



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“DISEÑO DE UN SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL
DE NIVEL DE UNA PLANTA DE AGUA UTILIZANDO
PLC'S Y VFD'S MEDIANTE UNA RED MODBUS Y
PROFIBUS”**

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD, ELECTRÓNICA Y
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

ERICK GERARDO LÓPEZ ROLDÁN

FERNANDO MIGUEL BASANTES MOLINA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser siempre mi luz y guía en toda mi trayectoria universitaria, por darme sabiduría y entendimiento para afrontar todas las adversidades que presenta la vida y seguir en marcha con mi objetivo. Este logro es gracias a su voluntad.

A mis formadores, por compartir sus valiosas sabidurías que me han permitido desarrollar mis capacidades desde distintos puntos de vista, social, económico y tecnológico. En especial al Msc. Damian Larco e Ing. Raúl Intriago por su confianza para la implementación de este proyecto.

A mis padres, por ser siempre los pilares fundamentales de mi vida y forjarme por el sendero correcto, por brindarme el mejor regalo que es la educación.

Erick Gerardo López Roldán

A Dios por brindarme salud y sabiduría para lograr mis objetivos personales y profesionales, por rodearme de buenas personas que me ayudaron en cada etapa de mi vida y por otorgarme el mejor regalo del mundo, mi madre.

A mi madre Piedad Molina, por ser ejemplo de mujer fuerte y valiente que cada día lucha por el bienestar de la familia, por guiarme y educarme, es y será la mejor profesora que pude haber tenido. A mi hermano Juan Carlos, por su apoyo incondicional y ayuda en la implementación del proyecto.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos y experiencias, especialmente al Msc. Damian Larco e Ing. Raúl Intriago por su voto de confianza para la elaboración de este proyecto.

Fernando Miguel Basantes Molina

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Dios por haberme dado sabiduría para llegar hasta este punto y por bendecirme con salud para cumplir unos de mis grandes objetivos.

A mi madre Digna Roldán por su comprensión desde mis inicios universitarios, por sus consejos y motivación en toda mi trayectoria y sobre todo por su infinito amor.

A mi padre Franklin López pilar fundamental de mi familia por haberme apoyado en todo momento demostrándome que la perseverancia, el respeto y la responsabilidad hacen de una persona la mejor, y enseñarme que todo sacrificio tiene una gran recompensa.

A mis hermanos Kevin, Karen y Kenny testigos de largas noches de estudios, y en general gracias a toda mi familia por ayudarme alcanzar este objetivo.

Erick Gerardo López Roldán

El proyecto se lo dedico a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, lleno de altos y bajos, pero siempre bajo su bendición, por darme la sabiduría y paciencia de cumplir este objetivo personal y familiar.

A mi familia, mi hermano Juan Carlos, su esposa Maricela Lozano y mis sobrinas Ainoha y Melida por siempre mantenernos unidos, especialmente a mi madre Piedad Molina pilar fundamental de la familia, por su dedicación y apoyo incondicional en toda mi etapa educativa, demostrándome que, con trabajo, perseverancia y sin hacer el mal todo lo que me proponga, podrá ser logrado.

A mi enamorada y mejor amiga Denisse Manobanda quien me supo esperar y acompañar cada día de trabajo y estudio, por entenderme que todo gran sacrificio conlleva un gran resultado, pero principalmente a su apoyo y compañía incondicional siempre.

Fernando Miguel Basantes Molina

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

MSc. Carolina Godoy

PROFESOR DE MATERIA
INTEGRADORA

MSc. Damián Alberto Larco Gómez

TUTOR ACADÉMICO

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
Erick Gerardo López Roldán

.....
Fernando Miguel Basantes Molina

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza el diseño de un sistema Scada para el control de nivel de una planta de agua utilizando PLC's y VFD's mediante una red modbus y profibus. En el capítulo 1, se detalla la problemática que dio origen al presente proyecto y su respectiva justificación, así como también se muestra el objetivo general y los objetivos específicos.

En el capítulo 2, se describen los equipos, elementos y programas que son necesarios para la ejecución del proyecto, así como también los fundamentos teóricos que dieron origen a la metodología de trabajo.

En el capítulo 3, se describe la metodología de trabajo para la ejecución del proyecto y éste consta de tres etapas fundamentales.

En la primera etapa del proyecto se realiza la programación del control proporcional y proporcional-integral de la planta de nivel en los autómatas micrologix 850 y S7-1200 de Allen-Bradley y Siemens respectivamente. El control realizado es para dos tipos de proceso tanto para el llenado y vaciado del nivel de agua en el tanque. Además, se realiza la programación para que el control de la planta de nivel trabaje en tres modos de operación que es el modo automático, semi-automático y manual.

En la segunda etapa del proyecto se realiza la implementación de tres comunicaciones industriales entre los autómatas y los variadores de frecuencias. La primera comunicación implementada es entre el micrologix-850 de Allen Bradley y el VFD ACS355 de ABB mediante la comunicación Modbus RTU, la segunda comunicación implementada es entre el S7-1200 de Siemens y el VFD ACS355 de ABB mediante la comunicación Modbus RTU y para finalizar entre el S7-1200 y VFD MicroMaster440 de Siemens mediante la comunicación Profibus DP. El control de la planta de nivel se ejecutará con los tres tipos de comunicaciones independientemente.

En la tercera etapa del proyecto se realiza la programación del sistema Scada mediante el software Visual Studio. Dentro del sistema Scada se ejecuta el proceso de control de la planta de nivel en los tres modos de operación y con los tres tipos de comunicaciones industriales implementadas.

Para finalizar, en el capítulo 4 se detallan los resultados obtenidos de todos los análisis que fueron necesarios para la ejecución del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
CAPÍTULO 1.....	12
1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.1 Planteamiento del problema.....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Justificación.....	13
1.4 Alcance	14
2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1 Antecedentes	15
2.2 Marco Teórico	17
2.2.1 Tipos de controles.....	17
2.2.2 Descripción del sistema	18
2.2.3 Equipos del proceso	20
2.2.4 Elementos de instrumentación	22
2.2.5 Programas y redes de comunicación	23
CAPÍTULO 3.....	25
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	25

3.1	Implementación física	25
3.2	Programación en los controladores	26
3.2.1	Programación en S7-1200	26
3.2.2	Programación en micrologix 850.....	30
3.3	Comunicaciones Industriales	34
3.3.1	Comunicación entre s7-1200 y Micromaster 440 VFD	34
3.3.2	Comunicación entre s7-1200 y ACS 355 VFD	40
3.3.3	Comunicación entre MicroLogix 850 y ACS 355 VFD	45
3.4	Sistema SCADA	48
3.4.1	Red Ethernet.....	48
3.4.2	Comunicación entre autómatas y PC	49
3.4.3	Cliente OPC.....	50
CAPÍTULO 4.....		51
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
4.1	Problemas y Soluciones	51
4.1.1	Motor y Bomba.....	51
4.1.2	Elementos de instrumentación	52
4.1.3	Comunicación Profibus DP	54
4.2	Comunicación de dispositivos.....	54
4.3	Control de la planta de nivel	56
4.4	SCADA.....	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		60
BIBLIOGRAFÍA.....		62
ANEXOS.....		64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Estructura de la planta de nivel de agua	16
Figura 2.2: Motor de inducción y la bomba centrífuga no alineados.....	16
Figura 2.3: Comportamiento del control P [3].....	17
Figura 2.4: Comportamiento del control PI [3].....	18
Figura 2.5: Diagrama de bloques del proceso de la planta de nivel	19
Figura 2.6: PLC S7-1200 [5]	20
Figura 2.7 PLC Micrologix 850 [6].....	20
Figura 2.8: Módulo de señales analógicas SM 1234 [7].....	21
Figura 2.9: Módulo de señales analógicas 2080-IF2.....	21
Figura 2.10: Drive ABB ACS-355 [9].....	21
Figura 2.11: Drive MicroMaster 440	21
Figura 2.12: Transductor de presión [10]	22
Figura 2.13: Electroválvula “ON-OFF”.....	23
Figura 3.1: Planta de nivel de agua.....	25
Figura 3.2: PLC s7-1200 y módulos.....	26
Figura 3.3: Bloque de función FB.....	27
Figura 3.4: Bloque PID_Compact.....	28
Figura 3.5: Configuración del bloque PID_Compact.....	30
Figura 3.6: PLC Micrologix 850	30
Figura 3.7: Estructura del software CCW	31
Figura 3.8: Escalamiento de señal analógica	32
Figura 3.9: Bloque IPIController	33
Figura 3.10: Función del control del proceso de llenado	34
Figura 3.11: Red Profibus Mater-Sclave	35
Figura 3.12: Direcciones I/O del formato PPO	37
Figura 3.13: Formato PPO comunicación profibus.....	37
Figura 3.14: Bloque de función para la comunicación profibus	39
Figura 3.15: Configuración módulo Modbus.....	40
Figura 3.16: Configuración del bloque de función Modbus.....	43
Figura 3.17: Bloque de función para la comunicación Modbus	44
Figura 3.18: Configuración del módulo de comunicación	45

Figura 3.19: Bloque MSG_MODBUS_1 de CCW	47
Figura 3.20: Bloque MSG_MODBUS_2 de CCW	48
Figura 3.21: Variables del NI OPC Server.....	50
Figura 3.22: Acceso al OPC Server desde Visual	50
Figura 4.1: Acoplamiento entre motor y bomba centrífuga	52
Figura 4.2: Curva de operación del transductor de presión	53
Figura 4.3: Instalación del transductor de presión	54
Figura 4.4: Configuración Profibus con MicroMaster440	55
Figura 4.5: Tablero de Control y Fuerza del PLC S7-1200.....	56
Figura 4.6: Tablero de Control y Fuerza del PLC micrologix 850	57
Figura 4.7: Variables internas del PID_compact	58
Figura 4.8: Diseño SCADA de la planta de nivel	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comunicaciones entre equipos a realizar.....	18
Tabla 2: Modos de operación.....	19
Tabla 3: Especificaciones básicas	22
Tabla 4: Parámetros de la ecuación (3.1)	29
Tabla 5: Dirección de elementos en red profibus	35
Tabla 6: Parámetros de datos de placa del motor	36
Tabla 7: Bits de palabra de mando	38
Tabla 8: Parámetros de datos de placa del motor y comunicación del VFD.....	41
Tabla 9: Palabra de control del perfil ABB FULL	42
Tabla 10: Registros de escritura	44
Tabla 11: Registros de lectura	44
Tabla 12: Bit de palabra de control DCU menos significativos	46
Tabla 13: Palabra de mando del perfil DCU	47
Tabla 14: Parámetros de Configuración: Palabra de mando	47
Tabla 15: Parámetros de configuración del valor de consigna	48
Tabla 13: Dirección IP de equipos	49
Tabla 16: Corriente de entrada de los VFD's.....	55
Tabla 17: Constantes del control PI	58
Tabla 18: Constante del control P	58
Tabla A.1.19: Parámetros del bloque IPID_Controller.....	64

CAPÍTULO 1

1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.

Hoy en día la automatización aplicada a plantas industriales aporta con numerosas ventajas en la producción de algún proceso en específico, tales como rapidez, eficiencia, seguridad, entre otros, es por ello que las empresas buscan especialistas en procesos automatizados.

Las industrias disponen de plantas automatizadas donde se involucran muchas áreas como la instrumentación, control automático y la electrónica de potencia para el desarrollo de la producción. En algunos laboratorios de la facultad de ingeniería eléctrica y computación disponen de pequeñas plantas industriales donde los estudiantes pueden desarrollar y ejecutar los análisis de algunos procesos, generando de esta manera una mejor visión desde el punto de vista estudiantil de como diseñar, programar y ejecutar una planta industrial.

Actualmente, el laboratorio de electrónica de potencia dispone de equipos de gama alta utilizados a nivel industrial como por ejemplo PLC's y variadores de frecuencias VFD's de diferentes marcas para sus prácticas. Sin embargo, no cuenta con pequeñas plantas industriales donde involucre automatización, electrónica de potencia y control automático en un mismo proceso, para que los estudiantes puedan desarrollar sus conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

Adicional a la problemática ya mencionada, las comunicaciones industriales entre los autómatas o PLC's y los variadores de frecuencia son muy pocos ejecutados por los estudiantes en las clases previstas a lo largo de la carrera, es por ello que la planta de agua que se desea controlar se va a utilizar diferentes protocolos de comunicaciones industriales. De esta manera se logrará un cambio en los controles típicos de los variadores de frecuencia, es decir, los variadores de frecuencia o VFD's se los controlará por medio de protocolos de comunicaciones industriales y no por entradas digitales y analógicas.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

Desarrollar un sistema automatizado para el control de nivel de una planta de agua con dos tipos de PLC's y un VFD mediante comunicaciones industriales.

1.2.2 Objetivos específicos.

Programar un sistema Scada en Visual Basic para el control automático de la planta de nivel de agua.

Diferenciar el comportamiento del control P y PI utilizados en la planta de nivel.

Emplear un protocolo de comunicación Modbus con los PLC S7-1200 y micrologix-850 con un variador de frecuencia para la regulación de velocidad del motor de inducción y un protocolo de comunicación profibus con el PLC S7-1200 y el VFD MicroMaster 440.

1.3 Justificación.

El presente proyecto busca automatizar una planta de nivel de agua ubicada en el laboratorio de electrónica de potencia que se encuentra en desuso, a nivel educativo esto puede ser útil para que futuros estudiantes puedan realizar pruebas y análisis de esta, y además ayude a resolver problemas de diseño e interpretación de diferentes controles y comunicaciones industriales que se pueden generar, a nivel industrial esto puede ser útil para que las empresas públicas y privadas se enfoquen como objetivo a realizar los controles automáticos de sus procesos mediante comunicaciones industriales logrando como ventaja mayores distancias y menor cableado en sus instalaciones.

La importancia de este proyecto radica en el impacto educativo que pudiera tener en el futuro ya que el laboratorio de electrónica de potencia actualmente no cuenta con pequeñas plantas industriales a diferencias de otros, donde los estudiantes puedan tener una mejor visión desde el punto de vista estudiantil de como diseñar, programar y ejecutar una planta industrial en específica.

1.4 Alcance

Se construirá un sistema de tuberías hidráulicas para el correcto funcionamiento del llenado y vaciado de la planta de nivel de agua. Además, se realizarán pruebas con diferentes variadores de frecuencias con la finalidad de verificar el menor consumo eléctrico posible del motor en condiciones estables y así determinar el variador de frecuencia adecuado para este proceso.

Una vez seleccionado el variador de frecuencia se realizará la implementación del control de una planta de nivel de agua donde se utilizará dos programadores "PLC" el S7-1200 de Siemens y el micro 850 de Allen Bradley. Posteriormente, se ejecutará la programación de un control Proporcional Integral "PI" y el control Proporcional "P" para realizar el control del llenado de la planta de nivel, de forma que se pueda visualizar la diferencia en el llenado usando estos dos tipos de controles. El tipo de control será seleccionado por el operador mediante un sistema SCADA en donde la variable a controlar será el nivel de agua de la planta por medio de los dos tipos de controles antes descritos.

Los PLC's y VFD estarán comunicados por medio de una red industrial con el objetivo de controlar el nivel de agua por medio de la variación de la frecuencia del motor tanto para el llenado y vaciado del líquido almacenado en el tanque. Esta variable será la encargada de aumentar o disminuir la velocidad del motor de inducción que estará acoplado a la bomba de agua centrífuga y a su vez variar el caudal del líquido.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se describirán conceptos de automatización industrial incluyendo redes de comunicación y parametrizaciones de los variadores de frecuencias utilizados para las pruebas de control a lazo cerrado de la planta de nivel de agua.

2.1 Antecedentes

Con el transcurso de los años las industrias han incrementado y modernizado sus procesos industriales dando lugar al desarrollo y mejoras de la calidad de estos, este gran cambio surge a partir de la automatización industrial donde el objetivo es tener control de todo un proceso industrial mediante un controlador lógico programable y poca intervención del ser humano.

En primer lugar, se tiene que, en junio 2014 fue presentado en la facultad de ingeniería eléctrica y computación de la escuela superior politécnica del litoral un paper desarrollado sobre “Diseño y construcción de una planta de tres vasos comunicantes” presentado por Roberto López Morán y Msc. Juan Fransisco Del Pozo Lemos [1], este trabajo tiene como objetivo realizar el control automático en el software Matlab de tres tanques conectados en cascada. El trabajo ayudó a la determinación de la instalación del transductor de presión hidrostática en una posición estratégica y de esta manera evitar lecturas erróneas en el inferior del tanque debido a perturbaciones generadas por el fluido.

En esta misma labor de diseño y consulta se encontró en el trabajo de grado presentado en el 2009 por Juan Carlos Ortega Márquez y Byron Antonio Rivera Salazar [2], quienes realizaron el control de la planta de nivel de agua en diferentes aspectos metodológicos que pueden ser aplicados con el mismo propósito, en ese caso la consigna de frecuencia se las enviaba por medio del PLC al variador de frecuencia con salidas analógicas de (0-10Vdc), por tal motivo en el presente proyecto se realizará la escritura de la consigna de frecuencia por medio de comunicaciones industriales. El trabajo de grado presentado en el 2009 ayudó en la comprensión e interpretación del proceso de diseño del sistema scada para la planta de nivel.

La situación de la estructura de la planta de nivel de agua estaba en un gran porcentaje en malas condiciones, en la Figura 2.1 se observa que no existía ningún sistema de tuberías hidráulicas para el respectivo control a lazo cerrado de la planta de nivel de agua.



Figura 2.1: Estructura de la planta de nivel de agua

Se observa también en la Figura 2.2 que la planta de nivel no constaba con una base metálica adecuada para el acople entre el matrimonio del motor de inducción trifásico y la bomba centrífuga, anteriormente esta planta de nivel tenía acoplado a la bomba centrífuga un motor 0.5hp de menores dimensiones.



Figura 2.2: Motor de inducción y la bomba centrífuga no alineados

2.2 Marco Teórico

A continuación, se describirán los tipos de controles, descripción del sistema, equipos y elementos de instrumentación utilizados para la automatización de la planta de nivel de agua, así como también los programas y redes de comunicación utilizadas para el presente proyecto integrador.

2.2.1 Tipos de controles

Los tipos de controles utilizados para la planta de nivel son el control proporcional “P” y el tipo de control proporcional-integral “PI”.

La característica principal de la acción de un control P es que la salida de su controlador es proporcional al error, es decir: $c(t) = K_p \cdot e(t)$, descrita desde su función de transferencia resulta que:

$$C_p(s) = K_p \quad (2.1)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional del controlador, el comportamiento del control P se puede observar en la Figura 2.3.

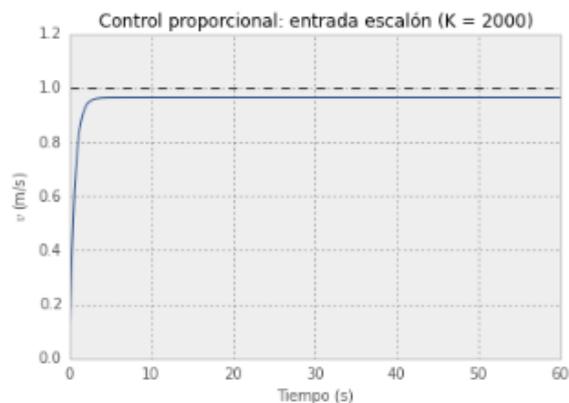


Figura 2.3: Comportamiento del control P [3]

La parte integral del controlador PID produce una señal que es proporcional al tiempo integral de la entrada del controlador [4] es decir:

$c(t) = K_p \cdot e(t) + K_p/T_i \int_0^t e(t) dt$, descrita desde su función de transferencia resulta que:

$$C_p(s) = K_p + K_I/s \quad (2.2)$$

Donde K_I es la ganancia integral del controlador, el comportamiento del control PI se puede observar en la Figura 2.4.

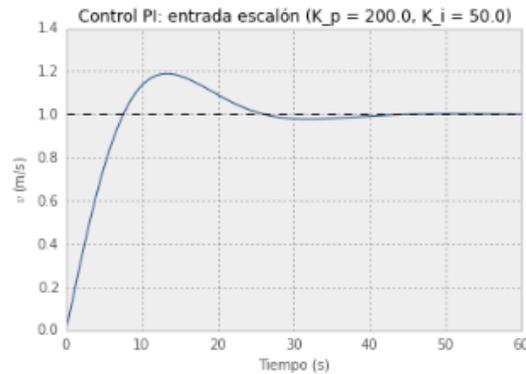


Figura 2.4: Comportamiento del control PI [3]

2.2.2 Descripción del sistema

El proceso comprende el control proporcional “P” y proporcional-integral “PI” de la planta de nivel de agua con dos tipos de autómatas, el PLC S7-1200 y el micrologix850 que controlarán la consigna de frecuencia del VFD a utilizar por medio de protocolos de comunicaciones industriales, todo el control y supervisión de datos de la planta de nivel de agua se lo realizará por medio de un sistema SCADA.

Unos de los objetivos del proyecto es trabajar con diferentes protocolos de comunicaciones y diferentes autómatas, por tal motivo se utilizarán dos tipos de controladores y dos tipos de VFD’s.

En la pantalla principal del sistema Scada se seleccionará el tipo de autómata y variador de frecuencia que se va a utilizar. En la Tabla 1 se observa las diferentes comunicaciones posibles.

Comunicación	PLC	VFD
Profibus DP	S7-1200	MicroMaster 440
Modbus RTU	S7-1200	ABB ACS-355
	Micrologix 850	ABB ACS-355

Tabla 1: Comunicaciones entre equipos a realizar

Una vez registrado el tipo de autómata y VFD a utilizar en el scada, se abrirá la pantalla secundaria, allí se seleccionará el modo de operación a

ejecutar. El sistema contará con tres modos de operación como se observa en la Tabla 2.

Modos	Descripción
Automático	Las diferentes constantes del control se escriben automáticamente al bloque del controlador
Semi-automático	La constante del control la escribe el operador
Manual	El operador selecciona el tipo de proceso de llenado o vaciado y la frecuencia deseada que desee que gire el motor

Tabla 2: Modos de operación

El autómatas por utilizar reconocerá de manera automática el proceso de llenado o vaciado del nivel de agua del tanque de acuerdo al set point que se escribirá en el scada. Para los diferentes procesos utilizados el sistema también accionará automáticamente la secuencia de electroválvulas para ejecutar los diferentes procesos.

El sistema reconocerá automáticamente las perturbaciones externas que se pueden generar, en este caso la perturbación se generará por medio de una válvula manual y de esta manera se logrará un consumo de agua, el control de la planta de nivel está diseñado para mantener el nivel de agua fijado frente a perturbaciones externos por medio de diferentes controladores.

En la figura 2.5 se observa el diagrama de bloques del proceso de automatización de la planta de nivel de agua.

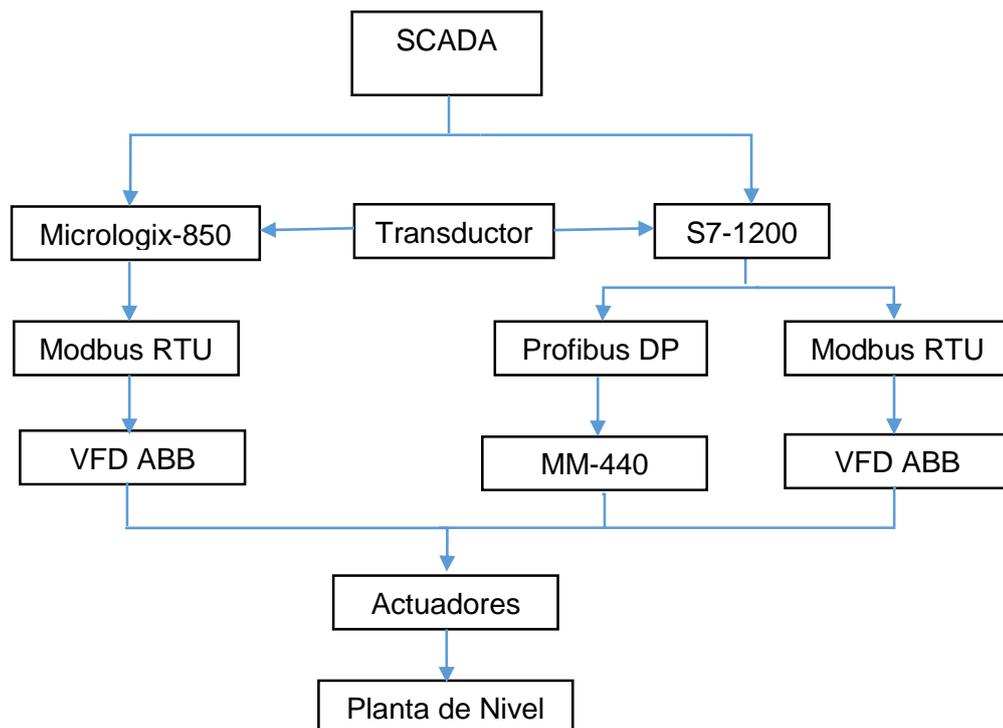


Figura 2.5: Diagrama de bloques del proceso de la planta de nivel

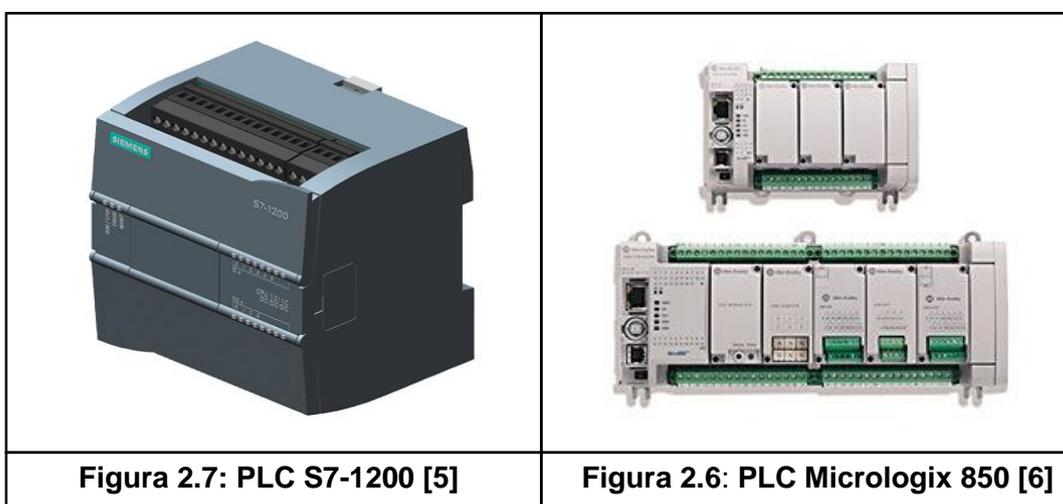
2.2.3 Equipos del proceso

En esta sección se detallará los equipos que se utilizarán para el control de nivel de agua de la planta industrial.

Controladores lógicos programables

En las plantas industriales es común encontrar algún autómatas programable que realice el control de un proceso industrial.

Los controladores que se utilizarán son el PLC S7-1200 de Siemens y el micrologix-850 de Allen Bradley como se observan en la figura 2.6 y figura 2.7 respectivamente.



Módulos de entradas analógicas

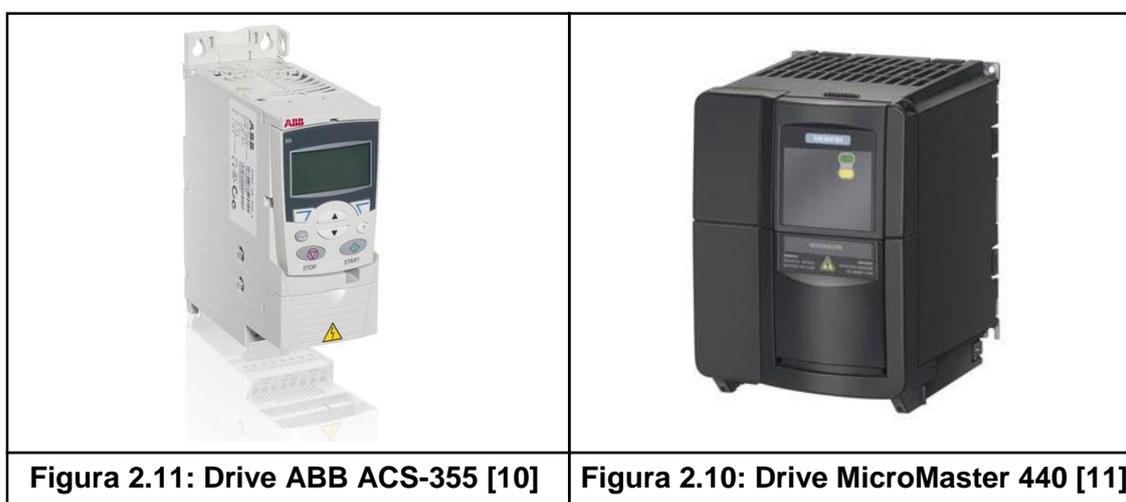
La planta de nivel contiene un transductor de presión hidrostática que será utilizado como la realimentación del lazo cerrado de control para leer la variable del proceso en los controladores.

Para los controladores S7-1200 y micrologix 850 se instalará un módulo de entradas analógicas externo que son el SM 1234 y el 2080-IF2 respectivamente para cada controlador. Estos módulos poseen entradas analógicas configurables de voltaje y corriente, en este caso la configuración realizada es por corriente de 4-20mA.



Variadores de frecuencia

Es un dispositivo industrial que trabaja como regulador de velocidad para motores eléctricos [9]. También conocidos como VFD “Variable Frequency Drive”. En este caso se utilizará dos tipos de VFD’s de diferentes marcas, el drive ABB ACS-355 y el micromaster 440 de Siemens, son los encargados de realizar el control escalar o control V/F para variar la velocidad del eje del motor de inducción acoplado a la bomba centrífuga. En la figura 2.10 se observa el drive ABB ACS-355, tiene como principal característica que se puede adaptar un módulo de comunicación modbus RTU y trabajar en varios perfiles de comunicación. De igual manera en la figura 2.11 se observa el drive MicroMaster 440 con la diferencia del anterior que se comunicará vía profibus DP.



2.2.4 Elementos de instrumentación

En esta sección se detallará los elementos de instrumentación que se utilizarán para el control de nivel de agua de la planta industrial.

Transductor de presión

Para efectos de la instalación del transductor de presión se considerará la importancia del tipo de fluido. El fluido generado en el proceso de llenado del tanque de la planta de nivel el comportamiento es estático.

En un fluido estático la presión en un punto dado es igual al peso de columna de líquido por unidad de área, es decir, la presión que ejerce el líquido es igual a la altura (h) por el peso específico (γ).



Figura 2.12: Transductor de presión [12]

Voltaje de alimentación	8 – 32 Vdc
Rango de medición	0 – 5 psi
Señal de salida	4 – 20 mA
Conexión	2 hilos

Tabla 3: Especificaciones básicas

Electroválvulas

Las electroválvulas que se utilizarán son de tipo proporcional “ON-OFF”, la apertura y cierre dependerá de la excitación de tensión que se le aplique a la bobina. El principal funcionamiento será determinar el paso del fluido para los diferentes procesos de llenado y vaciado de la planta de nivel.



Figura 2.13: Electroválvula “ON-OFF”

2.2.5 Programas y redes de comunicación

En esta sección se detallará los software y protocolos de comunicación que se utilizarán para el control de nivel de agua de la planta industrial.

TIA PORTAL

Totally Integrated Automation Portal es un software integrado a nivel de ingeniería que gracias a su interfaz intuitiva permite configurar de una manera sencilla todos los equipos utilizados en un proceso industrial.

El TIA portal incorpora las últimas versiones de Software de ingeniería SIMATIC STEP7, WinCC y Stardrive para la planificación, programación y diagnóstico de todos los controladores SIMATIC, pantallas de visualización y accionamiento SINAMICS de última generación [13].

Connected Components Workbench (CCW)

Es un software de Rockwell Automation y es compatible con la familia Micro800 de PLC, en este proyecto se utilizará un micrologix 850. Posee tres tipos de lenguaje de programación, diagrama escalera, diagrama de funciones y programación de texto estructurado [14].

Visual Basic

Es una herramienta de Microsoft diseñado para crear aplicaciones seguras y orientadas a objetos, se beneficia por la interoperabilidad de seguridad y lenguaje, es decir, que tiene la habilidad de intercambiar información de dos o más sistemas o componentes de una forma rápida y segura [15].

Protocolo de comunicación Modbus

Es un protocolo de comunicación a nivel de aplicación en el modelo OSI con la finalidad de transferir datos por una capa serial. Fue diseñado con la modalidad solicitud-respuesta usando la relación maestro esclavo [16].

Los tres tipos de modbus usados en la actualidad son los siguientes:

- Modbus ASCII
- Modbus RTU
- Modbus TCP/IP

Protocolo de comunicación Profibus

Es un estándar de comunicación abierto, se lo utiliza para aplicaciones con transmisión de datos de alta velocidad y en tareas de comunicación complejas y extensas.

Está dividido en tres versiones compatibles que son:

- Profibus DP
- Profibus FMS
- Profibus PA

El protocolo de comunicación que se utilizará para el control de nivel es profibus DP (Decentralized Peripherals). Es una red bidireccional compuesta por dispositivos “maestro-esclavos”, donde cada dispositivo debe tener una dirección asignada que lo identifique [17].

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

En este capítulo se explican los métodos y pasos usados en el desarrollo del proyecto, el diseño del SCADA se lo desarrolla en el software de Visual Studio usando una comunicación OPC para el manejo de las variables en los controladores.

A continuación, se detalla cada parte del proyecto.

3.1 Implementación física

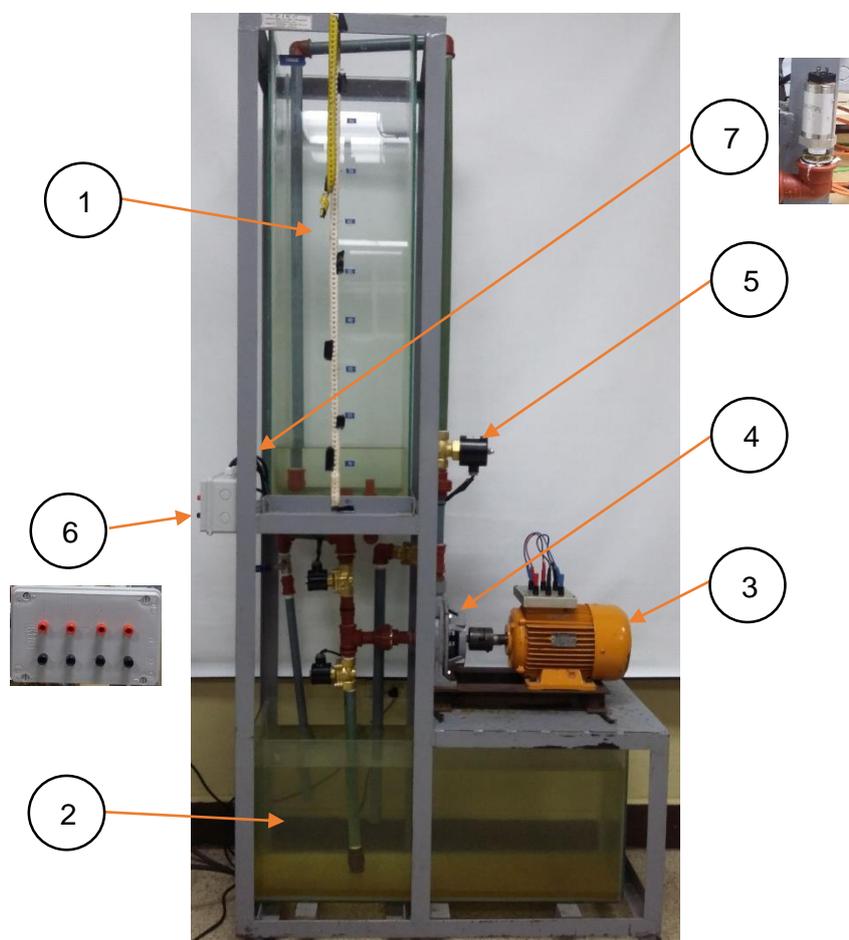


Figura 3.1: Planta de nivel de agua

En la figura 3.1 se observa las partes fundamentales de la planta de nivel, a continuación, se detalla la descripción de cada una de ellas.

Cifra	Descripción
1	Tanque
2	Reservorio
3	Motor de Inducción
4	Bomba Centrífuga
5	Electroválvulas
6	Cajetín de Conexiones de electroválvulas
7	Transductor de Presión

3.2 Programación en los controladores

Para el control de los dos procesos utilizados en la planta, se usaron dos PLC's que son el micrologix 850 y s7-1200, el objetivo de utilizar dos controladores es el de controlar la misma planta con diferentes autómatas de marcas distintas.

A continuación, se detallan la programación implementada en los PLC's.

3.2.1 Programación en S7-1200

Como se explicó anteriormente, se realizará un control de los procesos en la planta de nivel, en este caso se utiliza el autómatas s7-1200 para dicho control, el software que se utiliza para programarlo es TIA PORTAL, donde se procedió agregar el PLC y sus diferentes módulos

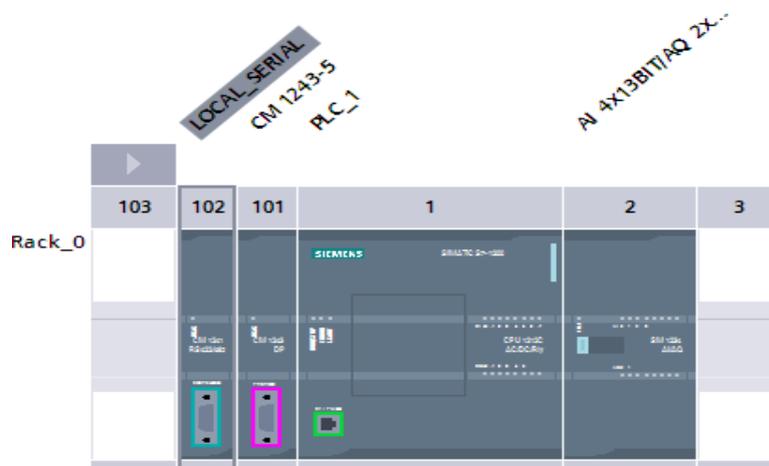


Figura 3.2: PLC s7-1200 y módulos

En la figura 3.2 se observa el PLC (slot 1) con los diferentes módulos, al lado derecho del PLC (slot 2) está el módulo de entradas y salidas analógicas utilizado para leer las señales analógicas que son emitidas por el transductor de presión y en el lado izquierdo se ubican los módulos de comunicación que serán detallados más adelante.

En el entorno de TIA PORTAL existe la facilidad de separar por segmentos la programación, además de crear diferentes funciones y bloques de datos que serán utilizados en algunos segmentos de programación, los bloques de programación utilizados son:

- Bloque de Funciones "FB".
- Bloque de Organización de interrupción cíclica "OB".
- Bloque de Datos "DB".
- Bloque de Organización "OB".

En este caso es una función creada a la cual se la llamo "ACT_VACIADO" (BLOQUE DE FUNCIONES FB4), el objetivo es llevar un control del proceso de vaciado, dentro del bloque se presenta una lógica programada en la que intervienen todas las entradas y salidas predefinidas.

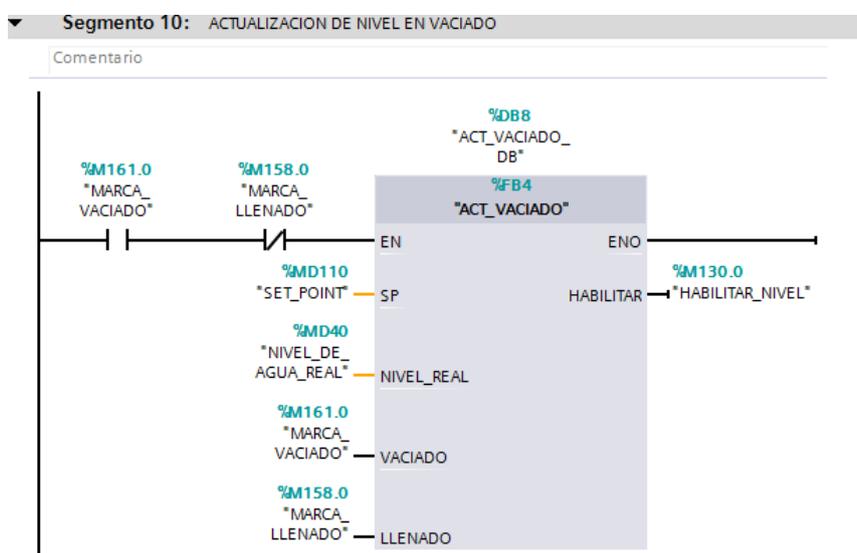


Figura 3.3: Bloque de función FB

La lógica interna del bloque es la siguiente, como se ve en la figura 3.3 el bloque posee una entrada habilitadora en la que se ven dos contactos, uno abierto (MARCA_VACIADO) y otro cerrado (MARCA_LLENADO) eso quiere decir de la función estará activada mientras el contacto

normalmente abierto cambie de estado, esto fue diseñado de esa manera porque el bloque solo interviene en el proceso de vaciado, además de las entradas habilitadoras posee las más importantes que son las variables “SET_POINT” y “NIVEL_DE_AGUA_REAL”, la lógica interna de la función hace una resta continua entre las dos variables para saber si después de vaciar el tanque continua o no con el proceso.

Los bloques de funciones son creados para la utilización en cualquier segmento de código, si se requiere la utilización de dicho bloque solo basta con llamarlo y el entorno de TIA PORTAL automáticamente crea un bloque de datos (DB) para almacenar continuamente las variables de la función en el programa principal.

Los bloques de datos (DB) pueden ser agregados y configurados manualmente por el programador o como se mencionó antes al llamar a una función al programa principal, esto va depender de las necesidades del programador.

Los segmentos de códigos incluyen el uso de dos tipos de control, en la planta la variable de interés que es el nivel de agua, por ello se utiliza dos tipos de control que son un control Proporcional Integral y un control Proporcional. Tia Portal ofrece un objeto tecnológico llamado PID_COMPACT del PLC SIMATIC S7-1200, el cual utiliza un algoritmo que calcula la ganancia proporcional K_p , Tiempo de acción integral T_i , Tiempo de acción derivativa T_D .

El PID_COMPACT se ejecuta cíclicamente comparando el Setpoint o consigna (W) que es establecido desde el SCADA con el nivel de líquido medido con el transductor de presión, de esta manera el objeto tecnológico indicado, ajusta cíclicamente el valor de salida.

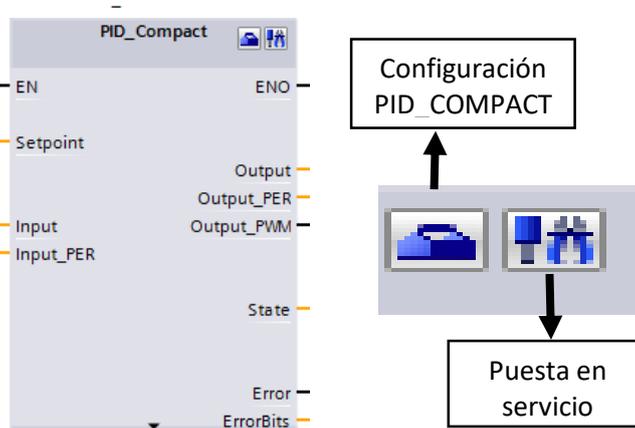


Figura 3.4: Bloque PID_Compact

Hay que tener en cuenta que el objeto tecnológico se lo debe programar y configurar en un bloque de organización de interrupción cíclica que es parecido al bloque de organización (OB) con la diferencia que los de interrupción se los configura a partir del (OB30).

En la ventana de configuración del PID_COMPACT se debe escoger que tipo de controlador desea el usuario, solo permite controlador PID o PI, en el proyecto se utiliza un controlador PI y P, entonces para utilizar el bloque como un controlador Proporcional, a la variable T_i se les asignó un valor bien pequeño aproximado a cero. La fórmula que utiliza el bloque para calcular el valor de salida es la siguiente:

$$y = KP * \left[(b * w - x) + \left(\frac{(w - x)}{TI * S} \right) \right] \quad (3.1)$$

En la Tabla 4 se detallan las variables que maneja esta fórmula.

y	Valor de Salida	x	Valor de proceso
w	Consigna	s	Operador laplaciano
K_p	Ganancia proporcional (acción P)	T_i	Tiempo de acción integral (acción I)

Tabla 4: Parámetros de la ecuación (3.1)

En la figura 3.5 se observa la ventana de configuración del bloque PID_COMPACT, en la que el programador en ajustes básicos puede escoger el tipo de regulación deseada, además del modo de funcionamiento del controlador si desea un control manual o automático, cabe recalcar que la variable input puede ser de dos modos, INPUT_PER que es una entrada analógica que puede leer directamente el bloque o INPUT el utilizado en la programación que es una entrada escalada previamente.

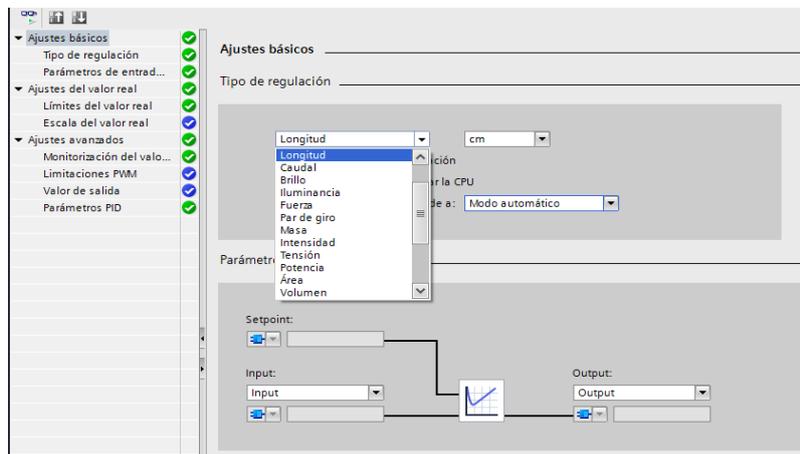


Figura 3.5: Configuración del bloque PID_Compact

3.2.2 Programación en micrologix 850.

Para realizar la programación del control de la planta de nivel con el PLC micrologix850 se utilizó el software Connected Components Workbench. Se agregó un módulo de entradas analógicas ubicado en el slot 3 para las respectivas lecturas de corriente del transductor de presión instalado como se puede observar en la figura3.6.

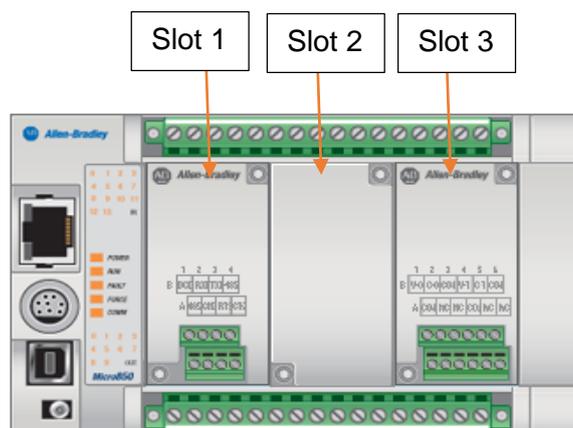


Figura 3.6: PLC Micrologix 850

El módulo de entradas analógicas 2080-IF2 se lo configura para trabajar en un rango de 4-20mA.

A continuación, se detalla la estructura del software Connected Component Workbench donde se realiza la respectiva programación del controlador para la planta de nivel. El lenguaje de programación utilizado en el bloque principal es el LD o también conocido como lenguaje LADDER y en ciertos bloques de funciones se programa en el lenguaje FBD o también conocido como diagramas de bloque de función, con el fin de simplificar el diagrama lógico.

En el organizador de proyecto se detalla el bloque principal y todos los bloques de funciones realizados con sus respectivas variables locales y globales utilizadas.

El bloque OB o Principal es aquel que se cargará en el PLC, es decir en este bloque se deberán llamar a todas las funciones que se hayan creados en el bloque de funciones.

Las propiedades del bloque seleccionado indican las características físicas del mismo, es decir, color de bloque, color de rama, color de comentarios y habilitadores para mostrar etiquetas y comentarios.

En el cuadro de herramienta se detallan todos los elementos booleanos, aritméticos, control de procesos y comunicaciones para la respectiva programación que se desee realizar.

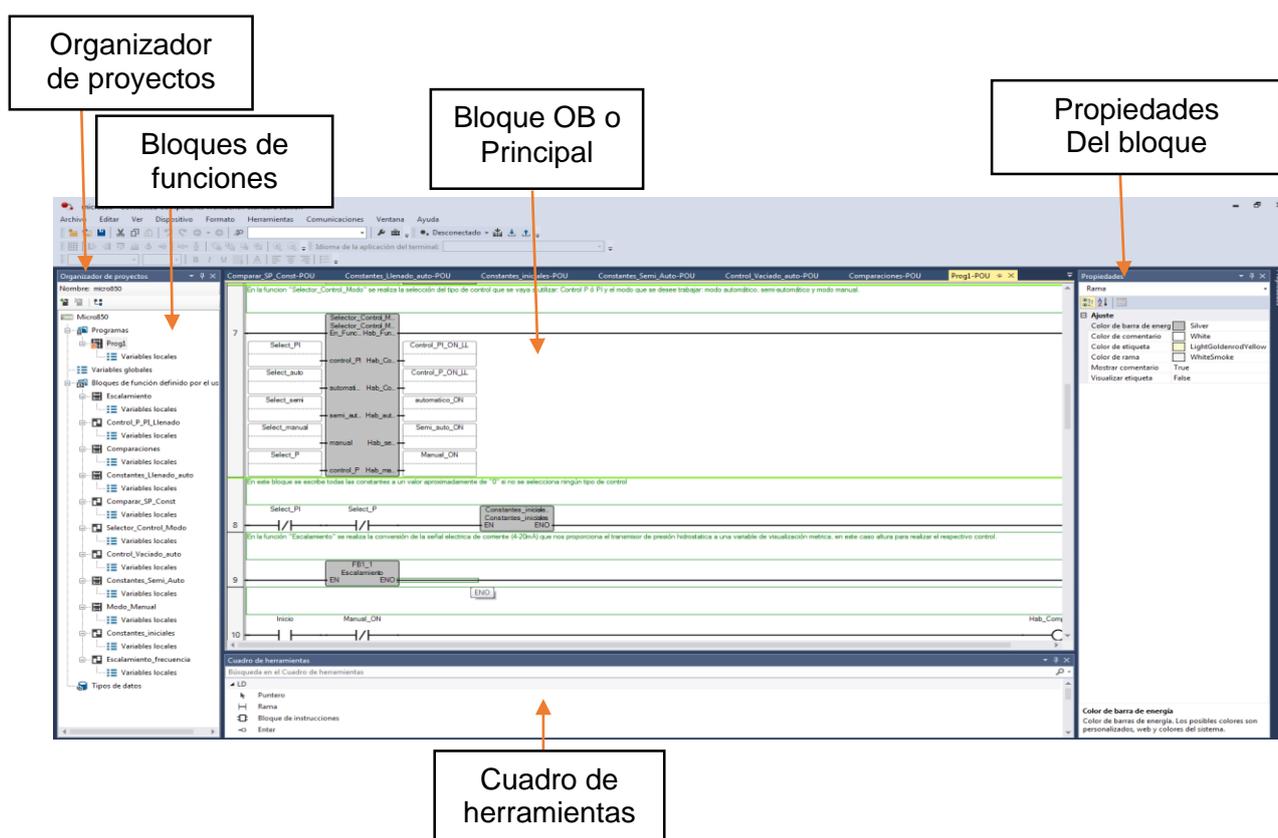


Figura 3.7: Estructura del software CCW

En los bloques de funciones realizados para el control de nivel de la planta se programa en dos tipos de lenguajes que son:

- Lenguaje LD o LADDER
- Lenguaje FBD o Diagrama de bloques de función

Lenguaje LD o LADDER:

Ladder es un lenguaje clásico que utiliza un diagrama de contactos lógicos para realizar distintos tipos de programación, se podrá utilizar temporizadores, contadores, operadores lógicos y bloques de comunicación para la programación que se desee realizar.

En este caso se tomará como ejemplo la función llamada “Escalamiento” que es la encargada de leer los valores analógicos de corrientes generados por el transductor de presión y estos datos relacionarlos con el nivel de altura de agua del tanque.

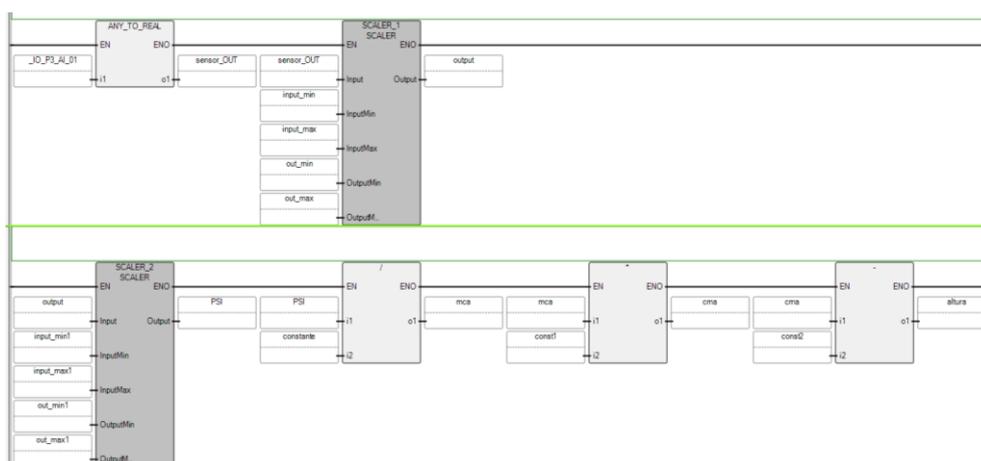


Figura 3.8: Escalamiento de señal analógica

Lenguaje FBD o Diagramas de bloque de función:

FBD es un lenguaje más sencillo a comparación con el lenguaje LD ya que no utiliza un diagrama lógico de contactos, sino que ya existen operaciones predefinidas en bloques.

En este caso se tomará como ejemplo la función llamada “Control_P_PI_Llenado” que es la encargada de realizar el respectivo control Proporcional-Integral “PI” o control proporcional “P” según lo seleccionado por el operador en el proceso de llenado. Estos dos tipos de control se definieron debido al proceso seleccionado, la acción de la

constante derivativa disminuye el sobre-nivel porcentual que genera la constante “Ti”, es decir el proceso con control PID es más exacto, pero más lento en llegar a su punto de operación. Para el respectivo control de la planta de nivel se utiliza el bloque IPIDCONTROLLER que tiene incluido el Software Connected Component Workbench “CCW” (Ver figura 3.9). Cada parámetro de entrada y salida del bloque IPIDController se detalla en la Tabla A1.13

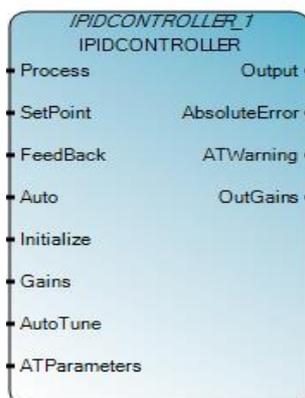


Figura 3.9: Bloque IPIDController

A continuación, se detalla la programación interna del bloque de función llamado “Control_P_PI_Llenado” realizado en lenguaje FBD o diagrama de bloque de función. Este bloque tiene como entradas principales el nivel de altura real del tanque, el set point que se desea llegar conocido también como el punto de operación, la variable Out_Feedback que es una realimentación al bloque IPIDController de la salida del proceso y por ultimo las ganancias del controlador.

El bloque IPIDController genera un valor tipo REAL en la variable “Output” dependiendo del error y el tipo de controlador que se esté utilizando sea este controlador P o PI, este valor de salida del controlador se lo limita entre 0 y 100% por medio del bloque llamado “LIMIT”, para proceder con el escalamiento de esta señal se inserta un bloque llamado “SCALER” que es el encargado de escalar de forma lineal la señal de entrada que varía entre 0 y 100 a un valor de salida que varíe entre 0 y 20000.

Los valores generados entre 0 y 20000 son los necesarios para escribir por medio de la comunicación Modbus RTU en el registro del valor de consigna y de esta manera accionar el drive ABB ACS-355 para que el

motor varíe su frecuencia entre 0 y 60 hz que se explicará con más detalle más adelante.

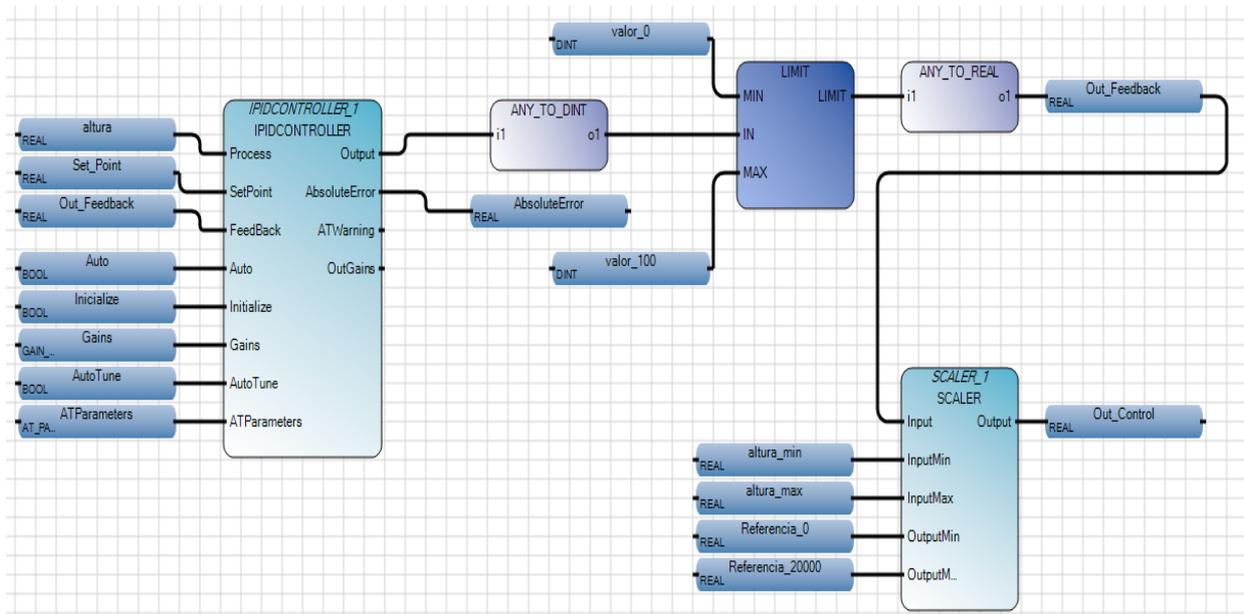


Figura 3.10: Función del control del proceso de llenado

3.3 Comunicaciones Industriales

Las redes industriales implementadas en los procesos de llenado y vaciado son dos y dependerá del autómatas con el cual se esté trabajando, en el caso del PLC micrologix 850 se utiliza una red Modbus RTU y en el caso del PLC s7-1200 se implementa dos protocolos de comunicación que son Profibus DP y Modbus RTU, los cuales se detallará a continuación.

3.3.1 Comunicación entre s7-1200 y Micromaster 440 VFD

Para realizar la comunicación entre el PLC s7-1200 y el Micromaster 440 VFD se debió establecer una comunicación Profibus DP, cabe recalcar que previamente se configuro al autómatas como maestro y al VDF como

esclavo. La red profibus establecida y la configuración de la velocidad de transmisión fue la siguiente.

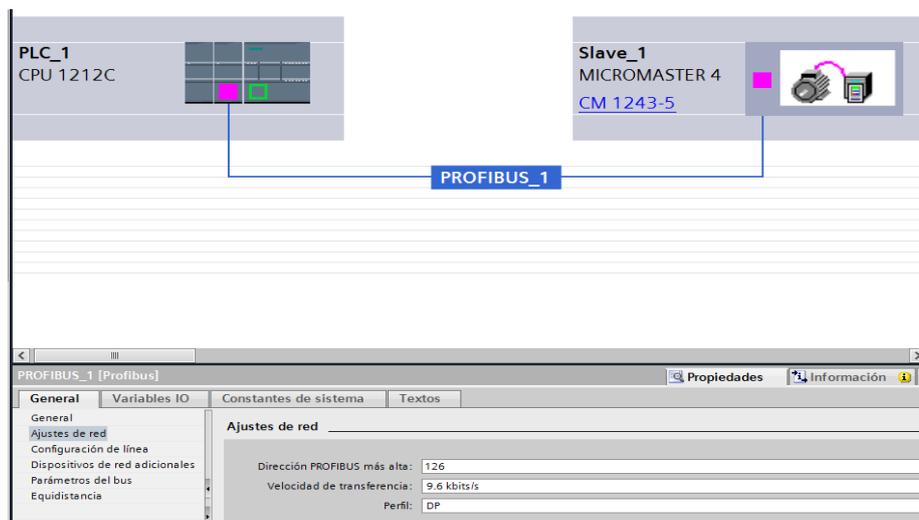


Figura 3.11: Red Profibus Mater-Sclave

El esclavo profibus debe ser agregado manualmente a la red, en este caso el Micromaster 440 VFD, para ello se dirigen a dispositivos y redes y en la parte derecha en la carpeta de otros dispositivos de campo se encuentran los esclavos profibus a utilizar, si no cuentan con es carpeta deberán descargarla de la página del fabricante del variador, a estos archivos se los conoce como archivos GSD

La velocidad de transmisión configurada es de 9600 baudios, una vez establecida la red se asignan automáticamente las direcciones Profibus del autómat y del variador, las que podemos ver en la siguiente tabla.

Elementos	Dirección Profibus
PLC s7-1200	2
Micromaster 440 VDF	3

Tabla 5: Dirección de elementos en red profibus

Una vez asignado las direcciones se procede a configurar el módulo de comunicación profibus CM 1243-5, lo importante es configurarlo como maestro, si eso no se realiza el autómat no podrá enviar información al variador. Luego se procede a configurar los parámetros en el motor. En

la Tabla 6 se detallan los parámetros para ingresar los datos de placa del motor y los parámetros necesarios para establecer comunicación profibus con el PLC.

Parámetro	Uso	Valor
P304	Tensión nominal del motor de la placa de características.	220 V trifasico
P305	Corriente nominal del motor de la placa de características.	6.95 Amperios
P307	Potencia nominal del motor [kW/hp] de la placa de características.	1.5 Kw
P308	Factor de potencia ($\cos\phi$) nominal del motor de la placa de características.	0.79
P310	Frecuencia nominal del motor de la placa de características.	50 Hz
P311	Velocidad nominal del motor de la placa de características.	1500 RPM
P700	Configuración de señales de mando por bus de campo.	6
P1000	Configuración de fuente de consigna de frecuencia.	6

Tabla 6: Parámetros de datos de placa del motor

En las pruebas realizadas con el variador conectado al motor, se observó que la mínima frecuencia a la cual el tanque comenzaba a subir el nivel del líquido era de 35 hz, entonces solo se tendría una banda de control de frecuencia de entre 35 y 50 hz, es por ello que se decidió utilizar la configuración de dos parámetros adicionales que son el P1080 que es la frecuencia mínima admitida por el variador que se lo configuro en 0 hz y el P1082 que es la frecuencia máxima del variador que se escogió 60 hz.

Una vez configurado tanto el esclavo como el maestro profibus se procede a realizar la programación en TIA PORTAL para que exista la transferencia de datos ordenada.

Para la comunicación Profibus entre un autómatas de la marca siemens y cualquier variador es importante escoger el formato de la trama transmisión de datos, cada VDF se comunica con diferentes formatos.

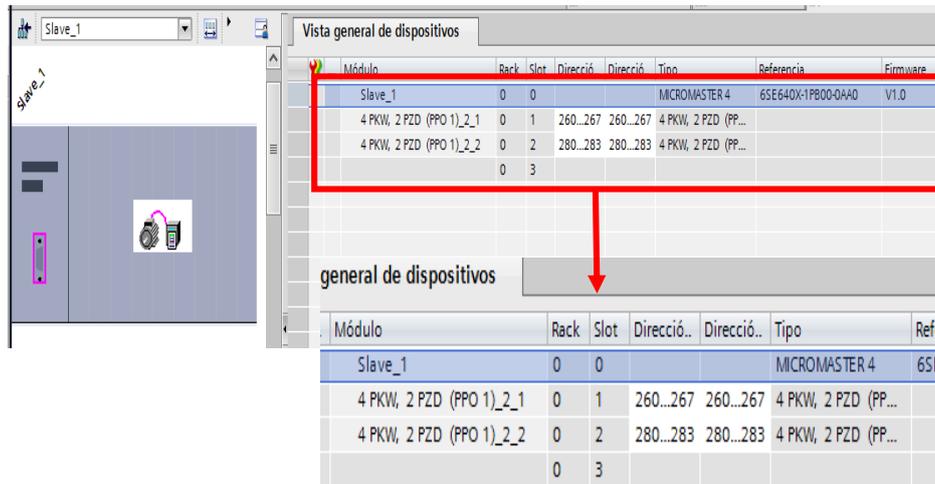


Figura 3.12: Direcciones I/O del formato PPO

El formato que se utilizará es el PPO_1 que está compuesto por 4 PKW y 2 PZD, el área de datos PKW está dividido en entradas (IW) y salidas (QW) tipo Word las cuales pueden ser usados para leer o modificar parámetros del variador, por lo contrario los PZD son áreas de datos de proceso con los cuales se enviará palabras de mando y valores de consigna de velocidad al VDF, de igual manera están compuesto de entradas y salidas analógicas. El uso del área de datos dependerá del programador o el proceso que desee controlar, en este caso se procede solo a utilizar el área de datos de procesos ya que para el control del nivel se desea es tener un control de la velocidad del VFD.

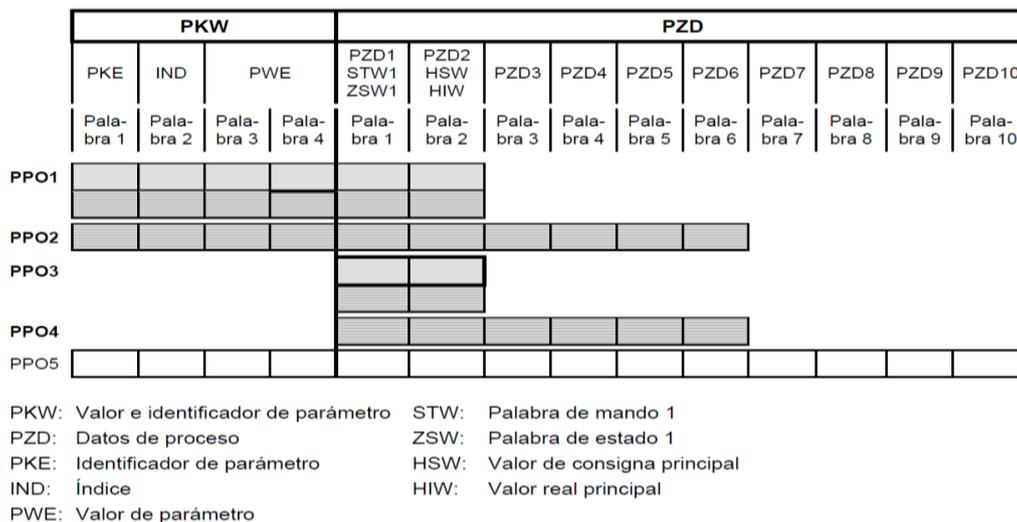


Figura 3.13: Formato PPO comunicación profibus

Para controlar la velocidad de la bomba se procede a configurar el formato para la transmisión de datos, en este caso se utilizará el área de datos PZD porque se desea enviarle la palabra de mando al variador y la consigna de velocidad a la cual necesita funcionar. Ver Tabla 7.

La palabra de mando está compuesta por 16 bits los cuales cada bit tiene su función específica, la trama de bits enviado desde el autómata hacia el VFD es "0000010001111111" ordenado desde el más significativo hasta el menos significativo respectivamente, además del valor de consigna que será un valor entre "hx0000" y "hx4CCC" este valor dependerá del valor de salida que entreguen los controladores PI o P.

Bit	Función del bit
0	ON/OFF estado listo para arrancar
1	OFF2 parada por inercia
2	OFF3 parada rápida
3	Desbloquear/Bloquear servicio
4	Desbloquear/Bloquear generador de rampa
5	ON/OFF generador de rampa
6	Desbloquear/Bloquear valor de consigna
7	ON/OFF fallo
8	Mando derecha
9	Mando izquierda
10	Validar/No validar consigna
11	Inversión/No inversión valor de consigna
12	No utilizado
13	Pot arriba
14	Pot abajo
15	Mando directo o a distancia

Tabla 7: Bits de palabra de mando

A continuación, se detalla el bloque de programación de la palabra de mando y consigna realizados en TIA PORTAL.

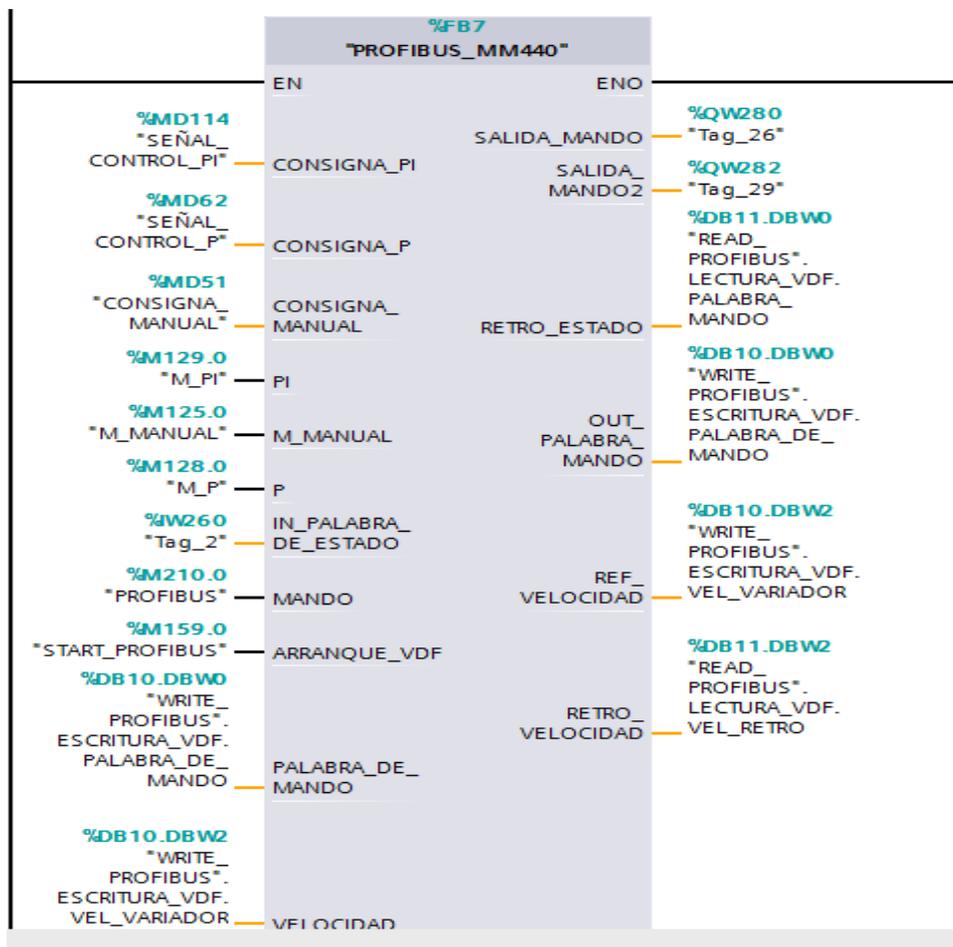


Figura 3.14: Bloque de función para la comunicación profibus

El bloque anterior es un bloque de función donde podemos ver las entradas de lado izquierdo y las salidas a la derecha:

SEÑAL_CONTROL_PI: valor de consigna enviado por el controlador PI.

SEÑAL_CONTROL_P: valor de consigna enviado por el controlador P.

CONSIGNA_MANUAL: valor de consigna enviado manualmente.

M_PI, M_P, M_MANUAL: contactos de identificación de la fuente de mando.

ESTADO: estado del variador.

PROFIBUS: habilitador de mando por comunicación Profibus.

START_PROFIBUS: habilitador de comunicación Profibus escogido.

WRITE_PROFIBUS PALABRA_DE_MANDO: palabra de mando leída desde un bloque de datos.

WRITE_PROFIBUS VEL_VARIADOR: consigna de velocidad.

SALIDA_DE_MANDO: salida del PLC donde se envía la palabra de mando al VDF.

SALIDA_DE_MANDO2: salida del PLC donde se envía la consigna de velocidad al VDF.

3.3.2 Comunicación entre s7-1200 y ACS 355 VFD

Para la comunicación entre los dos equipos se implementa una comunicación Modbus RTU, en la cual se configura el módulo Modbus del autómatas con interfaz RS422/485 y la configuración de parámetros del variador.

A continuación, se muestra la configuración del puerto Modbus del

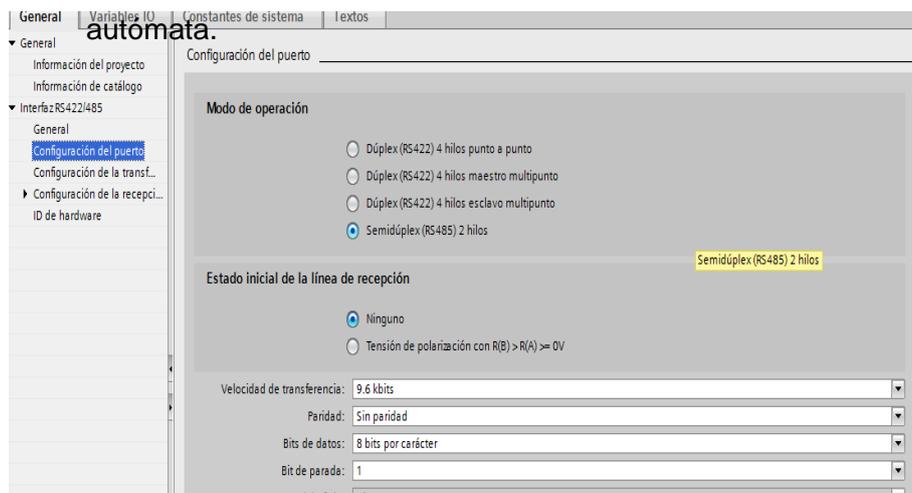


Figura 3.15: Configuración módulo Modbus

El variador ABB ACS 355 posee múltiples funciones y parámetros, para utilizarlo mediante una red Modbus es importante configurar ciertos parámetros y principalmente en el perfil el cual se va a trabajar, con el s7-1200 se escogió el perfil ABB FULL, porque en este perfil solo tendrán acceso a palabras de mando y consignas.

A continuación, se detalla los parámetros de datos de placa del motor y de comunicación configurados.

Parámetro	Valor	Función
9905	220 V	Tensión nominal del motor
9906	6,95 A	Corriente nominal del motor
9907	50 hz	Frecuencia nominal del motor
9908	1500 RPM	Velocidad nominal del motor
9909	1.5 Kw	Potencia nominal del motor
9904	3	Control escalar del motor.
9802	1	Escoger comunicación Modbus.
5302	1	Dirección de estación Modbus.
5303	9600	Velocidad de transmisión.
5304	0	Paridad.
5305	2	Perfil de comunicación: ABB FULL.
1001	10	Comandos externos 1 por comunicación.
1003	3	Permite control de giro por comunicación.
1102	8	Define la fuente de la señal de mando.
1103	8	Selecciona la fuente de la señal para comandos externos 1.
1104	0 hz	Define la frecuencia mínima.
1105	60 hz	Define la frecuencia máxima.
1601	7	Selecciona la fuente de la señal de marcha.
1604	8	Selecciona la fuente de restauración de fallos

Tabla 8: Parámetros de datos de placa del motor y comunicación del VFD

La palabra de control que utiliza el perfil ABB FULL es una trama de 16 bits que dependerá del programador establecer una trama fija o cambiarla continuamente de acuerdo a sus necesidades.

La trama de bits que se envía desde el autómatas hacia el VFD es "0000010001111111" ordenado desde el más significativo hasta el menos significativo respectivamente (ver Tabla 6), además del valor de consigna que será un valor entre "dx00000" y "dx20000" porque se utilizará la entrada de control externo EXT1 el cual recibe valores dentro de este rango, este valor dependerá del valor de salida que entreguen los controladores PI, P o control manual.

BIT	NOMBRE	VALOR	DESCRIPCIÓN
0	OFF1	1	Listo para apearar
		0	Paro por rampa
1	OFF2	1	OFF2 inactivo
		0	Desconexión de emergencia
2	OFF3	1	OFF3 inactivo
		0	Dirección de avance.
3	INHIBIT OPERATION	1	Activado
		0	Desactivado
4	RAMP_OUT_ZERO	1	Activado
		0	Desactivado
5	RAMP_HOLD	1	Habilitar función rampa
		0	Desactivar función rampa
6	RAMP_IN_ZERO	1	En operación
		0	No operación
7	RESET	0 => 1	Restaurar fallos
		0	Funcionamiento normal
8	No se usa		
9	No se usa		
10	REMOTE_CMD	1	Control por bus de campo habilitado
		0	Otro tipo de control
11	EXT CTRL LOC	1	Selecciona control externo EXT2
		0	Selecciona control externo EXT1
12	RESERVADO		
13	RESERVADO		
14	RESERVADO		
15	RESERVADO		

Tabla 9: Palabra de control del perfil ABB FULL

Una vez configurado tanto el módulo Modbus del autómata y los parámetros del VFD se procede a la programación en TIA PORTAL, el software posee dos bloques como herramientas para realizar este tipo de comunicación, los bloques son llamados MB_COMM_LOAD con el cual se designa el puerto de comunicación a utilizar con la velocidad de transmisión, además del bloque MB_MASTER donde se configura al PLC

como un maestro Modbus, la dirección del esclavo, modo de acceso al esclavo, registros de datos, dimensión de datos y salidas que muestran si la transmisión de datos fue realizada con éxito.

Existe la posibilidad de escribir y leer datos desde el autómatas, se procede a configurar dos bloques MB_MASTER para trabajar uno en modo escritura y el otro en modo lectura, en este caso hay que tener cuidado de no hacer los dos modos al mismo tiempo porque daría error de ocupación del puerto, es decir, no se puede escribir y leer datos en el variador al mismo tiempo, es mejor utilizar un clock que facilita el software llamadas marcas de ciclo para definir el proceso de escritura o lectura de registros.

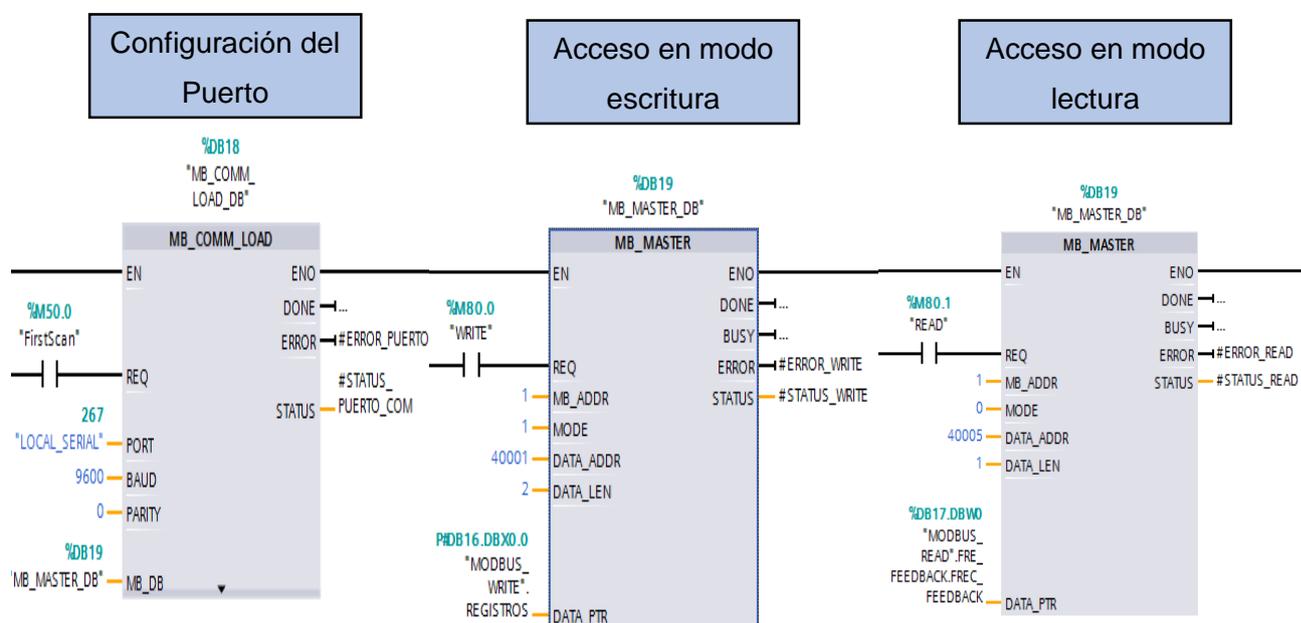


Figura 3.16: Configuración del bloque de función Modbus

Al acceder en modo escritura en el perfil de comunicación ABB FULL, se utiliza el método de enviar la palabra de mando y consigna de velocidad, en este caso el VFD trabaja con dirección para la trama de bits, la palabra de mando trabaja con 16 bits al igual que el valor de velocidad.

Parámetro	Dirección
Palabra de mando	40001
Referencia de velocidad	40002

Tabla 10: Registros de escritura

Parámetro	Dirección
Velocidad feedback	40005

Tabla 11: Registros de lectura

Luego de realizar las configuraciones de los registros y conocer cómo se envía la trama de bits se procede a realizar una función que contiene los dos bloques anteriormente explicados, en el bloque se tiene acceso al habilitador de la comunicación, las demás entradas son variables de la programación, en ellas se observa M_PI, M_P, M_MANUAL son contactos para identificar si el control del proceso se lo realiza mediante algún control o manualmente, además de las señales del valor de salida de los controles PI o P y la consigna manual, en las variables de salida el bloque posee lecturas de algún problema con la comunicación en el puerto, como también la lectura de la palabra de mando y velocidad de referencia enviada al variador y leída de él. Como ejemplo puede observar la Figura 3.17.

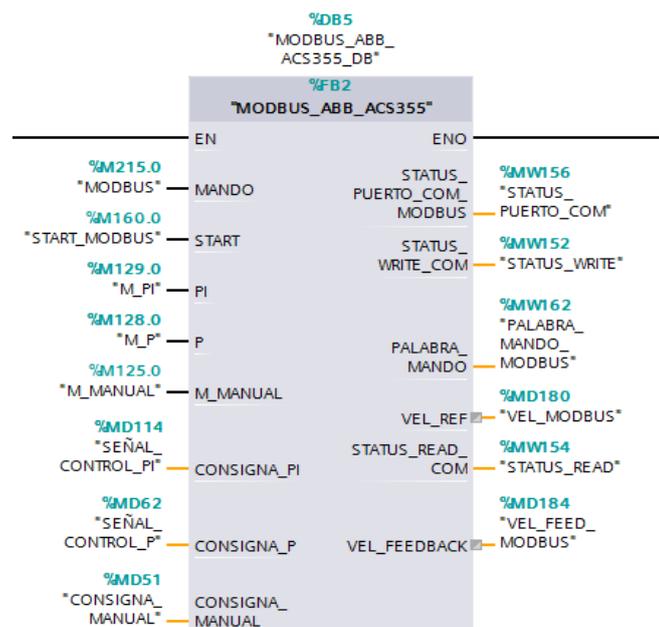


Figura 3.17: Bloque de función para la comunicación Modbus

3.3.3 Comunicación entre MicroLogix 850 y ACS 355 VFD

Para realizar la comunicación Modbus RTU entre el PLC Micrologix850 y el variador de frecuencia ABB ACS355 se debe empezar con la configuración del módulo de comunicación Modbus 2080-SERIALISOL ubicado en el slot 1 del PLC.

2080-SERIALISOL - Configuración

Configuración común

Controladora: Modbus RTU

Velocidad en baudios: 9600

Paridad: Ninguno

Función de Modbus: Maestro

Control de protocolo

Medios: RS485

Bits de datos: 8

Bits de parada: 1

Temporizador de respuesta: 200 ms

Pausa de broadcast: 200 ms

Inter-Frame: 0 μ s
(Retraso/tiempo de espera)

Figura 3.18: Configuración del módulo de comunicación

Una vez que se haya configurado el módulo de comunicación se deben considerar dos aspectos importantes que son, la palabra de mando o control y el valor de la consigna de frecuencia.

El drive ABB ACS355 tiene tres diferentes perfiles de comunicación para la escritura de la palabra de mando, el perfil ABB limitado, el perfil ABB completo y el perfil DCU. Los dos primeros perfiles de comunicación son propios de la marca ABB, es decir, se recomienda establecer comunicación con PLC de marca ABB, su interfaz de control y estado trabaja a 16 bits. El perfil de comunicación DCU es libre, es decir, con este perfil se puede realizar comunicación con PLC's de diferentes marcas, su interfaz de control y estado trabaja a 32 bits divididos en perfil DCU menos significativos y perfil DCU más significativos. Para la variación de la consigna de frecuencia del variador se trabaja con el perfil de comunicación DCU menos significativos como se puede observar en la Tabla 12.

BIT	NOMBRE	VALOR	DESCRIPCIÓN
0	PARO	1	Paro según el parámetro de modo de paro (2102) o las peticiones de modo de paro (bits 7, 8 y 9).
		0	No está en funcionamiento.
1	MARCHA	1	Habilitado
		0	No está en funcionamiento.
2	RETROCESO	1	Dirección de retroceso.
		0	Dirección de avance.
3	LOCAL	1	Entrar en modo de control local.
		0	Entrar en modo de control externo.
4	RESET	1	Restauración.
		otro	No está en funcionamiento.
5	EXT2	1	Cambio a control externo EXT2.
		0	Cambio a control externo EXT1.
6	RUN_DISABLE	1	Activar la inhabilitación de marcha.
		0	Activar el permiso de marcha.
7	STPMODE_R	1	Paro por la rampa de deceleración
		0	No está en funcionamiento.
8	STPMODE_EM	1	Paro de emergencia.
		0	No está en funcionamiento.
9	STPMODE_C	1	Paro por inercia
		0	No está funcionando
10	RAMP_2	1	Usar el par de rampas 1
		0	Usar el par de rampas 2
11	RAMP_OUT_0	1	Forzar a cero la salida de rampa.
		0	No está en funcionamiento.
12	RAMP_HOLD	1	Detener la rampa
		0	No está en funcionamiento.
13	RAMP_IN_0	1	Forzar a cero la entrada de rampa.
		0	No está en funcionamiento.
14	REQ_LOCALLOC	1	Habilitar el bloqueo local.
		0	No está en funcionamiento.
15	TORQLIM2	1	Usar el límite de par máximo/mínimo 2
		0	Usar el límite de par máximo/mínimo 1

Tabla 12: Bit de palabra de control DCU menos significativos

A continuación, se muestran los bits que se habilitan para enviar la palabra de mando desde el PLC micrologix 850 al drive ABB ACS355, se habilitan los bits 1 y 10 que es para la marcha y la utilización de las rampas de aceleración y desaceleración ya parametrizadas en el drive para el frenado del motor.

BITS	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
BINARIO	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
HEXADECIMAL	0				4				0				2			
DECIMAL	1026															

Tabla 13: Palabra de mando del perfil DCU

Para enviar la palabra de mando desde el software Connected Components Workbench se llama al bloque MSG_Modbus y se configura los siguientes parámetros:

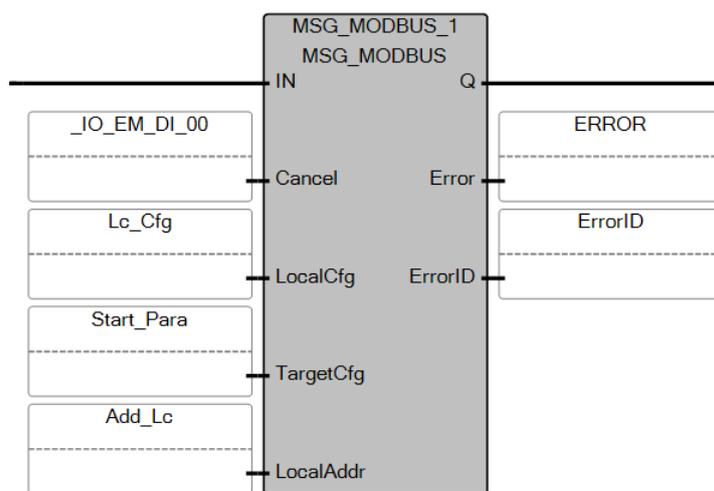


Figura 3.19: Bloque MSG_MODBUS_1 de CCW

LocalCfg	Channel	5	Módulo de comunicación insertado en el slot 1
	Trigger	0	Mensaje activado por cambio de estado de IN
	Cmd	6	Escritura de registro único (4xxxx)
	ElementCnt	1	Límites de escrituras
TargetCfg	Addr	31	Dirección de datos de destino
	Nodo	1	Dirección del nodo esclavo
LocalAddr	LocalAddr[1]	1026	Dato de escritura al registro

Tabla 14: Parámetros de Configuración: Palabra de mando

Una vez que ya se haya configurado correctamente la palabra de mando desde el PLC al variador de frecuencia ya existe comunicación entre ellos, por último, se realizará la escritura de la consigna de frecuencia por medio del bloque MSG_MODBUS_2.

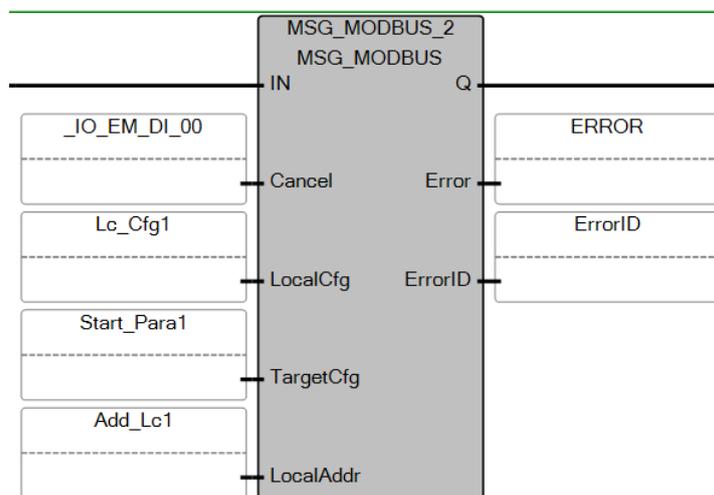


Figura 3.20: Bloque MSG_MODBUS_2 de CCW

LocalCfg	Channel	5	Módulo de comunicación insertado en el slot 1
	Trigger	0	Mensaje activado por cambio de estado de IN
	Cmd	6	Escritura de registro único (4xxxx)
	ElementCnt	1	Límites de escrituras
TargetCfg	Addr	2	Dirección de datos de destino
	Nodo	1	Dirección del nodo esclavo
LocalAddr	LocalAddr[1]	0 - 20000	Dato de escritura al registro

Tabla 15: Parámetros de configuración del valor de consigna

3.4 Sistema SCADA

En esta parte del proyecto se procedió a realizar el SCADA para controlar y supervisar el estado de la planta de nivel, se implementará una red ethernet para comunicar los autómatas con el CPU principal.

3.4.1 Red Ethernet

Para el desarrollo de la configuración ethernet, se utiliza un router TP_LINK con dirección IP "192.168.0.1" y a éste conectamos todos los autómatas y la computadora principal, cabe recalcar que no se debe sobrescribir las IP de cada equipo porque causa problemas en la red.

Dirección IP	Equipo
192.168.0.101	MICRO850
192.168.0.105	S7-1200
192.168.0.100	PC-Principal
192.168.0.1	Router TP_LINK

Tabla 16: Dirección IP de equipos

Hay que tener en cuenta que cada vez que se requiera acceder de manera remota a las variables internas de los autómatas, se debe habilitar el acceso remoto a cada uno de ellos, esto se encuentra en las propiedades de cada PLC.

3.4.2 Comunicación entre autómatas y PC

Después de crear la red ethernet de todos los equipos se realizará la comunicación entre ellos, esto se lo realizara vía OPC, entonces se crea un servidor donde se alojarán todas las variables de interés tanto del s7-1200 como del micrologix 850, cabe recalcar que la red ethernet fue creada para tener acceso desde un servidor OPC a los autómatas, pero no existe comunicación entre ellos.

Al terminar de configurar los autómatas en el servidor OPC se procede agregar las variables que se desea tener acceso en los PLC, es importante que las variables sean declaradas como variables globales en los autómatas.

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling
ALTURA DE AGUA	ALTURA	Word	10	None
INICIO	INICIO	Boolean	10	None
KP_LLENADO_SEMI	KP_LLENADO_S_A	Float	10	None
KP_VACIADO_SEMI	KP_VACIADO_S_A	Float	10	None
LLENAR_MANUAL	LLENAR_MANUAL	Boolean	10	None
SALIDA_LLENADO	_JO_EM_DO_01	Boolean	10	None
SALIDA_VACIADO	_JO_EM_DO_00	Boolean	10	None
SELECT_AUTO	SELECT_AUTO	Boolean	10	None
SELECT_MANUAL	SELECT_MANUAL	Boolean	10	None
SELECT_P	SELECT_P	Boolean	10	None
SELECT_PI	SELECT_PI	Boolean	10	None
SELECT_SEMI	SELECT_SEMI	Boolean	10	None
SET_POINT	SET_POINT	Float	10	None
TI_LLENADO_SEMI	TI_LLENADO_PI_S_A	Float	10	None
TI_VACIADO_SEMI	TI_VACIADO_PI_S_A	Float	10	None
VACIAR_MANUAL	VACIAR_MANUAL	Boolean	10	None
VELOCIDAD	MANUAL_SET_POINT	Float	10	None

Figura 3.21: Variables del NI OPC Server

3.4.3 Cliente OPC

Para finalizar el diseño del SCADA se utilizó Visual Studio, se procedió a agregar múltiples elementos para la visualización del proceso de la planta en tiempo real, para poder tener acceso a las variables guardadas en el servidor se procedió a crear un cliente OPC, con la ayuda de la librería Measurement Studio se logró enlazar todas las variables del servidor OPC con el cliente.

Para acceder a las variables en el servidor se requiere hacer los siguientes pasos:

- 1) obtener la dirección OPC donde está alojada la variable.
Ej: `opcMM440 = "opc://localhost/National Instruments.NIOPCServers.v5/PLC_S7-1200.S7-1200.PROFIBUS";`
- 2) Crear un Puerto DataSocket
Ej: `DataSocket datasocketMM440 = new DataSocket();`
- 3) Inicializar el Puerto
Ej: `if (datasocketMM440.IsConnected)
 datasocketMM440.Disconnect();`
- 4) Definir el modo de acceso al Puerto
Ej: `datasocketMM440.Connect(opcMM440,AccessMode.WriteAutoUpdate);`

Figura 3.22: Acceso al OPC Server desde Visual

Los pasos detallados son la manera de cómo definir el acceso al servidor desde el cliente OPC creado en Visual Studio. La programación utilizada fue C# para crear todas las ventanas del SCADA.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos en el transcurso del proyecto, indicando la factibilidad y complejidad de los mismos, también se detallan los problemas encontrados en la implementación de cada etapa del proyecto.

Para empezar, se reconoció el estado inicial de la planta de nivel, como se mencionó en capítulos anteriores se encontraba deshabilitada en su totalidad, con análisis previos se rediseñó desde el sistema de tuberías hidráulicas hasta la instalación de los elementos de instrumentación y programación de los equipos utilizados. El objetivo fue controlar la planta de nivel funcionando en dos procesos distintos desde un sistema SCADA mediante dos autómatas.

Con el fin de demostrar los objetivos y alcance del proyecto planteados al inicio, este capítulo se lo ha dividido en ítems, donde se involucra los problemas y soluciones encontradas, comunicación de los equipos, el control de la planta y el SCADA del proceso.

4.1 Problemas y Soluciones

En el desarrollo del proyecto se presentaron múltiples problemas de índole mecánico, hidráulico, eléctrico y electrónico, los cuales serán detallados a continuación y como se solucionaron.

4.1.1 Motor y Bomba

La planta de nivel del laboratorio se encontraba deshabilitada por completo y faltaban muchas partes mecánicas, una de ellas era la bomba centrífuga que se encontraba desarmada y con la etiqueta de dañada. Por esas razones se procedió a revisar las partes mecánicas del mismo para comprobar su funcionamiento, una vez armada se la acopló a un motor de inducción de mayor potencia y de este modo se logró que exista un mayor caudal de entrada al tanque principal. Pese a la complejidad del diseño y construcción de la base metálica para sujetar y acoplar la bomba al motor se logró alinear los ejes y de esta manera evitar desgastes y daños en las partes internas de los equipos.

Hoy en día existen sistemas de alineación computarizados que ayudan al perfecto alineamiento de los ejes, pero con las limitaciones que existían se procedió a realizarlo de forma manual, lográndolo con éxito. En la Figura 4.1, se observa cómo se encuentra el motor acoplado a la bomba centrífuga.



Figura 4.1: Acoplamiento entre motor y bomba centrífuga

4.1.2 Elementos de instrumentación

Los elementos de instrumentación que presentaron problemas fueron el transductor de presión y las electroválvulas. Debido a la falta de información técnica del transductor de presión se procedió hallar la curva característica corriente vs nivel de altura (cm) y de esta manera se concluyó que éste trabaja de manera lineal con un rango de salida de 4-20mA (ver Figura 4.2). La única información técnica del transductor de presión es que trabaja en un rango de 0 – 5 PSI.

El tanque de la planta de nivel tiene una altura máxima de 1mt, es decir, que la presión máxima a 1mt de columna de agua es de 1,422 PSI.

1mca= 1,422 PSI.

De la ecuación lineal generada (ver Figura 4.2), se observa la variable “x” representa el nivel de altura de agua en centímetros y la variable “y” es la corriente generada por el transductor.

$$y = 0,045x + 5,6 \quad (4.1)$$

Esto indica que para una altura de 100cm se estima una corriente generada de 10,1mA. Es decir, nuestros análisis están en el rango de 4 - 10mA.

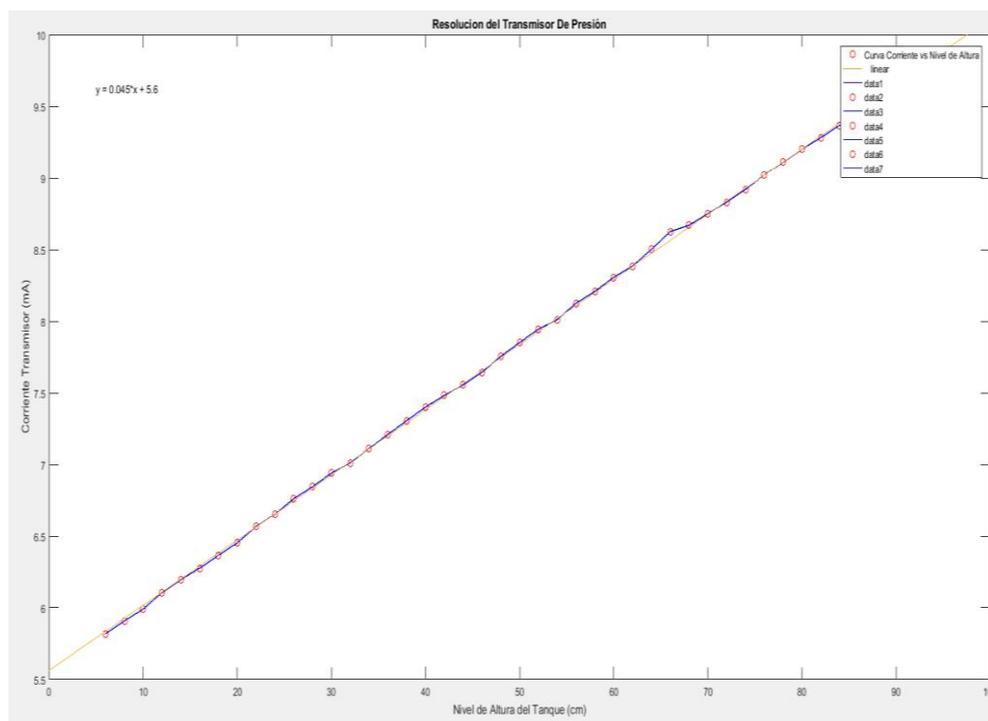


Figura 4.2: Curva de operación del transductor de presión

Una vez corroborado su funcionamiento fue instalado en la parte inferior del tanque, pero al momento adquirir los datos al PLC se observó que existía una gran perturbación y variación de éstos, lo cual llevo a pensar que existía presencia de ruido eléctrico que afectaba la lectura del nivel. Sin embargo, no resultó ser un problema eléctrico sino hidráulico, el agua al entrar al tanque lo hacía con un flujo turbulento que causaba variaciones bruscas en la medida del nivel, esto es porque el transductor es de presión hidrostática que con la presencia de un flujo de agua turbulento causaba distorsión en las adquisiciones de datos. El problema fue solucionado extendiendo la tubería desde donde se encontraba instalado el elemento hasta una posición estratégica para evitar el flujo turbulento del agua en la rosca de fijación del transductor (ver Figura 4.3).



Figura 4.3: Instalación del transductor de presión

4.1.3 Comunicación Profibus DP

En comunicaciones industriales existen múltiples causas por las cuales la comunicación se ve interrumpida, los más comunes son la interferencia eléctrica producidas por cargas de potencia, en este caso un motor trifásico.

Inicialmente no se presentó ningún problema, por lo que se tomaron todas las consideraciones de diseño del cable profibus como resistencias de terminación y polarización en los terminales de conexión, pero no se tomó en cuenta la referencia a tierra que deben tener tanto el motor como el variador por lo que una vez que el motor funcionaba se perdía la comunicación y el control sobre él.

4.2 Comunicación de dispositivos

La comunicación entre los autómatas y los VFD's utilizados en el proyecto se lo realizó de la siguiente manera, se implementó una comunicación Modbus RTU entre el micrologix 850 y el VFD ABB ACS355, de igual manera se realizó con el PLC S7-1200 una comunicación con dos VFD's configurados como esclavos mediante Modbus RTU (ABB ACS355) y Profibus DP (Micormaster 440).

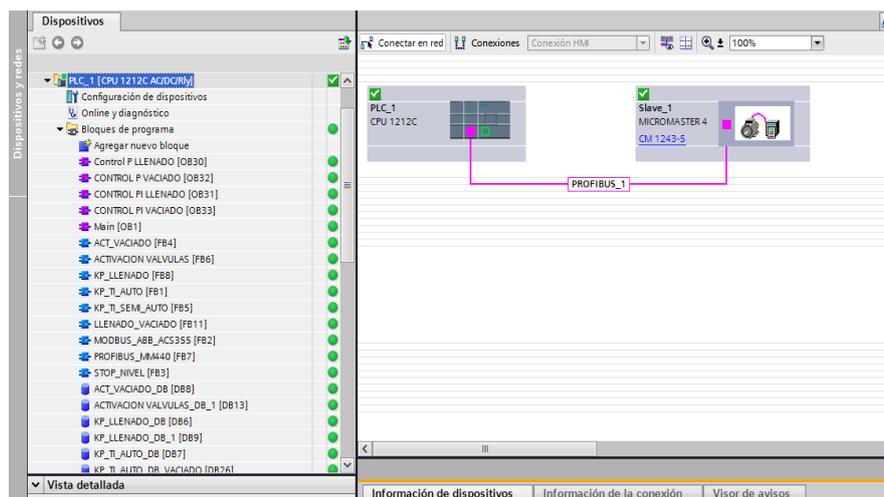


Figura 4.4: Configuración Profibus con MicroMaster440

En la Figura 4.4 se observa la red Profibus utilizada, mientras que la red Modbus dependerá de la configuración del módulo y de los bloques utilizados en la programación principal que fueron detallados en el capítulo 3.

Para escoger los variadores de frecuencias se tomaron en cuenta dos aspectos importantes, la principal fue que cada variador debería comunicarse con uno de los protocolos descritos y la siguiente sería que con un flujo de agua definido deberían consumir la mínima corriente posible. Para ello se realizaron pruebas a cuatro variadores, Micromaster 440, ABB ACS355, Sinamics V20 y Altivar 31.

Variador	Comunicación	Corriente (A)
Micromaster 440	Profibus DP	2,18
ABB ACS355	Modbus RTU	2,15
Sinamics V20	Modbus RTU	2,2
Altivar 31	Modbus RTU	2,4

Tabla 17: Corriente de entrada de los VFD's

En la Tabla 16 se observa los resultados de consumo de los VFD's. Tres VFD's consumen aproximadamente lo mismo para dos flujos constantes, mientras que el Altivar 31 tiene un consumo mayor por el cual fue descartado. Para realizar esta medición se utilizó un sensor de flujo conectado a una tarjeta de adquisición de datos (Arduino UNO). El VFD que se comunica vía Profibus es el Micromaster 440, por ello fue escogido y para comunicación Modbus RTU se escogió el ABB ACS355, porque ofrece múltiples perfiles de funcionamiento dependiendo de la aplicación.

4.3 Control de la planta de nivel

Para tener control sobre los diferentes elementos en la planta, se utilizó un tablero didáctico de PLC's, donde cada tablero posee elementos básicos como relés, contactos de fuerza, borneras de entradas y salidas digitales. Los tableros no fueron diseñados exclusivamente para el control de esta planta, pero al ser un tablero diseñado para uso en general es adaptable a la planta con el único inconveniente que no presenta borneras de entradas y salidas analógicas, lo que lleva a un problema en el cableado.

El tablero de control, que se muestra en la Figura 4.5 es el del autómatas S7-1200 que está conectado a los dos VFD's que serán usados mediante la comunicación escogida desde el SCADA, se puede observar en los leds del controlador y de los variadores están en verde que la red diseñada para el control mediante vía Modbus RTU y Profibus DP están funcionando perfectamente.



Figura 4.5: Tablero de Control y Fuerza del PLC S7-1200

A continuación, en la Figura 4.6 se observa el tablero de control y fuerza del PLC micrologix 850 conectado vía Modbus RTU con el VFD ABB ACS355.



Figura 4.6: Tablero de Control y Fuerza del PLC micrologix 850

La planta de Nivel cuenta con dos procesos, que son controlados mediante la programación en cada PLC, en el caso del s7-1200 se lo realizó mediante bloques de funciones, lógica de contactos, bloques de datos y programa principal, de manera parecida ocurre con la programación del micrologix 850.

Para establecer el control de nivel en el tanque se utilizó dos tipos de control, el control proporcional integral y proporcional, en este caso un controlador PI reacciona al error entre el nivel del agua y el SetPoint (SP), acción de la constante K_p , con un tiempo de arrastre y tiempo estabilización que depende del valor de T_i . El controlador P actúa mientras existe un error proporcional, es decir solo reacciona ante diferencias entre el nivel de Agua y SP o viceversa.

El bloque PID_Compact de TIA PORTAL tiene una función de Autotuning que nos permite conocer las constantes del controlador de manera automática, los valores que se obtuvieron para control PI en el llenado fueron $K_p = 10$ y $T_i = 0.1$ s, con estos valores se pudo establecer que la constante proporcional es de mayor magnitud respecto al valor de la constante de integración, es decir, prácticamente se está realizando un control P, como se explicó los valores y el tipo de control a utilizar dependerá del tipo de proceso.

En este caso el proyecto fue planteado con fines educativos, se buscó que exista una diferencia al aplicar los dos tipos de controles, es por ello por lo que se definieron valores fijos de constantes para el proceso automático.

Constantes	Valor
Kp	10
Ti	4,5 s

Tabla 18: Constantes del control PI

Constantes	Valor
Kp	10

Tabla 19: Constante del control P

La planta de nivel posee tres modos de funcionamiento uno de los cuales se mencionó previamente. En el modo semi-automático las constantes son enviadas manualmente desde el SCADA hacia el bloque del PID_COMPACT, estos valores serán escritos en las variables internas del bloque para regular la señal de salida del controlador, de esta manera trabaja el control P y PI en modo semi-automático.

A continuación, en la Figura 4.7 se observa en modo online las variables internas del Bloque PID_COMPACT.

CONTROLADOR_P_LLENADO								
	Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Valor de observación	Remanen...	Accesible d...	Visible en ...	Valor de a...
48	Retain	PID_CompactRetain			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
49	CtrlParams	PID_CompactCo...			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
50	Gain	Real	10.0	10.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
51	Ti	Real	1.0E-6	1.0e-006	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
52	Td	Real	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
53	TdFiltRatio	Real	0.1	0.1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
54	PWeighting	Real	0.8	0.8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
55	DWeighting	Real	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
56	Cycle	Real	1.000015E-1	0.1000015	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 4.7: Variables internas del PID_compact

4.4 SCADA

El sistema de supervisión y control diseñado para la planta contiene los detalles básicos de un SCADA, además de acceso al autómata que desee utilizar el usuario para controlar la planta, en el caso de escoger control por medio del PLC micrologix 850 se tendrá acceso al VFD ABB ACS355 vía Modbus RTU, mientras que al escoger al S7-1200 tendrá acceso al VFD Micromaster 440 o al ABB ACS355 vía Profibus DP y Modbus RTU respectivamente.

Para realizar el SCADA del proceso se seleccionó y guardó las variables de interés de los autómatas, en el diseño de las ventanas se utilizó un esquema fácil

y sencillo de realizar maniobras, además de mostrar un esquema real de la planta física.

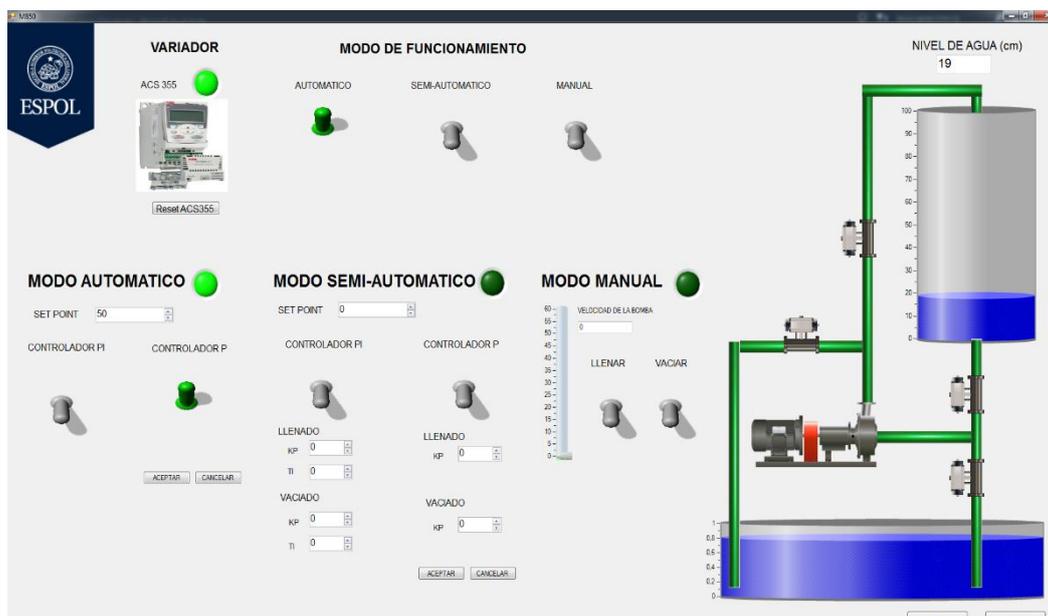


Figura 4.8: Diseño SCADA de la planta de nivel

Existen luces leds que muestran el estado activo o inactivo de diferentes variables de funcionamiento, por ejemplo si la planta se encuentra funcionando en modo automático se muestra una luz verde indicando el estado ON de este modo, de igual manera existen una protección en el SCADA que fue realizada por programación, si la planta está trabajando en un modo de funcionamiento y por error el usuario cambia de modo, el sistema no lo dejará, en ese caso deberá primero salir del modo de funcionamiento activo para escoger otro, cada evento dentro de un modo de funcionamiento es propio de ese modo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el proceso de llenado o vaciado sin aplicación de consumo, el controlador seleccionado deberá ser capaz de llegar al nivel de referencia y detener el caudal de entrada al tanque, desacelerando el motor. Es decir, en el proceso de llenado o vaciado al control solo le interesa llegar al nivel deseado y detener el motor lo más rápido posible. Si estos procesos fueran aplicados a nivel industrial lo más práctico y eficiente es realizarlo mediante un arrancador suave en la que se aplicaría un control ON/OFF regulando la aceleración y desaceleración del motor, pero al manejar otro proceso que requiere control de velocidad del motor se puede emular el control ON/OFF mediante un control proporcional aplicado al VFD que reaccionará ante un cambio en el nivel de referencia tanto en la activación como en la desactivación del motor. Esto conlleva a la reducción de equipos de potencia y versatilidad en el control de los procesos como llenado, vaciado y control de nivel.

En comunicación Modbus RTU se implementó dos perfiles de comunicación, que son el perfil de comunicación DCU y el perfil ABB DRIVES, entre ellos se encontró que el perfil ABB DRIVES maneja una interfaz de control y estado de 16 bits mientras que el DCU se maneja con 32 bits teniendo así un mayor control mediante la modificación de la palabra de mando y parámetros del VFD. En conclusión, para implementar una red Modbus entre los autómatas y el variador ACS 355 dependerá del grado de control que se necesite en la aplicación, es decir, en este caso la aplicación requiere un control de la velocidad del motor para mantener el nivel de agua, por esta razón bastaría modificar los bits de arranque y paro de la palabra de control del perfil ABB DRIVES y el valor de velocidad que requiere el control para mantener el nivel de agua. Esto libera espacio en la memoria del controlador, porque se descartan el uso de variables y bits que no están cumpliendo ninguna función en la aplicación.

Al abrir la válvula de consumo el controlador P o PI deberán mantener el nivel de agua aumentando o disminuyendo el caudal de entrada al tanque. En las pruebas de funcionamiento de la planta se comprobó que el controlador más óptimo es el PI debido que la constante proporcional brinda una reacción ante el error entre la variable del proceso y la referencia, pero posee la característica de ser inestable y ocasionar errores en estado estacionario (offset), debido a esto si el proceso necesita mantener un nivel estable y sin offset un controlador netamente proporcional no cumpliría las expectativas. La intervención la constante TI es capaz de darle la energía necesaria al controlador P para superar el error en estado estacionario, porque trabaja sumando constantemente el offset en cada intervalo de tiempo hasta ser lo mínimo posible. En conclusión, el

controlador PI es el controlador necesario para este tipo de aplicaciones donde el nivel sea lo más estable y exacto posible como control de nivel de agua en sistemas de refrigeración industrial.

‘Cuando se implementa un controlador proporcional en alguna aplicación industrial se deberá tener cuidado con el valor de la constante K_p , si este valor es muy grande el sistema tiende a oscilar y ser inestable, mientras que si es pequeño el controlador produce un offset entre el set point y la variable del proceso. Por lo contrario, si se utiliza un controlador proporcional- integral y desean eliminar el offset el valor de la constante T_i deberá ser pequeño caso contrario el sistema oscilaría.

Para que el control de nivel en lazo cerrado sea estable se debe tener en cuenta que el flujo de entrada de agua sea mayor que el flujo de consumo, por lo tanto, la válvula manual y las tuberías utilizadas para el consumo se redujeron de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ ", con el fin de apreciar de mejor manera el control.

Los tiempos de desaceleración y aceleración que son parametrizados en los variadores deben ser los mínimos posibles para tener una mejor visualización de los controles PI y P implementados para el control de proceso, evitando un retardo en la ejecución.

El acoplamiento de los ejes del motor y la bomba debe ser lo mejor posible para evitar vibraciones en el eje ya que pueden ocasionar problemas mecánicos en la bomba centrífuga, así como también en el motor de inducción. Además, de problemas eléctricos tanto en el sobrecalentamiento del rotor del motor e interferencia en la medición del nivel y problemas de comunicación con los VFD's.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. L. -. M. J. D. P. Lemos, «dspace,» 05 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/29652/Resumen%20de%20tesis%20RL%C3%B3pez%2c%20director%20de%20tesis%20M.Sc.%20Juan%20Del%20Pozo%20L.%2005%20junio%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 12 Noviembre 2017].
- [2] J. C. O. -. B. Rivera, «space,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10191/1/D-42146.pdf>. [Último acceso: 10 Noviembre 2017].
- [3] J. L. Cano, «pybonacci,» 6 Noviembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.pybonacci.org/2013/11/06/teoria-de-control-en-python-con-scipy-ii-control-pid/>. [Último acceso: 31 Enero 2018].
- [4] F. Golnaraghi y B. C. Kuo, Automatic Control System, Canada, 2009.
- [5] Siemens AG, «Industry Mall,» [En línea]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/mx/Catalog/Product/6AG1211-1AE31-4XB0>. [Último acceso: 2 Febrero 2018].
- [6] «Allen-Bradley,» [En línea]. Available: <http://ab.rockwellautomation.com/Programmable-Controllers/Micro850>. [Último acceso: 01 Febrero 2018].
- [7] Siemens, «Product Support,» [En línea]. Available: <https://support.industry.siemens.com/cs/products/6es7234-4he30-0xb0/-e-s-analog-sm-1234-4ai-2ao?pid=166398&mlfb=6ES7234-4HE30-0XB0&mf=ps&lc=es-PE>. [Último acceso: 01 Febrero 2018].
- [8] «Wernerelectric,» [En línea]. Available: https://www.wernerelectric.com/162023/Product/Rockwell_Automation_SAP_2080-IF2. [Último acceso: 2 Febrero 2018].
- [9] ABB, «Variadores de frecuencia ABB,» [En línea]. Available: <http://new.abb.com/drives/es>. [Último acceso: 1 Febrero 2018].

- [10] ABB, «ACS355,» [En línea]. Available: <http://new.abb.com/drives/es/convertidores-baja-tension-ca/maquinaria/acs355>. [Último acceso: 1 Febrero 2018].
- [11] Siemens AG, «Siemens AG,» Siemens Aktiengesellschaft, Germany, [En línea]. Available: https://support.industry.siemens.com/dl/files/imagepool/products/692/4692/v1/P_DA51_XX_00072i.jpg. [Último acceso: 02 Febrero 2018].
- [12] Winters, «Catalogo de productos,» [En línea]. Available: http://winters.com/PDF/winters_catalogue_spanish.pdf. [Último acceso: 2 Febrero 2018].
- [13] Siemens, «TIA PORTAL,» [En línea]. Available: http://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/tia-portal/tia_portal/pages/tia-portal.aspx. [Último acceso: 15 11 2017].
- [14] Rockwell Automation, «Support Center,» [En línea]. Available: https://rockwellautomation.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/279150. [Último acceso: 2 Febrero 2018].
- [15] Microsoft, «Visual Basic Guide,» [En línea]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/visual-basic/>.
- [16] National Instruments, «Protocolo Modbus,» 16 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/52134/es/>. [Último acceso: 2 Febrero 2018].
- [17] National Instruments, «Profibus,» 22 Junio 2010. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/6958/en/#toc1>. [Último acceso: 2 Febrero 2018].

ANEXOS

Parámetro	Tipo de Parámetro	Tipo de datos	Descripción
EN	Entrada	BOOL	Habilita el bloque de función cuando EN=1
Process	Entrada	REAL	Valor de la variable del proceso
SetPoint	Entrada	REAL	Punto de ajuste o deseado
FeedBack	Entrada	REAL	Señal de retorno que es el valor de la variable de control aplicada al proceso
Auto	Entrada	BOOL	Modo de funcionamiento del controlador PID Verdadero: Modo normal del controlador Falso: El controlador causa un restablecimiento.
Initialize	Entrada	BOOL	Un cambio de estado produce que el controlador elimine cualquier ganancia proporcional durante ese ciclo. Además inicializa las secuencias de AutoTune
Gains	Entrada	GAIN_PID	Ganancias de PID de IPIDController
AutoTune	Entrada	BOOL	Si se define a Verdadero y Auto e Initialize se definen a falso, se inicia la secuencia de AutoTune
ATParameters	Entrada	AT_Param	Parametros de puesta a punto automática
Salida	Salida	REAL	Valor de salida del controlador
AbsoluteError	Salida	REAL	Error absoluto (Process-SetPoint) del controlador
ATWarnings	Salida	DINT	(ATWarning) Advertencia de la secuencia de puesta a punta automática. 0: modo de puesta a punto automática sin habilitar 1: modo de puesta a punto automática habilitado 2: puesta a punto automática completada. -1: ERROR 1, entrada configurada automáticamente como Verdadero; la puesta a punto automática no se puede realizar. -2: ERROR 2, error de puesta a punto automática; ATDynaSet caducado
OutGains	Salida	GAIN_PID	Ganacias calculadas tras la secuencias de puesta a punto automática
ENO	Salida	BOOL	Habilita la salidad. Solo se aplica a programas LD

Tabla A.1.20: Parámetros del bloque IPID_Controller