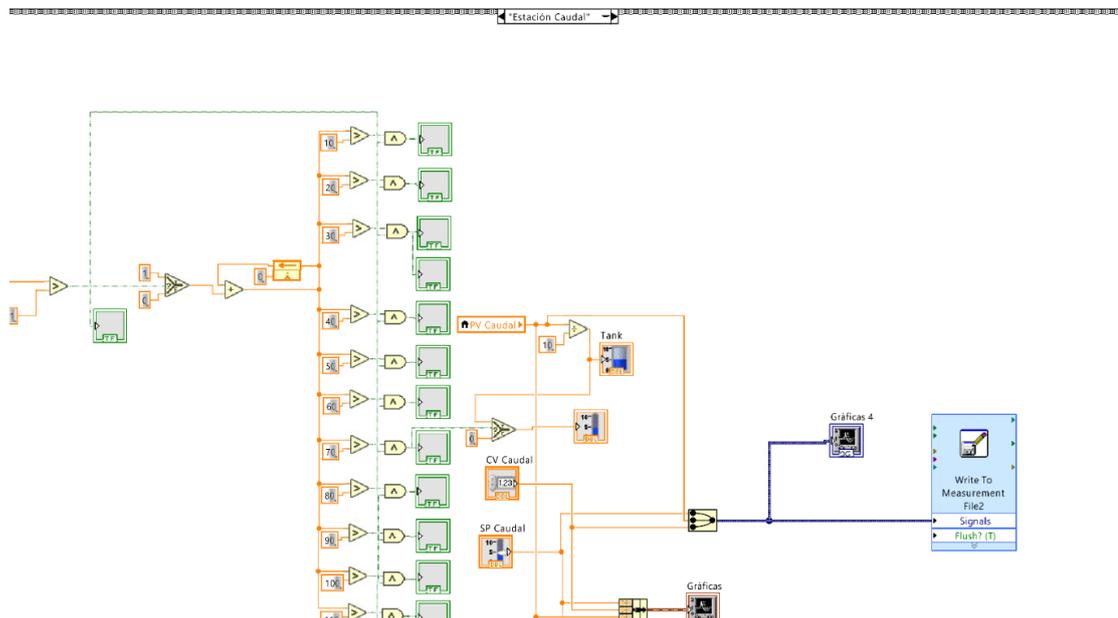


Nota. La imagen muestra el diseño final de las estaciones de Caudal y Nivel dentro del software LabVIEW, que servirán como HMI Local del proceso.

La programación de dicho VI, se la realizó en la ventana de diagrama de bloque con la ayuda de su paleta de funciones, la cual sirvió para enlazar los controles, indicadores y constantes necesarias para su representación en el panel frontal del programa. Figura 78.

Figura 78

Ventana de Programación de LabVIEW.



Nota. La imagen muestra la programación de la ventana Diagrama de Bloque de la estación de Caudal dentro del software LabVIEW, que servirán como HMI Local del proceso.

El diseño de la página Web, realizada en el software LWE (Logo Web Editor), contiene los parámetros necesarios para la supervisión remota del proceso, es decir se toma en cuenta las variables CV, PV y SP para su representación en la Web, ayudando al operador a conocer el estado del proceso. Figura 79.

De esta manera, se logra diseñar una página web que sirva de enlace entre el operador y cada uno de los procesos de control, dentro de la cual se representa de una manera gráfica e interactiva las variables de importancia de las estaciones de Caudal y Nivel respectivamente, tal como se visualiza en la Figura 80.

Figura 79

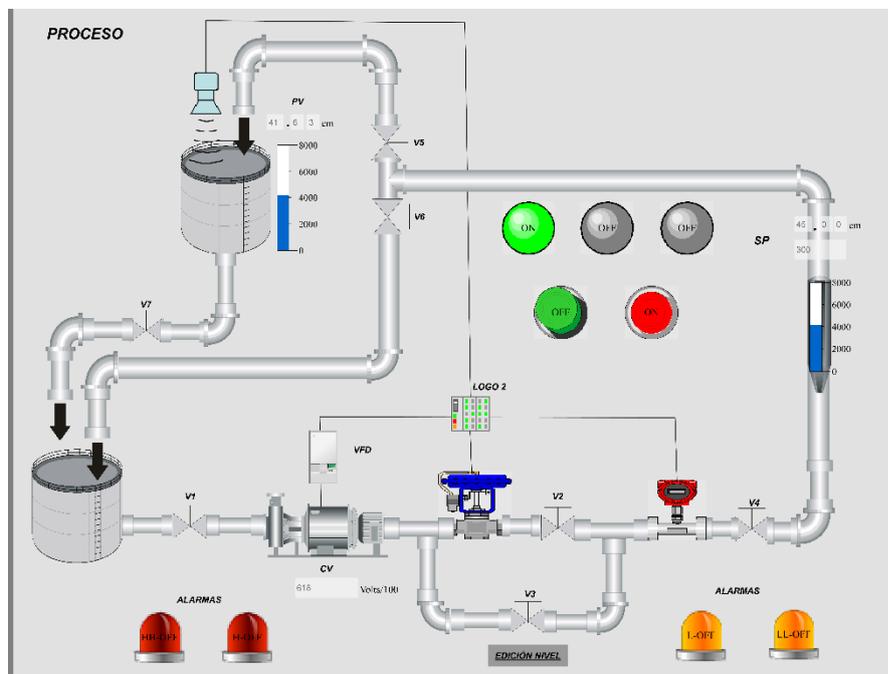
Implementación página web.



Nota. La imagen muestra portada final de la página web, realizada en el Software Logo Web Editor, que servirán como HMI remoto del proceso.

Figura 80

Proceso de nivel página web.



Nota. La imagen muestra el proceso de Nivel de la página web, realizada en el Software Logo Web Editor, que servirá como HMI remoto del proceso.

CAPÍTULO IV

4. Resultados obtenidos

En este capítulo se presentan las pruebas y resultados de la red industrial en el sistema de supervisión, control local y remoto, detallando el funcionamiento de cada uno de ellos y el análisis de los controladores utilizados en las estaciones de Caudal AP-1511 y Nivel ND0704.

4.1 Pruebas y Resultados del control PI de las estaciones de caudal y nivel.

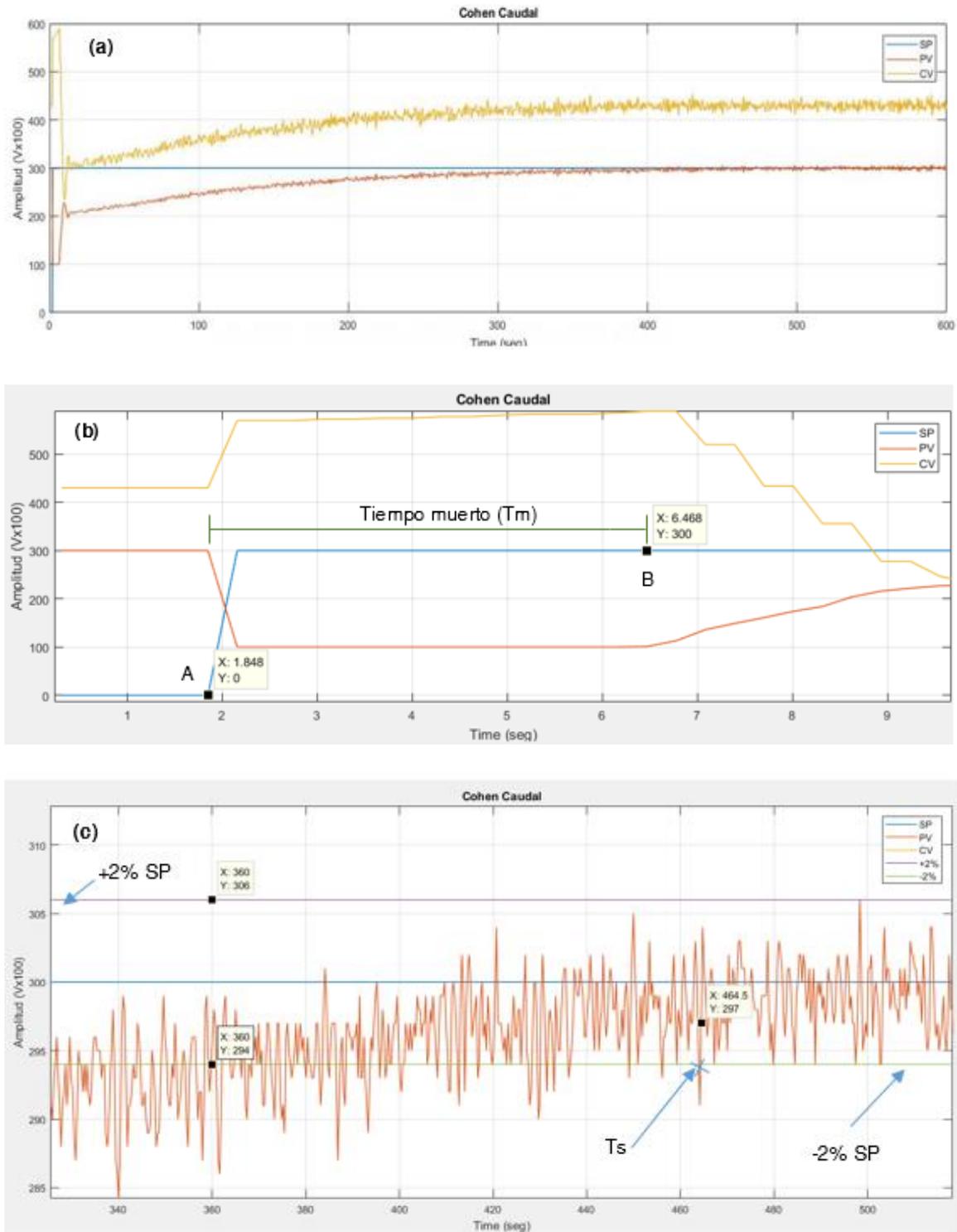
En esta sección se realizarán pruebas de los controladores con las constantes de sintonía calculadas en el capítulo 3 de los procesos de caudal y nivel con el propósito de determinar el mejor método de sintonización para cada proceso, para esto se considerará:

- **Tiempo muerto T_m :** Se considera el tiempo desde el momento que se da un punto de consigna o SP hasta el tiempo donde empieza a reaccionar el proceso.
- **Robustez:** Se considera como la variación que tienen las variables del proceso ante perturbaciones externas.
- **Tiempo de Asentamiento T_s :** Tiempo necesario para que las oscilaciones del PV alcancen y permanezcan a no más del $\pm 2\%$ del valor del punto de consigna o SP en estado estable (Nise, 2004).

4.1.1 Caudal

Figura 81

Respuesta del controlador, T_m , T_s de Cohe-Coon Caudal.



Nota. Graficas obtenidas con ayuda del software Matlab.

En la Figura 81b el tiempo muerto se calcula como la diferencia entre B y A.

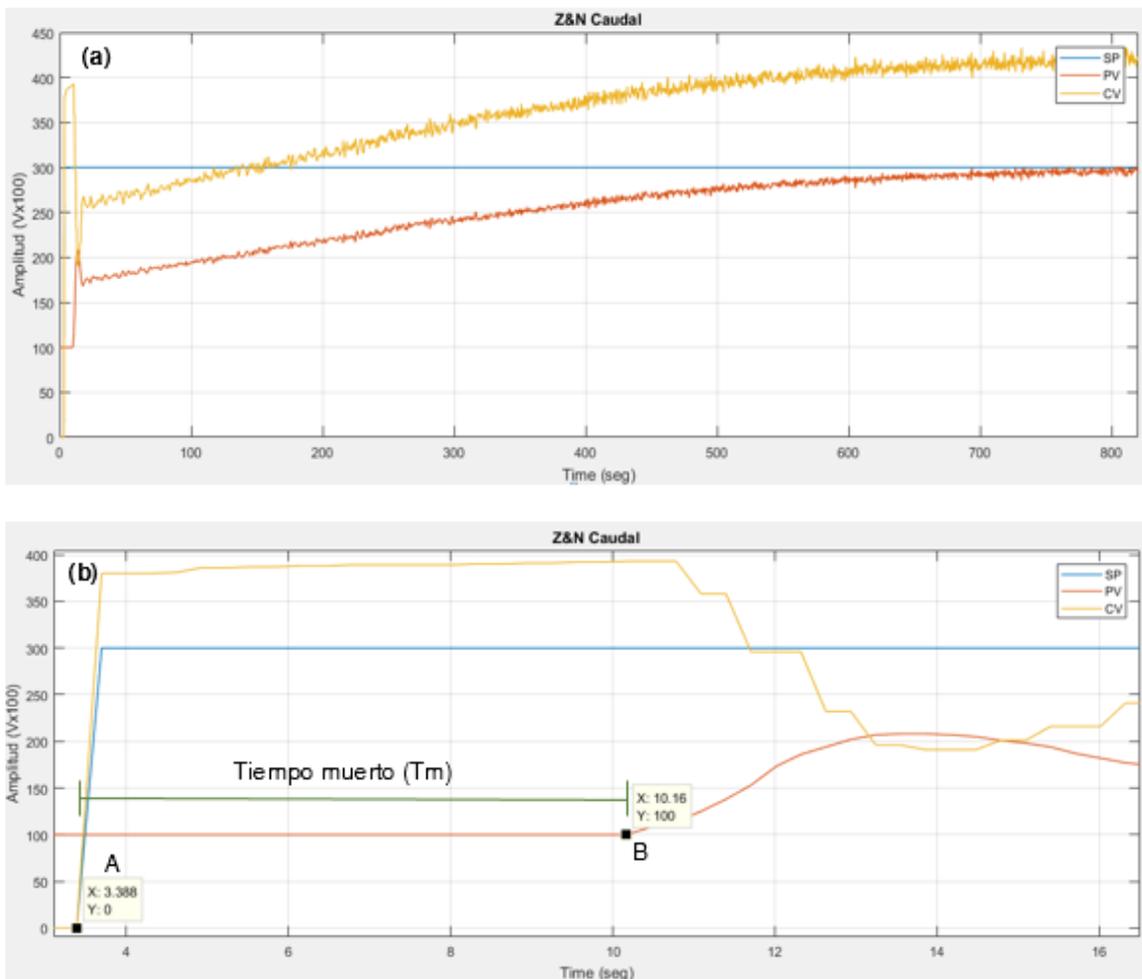
$$T_m = 6,468 \text{ seg} - 1,848 \text{ seg} = 4,62 \text{ seg}$$

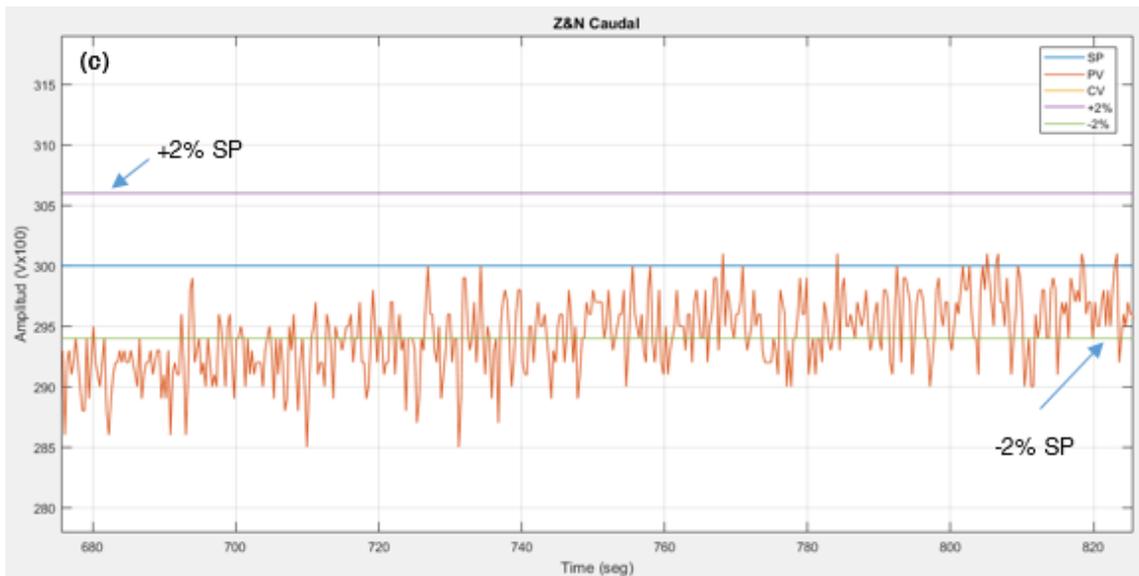
En la Figura 81c se aprecia como la señal del PV entra dentro del rango considerado como estable donde el tiempo de establecimiento es:

$$T_s = 464,5 \text{ seg}$$

Figura 82

Respuesta del controlador, T_m , T_s de Z&N Caudal.





Nota. Graficas obtenidas con ayuda del software Matlab.

En la Figura 82b el tiempo muerto se calcula como la diferencia entre B y A.

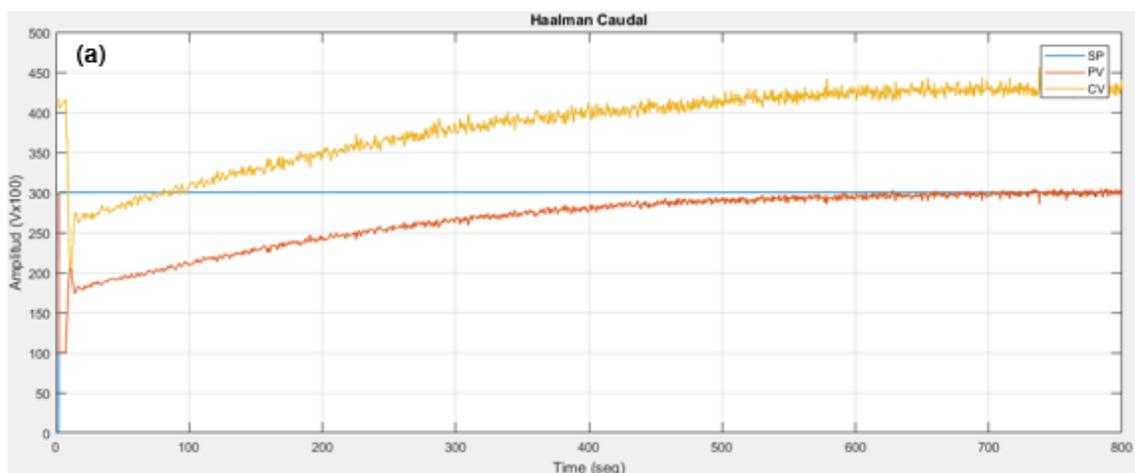
$$T_m = 10,16 \text{ seg} - 3,388 \text{ seg} = 6,772 \text{ seg}$$

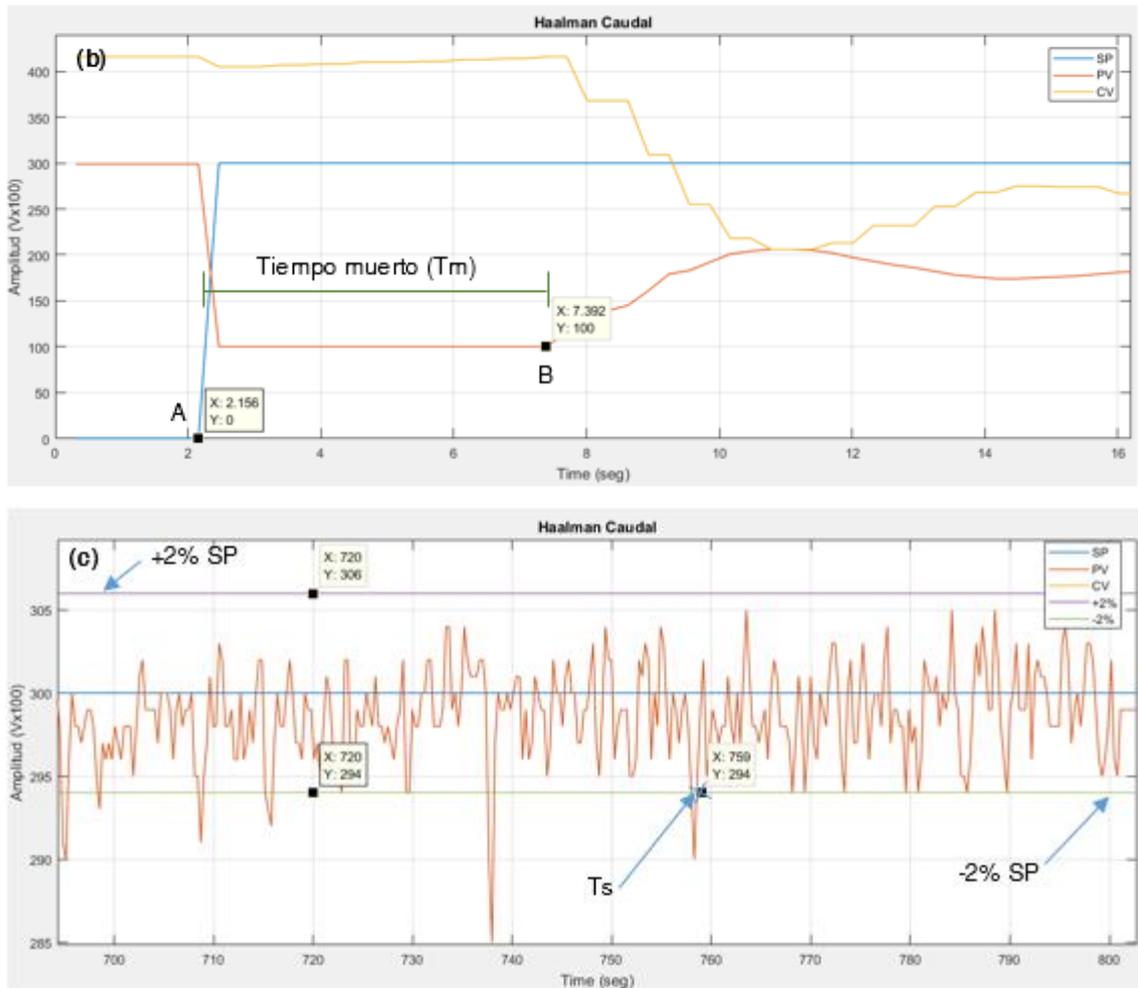
En la Figura 82c se aprecia como la señal del PV nunca entra dentro del rango considerado como estable donde el tiempo de establecimiento es:

$$T_s = \text{no existe}$$

Figura 83

Respuesta del controlador, T_m , T_s de Haalman Caudal.





Nota. Graficas obtenidas con ayuda del software Matlab.

En la Figura 83b el tiempo muerto se calcula como la diferencia entre B y A.

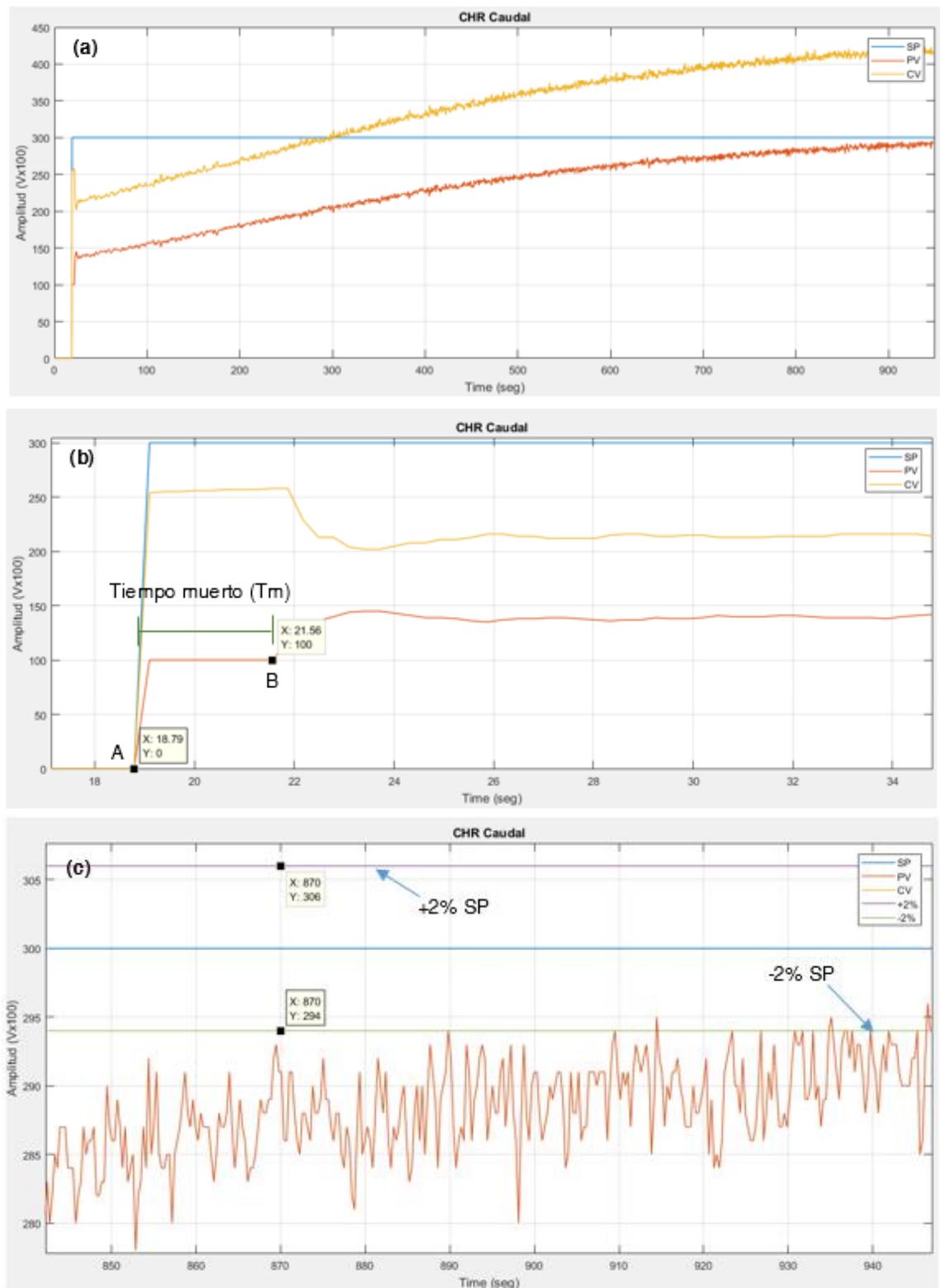
$$T_m = 7,392 \text{ seg} - 2,156 \text{ seg} = 5,236 \text{ seg}$$

En la Figura 83c se aprecia como la señal del PV entra dentro del rango considerado como estable donde el tiempo de establecimiento es:

$$T_s = 759 \text{ seg}$$

Figura 84

Respuesta del controlador, T_m , T_s de CHR Caudal.



Nota. Grafica obtenidas con ayuda del software Matlab.

En la Figura 84b el tiempo muerto se calcula como la diferencia entre B y A.

$$T_m = 21,56 \text{ seg} - 18,79 \text{ seg} = 2,77 \text{ seg}$$

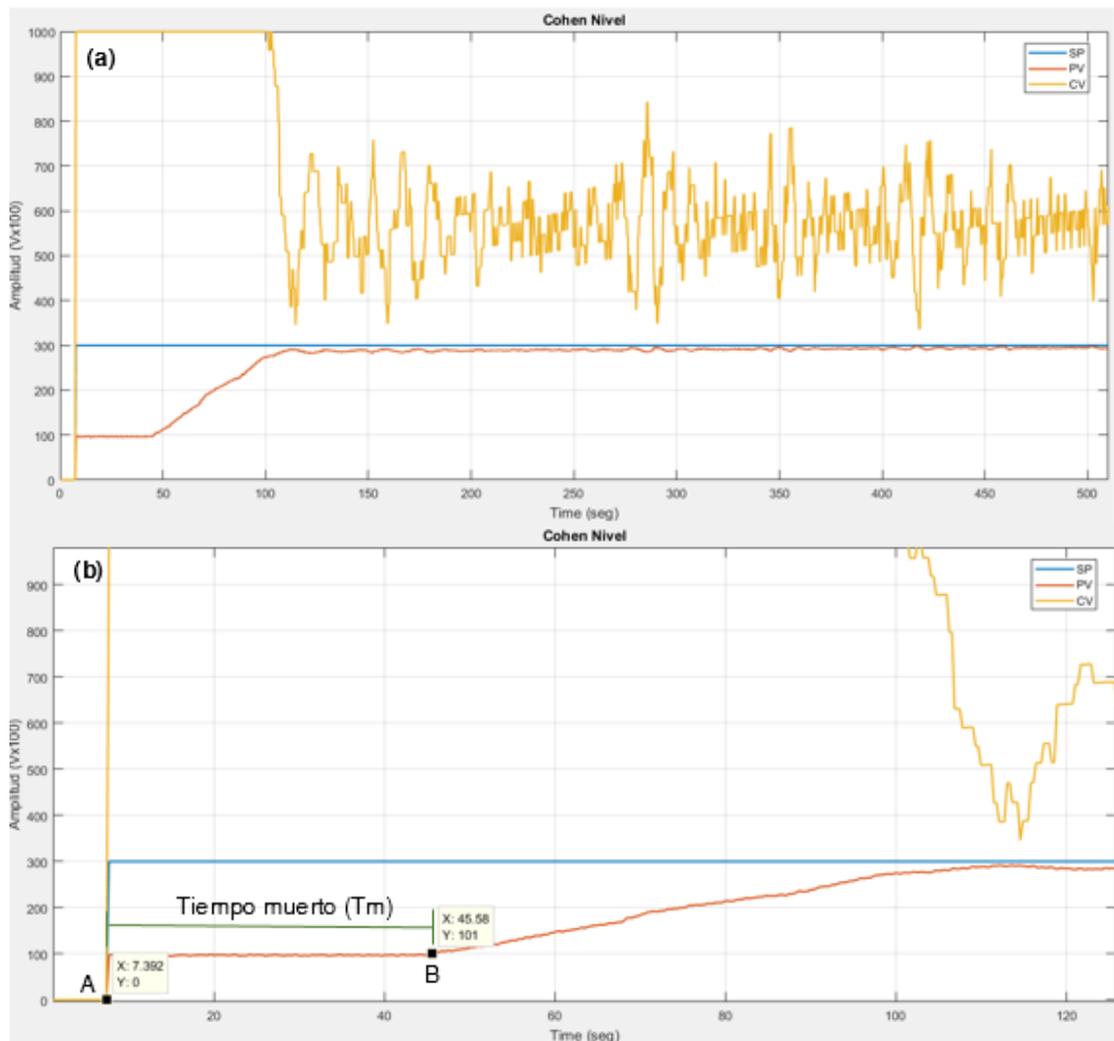
En la Figura 84c se aprecia como la señal del PV nunca entra dentro del rango considerado como estable donde el tiempo de establecimiento es:

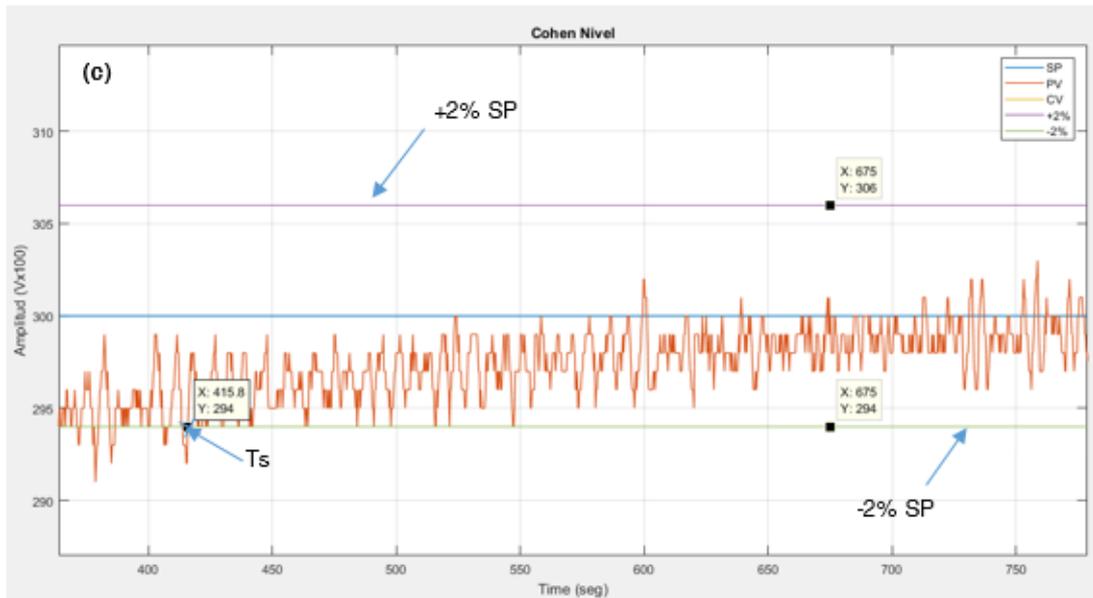
$$T_s = \text{no existe}$$

4.1.2 Nivel

Figura 85

Respuesta del controlador, T_m , T_s de Cohe-Coon Nivel.





Nota. Graficas obtenidas con ayuda del software Matlab.

En la Figura 85b el tiempo muerto se calcula como la diferencia entre B y A.

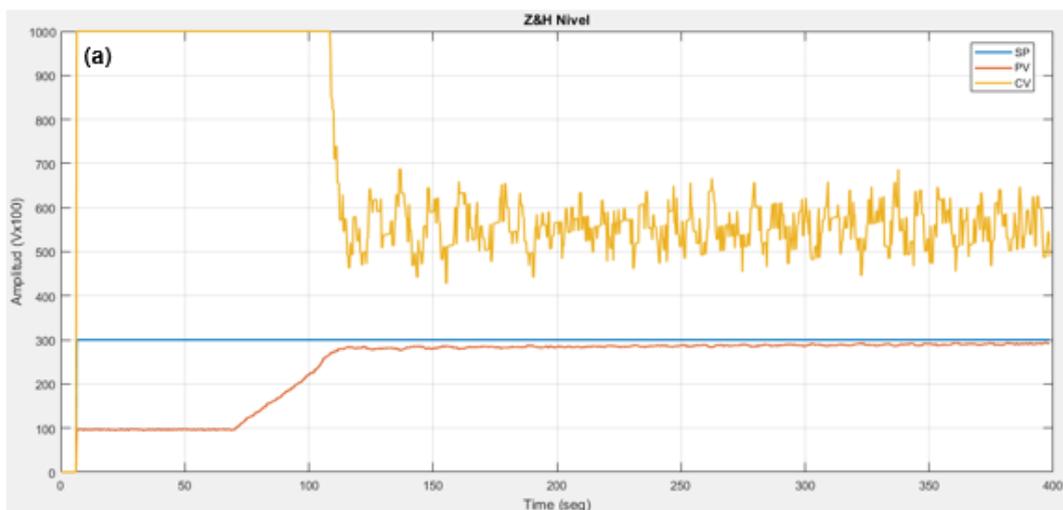
$$T_m = 45,58 \text{ seg} - 7,392 \text{ seg} = 38,188 \text{ seg}$$

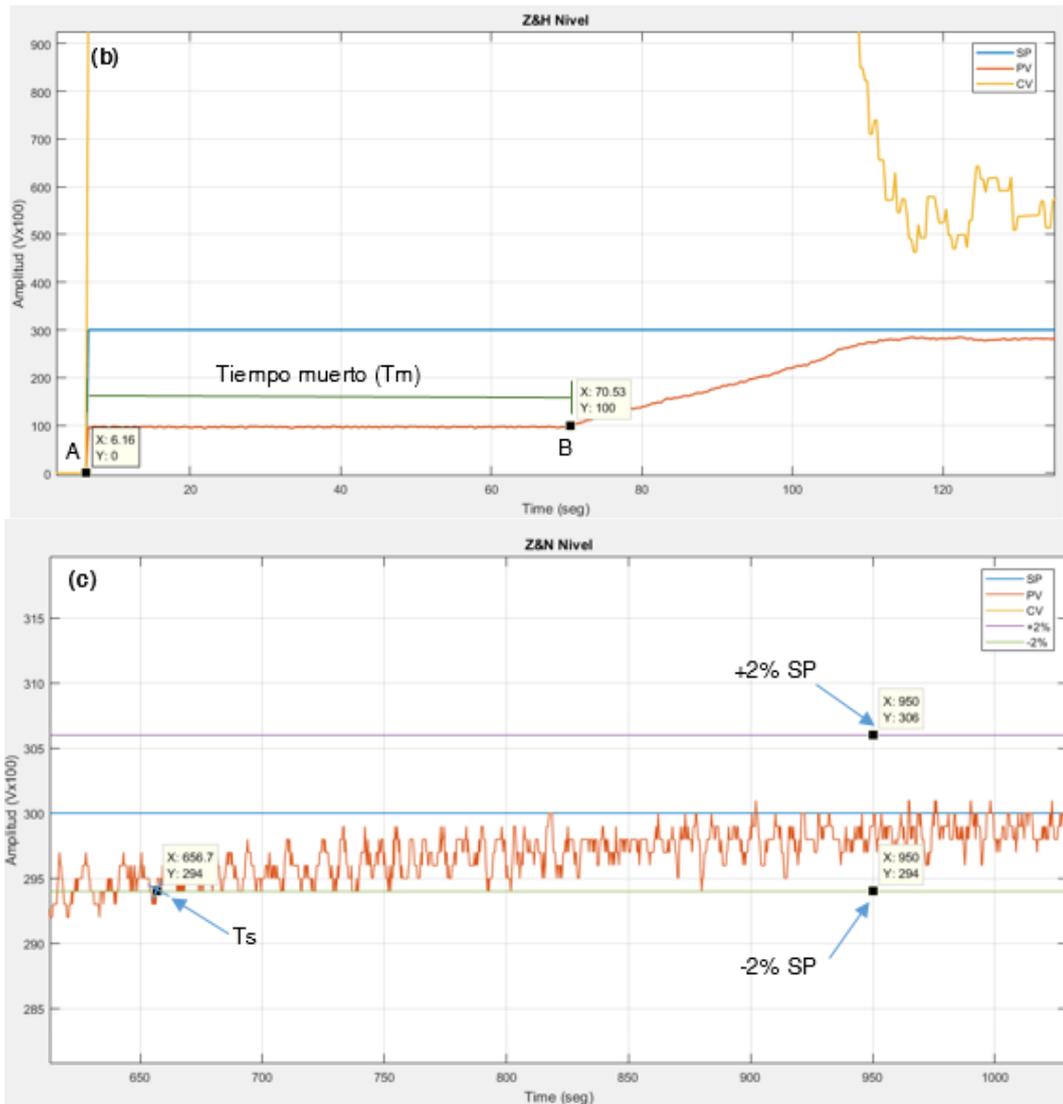
En la Figura 85c se aprecia como la señal del PV entra dentro del rango considerado como estable donde el tiempo de establecimiento es:

$$T_s = 415,8 \text{ seg}$$

Figura 86

Respuesta del controlador, T_m , T_s de Z&N Nivel.





Nota. Grafica obtenidas con ayuda del software Matlab.

En la Figura 86b el tiempo muerto se calcula como la diferencia entre B y A.

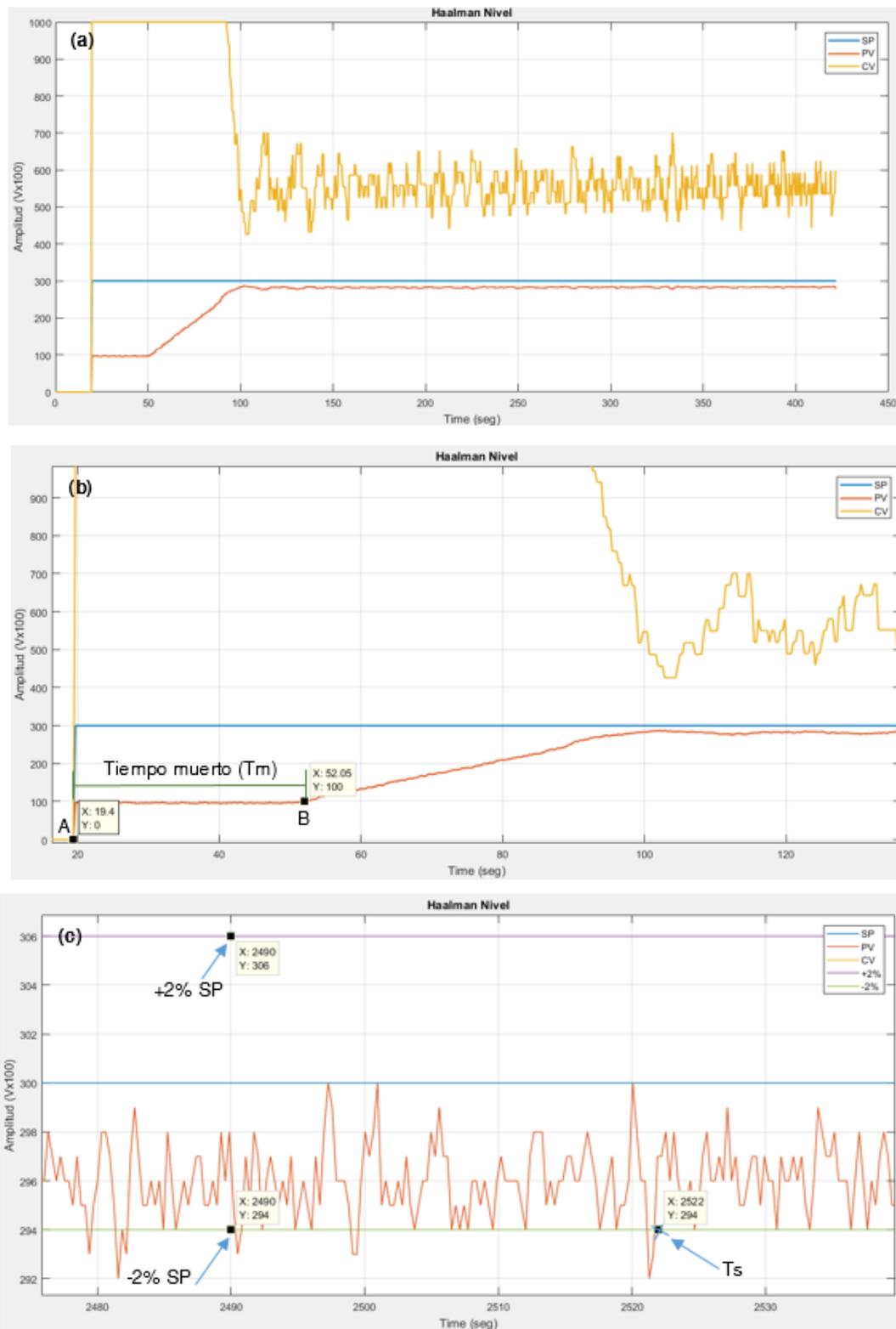
$$T_m = 70,53 \text{ seg} - 6,16 \text{ seg} = 64,37 \text{ seg}$$

En la Figura 86c se aprecia como la señal del PV nunca entra dentro del rango considerado como estable donde el tiempo de establecimiento es:

$$T_s = 656,7 \text{ seg}$$

Figura 87

Respuesta del controlador, T_m , T_s de Haalman Nivel.



Nota. Graficas obtenidas con ayuda del software Matlab.

En la Figura 87b el tiempo muerto se calcula como la diferencia entre B y A.

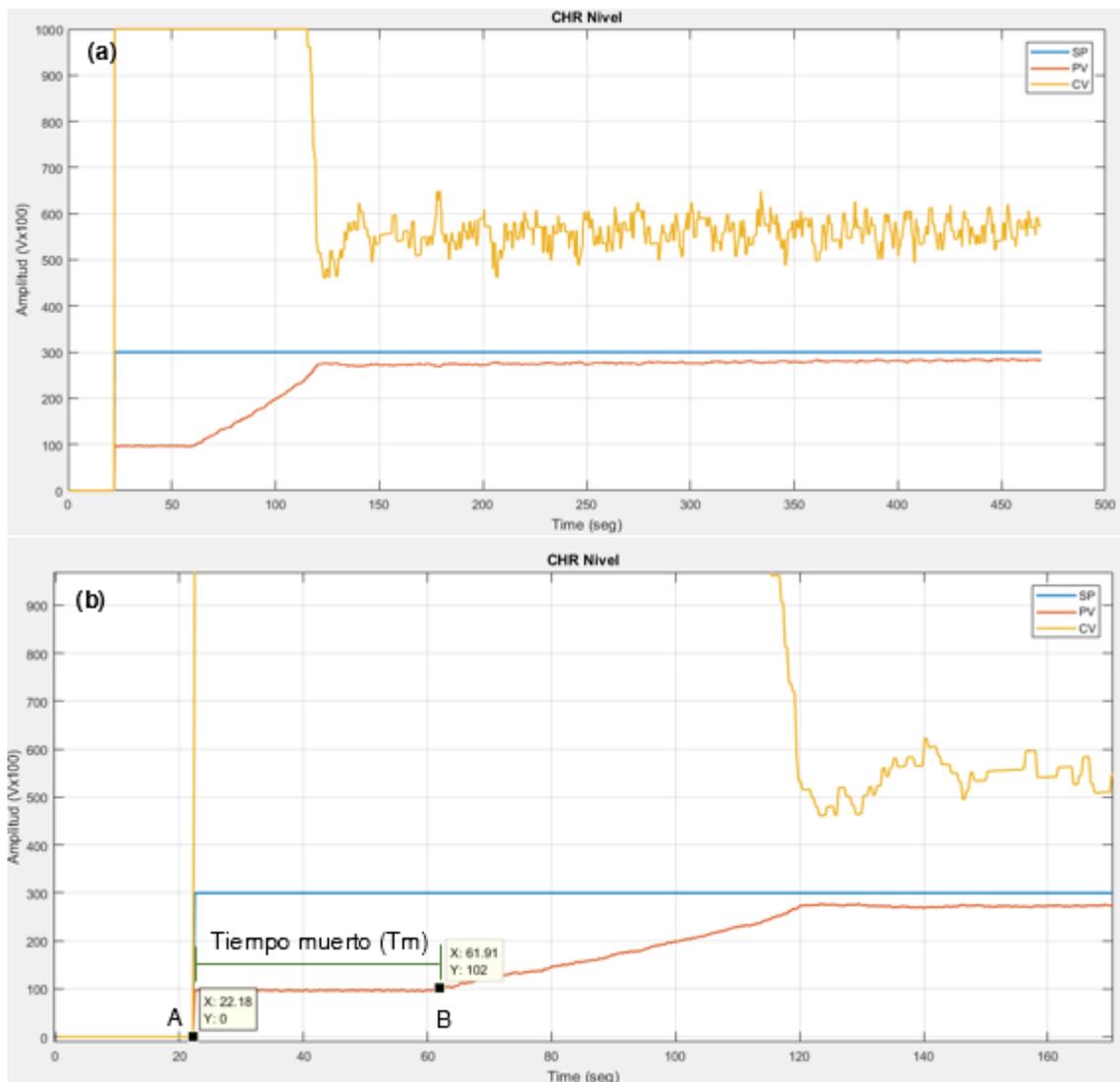
$$T_m = 52,05 \text{ seg} - 19,4 \text{ seg} = 32,65 \text{ seg}$$

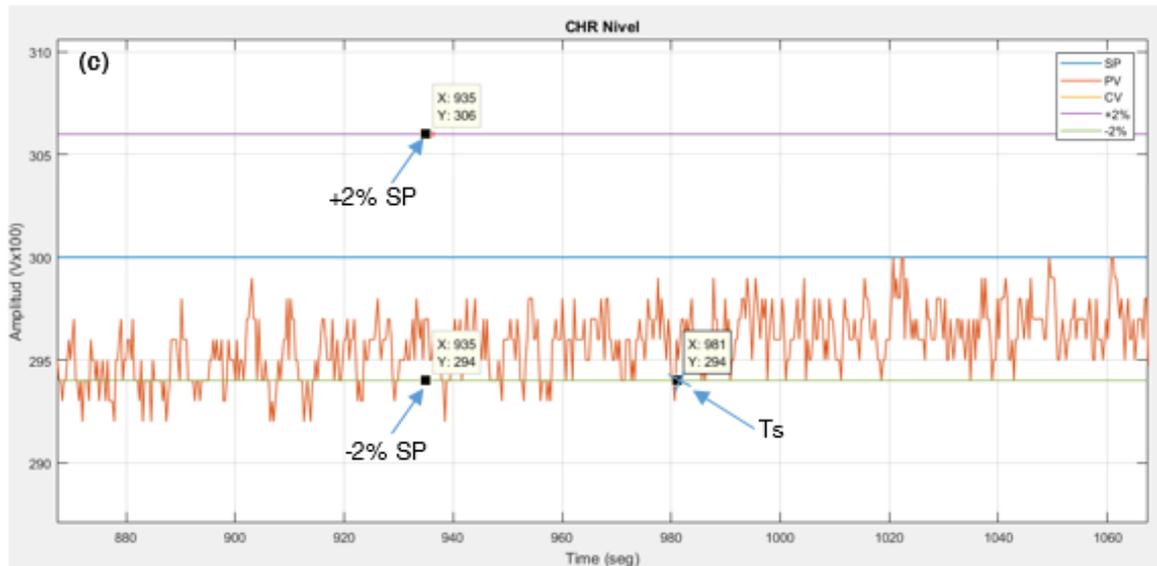
En la Figura 87c se aprecia como la señal del PV entra dentro del rango considerado como estable donde el tiempo de establecimiento es:

$$T_s = 2522 \text{ seg}$$

Figura 88

Respuesta del controlador, T_m , T_s de CHR Nivel.





Nota. Graficas obtenidas con ayuda del software Matlab.

En la Figura 88b el tiempo muerto se calcula como la diferencia entre B y A.

$$T_m = 61,91 \text{ seg} - 22,18 \text{ seg} = 39,73 \text{ seg}$$

En la Figura 88c se aprecia como la señal del PV nunca entra dentro del rango considerado como estable donde el tiempo de establecimiento es:

$$T_s = 981 \text{ seg}$$

4.2 Pruebas y resultados de la red industrial.

Una red industrial es un protocolo que interconecta el paso de información entre los instrumentos y los procesos, es decir representa un medio por el cual todo lo involucrado en un proceso industrial pueda comunicarse dentro de una misma plataforma. De esta forma, todo lo que se puede observar en la Figura 89, está entrelazado por una misma plataforma de comunicación.

Figura 89*Red industrial.*

Nota. La imagen muestra la comunicación entre los dispositivos pertenecientes a la red industrial del proyecto de titulación.

Parte fundamental de la red industrial implementada, se basa en el direccionamiento IP de los dispositivos, a través de una subred local gestionada por un Router que proporciona la plataforma LAN de la cual el panel local y los paneles remotos formarán parte. El panel Local o HMI local realizado en LabVIEW, se enlaza con los micro autómatas, a través de una herramienta que ayuda a transferir los valores de las entradas, salidas o variables del micro autómatas hacia su entorno de programación, es decir se utiliza el programa KepServer para el envío y recepción de información hacia el panel local.

Por otra parte, y de manera más eficiente, Logo Web Editor es una herramienta de diseño de páginas web, que enlaza directamente las variables requeridas por el programador a su entorno Web, facilitando su implementación y diseño en la creación de paneles remotos. De la misma forma la pantalla Logo TDE, al ser propia del fabricante, es una opción muy cómoda y fiable para el operador, ya que esta ilustra los valores de las variables involucradas en el proceso.

De esta manera se pudo comprobar que la adquisición de datos por parte del HMI local, diseñado en el software LabVIEW, la representación de datos en los paneles remotos, diseñados en LWE y la representación de las variables en la pantalla Logo TDE, programadas en el software Logo Soft Comfort; cumplen con los propósitos de diseño y trabajan en conjunto para la representación, envío o recepción de información, fortaleciendo y cerrando el ciclo de la red industrial.

4.3 Pruebas y resultados del sistema de supervisión, control local y remoto.

Se debe tomar en cuenta que el sistema de supervisión diseñado en el presente trabajo de titulación, se basa fundamentalmente en la introducción de paneles remotos a la cadena convencional de dispositivos utilizados para los diferentes procesos de control. Por esta razón, se determinará la eficiencia del sistema en los ejes fundamentales para la supervisión, como lo son dispositivos de control local y remoto, además de la representación clara y concisa de las variables del proceso, en cada una de sus interfaces locales o remotas. Figura 90.

Figura 90

Sistema de supervisión.



Nota. La imagen muestra un panel local (PC local), un panel remoto (Tablet) y una pantalla de interacción con el usuario nativa del panel (TDE Logo).

Las pruebas realizadas para el control remoto de la estación de Caudal AP-1511 a través de un navegador web proporcionado por una Tablet con una dirección IP 192.168.2.45, apuntando al micro autómatas con dirección IP 192.168.2.13, dieron los resultados más satisfactorias posibles, ya que tras las evaluaciones y las pruebas de rendimiento; se determinó que la carga o cambio del valor de Set Point del proceso es inmediato, es decir el retardo en la transmisión de datos hacia la variable interna del micro autómatas es muy pequeño, casi despreciable. Figura 91.

Figura 91

Estación de caudal y panel remoto.

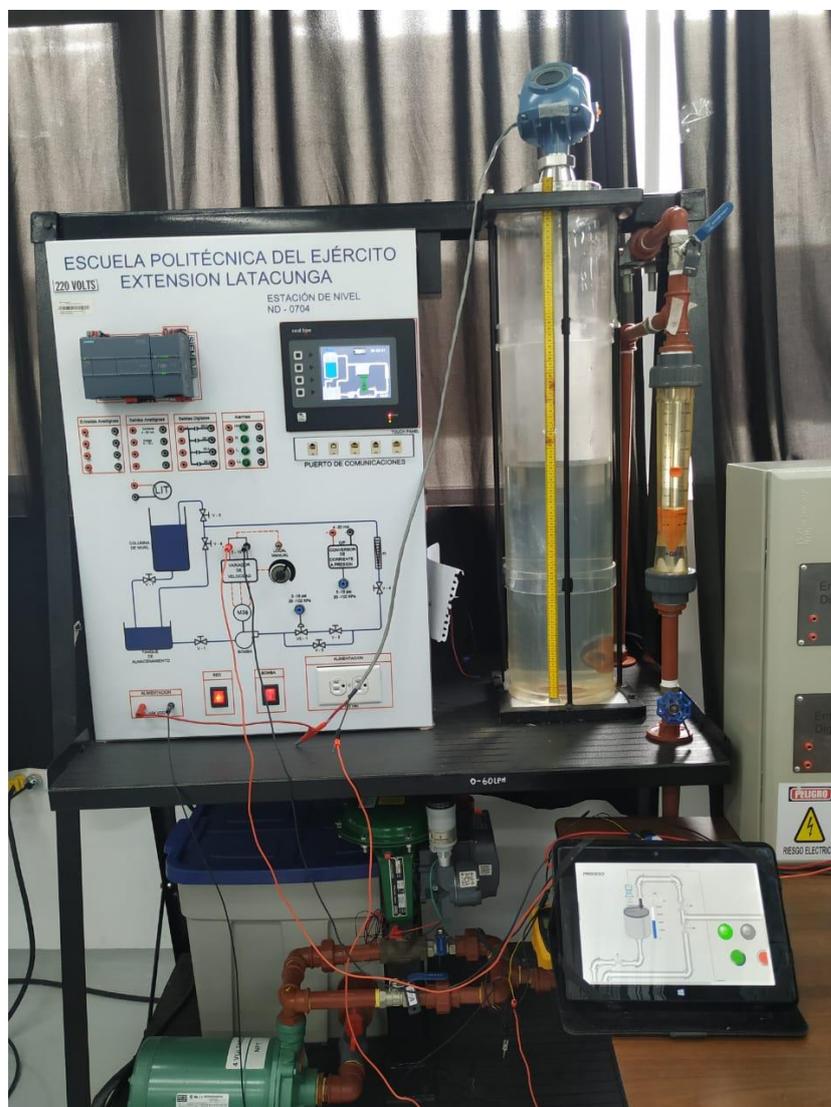


Nota. Estación de caudal AP-1511 y panel de supervisión remoto en funcionamiento.

Las pruebas realizadas para el control remoto de la estación de Nivel ND-0704 a través de un navegador web proporcionado por una Tablet con una dirección IP 192.168.2.45, apuntando al micro autómatas con dirección IP 192.168.2.15, dieron los resultados más satisfactorias posibles, ya que tras las evaluaciones y las pruebas de rendimiento; se determinó que la carga o cambio del valor de Set Point del proceso es inmediato, es decir el retardo en la transmisión de datos hacia la variable interna del micro autómatas es muy pequeño, casi despreciable. Figura 92.

Figura 92

Estación de caudal y panel remoto.



Nota. Estación de Nivel ND-0704 y panel de supervisión remoto en funcionamiento.

Las pruebas realizadas en las estaciones de Caudal AP-1511 y Nivel ND-0704 a través de la pantalla Logo TDE con una dirección IP 192.168.2.5, apuntando al micro autómatas con dirección IP 192.168.2.13 y micro autómatas con dirección IP 192.168.25.15, dieron los resultados más satisfactorias posibles, ya que tras las evaluaciones y las pruebas de rendimiento; se determinó que la carga o cambio del valor de Set Point del proceso es inmediato, es decir el retardo en la transmisión de datos hacia la variable interna del micro autómatas es muy pequeño, casi despreciable. Figura 93.

Figura 93

Pantalla de Logo TDE en el tablero principal.



Nota. Muestra el funcionamiento de la pantalla Logo TDE hacia los procesos de caudal y nivel.

4.4 Análisis de resultados.

Analizando los resultados obtenidos del tiempo muerto T_m y tiempo de asentamiento T_s en cada método de sintonización en el apartado 4.1 se determinó que el método de sintonización Cohen-Coon cumple con los requisitos planteados, con un $T_m = 4,62 \text{ seg}$ para Caudal y un $T_m = 38,188 \text{ seg}$ para Nivel, de igual forma, ambos procesos oscilan dentro del rango de $\pm 2\%$ del punto de consigna o SP en estado estable con un $T_s = 464,5 \text{ seg}$ para Caudal y un $T_s = 415,8 \text{ seg}$ para Nivel.

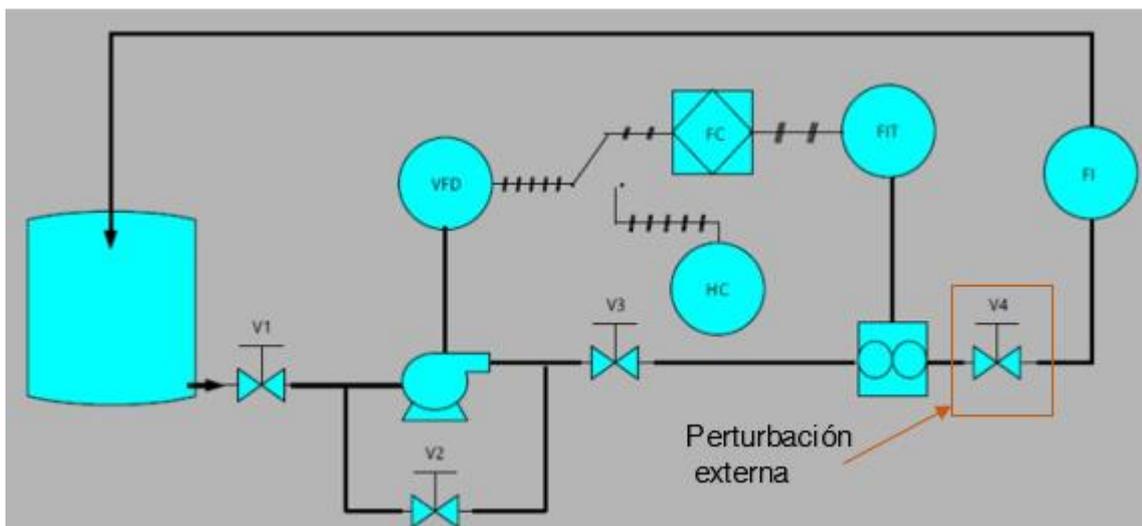
Una vez elegido el mejor método de sintonía se analizará la robustez del controlador en cada proceso:

4.4.1 Caudal

Se provocará una perturbación cerrando la válvula V_4 , Figura 94, para producir un estrechamiento en la tubería y analizar su robustez.

Figura 94

Diagrama P&ID del proceso de caudal.

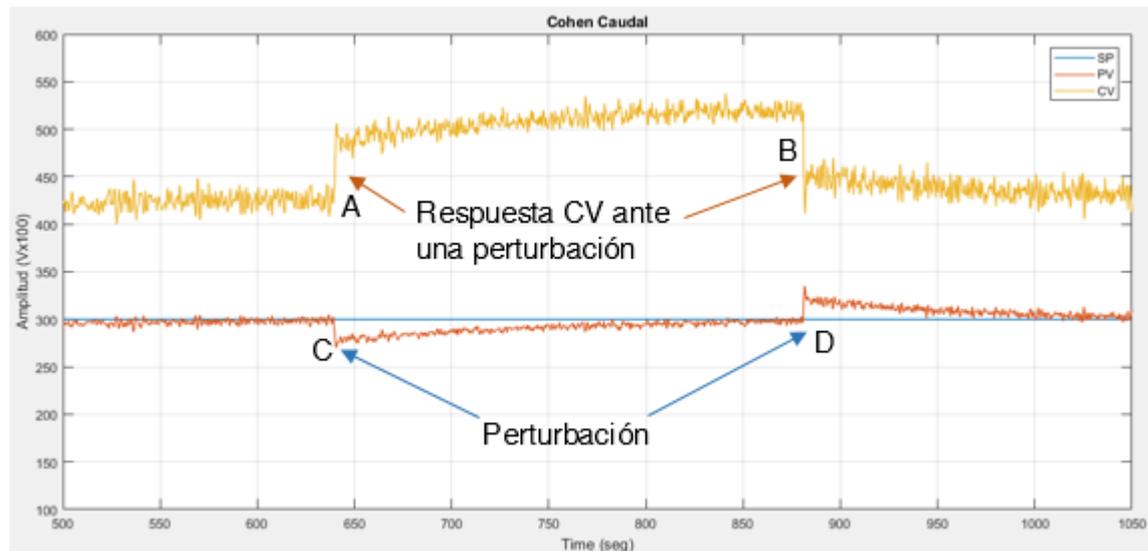


Nota. Se variará el cierre de la válvula V_4 hasta un máximo del 50-60%.

Ahora se procederá a producir una perturbación y tomar datos para analizar de forma gráfica la robustez del controlador.

Figura 95

Gráfica a la respuesta de una perturbación externa.



Nota. Gráfica generada en Matlab.

En la Figura 95 se observa que en el punto C se genera una perturbación, provocando un decremento de la señal PV, desviándolo del punto de consigna, instantáneamente CV entrega un mayor voltaje al variador de frecuencia para compensar dicha perturbación, punto A, y permitir que PV vuelva al punto de consigna o SP.

Se analizará la variación de CV en datos reales:

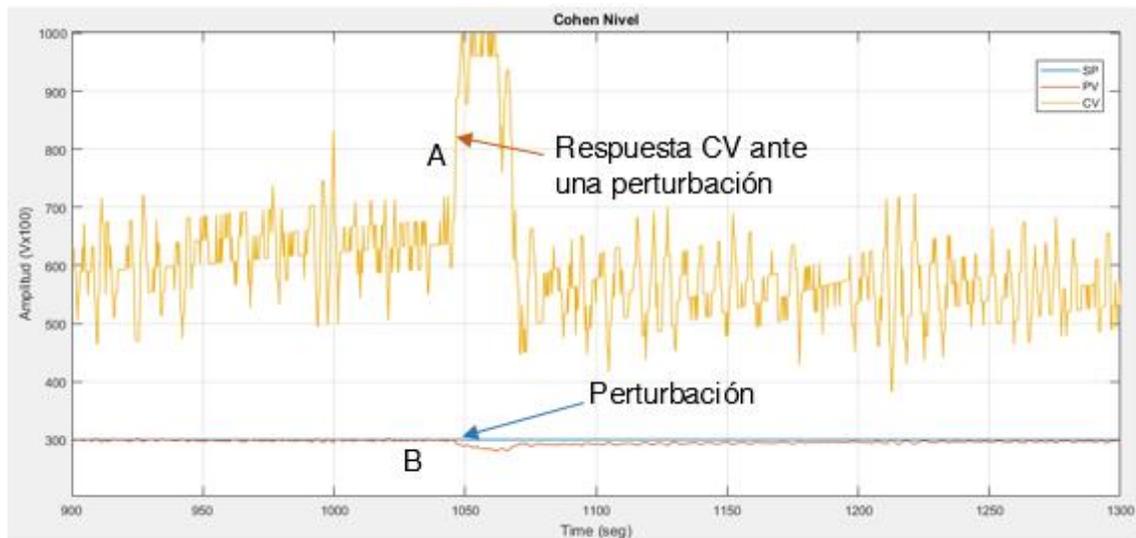
Voltaje promedio sin perturbación: 4,22V.

Voltaje promedio con perturbación: 5,1V.

Con estos datos podrá concluir que generando una perturbación externa con un cierre máximo de V_4 entre el 50-60%, existe un incremento del 17,6% equivalente a 0,88V en el CV, demostrando robustez del controlador hasta un máximo del 60% de cierre de V_4 .

Figura 97

Grafica a la respuesta de una perturbación externa.



Nota. Gráfica generada en Matlab.

En la Figura 97 se observa que en el punto B se genera una perturbación, provocando un decremento de la señal PV, desviándolo del punto de consigna, instantáneamente CV entrega un mayor voltaje al variador de frecuencia para compensar dicha perturbación, punto A, y permitir que PV vuelva al punto de consigna o SP.

Se analizará la variación de CV en datos reales:

Voltaje promedio sin perturbación: 5,55V.

Voltaje promedio con perturbación: 5,76V.

Con estos datos se puede concluir que generando una perturbación externa con una apertura máximo de V_6 entre el 50-60%, se tiene un incremento del 4,2% equivalente a 0,21V en el CV, demostrando robustez del controlador hasta un máximo del 60% de apertura de V_6 .

4.5 Análisis costo-beneficio entre micro autómatas LOGO y controladores lógicos programables S7-1200.

Al hablar de controladores, autómatas o micro autómatas, se debe tomar en cuenta que cada uno de ellos tienen características definidas, algunas muy semejantes entre sí y otras opuestas. El fin de este análisis es la comparativa entre los micro autómatas LOGO y los autómatas S7-1200, quienes son capaces de solventar el requerimiento propuesto en este proyecto de tesis. Es por ello que se basará en las diferencias, ventajas e inconvenientes que se presentaron a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Primero y como punto fundamental, se debe diferenciar que los micro autómatas LOGO solo poseen un bloque de control PI (Proporcional Integral) y los autómatas S7-1200, poseen bloques PI y PID (Proporcional Integral Derivativo), limitando a los micro autómatas al control de procesos específicos, cuya sintonía de controlador solo se base en un control PI.

Se debe tomar en cuenta que la brecha de costos entre dichos controladores, es muy grande, por ello la utilización de micro autómatas para el control de tareas sencillas de automatización, son una gran opción llena de grandes beneficios a la hora de implementar una red industrial de supervisión local y remota.

Uno de los beneficios de utilizar micro autómatas, recae directamente en el software que acompaña a la programación de dichos dispositivos, es por ello que Logo Soft Comfort, al ser un entorno dedicado a la programación de micro autómatas LOGO tienen mayor impacto en la innovación de nuevas características orientadas a la nueva industria digital. Por otra parte, los autómatas S7-1200, depende plenamente de la instalación de las versiones de TIA Portal y las actualizaciones a todos los controladores que soporta esta plataforma.

Una limitación dentro de la programación de los micro autómatas, es la carencia de punto decimal en sus valores nominales, ya que los sensores vienen pre-escalados con valores de 0 a 1000 que representan de 0 a 10 Voltios, lo cual se lo puede solucionar con otro bloque de programación UDF que ayude a descomponer dicho valor en 2 o más variables, segmentando en valor numérico entero de sus valores decimales. Lo cual no sucede en la utilización de autómatas S7-1200, quienes poseen salidas de variables con varios decimales de forma directa.

Uno de los beneficios de los micro autómatas es poseer una plataforma de diseño web, que enlaza directamente las variables involucradas en el proceso con un servidor web y desde la nueva actualización de LWE 1.1, permite una interacción con la nube y la recopilación de información en servidores basados en la nube, como AWS (Amazon Web Server), lo cual facilita e innova la supervisión remota de procesos industriales.

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

Considerando el trabajo realizado en el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos en la Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE. Sede Latacunga.

5.1 Conclusiones.

- En resumen, una vez analizado los métodos de sintonización, se demuestra que Cohen-Coon posee el tiempo de asentamiento más pequeño para los procesos en análisis, con respecto al tiempo muerto, este método presenta el segundo tiempo más pequeño después de CHR y Haalman en Caudal y Nivel respectivamente, convirtiéndolo en conclusión en el método de sintonización elegido para ambos procesos por llevarlos al rango de $\pm 2\%$ en estado estable en el menor tiempo y permitir una rápida respuesta ante cambios a las entradas.
- En relación con lo antes expuesto, el diseño de la red industrial para la supervisión de los procesos Caudal y Nivel con la implementación de Paneles locales y Remotos, utilización de Web Server e interconectividad entre los instrumentos y los procesos; cumplen con el propósito de diseño, solventando la necesidad de comunicación entre cada uno de ellos, para cumplir con las características de envío, recepción y presentación de información.
- En cuanto a lo abordado con anterioridad, se debe destacar el diseño e implementación de los paneles local y remoto, siendo LabVIEW y Logo Web Editor herramientas participes en la creación de dichos entornos, cumplieron con todas las normas y características de diseño propuestas.
- Dentro del análisis expuesto, el método de sintonización Cohen-Coon presenta robustez hasta un máximo del 50-60% de variación de la válvula de cada proceso que simula perturbaciones externas con un incremento máximo de 17,6% del CV en Caudal y 4,2% del CV para Nivel.
- En última instancia, se debe mencionar la brecha de costos entre los micro autómatas LOGO y los autómatas S7-1200, tomando en cuenta que dichos

dispositivos poseen características definidas, por una parte se tiene a los micro autómatas LOGO que poseen bloques de control PI, carecen de punto decimal y tienen gran apertura al servicio web, además de poseer un software de programación dedicado con una elevada tasa de actualización, que a comparativa de su homólogo el autómata S7-1200, posee bloques de control PID, punto decimal y sus actualizaciones depende de la versión instalada de TIA Portal.

5.2 Recomendaciones.

- Antes de finalizar, en base a los resultados y las conclusiones obtenidas, se recomienda mejorar la participación de los docentes con temas orientados a nuevas tecnologías, fomentando la innovación de las diferentes disciplinas de enseñanza a lo largo de la formación académica estudiantil. Introduciendo temas de carácter digital y conceptos como Web Server, Servicios en la Nube, Redes Compartidas y Paneles Remotos.
- Una vez concluido el presente trabajo de titulación, se pone a consideración del lector y la comunidad educativa, la investigación de aspectos relacionados con futuras tecnologías de supervisión y control de procesos, basados en la utilización de micro autómatas y softwares dedicados a la interconectividad y la utilización de datos en la nube, expandiendo conocimientos e innovando sobre la industria 4.0.

6. Bibliografía

- 3R Fourth Industry, S. (12 de Junio de 2018). 3R Fourth Industry, SL. Recuperado el 10 de Abril de 2020, de 3R Fourth Industry, SL: <https://industria40.me/blog/smart-factory-que-es/>
- Astrom, K. L. (2019). Control PID avanzado. En K. L. Astrom, Control PID avanzado (pág. 177). España: PEARSON.
- Class, Z., & Souza, I. (19 de Junio de 2019). Rockcontent blog. Recuperado el 24 de Abril de 2020, de Rockcontent blog: <https://rockcontent.com/es/blog/que-es-un-servidor/>
- Itat. (14 de Febrero de 2017). Itat. Recuperado el 15 de Abril de 2020, de itat: <https://procesosdefabricacionitablog.wordpress.com/2017/02/14/1-1-historia-de-los-procesos-de-fabricacion/>
- Logicbus. (17 de Junio de 2019). Logicbus. Recuperado el 24 de Abril de 2020, de Logicbus: <https://blog.logicbus.com.mx/blogs/post/modbus-tcp-ip>
- Masvoltaje. (16 de Septiembre de 2014). Masvoltaje. Recuperado el 24 de Abril de 2020, de Masvoltaje: <https://siemenslogo.com/que-es-un-siemens-logo/>
- Nise, N. S. (2004). Sistemas de Control para Ingeniería. En N. S. Nise, Sistemas de Control para Ingeniería (pág. 193). Mexico: Continental.
- Smith, C. A. (1991). El Sistema de Control de Procesos. En C. A. Smith, Carlos A. Smith (págs. 17-25). Mexico: Industria Editorial Mexicana.
- Talks, T. (15 de Agosto de 218). Youtube. Recuperado el 24 de Abril de 2020, de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?V=a0Ycxn-bzak>

ANEXOS