



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“DESARROLLO DE SISTEMA SCADA Y ANÁLISIS DE  
CONTROLADORES PI PARA LA REGULACIÓN DE NIVEL EN  
EL TANQUE PRINCIPAL DE LA ESTACIÓN DE MEZCLA IPA2”

**INFORME DE MATERIA INTEGRADORA**

Previo a la obtención del Título de:

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

MIGUEL ÁNGEL ORDÓÑEZ MERA

JULIO DANIEL RUANO LIMA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

## DEDICATORIA

A Dios por cuidar de mi desde antes de mi nacimiento. A mi familia y en especial a mis padres, Miguel Ordóñez y Luisa Mera, quienes desde pequeño supieron brindarme un hogar lleno de amor y fueron mis primeros maestros, de quienes aprendí y sigo aprendiendo a vivir; a mi hermano, Abraham Ordóñez, cuya amistad y complicidad son invaluableles para mi.

A mi enamorada, Steffanie Jiménez, quien siempre me muestra su apoyo incondicional y me ha acompañado durante la mayor parte de mi carrera Universitaria.

Por último pero no por eso menos importante, a mis maestros y amigos, por contribuir a mi desarrollo, razón por la cual mantengo una eterna gratitud hacia ustedes.

Miguel Ángel Ordóñez Mera

A Dios, por trazar mi camino con bendiciones y personas increíbles que he podido conocer.

A mis padres Gladys Lima y Julio Ruano, pilar fundamental de mi vida, y principales responsables de todo lo cosechado hasta la actualidad.

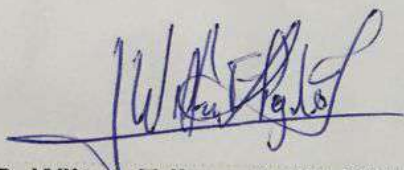
A Dostin, Nala y Dora; mis compañeros de cuatro patas en mi transitar hasta el día de hoy.

A mi familia; los que están, ya sea físicamente o en mi corazón, quienes ayudaron a mi formación y desarrollo.

Finalmente a mis amigos, parte clave de toda mi vida y apoyo incondicional en todo momento.

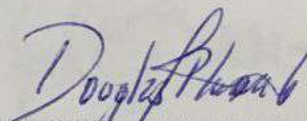
Julio Daniel Ruano Lima

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



**PhD. Wilton Edixon Agila Gálvez**

PROFESOR EVALUADOR

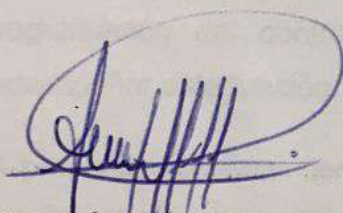


**PhD. Douglas Antonio Plaza Guingla**

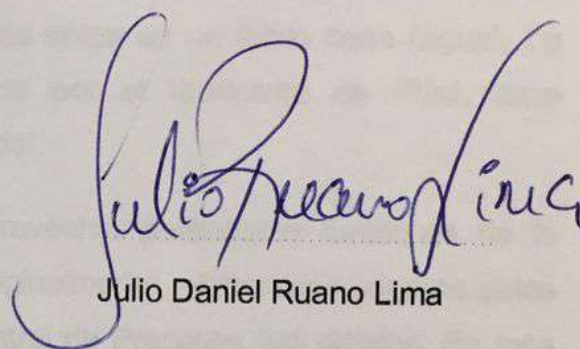
PROFESOR EVALUADOR

## 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"



Miguel Ángel Ordóñez Mera



Julio Daniel Ruano Lima

## RESUMEN

En septiembre de 2015, la ESPOL inauguró el Laboratorio de Control de Procesos Industriales, para el cual se adquirió la planta de entrenamiento IPA26. Este equipo es una línea de envasado a escala, que se compone de una variedad de estaciones de producción. Las estaciones van desde mezcla, hasta sellado y almacenamiento, entre otras.

Una de las estaciones se denomina IPA2, la cual tiene por función exclusiva originalmente el proceso de mezcla entre dos tintas en un fluido base (agua). La programación del controlador proporcionada por el fabricante de IPA2, para desempeñar esta función, usa lógica secuencial.

El presente proyecto tiene por objetivo aprovechar potenciales funciones de la estación IPA2, que el fabricante no utilizó originalmente, elaborando además guías para el aprendizaje en el Laboratorio de Control de Procesos Industriales. En este informe se describe el diseño e implementación de una interfaz HMI mejorada, un sistema SCADA y una variedad de controladores PI para el tanque principal de la estación.

En el capítulo 1, se describe de manera más específica la problemática y solución propuesta para el mejor aprovechamiento de la estación de mezcla IPA2.

En el capítulo 2, se otorga mayor información y detalle de la implementación de las funciones añadidas así como un repaso de conceptos necesarios para su comprensión.

En el capítulo 3, se realiza un análisis profundo de los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto.

Finalmente, en los anexos, se presentan las guías de pre-prácticas, prácticas y aprendizaje desarrolladas para la cátedra del Laboratorio de Control de Procesos Industriales.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	1
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN .....	2
RESUMEN.....	4
ÍNDICE GENERAL .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
CAPÍTULO 1.....	1
1. MARCO GENERAL .....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del Proyecto .....	2
1.3 Propuesta de Solución .....	2
1.4 Objetivos .....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos .....	3
1.5 Estado original de la estación de mezcla IPA2 .....	4
1.6 Adecuaciones realizadas en Hardware en la estación de mezcla IPA2 .....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2 REVISIÓN DE CONCEPTOS Y METODOLOGÍA UTILIZADA PARA IMPLEMENTACIÓN DE FUNCIONALIDADES .....	9
2.1 Arquitectura utilizada en funcionalidades implementadas.....	10
2.1.1 Diseño de sistema SCADA e interfaz HMI .....	10
2.1.2 Implementación de controladores PI.....	11
2.2 Rediseño de interfaz HMI .....	13
2.3 Diseño e implementación sistema SCADA .....	18
2.3.1 Interfaz desarrollada en LabVIEW .....	19
2.4 Diseño e implementación de controladores PI.....	23
2.4.1 Controladores PID .....	23
2.4.2 Metodología para diseño de controladores PI con Matlab .....	29
2.4.3 Sintonización automática a través de TIA Portal V13 .....	43
CAPÍTULO 3.....	47

3	RESULTADOS OBTENIDOS DE SISTEMA SCADA Y CONTROLADORES PI IMPLEMENTADOS.....	47
3.1	Funcionamiento del sistema SCADA.....	47
3.2	Sintonización de controladores.....	50
3.2.1	Sintonización automática a través de TIA Portal V13 .....	50
3.2.2	Sintonización a través de manipulación del lugar de las raíces .....	51
3.2.3	Sintonización por el método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado.....	55
3.3	Funcionamiento de controladores .....	56
3.3.1	Dinámica del sistema y esfuerzo de controladores en prueba de arranque .....	57
3.3.2	Dinámica del sistema y esfuerzo de controladores en .....	59
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	63
	ANEXO 1 .....	66
	ANEXO 2 .....	67
	ANEXO 3 .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Interconexión de los bloques TUN_EC y CONT_C en TIA Portal... 28	28
Tabla 2: Entradas y salidas de bloque de “Conversión salida analógica” . .... 37	37
Tabla 3: Entrada y salida del bloque “Conversión a porcentaje de velocidad”. ..... 38	38
Tabla 4: Entrada y salida del bloque “Ajuste a % de columna de agua” . .... 40	40
Tabla 5: Entradas y salidas del bloque “Controlador PI” . .... 41	41
Tabla 6: Constantes obtenidas de sintonización automática del PLC..... 51	51
Tabla 7: Constantes características de la planta IPA2..... 53	53
Tabla 8: Cálculo de constantes del controlador PD según método Ziegler- Nichols. .... 56	56
Tabla 9: Resultados de la prueba de arranque para los tres controladores.. 58	58



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Imagen de IPA2 proporcionada en el manual del fabricante. ....	5
Figura 1.2: Diagrama DTI de la estación de mezcla IPA2. ....	6
Figura 1.3: Reservorios originales de la IPA2. ....	7
Figura 1.4: Adecuación física realizada a la estación IPA2. ....	8
Figura 1.5: Elementos de conexión de tuberías. ....	8
Figura 2.1: Arquitectura de conexiones necesarias para implementación de pantalla HMI. ....	10
Figura 2.2: Arquitectura de conexiones necesarias para implementación de pantalla HMI & Sistema SCADA. ....	10
Figura 2.3: Arquitectura del lazo de control para implementación de controladores PI en Simulink. ....	11
Figura 2.4: Lazo de control para implementación de controlador PI sintonizado en TIA Portal. ....	12
Figura 2.5: Pantalla HMI original de la estación IPA2. ....	13
Figura 2.6: Menú principal de la interfaz HMI rediseñada. ....	14
Figura 2.7: Función de mezcla en la pantalla HMI rediseñada. ....	15
Figura 2.8: Función de limpieza en la pantalla HMI rediseñada. ....	16
Figura 2.9: Función de llenado en la pantalla HMI rediseñada. ....	16
Figura 2.10: Histórico en pantalla HMI rediseñada. ....	17
Figura 2.11: Lista de variables creadas y usadas en proyecto de LabVIEW. ....	18
Figura 2.12: Pestaña principal del SCADA desarrollado. ....	19
Figura 2.13: Pestaña de limpieza del SCADA desarrollado. ....	20
Figura 2.14: Pestaña de mezcla del SCADA desarrollado. ....	20
Figura 2.15: Pestaña de llenado del SCADA desarrollado. ....	21
Figura 2.16: Pestaña de Control de calidad del SCADA desarrollado. ....	22
Figura 2.17: Diagrama de bloques del funcionamiento de un controlador PID en lazo cerrado. ....	23
Figura 2.18: Diagrama de bloques de la respuesta al paso de IPA2. ....	25
Figura 2.19: Diagrama de bloques de sintonización por método de Ziegler-Nichols. ....	26
Figura 2.20: Tabla de variables del PLC en TIA Portal. ....	29
Figura 2.21: Instrucción necesaria para escritura en salida analógica de PLC. ....	30
Figura 2.22: Configuración de direcciones de entradas y salidas analógicas en TIA Portal. ....	30

Figura 2.23: Configuración de direcciones de entradas y salidas digitales en TIA Portal.....	31
Figura 2.24: Configuración del PLC añadido al canal OPC en KepServer. ..	32
Figura 2.25: Etiquetas creadas en el canal OPC.....	32
Figura 2.26: Bloques para comunicación OPC en Simulink.....	33
Figura 2.27: Configuración de canal OPC en Simulink.....	33
Figura 2.28: Lista de canales OPC disponibles en el computador.....	34
Figura 2.29: Conexión con el canal OPC deseado.....	34
Figura 2.30: Configuraciones necesarias para el modelo de bloques de Simulink.....	35
Figura 2.31: Selectores de mando del diagrama de bloques para comunicación OPC.....	36
Figura 2.32: Bloque de “Conversión salida analógica”.....	36
Figura 2.33: Máscara interna del bloque “Conversión salida analógica”.....	37
Figura 2.34: Bloque “Conversión a porcentaje de velocidad”.....	38
Figura 2.35: Máscara interna del bloque “Conversión a porcentaje de velocidad”.....	39
Figura 2.36: Bloque de “Ajuste % de columna de agua”.....	39
Figura 2.37: Máscara del bloque “Ajuste % de columna de agua”.....	40
Figura 2.38: Bloque “Controlador PI”.....	41
Figura 2.39: Máscara interna del bloque “Controlador PI”.....	42
Figura 2.40: Variables necesarias en PLC para sintonización automática. ..	43
Figura 2.41: Direcciones de entradas y salidas digitales para sintonización.	43
Figura 2.42: Direcciones de entradas y salidas analógicas para sintonización.....	44
Figura 2.43: Escalamiento de señales.....	44
Figura 2.44: Interconexión de los bloques TUN_EC y CONT_C en TIA Portal.....	45
Figura 2.45: Programación para habilitación de actuadores.....	46
Figura 2.46: Tabla de observación y forzado en TIA Portal.....	46
Figura 3.1: Referencia de color usada para coincidencia de mezcla.....	47
Figura 3.2: Foto de mezcla preparada, tomada por VI del SCADA.....	48
Figura 3.3: Formato de nombre de reportes en MS Excel.....	48
Figura 3.4: Datos almacenados en archivo de MS Excel.....	49
Figura 3.5: Formato de nombres de reportes de usuarios en MS Excel.....	49
Figura 3.6: Registro de usuarios que accedieron a carpeta de reportes.....	49
Figura 3.7: Evolución de la columna de agua en el tiempo durante sintonización automática.....	50

Figura 3.8: Esfuerzo del controlador a través del tiempo durante sintonización automática. ....	51
Figura 3.9: Forma típica de la respuesta al paso de la estación IPA2. ....	52
Figura 3.10: Lugar de las raíces original de la planta IPA2.....	54
Figura 3.11: Lugar de las raíces de IPA2 considerando controlador PI diseñado. ....	54
Figura 3.12: Oscilaciones debido a ganancia crítica en lazo cerrado. ....	55
Figura 3.13: Respuesta de los diversos controladores en la prueba de arranque. ....	57
Figura 3.14: Esfuerzo de controladores durante prueba de arranque.....	58
Figura 3.15: Respuesta de los diversos controladores a la prueba de tren de pulsos. ....	60
Figura 3.16: Esfuerzo de los diversos controladores a la prueba de tren de pulsos. ....	62

# CAPÍTULO 1

## 1. MARCO GENERAL

El proyecto integrador a describirse en el presente informe fue orientado a la repotenciación de la Estación de Mezcla: Industrial Process Automation 2 (IPA2) [1] del Laboratorio de Control de Procesos Industriales.

En el capítulo presente se comentará sobre el estado original de la estación IPA2 así como las modificaciones realizadas en hardware y software sobre la misma en función de los propósitos planteados.

### 1.1 Descripción del problema

El Laboratorio de Control de Procesos Industriales forma parte del ala añadida a bloque de Laboratorios de la FIEC. Como parte de su equipamiento fue adquirida una línea de envasado, la cual dispone de varias estaciones que conforman la estación IPA26.

La línea de producción, previamente mencionada, es desarrollada por Lucas-Nülle. El proceso arranca con una mezcla entre dos tintas usando como fluido base, el agua. Posteriormente esta mezcla es envasada en pequeños recipientes de vidrio, que son luego sellados y almacenados. La estación encargada de realizar la mezcla de líquido base y tintas se denomina IPA2.

Es sobre la estación IPA2 que el presente proyecto se desarrolla, la cual originalmente está orientada a realizar tareas secuenciales. Tras un análisis exhaustivo, se llegó a la conclusión que la misma posee capacidades de adaptación para mejora de funcionalidades y aprovechamiento de recursos.

En este contexto, aprovechando **la disponibilidad del equipo y apertura para la innovación que se promueve en la facultad y universidad en general**, se propone la repotenciación de sus funcionalidades. En el marco de la mejora planteada se implementó nuevas características que sirvan para aprendizaje de los estudiantes a través de guías de pre prácticas, prácticas y de aprendizaje.

## **1.2 Justificación del Proyecto**

Dado el estrecho lazo entre las áreas de Control de Procesos Industriales y Automatización Industrial, además del beneficio que representa para el estudiante el aprendizaje de diversas herramientas y marcas a usarse en el mundo laboral; el proyecto está enmarcado en desarrollo de nuevas y poderosas funciones en la estación de mezcla IPA2.

Es por esto, que aprovechando conocimientos básicos, adquiridos en cursos previos como Automatización Industrial, Control Automático e Instrumentación Industrial; se pondrán a consideración del estudiantado capacidades de equipos y software no antes utilizadas.

Lo anterior ayudará a la formación profesional de los futuros ingenieros así como de refuerzo a los conocimientos teóricos impartidos en la cátedra de Control de Procesos Industriales y aumento del conocimiento adquirido en diversas marcas y equipos industriales.

## **1.3 Propuesta de Solución**

En la actualidad, la unión de sistemas y su innovación es un área de gran auge y desarrollo. Industrialmente se suele mejorar o complementar un sistema existente, añadiendo características nuevas con pequeñas modificaciones en su forma física o software utilizado.

La planta IPA2 representa un ejemplo de un sistema que de fábrica posee funcionalidades fijas, pero que puede ser mejorado con mínimas modificaciones. Un sistema SCADA [2], es una herramienta ampliamente usada hoy en día. Se puede obtener control local y remoto del sistema, de tal forma que el operario así como un supervisor pueda realizar monitoreo y acciones sobre el proceso. Dada la función de mezclar tintas de la estación IPA2, un control de calidad por imágenes resulta un gran aditivo al mencionado al SCADA.

Además, considerando los tópicos a tratarse en la cátedra de Control de Procesos Industriales, y la disponibilidad de un tanque principal provisto de un sensor analógico y un actuador con influencia directa en el mismo; se diseñó e

implementó controladores PI de nivel. De este modo se dispone de un soporte práctico a la teoría impartida en las clases de la materia.

Las soluciones antes presentadas enmarcan además el uso de software de gran capacidad como son LabVIEW para el sistema SCADA, Matlab para el diseño de controladores PI y TIA Portal V13 para la programación y configuración del PLC S7-300 del que dispone la estación IPA2. Cabe recalcar que para la comunicación entre el PLC Siemens S7-300 y los software no distribuidos por Siemens (LabVIEW y Matlab) se estableció un canal OPC.

Finalmente se contempló el desarrollo de guías de pre prácticas, prácticas y aprendizaje (ver Anexos); para los estudiantes de Control de Procesos Industriales, de tal forma, que el conocimiento adquirido se dé de forma más ordenada y pedagógica.

La guía de prácticas, es un soporte para la correcta realización de la experiencia en el laboratorio. La misma otorga pautas y pasos a seguir de manera ordenada para el uso correcto de los equipos.

La guía de pre prácticas involucra la realización de pequeños trabajos de investigación o implementación que preparan al estudiante para la experiencia a desarrollarse en la práctica.

Finalmente la guía de aprendizaje, representa un soporte o apoyo para las tareas detalladas en la guía de pre practicas; de tal manera que el estudiante tenga un ejemplo desarrollado de lo solicitado como tarea.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

- o Aprovechar las capacidades de la estación de mezcla IPA2, que no fueron utilizadas por el fabricante.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- o Diseñar una variedad de controladores PI para la regulación de nivel en el tanque principal de la estación de mezcla IPA2.

- o Contrastar y analizar la respuesta de los controladores PI diseñados para la estación IPA2, por medio de pruebas de desempeño.
- o Implementar un sistema SCADA para el control y monitoreo de la estación de mezcla IPA2.
- o Rediseñar la interfaz HMI de la estación de mezcla IPA2.
- o Elaborar guías de pre-prácticas, prácticas y aprendizaje para el Laboratorio de Control de Procesos Industriales.

### **1.5 Estado original de la estación de mezcla IPA2**

Lucas-Nülle, desarrollador tecnológico alemán, tiene entre su catálogo de productos de automatización equipos de la línea IPA.

IPA tiene una variedad de equipos para implementar procesos y sistemas utilizados comúnmente en diversos tipos de manufactura.

La estación de mezcla IPA2, es un ejemplo de uno de los equipos desarrollados por Lucas-Nülle para entrenamiento en procesos que pertenecen a esta línea. La estación que se puede ver en la figura 1.1 [3], posee los componentes descritos a continuación:



**Figura 1.1: Imagen de IPA2 proporcionada en el manual del fabricante.**

- Dos caudalímetros
- Tres sensores binarios de nivel
- Una bomba de agua
- Dos tanques de almacenamiento de tinta
- Un tanque principal de mezcla
- Un módulo de adquisición de señales de sensores, y de control de la bomba de agua por medio de una tarjeta electrónica
- Válvula 3 vías 2 estados
- Válvula de evacuación manual
- Dos válvulas para paso de tinta a tanque de mezcla
- Dos válvulas para llenado de tanque almacenador de tinta

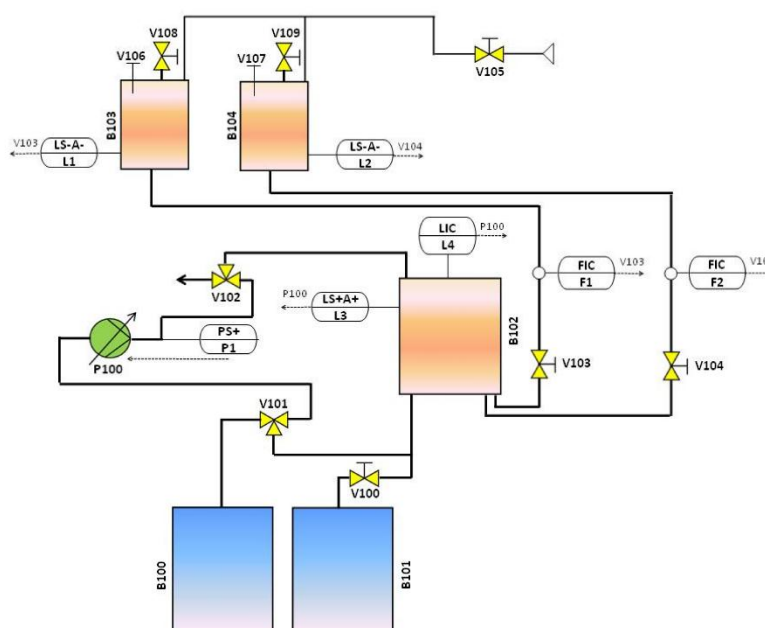
La estación de mezcla, como su nombre lo indica, tiene por objetivo mezclar las tintas (provenientes de los reservorios B103 y B104) con el líquido base (agua, proveniente de B100). Para lograr el cometido posee una bomba de agua que



lleva el fluido desde un reservorio hasta el tanque de mezclado, pasando por una válvula de tres vías dos estados.

El conjunto válvula-bomba tiene dos funciones principales; bombear el fluido base desde el reservorio B100, pasando por la válvula V101 para llegar al tanque de mezcla B102. La función restante permite al fluido existente en B102 recircular en el tanque principal.

Los elementos antes mencionados, se muestran de mejor forma en el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) de la figura 1.2 [3]:



**Figura 1.2: Diagrama DTI de la estación de mezcla IPA2.**

Por otra parte, existe una válvula manual (V100) a la salida del tanque de mezclado que permite la evacuación del líquido remanente al mismo.

Originalmente tanto el depósito de líquido base como el depósito al que llega la mezcla remanente evacuada por la válvula manual, son pequeños recipientes plásticos de aproximadamente un galón de volumen como se muestra en la figura 1.3.



**Figura 1.3: Reservorios originales de la IPA2.**

La estación de mezcla así como las demás estaciones de trabajo con las que cuenta el Laboratorio de Control de Procesos (que no se detallan en este documento) están provistas de un controlador lógico programable (PLC) Siemens Simatic S7-300 [4].

#### **1.6 Adecuaciones realizadas en Hardware en la estación de mezcla IPA2**

Dada la intención de diseñar controladores de nivel, se realizó una adaptación significativa en los componentes de la estación de mezcla. Con el fin de tener un reservorio de agua que permita la recirculación de la misma en el tanque de mezclado B102, se adaptó un recipiente rectangular construido en metal para almacenar el agua que sirve tanto para alimentar la bomba de la estación como para recibir el agua evacuada a través de la válvula manual.

Con la adecuación antes mencionada se implementaron los controladores que se describen en secciones posteriores, el recipiente adaptado tiene por medidas (todas en centímetros) 49, 50 y 35 como se ve en la figura 1.4.



**Figura 1.4: Adecuación física realizada a la estación IPA2.**

Para poder realizar la adaptación se utilizó acoples denominados “pasatanques”, tubería PVC de  $\frac{1}{2}$ ”, codos de  $\frac{1}{2}$ ”, bushings y finalmente cachimbas para empatar a la manguera de alimentación a la bomba y evacuación del tanque, respectivamente, ver figura 1.5.



**Figura 1.5: Elementos de conexión de tuberías.**

## **CAPÍTULO 2**

### **2 REVISIÓN DE CONCEPTOS Y METODOLOGÍA UTILIZADA PARA IMPLEMENTACIÓN DE FUNCIONALIDADES**

En el presente capítulo se describirán las configuraciones necesarias realizadas a lo largo del desarrollo del proyecto en los diversos software empleados.

El proyecto, se divide en dos subproyectos, el primero está orientado al área de automatización y consta del desarrollo de un SCADA para la estación de mezcla IPA2 así como del rediseño de la interfaz HMI de la planta.

La segunda parte del proyecto, está orientada al control PI de una planta, para esto se diseñaron tres controladores de este tipo. Los controladores fueron implementados en el tanque principal de mezcla de la estación IPA2, para mantener el nivel de una columna de agua en el mismo.

Cabe recalcar que los controladores fueron diseñados e implementados de manera independiente de las otras funciones secuenciales de la estación IPA2. Para la implementación, fueron necesarias modificaciones físicas; previamente detalladas en el capítulo 1.

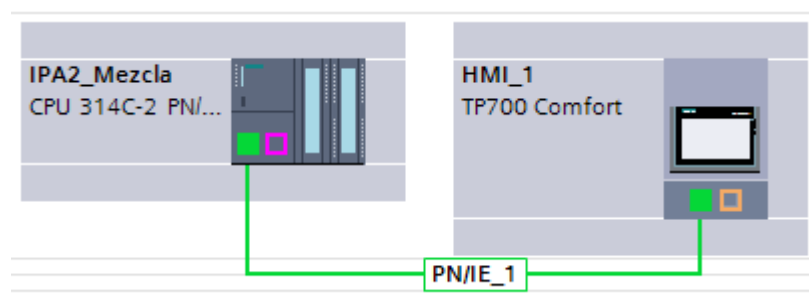
Durante la sintonización e implementación de los controladores, la válvula manual V100 (ver figura 1.2) se mantuvo totalmente abierta, para así permitir la recirculación de agua entre el tanque principal de mezcla y el reservorio (ver figura 1.4) adaptado.

A continuación se detalla de mejor manera la forma en que se implementaron ambas partes del proyecto.

## 2.1 Arquitectura utilizada en funcionalidades implementadas

### 2.1.1 Diseño de sistema SCADA e interfaz HMI

Los cambios en el diseño de la pantalla HMI fueron llevados a cabo en TIA Portal V13 SP1 y luego cargados al dispositivo. Se configuró que su comunicación para enlace de datos sea con el PLC de la estación de mezcla, obteniendo una red como se muestra en la figura 2.1.

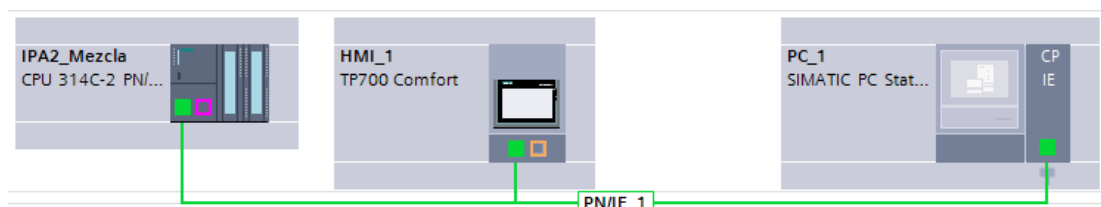


**Figura 2.1: Arquitectura de conexiones necesarias para implementación de pantalla HMI.**

Cabe mencionar que para el funcionamiento de esta arquitectura no es necesario el uso de una computadora, pues los programas ya se encuentran cargados en cada uno de los dispositivos y es desde estos que se ejecutan.

Los elementos de la pantalla HMI se encuentran enlazados a variables del PLC, por lo cual para permitir que esto sea posible es indispensable la conexión física de los equipos por medio de protocolo Profinet [5].

Por otro lado, cuando se diseñó un sistema SCADA para poder tener control remoto de la estación, se requirió de una computadora donde se ejecutó el sistema en LabVIEW, el cual obtuvo las variables a través de



**Figura 2.2: Arquitectura de conexiones necesarias para implementación de pantalla HMI & Sistema SCADA.**

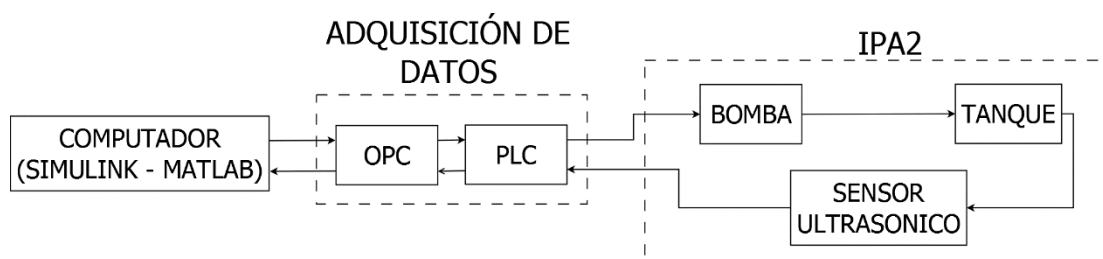
un canal OPC de NI [6], obteniendo una red como la mostrada en la figura 2.2.

Los elementos del sistema SCADA están enlazados a variables del PLC que se encuentran en el canal OPC de NI, estas a su vez tienen efecto sobre la ejecución del sistema siempre y cuando el selector se encuentre en modo remoto, mientras que cuando está en modo local estos elementos no tienen efecto y el control es ejecutado exclusivamente por la pantalla HMI. Es por esto que es necesario que exista una conexión física entre los tres dispositivos (usando nueva Profinet [5]).

### 2.1.2 Implementación de controladores PI

La implementación de los controladores PI se dio bajo dos diferentes lazos. Dos controladores se implementaron usando Simulink (Matlab), mientras que un tercer controlador se implementó con la sintonización automática de TIA Portal V13.

La arquitectura del lazo de control, que se usó con Simulink es el mostrado en la figura 2.3. En el mismo se puede ver cómo funciona la implementación elaborada. El computador ejecuta Simulink de manera continua, y es a través de un canal OPC, que Simulink tiene un enlace bidireccional con el PLC de la planta.

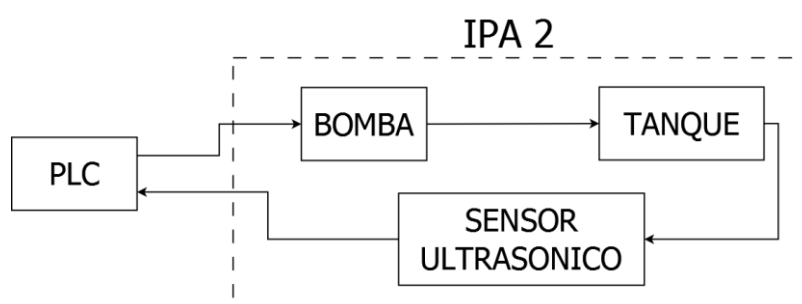


**Figura 2.3: Arquitectura del lazo de control para implementación de controladores PI en Simulink.**

El PLC por su parte es el encargado de enviar y recibir las señales de control desde y hacia la estación de mezcla IPA2. El actuador en este caso es la bomba de la que dispone la estación, la cual puede influir directamente en el tanque principal de la estación.

La altura de agua en el tanque principal se mide indirectamente a través del sensor ultrasónico, para ser retroalimentada al PLC y a su vez a Simulink. Es, en Simulink, donde se realizan los cálculos necesarios tanto para el proceso de sintonización del controlador como para su implementación y prueba final.

De manera similar se puede observar en la figura 2.4 el lazo de control usado para la implementación del controlador PI sintonizado a través de TIA Portal V13.



**Figura 2.4: Lazo de control para implementación de controlador PI sintonizado en TIA Portal.**

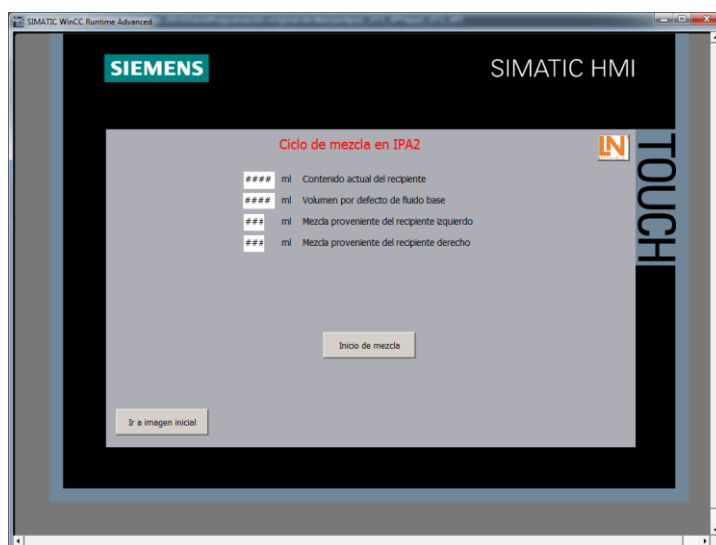
Para este caso el lazo es más sencillo, el PLC trabaja de manera directa sobre la planta, dado que el mismo tiene cargado en su memoria el programa donde se detallan las constantes del controlador PI en funcionamiento.

Nuevamente es la bomba el actuador que puede influir directamente sobre el tanque de la estación IPA2. Mientras que el sensor ultrasónico nos permite conocer de manera indirecta la altura de agua en el tanque.

Ambos elementos descritos anteriormente se encuentran en comunicación permanente con el PLC, de tal manera que este último pueda realizar la tarea de control especificada.

## 2.2 Rediseño de interfaz HMI

Al revisar la programación original de la estación de mezcla IPA2, se encontró que la correspondiente a la pantalla HMI era muy simple y carecía de representación en tiempo real del funcionamiento de los elementos de la planta. Se presenta en la figura 2.5 el HMI que corresponde a la programación original de la planta.



**Figura 2.5: Pantalla HMI original de la estación IPA2.**

Es por esta razón que se decidió implementar una pantalla HMI en la cual se pueda observar una representación de cada uno de los componentes de la estación de mezcla IPA2, apoyándonos en las animaciones de apariencia & visibilidad, representación de una variable de proceso por medio de barras y campos de E/S. Lo anterior, dio como resultado la interfaz que se muestra en la figura 2.6.





**Figura 2.6: Menú principal de la interfaz HMI rediseñada.**

La pantalla “Menú Principal (ver figura 2.6)” presenta los datos del proyecto de graduación realizado y el botón para inicializar todos los procesos a implementarse en la estación de mezcla. Además cada una de las pantallas tiene botones para cambiar entre las posibles funciones secuenciales.

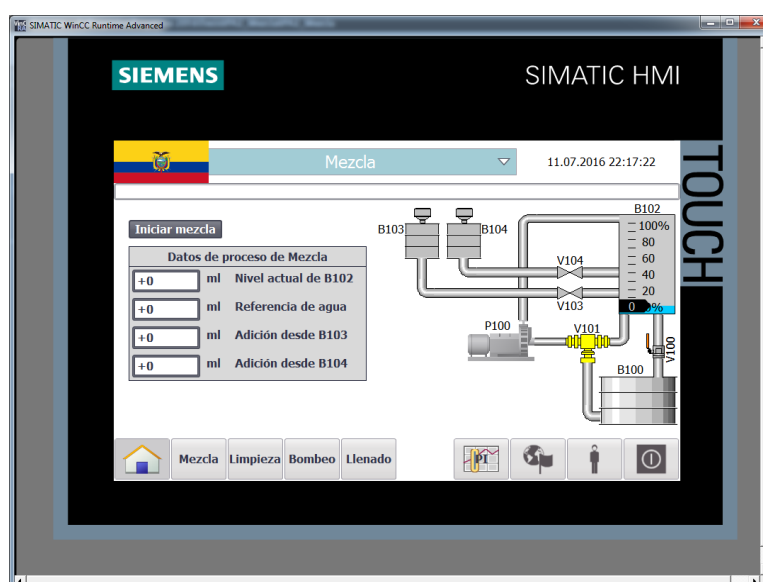
Todos los procesos ejecutables en la estación de mezcla presentan mejoras, en las cuales, se puede apreciar en tiempo real el comportamiento de las salidas digitales del PLC por medio de cambio de colores en los sensores y actuadores representados en el gráfico, de acuerdo a lo siguiente:

- Columna celeste cuya altura representa el nivel de la columna de agua en el tanque B102 que es obtenido por el sensor ultrasónico de la planta.
- Cambio de color de la bomba B100 a verde cuando esta se encuentra encendida y a color gris cuando se encuentra apagada.
- Cambio de color de la válvula V103 a azul cuando esta se encuentra abierta y a color gris cuando se encuentre cerrada.
- Cambio de color de la válvula V104 a amarillo cuando esta se encuentra abierta y a color gris cuando se encuentra cerrada.

- Cambio de color de V101 a verde cuando permite bombear desde el reservorio B100 y a color amarillo cuando permite al fluido recircular en el tanque B102.

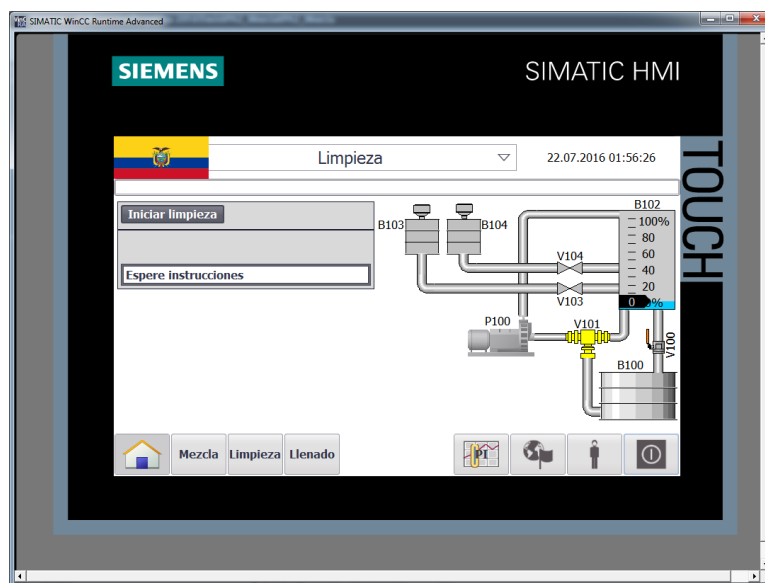
Además se mantienen las bondades (visualización de valores decimales en tiempo real, botones de control) que poseía la anterior pantalla HMI desarrollada por el técnico responsable de la instalación de la planta.

En las figuras 2.7, 2.8 y 2.9 se pueden observar las pantallas correspondientes a cada una de las funciones disponibles de la estación IPA2 (Mezcla, Limpieza y Llenado).



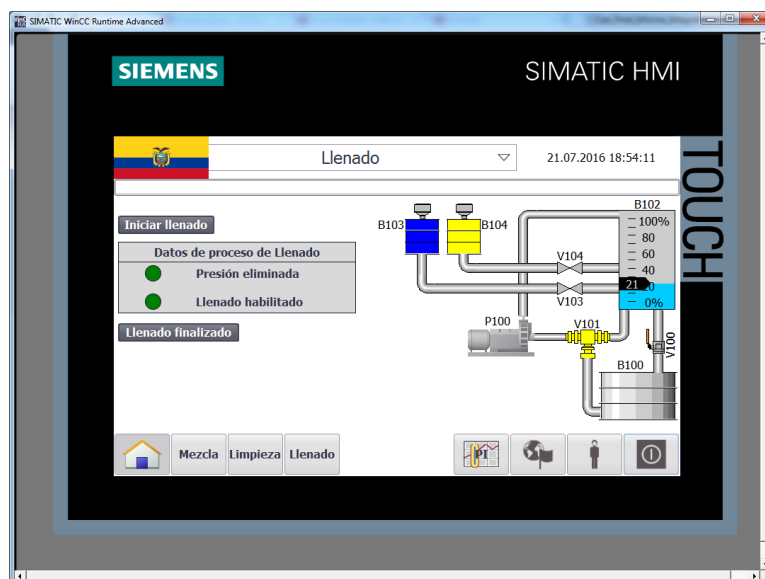
**Figura 2.7: Función de mezcla en la pantalla HMI rediseñada.**

En la pantalla de “Mezcla” se tendrá a disposición un botón para dar inicio al proceso, además se podrá visualizar en tiempo real el nivel del tanque principal B102 y se podrá observar el estado de los actuadores de acuerdo a las propiedades de apariencia y visualización descritas anteriormente.



**Figura 2.8: Función de limpieza en la pantalla HMI rediseñada.**

En la pantalla de “Limpieza” se dispone de un botón para dar inicio al proceso, además se tiene un campo de entrada/salida simbólico el cual muestra mensajes al usuario para comunicar instrucciones a seguir durante la ejecución.



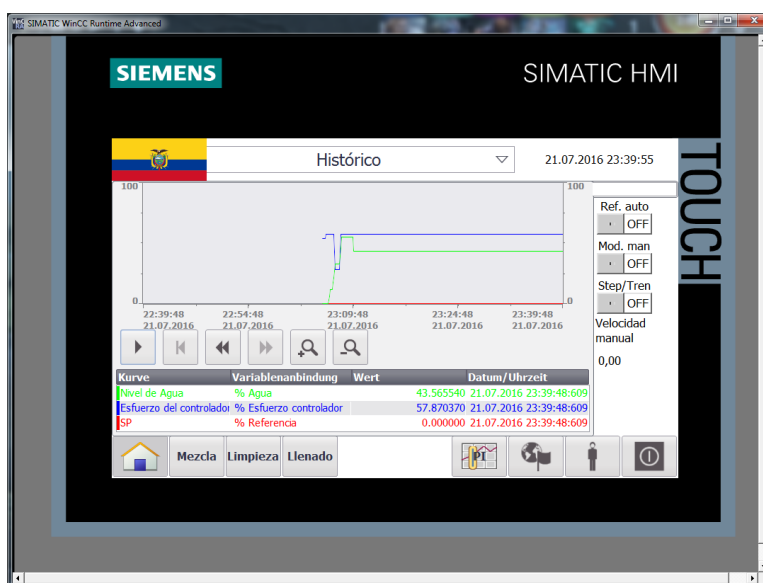
**Figura 2.9: Función de llenado en la pantalla HMI rediseñada.**

En la pantalla de “Llenado” se tiene dos botones cuya función son la de iniciar el proceso y comunicar al PLC que se ha terminado de llenar los tanques B103 y B104. Además se poseen dos indicadores para informar al usuario que la presión

ha sido eliminada en los reservorios de tinta (B103, B104) y que el llenado ha sido habilitado.

Nuestra pantalla HMI también posee la opción de visualizar un histórico de los valores en porcentaje de las variables: Columna de agua, Velocidad de la bomba y Referencia (variable usada solamente en el diseño e implementación de controladores PI).

En la figura 2.10 se puede apreciar las gráficas correspondientes al proceso de mezcla (por lo cual el valor de Referencia es cero).

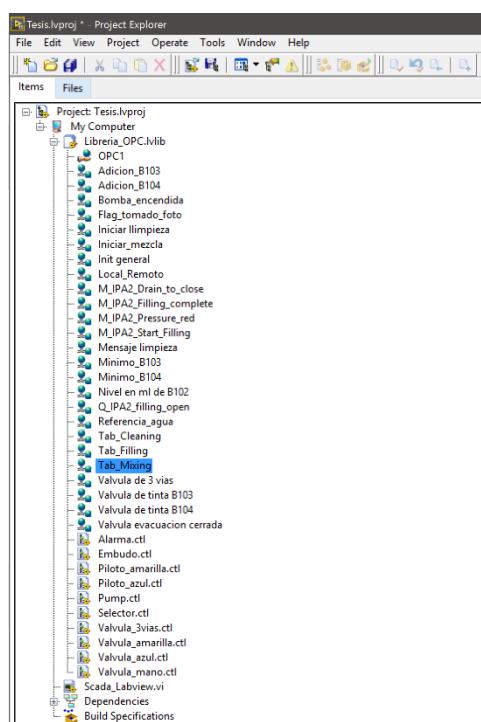


**Figura 2.10: Histórico en pantalla HMI rediseñada.**

### 2.3 Diseño e implementación sistema SCADA

Con el fin de ampliar las formas de control de la estación IPA2, se diseñó e implementó un sistema SCADA usando NI LabVIEW 2015.

La figura 2.11 muestra todos los elementos configurados en el proyecto de LabVIEW con el propósito de configurar el SCADA y demás opciones. Para la creación de las variables compartidas en LabVIEW se usó un canal OPC mediante el servidor propio del fabricante, a saber, NI OPC Server [5].



**Figura 2.11: Lista de variables creadas y usadas en proyecto de LabVIEW.**

La presentación del sistema SCADA es análoga al HMI implementado. En el mismo se puede controlar y monitorear cada una de las funciones disponibles en IPA2.

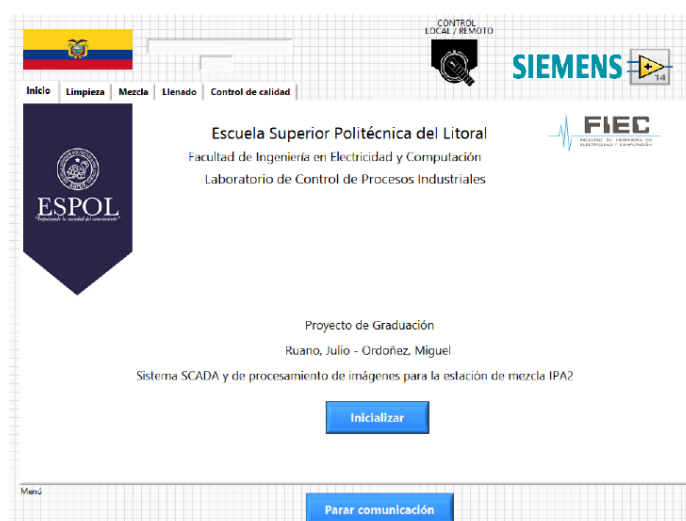
A continuación se describe con mayor detalle la interfaz desarrollada.

### 2.3.1 Interfaz desarrollada en LabVIEW

El sistema SCADA desarrollado cuenta con una pestaña principal como se muestra en la figura 2.12, donde se puede detener la comunicación de ser necesario; mientras que el selector superior permite conmutar entre dos modos de operación: Local o Remoto.

El modo Local le otorga el control al usuario u operador a través de la interfaz HMI de IPA2, mientras que el modo Remoto permite control únicamente por el SCADA desarrollado en LabVIEW.

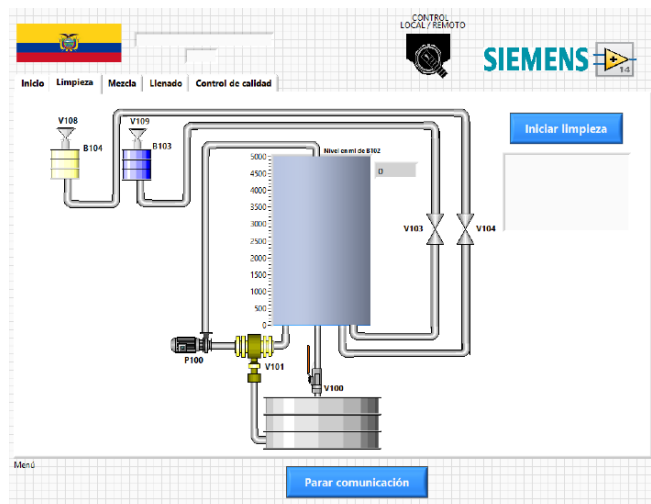
En la pestaña “Principal” se puede inicializar el funcionamiento de la planta, de tal manera que quede lista para recibir comandos de cualquiera de las otras funciones disponibles.



**Figura 2.12: Pestaña principal del SCADA desarrollado.**

La figura 2.13 muestra la pestaña donde se tiene disponibles la función de Limpieza de IPA2. En la misma se puede dar inicio a este proceso, además de monitorearlo una vez arrancado a través de los elementos con animaciones desarrollados con el módulo DSC [5].

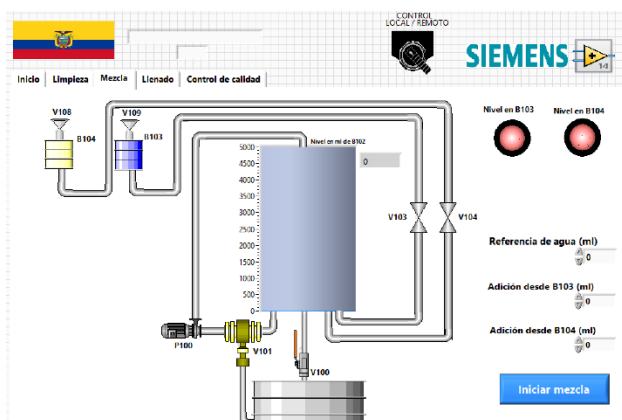
Se dispone además de un indicador de texto donde se muestran mensajes referentes al proceso, así como indicaciones al usuario u operador que lo esté realizando.



**Figura 2.13: Pestaña de limpieza del SCADA desarrollado.**

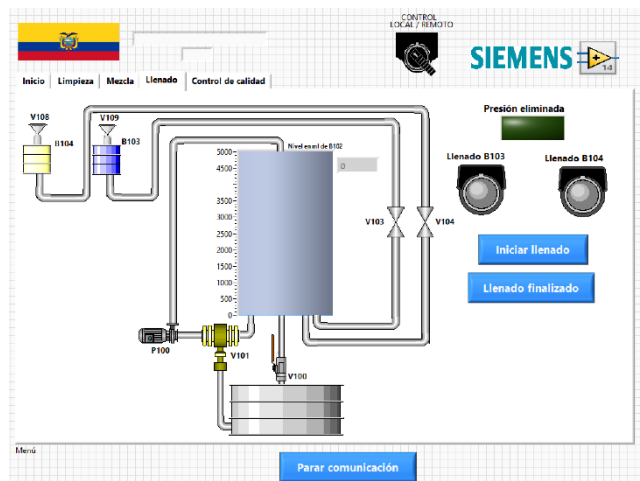
La siguiente pestaña desarrollada es la de “Mezcla”, mostrada en la figura 2.14. En dicha sección se puede iniciar y monitorear el proceso dedicado a esta función. Se dispone de manera similar del diseño del proceso con animaciones para interactuar con el operador, así como de los controles necesarios para iniciar el proceso.

En el sistema desarrollado se puede escoger la cantidad de líquido base a mezclar así como de tintas. De manera similar se tiene a disposición indicadores de atención por niveles bajos de tinta en los reservorios.



**Figura 2.14: Pestaña de mezcla del SCADA desarrollado.**

La pestaña de “Llenado”, mostrada en la figura 2.15, de manera análoga a las anteriores permite el control y monitoreo de esta funcionalidad. Posee los indicadores necesarios para la interacción con una persona durante el proceso de llenado de los recipientes de tinta.



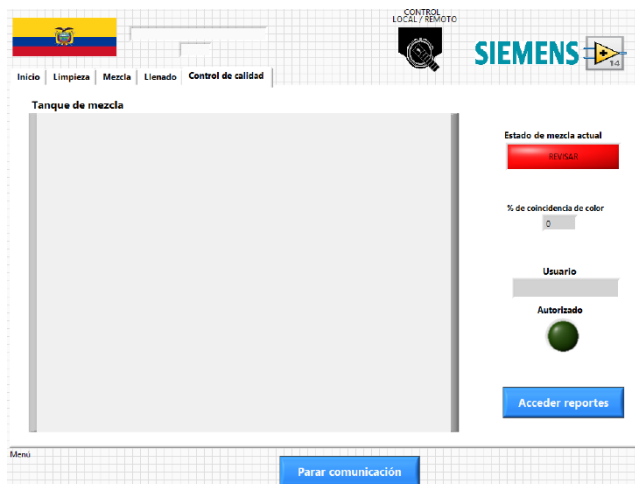
**Figura 2.15: Pestaña de llenado del SCADA desarrollado.**

Finalmente se tiene la pestaña de “Control de calidad”, mostrada en la figura 2.16. En esta pestaña se puede monitorear en tiempo real el tanque principal de IPA2 a través de una cámara web. Además permite conocer el porcentaje de coincidencia del color de la mezcla producida respecto a un valor definido previamente como referencia.

La adquisición de imágenes de modo continuo así como su correspondiente comparación con una referencia previamente establecida, fue posible gracias a los módulos de visión de LabVIEW denominados NI Vision Acquisition Software (NI VAS) [6] y NI Vision Development Module [7].



La pestaña en mención, posee también la posibilidad de validar usuarios a través de un lector de códigos QR. De esta forma restringe el acceso a la carpeta de reportes, que contiene registros de las veces que el proceso de mezcla fue activado así como fotos de cada uno de los resultados de mezclas obtenidos.



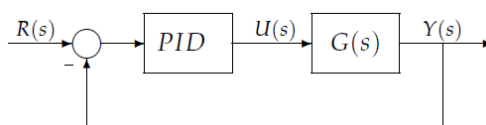
**Figura 2.16: Pestaña de Control de calidad del SCADA desarrollado.**

## 2.4 Diseño e implementación de controladores PI

### 2.4.1 Controladores PID

#### Generalidades sobre controladores PI

En la figura 2.17 se muestra una representación en diagrama de bloques del funcionamiento de un controlador PID en una planta con función de transferencia  $G(s)$  [8].



**Figura 2.17: Diagrama de bloques del funcionamiento de un controlador PID en lazo cerrado.**

Los controladores PID poseen tres acciones las cuales son: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Las dos primeras tienen una función que se describe a continuación:

P: Produce una salida al controlador que es proporcional al error, que se representa de la siguiente manera en el dominio del tiempo y de la frecuencia, como se ve en la ecuación 2.1.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \Rightarrow C_p(s) = K_p \quad (2.1)$$

I: Produce una salida al controlador que es proporcional al error acumulado, que se representa de la siguiente manera en el dominio del tiempo y la frecuencia, como se ve en la ecuación 2.2.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \Rightarrow C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (2.2)$$

Entonces el controlador PI se define por la siguiente expresión dada en la ecuación 2.3:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \Rightarrow C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.3)$$

Donde  $T_i$  se denomina tiempo integral y es el tiempo durante el cual se acumula el error en la parte integral del controlador.

La parte proporcional del controlador dará una acción de control diferente a cero siempre que exista error, mientras que en la parte integral cualquier error positivo pequeño generará una acción de control positiva y análogamente un error negativo generará una acción de control negativa. Por tanto una vez alcanzado el estado estacionario, el error siempre será cero.

### **Diseño de controladores PID a través de su lugar de las raíces**

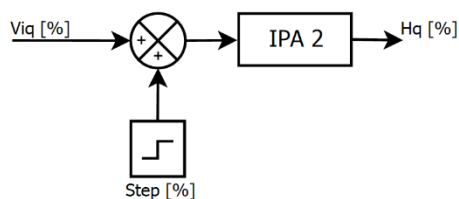
Para poder obtener el lugar de las raíces de la planta IPA2 fue necesario modelarla mediante su función de transferencia.

Para esto se usó el método de caracterización de la respuesta al paso [9] en doce pruebas consecutivas; seguidamente se usó el criterio de Chauvenet [10] para eliminar los datos aberrantes de los resultados obtenidos.

A continuación se detalla de forma específica como se realizaron las pruebas de la respuesta al paso.

### Respuesta al paso

La prueba desarrollada a la planta puede verse de mejor manera en el diagrama de bloques mostrado en la figura 2.18.



**Figura 2.18: Diagrama de bloques de la respuesta al paso de IPA2.**

Para alcanzar el punto de operación escogido se alimenta a la bomba de la estación de mezcla con un voltaje fijo denominado  $V_{iq}$ , el mismo es expresado en porcentaje en su escala de 0 a 10 Voltios. Por otro lado, el nivel de agua en el tanque tiene una altura denominada  $H_q$ , medida también en porcentaje de su escala que va de 0 a 25 centímetros aproximadamente.

Tras un tiempo prudente el sistema alcanzó su punto de operación, donde el nivel se mantuvo estable. Al llegar a esta situación la señal  $Step$ , medida también en porcentaje, añade una componente que aumenta el voltaje de alimentación de la bomba.

Tras esto se puede recopilar la respuesta del sistema al cambio de un paso en la excitación de la bomba.

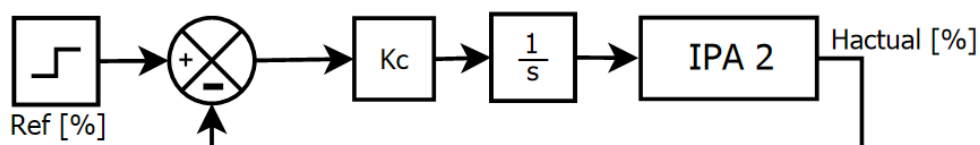
Una vez obtenida la respuesta del sistema alrededor del punto de operación se procedió a manipular el lugar de las raíces para obtener niveles aceptables de tiempo de asentamiento y sobreelongación.

### **Sintonización de controladores a través de su respuesta en lazo cerrado utilizando metodología Ziegler-Nichols**

Ziegler y Nichols publicaron sus conclusiones experimentales en un paper de 1942 [11], donde expusieron un método para sintonización de las constantes de un controlador PID a través de una prueba de lazo cerrado de una planta.

Para poder aplicar dicho método en nuestra planta, se añadió un polo al sistema de tal manera que el mismo se convierta en un sistema de segundo orden. Además, se cerró el lazo con la constante  $K_c$ , que servirá para hallar la ganancia crítica del sistema y aplicar la sintonización propuesta por Ziegler y Nichols.

El diagrama de bloques del proceso antes descrito se ve en la figura 2.19:



**Figura 2.19: Diagrama de bloques de sintonización por método de Ziegler-Nichols.**

Vale la pena aclarar que en este diagrama de bloques se asume al sistema ubicado ya en el punto de operación, al que fue llevado a través de un lazo abierto.

Al alcanzar dicho punto se cierra el lazo y se envía un cambio en la referencia respecto al valor actual de la variable medida. Se debe tomar varias lecturas para ganancias  $K_c$  diferentes hasta obtener que a la salida del sistema se encuentren oscilaciones sostenidas y visibles.

Debido a la introducción de un polo adicional al lazo de la planta, el controlador a diseñarse fue seleccionado como PD, de tal forma que por la acción del término integrador se comporte de forma general como un controlador PI.

### **Sintonización de controladores a través de sintonización automática de TIA Portal V13**

Los controladores lógicos programables (PLC) SIMATIC usan el bloque "CONT\_C" para realizar el control en procesos con entradas y salidas continuas. El mismo puede ser usado de dos formas:

Modo manual: En el modo manual el usuario puede variar el valor de la salida del controlador manualmente.

Modo automático: La variable manipulada cambiará en función de las constantes del controlador.

Para poder aplicar esta herramienta de SIEMENS de forma óptima, se usó una sintonización automática por medio del bloque "TUN\_EC", el cual utilizó las variables de proceso y la manipulada en una escala de 0 a 100%, además tuvo que ser interconectado con el bloque "CONT\_C" para que, de esta manera, por medio de los algoritmos de estas funciones se pueda realizar un control apropiado del nivel de agua en la estación de mezcla IPA2.

A continuación, en la Tabla 1 se puede apreciar las conexiones realizadas entre estos dos bloques, las cuales siguen las instrucciones de la ayuda de TIA Portal [12]:

TUN_EC	CONT_C
PV	PV
LMN	LMN
NORM_FAC	--
WRITE_DIS	--
MAN_OUT	MAN
SP_OUT	SP_INT
GAIN	GAIN
TI	TI
TD	TD
TM_LAG	TM_LAG
RATIOFAC	--
PHASE	--
QMAN_ON	MAN_ON
QI_SEL	I_SEL
QD_SEL	D_SEL
QWRITE	--

**Tabla 1: Interconexión de los bloques TUN\_EC y CONT\_C en TIA Portal.**

Para poder comparar este controlador con los obtenidos por otros métodos, se lo tuvo que diseñar alrededor del mismo punto de operación y en vista que, para realizar la optimización es indispensable que la planta se encuentre en condiciones estáticas, inicialmente el controlador funcionó en modo manual con la variable “MAN\_ON=1”, con una salida analógica fija de 3.9V (equivalente al 39%).

Una vez que el nivel se encontró estable fue necesario seleccionar la opción PI en la “Puesta en servicio” del bloque, también se tuvo que fijar la referencia del controlador en un valor que sea mayor al variable del

proceso por al menos 10 unidades. Hecho esto, se cambió el modo de operación del bloque “TUN\_EC” a “Optimización Inicial”. En cuanto las configuraciones anteriores se encontraron listas, se conmutó el funcionamiento del controlador a modo automático con la variable “MAN\_ON=0”.

Finalmente, el PLC inició la optimización de las variables del controlador. Este proceso tuvo tres etapas fundamentales, las cuales son [12]:

- Búsqueda del punto de inflexión.
- Regulador PI grueso
- Modo normal del regulación

Al encontrarse en modo manual ya se obtienen los valores de las constantes del controlador a usar, las cuales luego pueden ser cargadas en un programa donde solo se encuentre el bloque “CONT\_C”.

#### 2.4.2 Metodología para diseño de controladores PI con Matlab

A continuación se detallarán configuraciones necesarias para el diseño e implementación de controladores PI a través de Matlab y sus recursos Simulink, Sisotool y el Identificador de sistemas.

#### Establecimiento de comunicación OPC entre PLC S7-300 y Simulink: Direccionamiento de entradas y salidas en PLC Siemens Simatic S7-300

Como primer paso se debe direccionar de manera adecuada las variables a usarse en el PLC, en esta ocasión se utilizaron las mostradas en la figura 2.20:





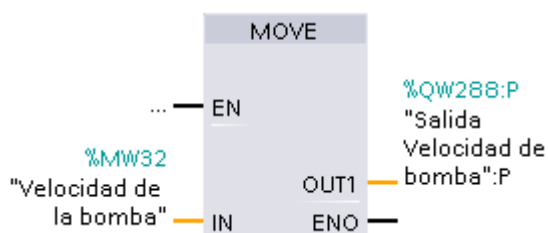
PLC tags					
		Name	Tag table	Data type	Address
1		Velocidad de la bomba	Default tag table	Int	%MW32
2		Salida Velocidad de bomba	Default tag table	Word	%QW288
3		Entrada sensor ultrasonido	Default tag table	Int	%IW288
4		Enable bomba	Default tag table	Bool	%Q0.0

Figura 2.20: Tabla de variables del PLC en TIA Portal.



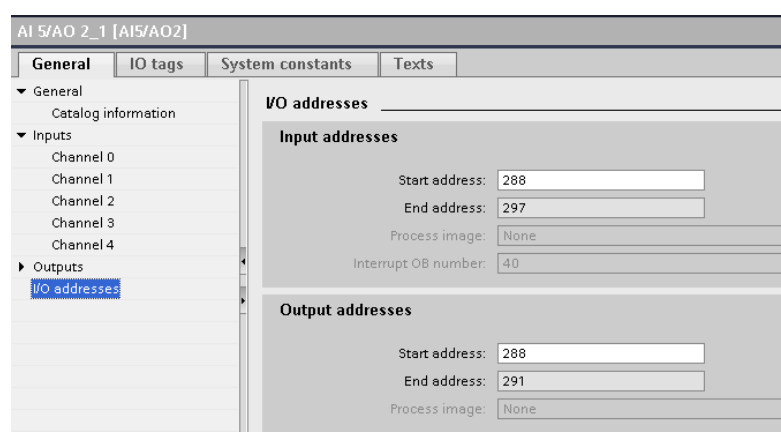
Para poder escribir a través del cliente OPC en la localidad de salida analógica del PLC se utilizó como variable auxiliar la marca %MW32 a través del código mostrado en la figura 2.21, que se ubicó en el bloque principal de programa del PLC:



**Figura 2.21: Instrucción necesaria para escritura en salida analógica de PLC.**

Cabe recalcar que lo descrito previamente constituye las únicas configuraciones de software usadas en el PLC dado que todo el control y adquisición se realiza a través de la herramienta Simulink de Matlab usando OPC [13] como medio de comunicación de las dos plataformas.

Se debe además tener cuidado con las configuraciones de hardware del PLC, las cuales deben concordar con lo usado hasta ahora. El direccionamiento de las entradas y salidas en los módulos analógico y digital del PLC son respectivamente los mostrados en la figura 2.22 y 2.23:



**Figura 2.22: Configuración de direcciones de entradas y salidas analógicas en TIA Portal.**

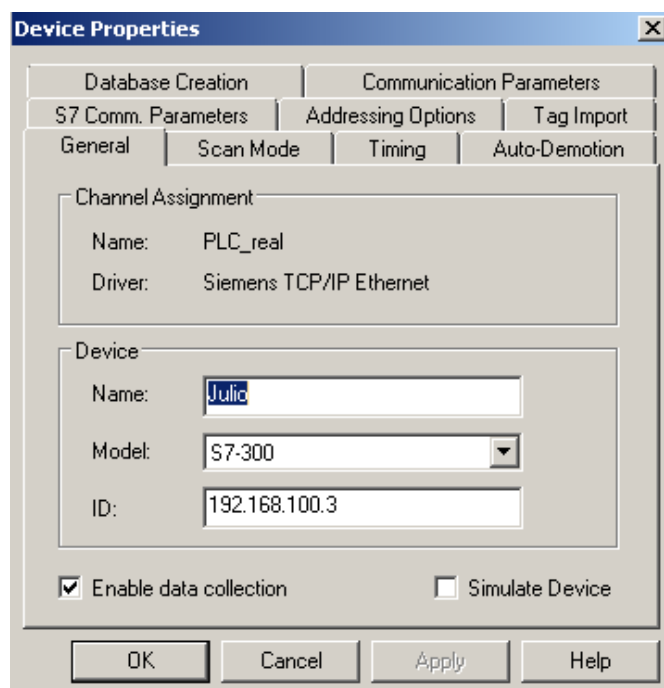
I/O addresses	
<b>Input addresses</b>	
Start address:	0
End address:	2
Process image:	OB1-PI
Interrupt OB number:	40
<b>Output addresses</b>	
Start address:	0
End address:	1
Process image:	OB1-PI

**Figura 2.23: Configuración de direcciones de entradas y salidas digitales en TIA Portal.**

### **Configuración del canal OPC**

Para establecer la comunicación OPC entre las variables del PLC S7-300 y Simulink se usó KepServerEx 5, en el mismo se creó un canal de comunicación al autómatas antes mencionado [14].

Previamente en TIA Portal V13 se estableció la dirección IP 192.168.100.3 al PLC por lo que la misma fue también ubicada en el dispositivo de KepServer como se muestra en la figura 2.24.



**Figura 2.24: Configuración del PLC añadido al canal OPC en KepServer.**

En el dispositivo se crearon las mismas etiquetas que se mencionaron previamente como necesarias al referirse sobre el direccionamiento del PLC, como se observa en la figura 2.25.

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling
Velocidad_bomba	MW32	Word	100	None
Valvula 3 vias	Q0.1	Boolean	100	None
Sensor ultrasonido	PIW288	Word	100	None
Enable_Bomba	Q0.0	Boolean	100	None

**Figura 2.25: Etiquetas creadas en el canal OPC.**

### Configuraciones necesarias en Simulink

Al abrir un nuevo modelo en Simulink, se debe ingresar los bloques de comunicación OPC como primer paso [13].

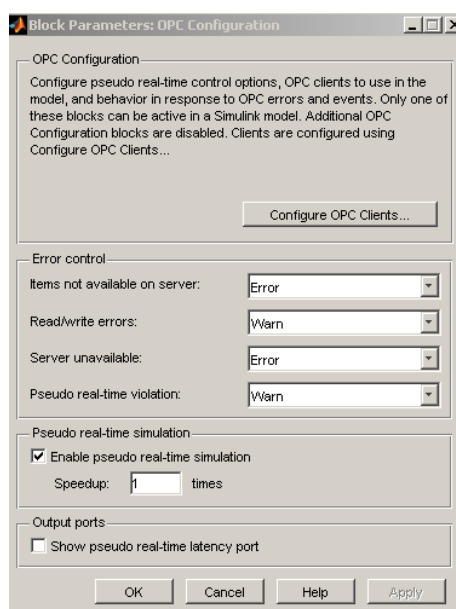
En la librería de Simulink se encuentran los siguientes bloques como parte de recursos OPC (ver figura 2.26).



**Figura 2.26: Bloques para comunicación OPC en Simulink.**

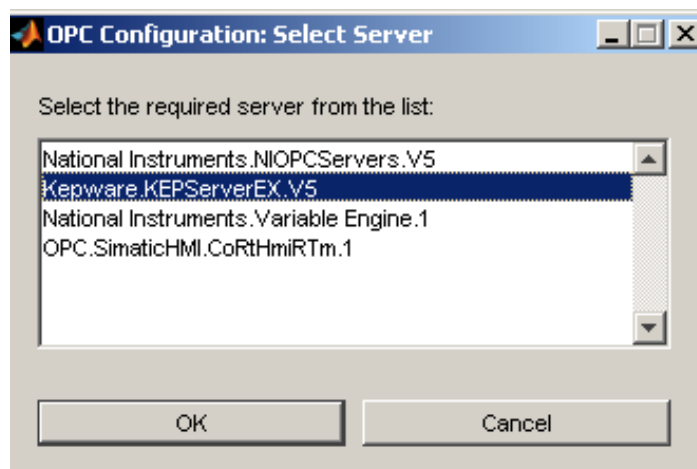
De los anteriores se usa el primero, tercero y cuarto que corresponden a: la configuración del cliente OPC, lectura de una etiqueta creada en el servidor y escritura de una etiqueta creada en el servidor, respectivamente.

Al añadir el bloque de configuraciones a nuestro modelo, se puede abrir su cuadro de diálogo, ver figura 2.27.



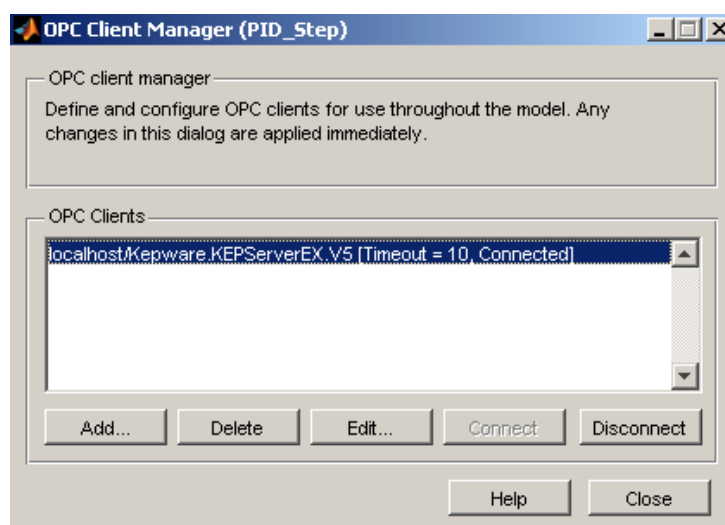
**Figura 2.27: Configuración de canal OPC en Simulink.**

En la opción de Configurar clientes OPC, se conecta el modelo con KepServer, abriendo dicho cuadro de diálogo y utilizando la función “Añadir” que se nos presenta se busca el servidor antes mencionado como se muestra en la figura 2.28:



**Figura 2.28: Lista de canales OPC disponibles en el computador.**

Se escoge KepServerEx V5 y se acepta, posteriormente en la ventana de clientes OPC se selecciona la opción Conectar. De establecerse correctamente la comunicación, el estado del cliente OPC pasará a Conectado (ver figura 2.29).



**Figura 2.29: Conexión con el canal OPC deseado.**

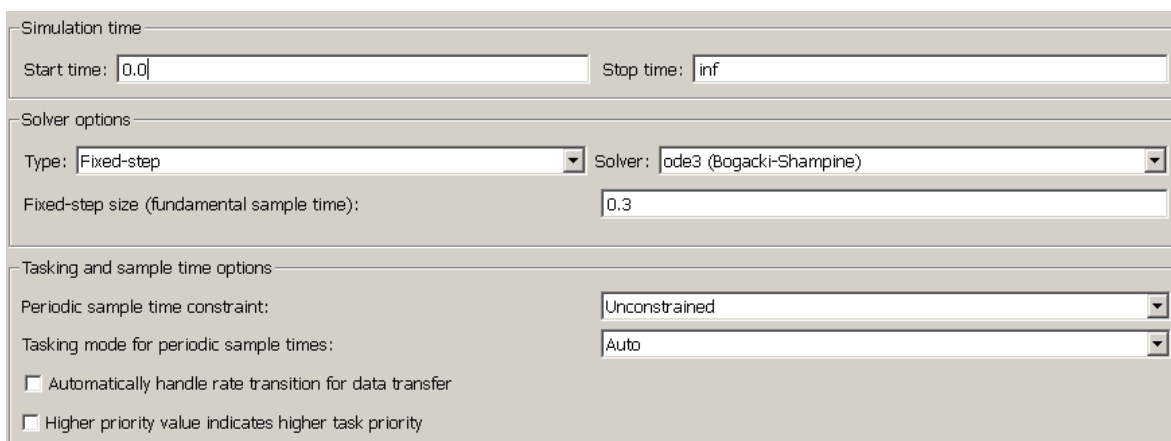
### **Breve descripción del modelo de Simulink usado para comunicación**

Para el desarrollo de los dos métodos basados en Simulink comunicado vía OPC al PLC S7-300 se usó un modelo de bloques.

Este modelo emplea los bloques disponibles en la paleta OPC de Simulink así como las demás funciones que permiten implementar de forma correcta los escalamientos y ajustes necesarios.

Las configuraciones de los parámetros de simulación usados para este modelo son las siguientes; en el tiempo de simulación se ubicó la opción “inf” para que la comunicación se mantenga hasta que el usuario pare la ejecución.

En los parámetros de configuración del modelo (opción disponible en Menú Simulación de Simulink), se selecciona “Paso fijo” en las opciones del Solucionador, estableciéndolo en 0.3 segundos con un método de solución de ecuaciones diferenciales de orden 3 (ode3) como se ve en la figura 2.30.

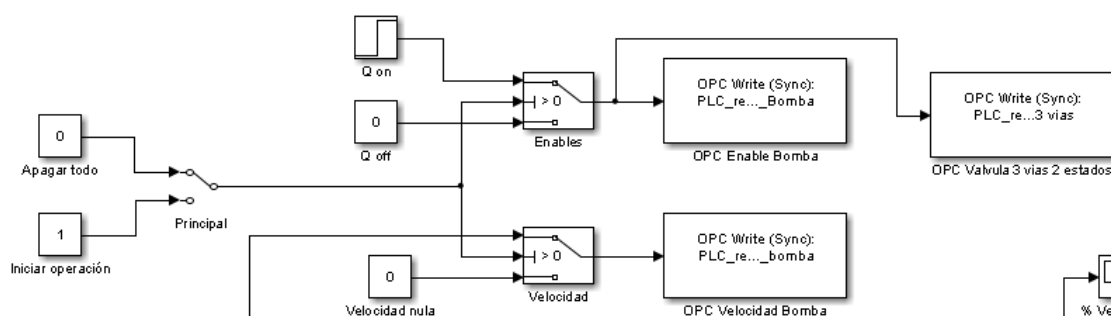


The image shows the Solver Configuration dialog box in Simulink, divided into three sections:

- Simulation time:** Start time: 0.0, Stop time: inf
- Solver options:** Type: Fixed-step, Solver: ode3 (Bogacki-Shampine), Fixed-step size (fundamental sample time): 0.3
- Tasking and sample time options:** Periodic sample time constraint: Unconstrained, Tasking mode for periodic sample times: Auto, and two unchecked checkboxes: "Automatically handle rate transition for data transfer" and "Higher priority value indicates higher task priority".

**Figura 2.30: Configuraciones necesarias para el modelo de bloques de Simulink.**

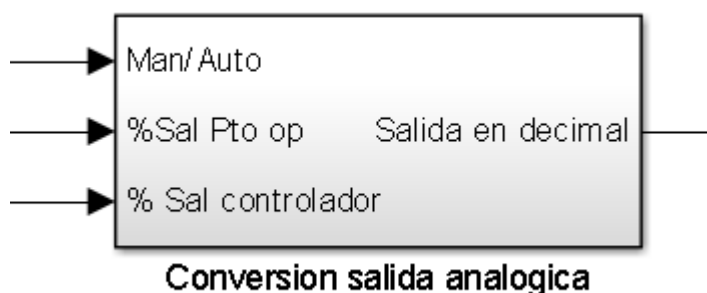
Cabe recalcar que el paso seleccionado (0.3 segundos) debe ser además ubicado en los tiempos de muestreo de los bloques de lectura y escritura OPC del modelo.



**Figura 2.31: Selectores de mando del diagrama de bloques para comunicación OPC.**

Una vez que se corrió el modelo, el mismo se comunicó de manera directa vía OPC con el PLC. El selector Principal mostrado en la figura 2.31 permite enviar las señales de habilitación de la válvula de tres vías, de la bomba así como la señal de velocidad de la misma. De esta forma dicho selector se convierte en el mando maestro del modelo.

Un punto importante a considerar es la velocidad de la bomba, la misma puede tener dos valores, cero o la salida del bloque “Conversión salida analógica” que se muestra en la figura 2.32.



**Figura 2.32: Bloque de “Conversión salida analógica”.**

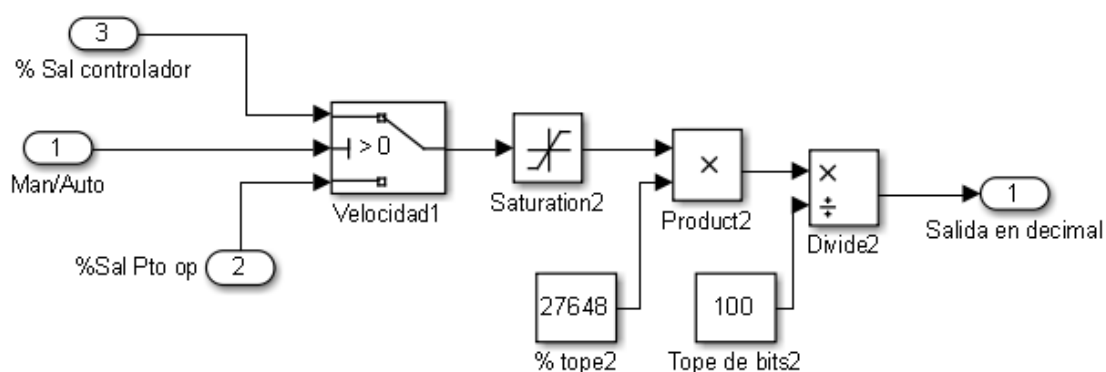
### Bloque Conversión salida analógica

Este bloque tiene tres entradas y una salida, las características de cada una de ellas se detalla en la Tabla 2:

Denominación	Entrada/Salida	Función
Man/Auto	Entrada	Selector de modo de trabajo
%Sal Pto op	Entrada	Valor porcentual de velocidad de bomba para punto de operación
% Sal controlador	Entrada	Valor porcentual de velocidad de bomba dada por controlador
Salida en decimal	Salida	Valor ajustado en decimal (0 a 27648) del porcentaje de velocidad de la bomba para salida analógica del PLC

**Tabla 2: Entradas y salidas de bloque de “Conversión salida analógica”.**

La máscara interna del bloque es la mostrada en la figura 2.33:



**Figura 2.33: Máscara interna del bloque “Conversión salida analógica”.**

De la máscara se puede entender con mayor facilidad su funcionamiento, la entrada “Man/Auto” permite seleccionar si a la salida del bloque “Velocidad1” se tiene la velocidad del punto de operación o la velocidad a la salida del controlador.

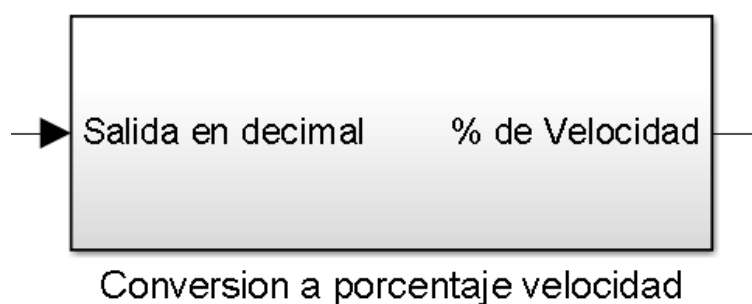
Seguidamente del bloque “Velocidad1” se tiene un saturador, esto recordando que cualquiera de las dos entradas de velocidad está en porcentaje. El saturador restringe el valor al intervalo de 0 a 100, para luego



pasar un ajuste matemático que permite obtener el valor en decimal de 0 a 27648.

### **Bloque Conversión a porcentaje velocidad**

El bloque “Conversión a porcentaje velocidad”, cuya grafica se muestra en la figura 2.34, permite reajustar nuevamente el valor que se escribe en la salida analógica a un valor porcentual para su mejor observación.



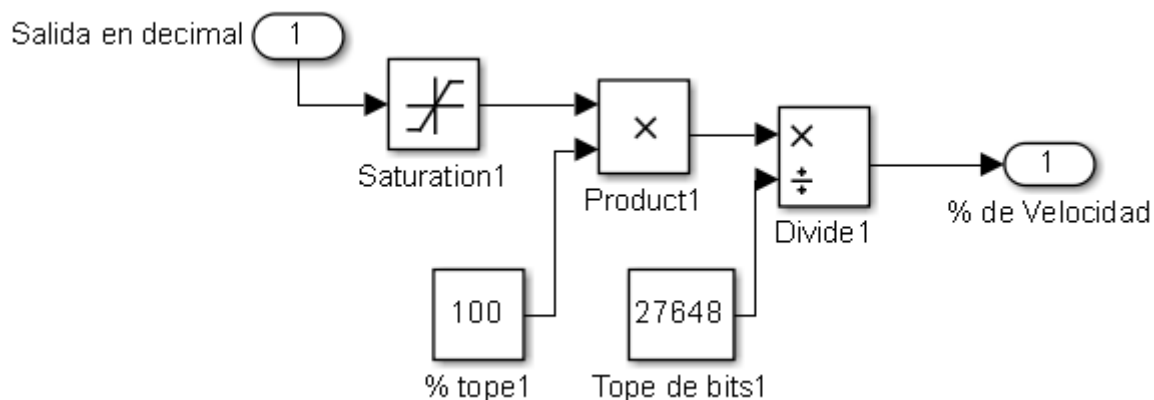
**Figura 2.34: Bloque “Conversión a porcentaje de velocidad”.**

Este bloque solo cuenta con una entrada y una salida, tal como se indica en la Tabla 3:

Denominación	Entrada/Salida	Función
Salida en decimal	Entrada	Valor en decimal que se escribe en PLC
% de Velocidad	Salida	Valor porcentual que se escribe en PLC

**Tabla 3: Entrada y salida del bloque “Conversión a porcentaje de velocidad”.**

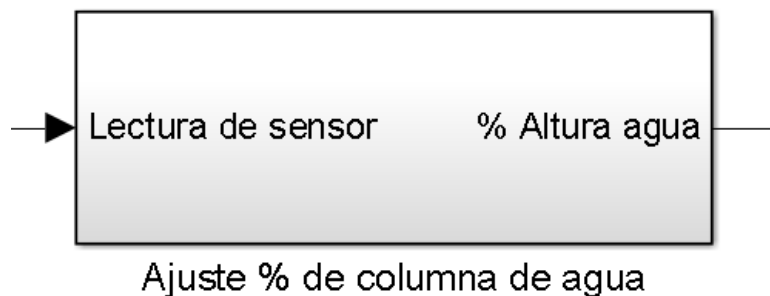
La máscara de este bloque, que se puede apreciar en la figura 2.35, corrobora su función.



**Figura 2.35: Máscara interna del bloque “Conversión a porcentaje de velocidad”.**

### **Bloque Ajuste % de columna de agua**

El bloque “Ajuste % de columna de agua”, cuya grafica se muestra en la figura 2.36, realiza el escalamiento y ajuste de la señal del sensor de nivel. Dicho sensor en realidad entrega el nivel de aire en el tanque de mezclado, por lo que para conocer el nivel de agua se debe realizar un ajuste.



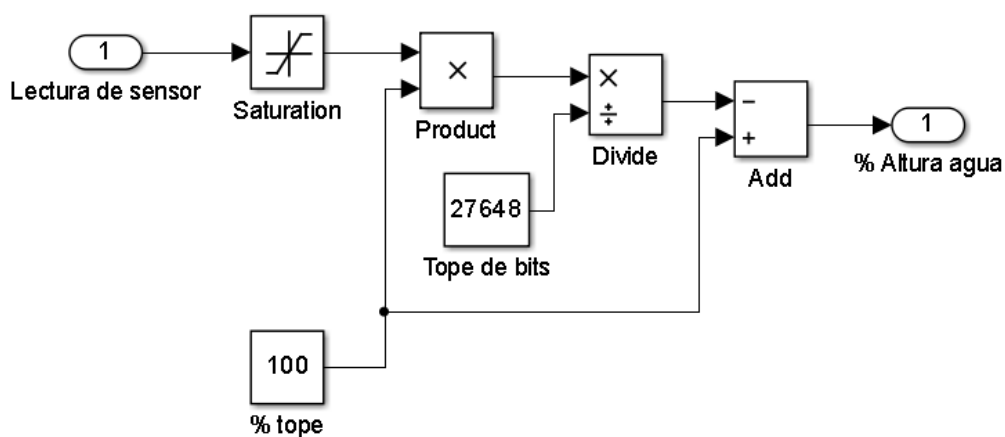
**Figura 2.36: Bloque de “Ajuste % de columna de agua”.**

Las entradas y salidas del bloque se detallan en la Tabla 4:

Denominación	Entrada/Salida	Función
Lectura de sensor	Entrada	Valor en decimal de sensor de nivel que lee el PLC
% Altura agua	Salida	Valor porcentual ajustado de altura de agua

**Tabla 4: Entrada y salida del bloque “Ajuste a % de columna de agua”.**

La máscara del mismo es la mostrada en la figura 2.37:

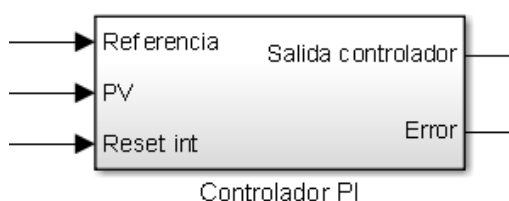


**Figura 2.37: Máscara del bloque “Ajuste % de columna de agua”.**

En la máscara se puede notar que el escalamiento a porcentaje es básicamente el mismo de bloques anteriores, con la novedad de tener una resta en su implementación. Dicha resta se debe a que como se mencionó, el sensor de nivel en realidad mide la altura de aire, por lo que la altura de la columna de agua corresponde al 100% menos el porcentaje de aire en el tanque.

### Bloque Controlador PI

El bloque “Controlador PI”, que se muestra en la figura 2.38, tiene como función primordial realizar el control mediante algoritmo PI del nivel de agua en el tanque de la estación IPA2. Para cumplir con lo anterior, dispone de las siguientes entradas y salidas, como se ve en la figura 2.30 y Tabla 5:

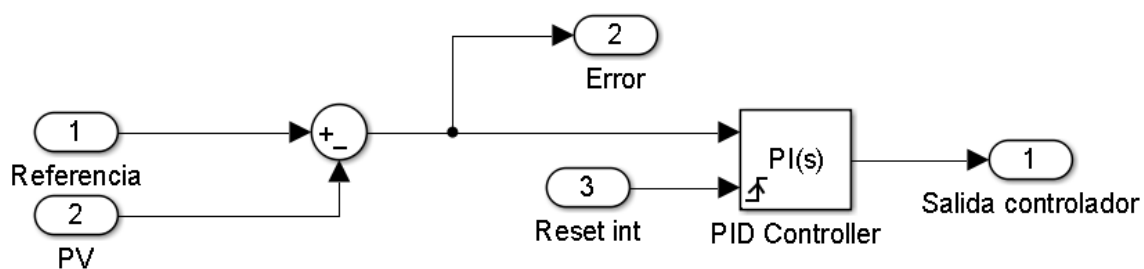


**Figura 2.38: Bloque “Controlador PI”.**

Denominación	Entrada/Salida	Función
Referencia	Entrada	Referencia en % de altura de columna de agua
PV	Entrada	Valor actual en % de altura de columna de agua
Reset int	Entrada	Entrada de reinicio de termino integrador
Salida controlador	Salida	Valor en % que debe sumarse a velocidad de la bomba
Error	Salida	Diferencia actual en % entre referencia y valor actual de altura de agua

**Tabla 5: Entradas y salidas del bloque “Controlador PI”.**

La máscara del bloque anteriormente descrito es la mostrada en la figura 2.39:



**Figura 2.39: Máscara interna del bloque “Controlador PI”.**

En la misma se puede ver claramente que este se encarga de realizar el lazo de retroalimentación para calcular el error actual, y enviarlo al controlador PI para su procesamiento. La entrada 3, se usa para reiniciar el error acumulado por el término integrador presente en el controlador, esto sirve para que el controlador ingrese a trabajar desde cero cuando se lo requiera.

### 2.4.3 Sintonización automática a través de TIA Portal V13

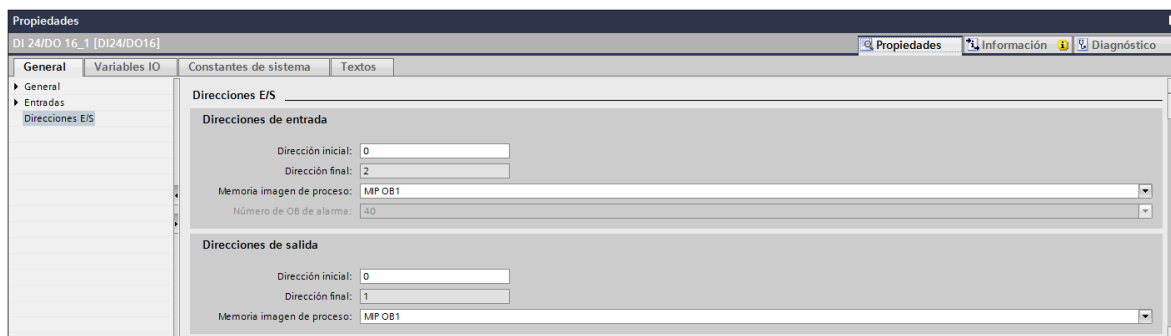
#### Configuración de variables y sus direcciones en el PLC

Para poder realizar la sintonización fue necesario que el PLC tenga las variables que se muestran en la figura 2.40:

Variables PLC				
	Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección
1	Siempre_Falso	Tabla de variables e..	Bool	%M150.0
2	Entrada_Analogica	Tabla de variables e..	Int	%IW288
3	Cod_Error	Tabla de variabl...	Word	%MW152
4	Entrada_Esc	Tabla de variables e..	Real	%MD156
5	Nivel_Porc	Tabla de variables e..	Real	%MD160
6	Setpoint	Tabla de variables e..	Real	%MD164
7	Salida_Analogica	Tabla de variables e..	Word	%QW288
8	Bomba_On	Tabla de variables e..	Bool	%Q0.0
9	En_PID	Tabla de variables e..	Bool	%M150.1
10	Valv_On	Tabla de variables e..	Bool	%Q0.1
11	Vel_Porc	Tabla de variables e..	Real	%MD168
12	Man_On	Tabla de variables e..	Bool	%M172.0
13	En_Bomba	Tabla de variables e..	Bool	%M150.2

**Figura 2.40: Variables necesarias en PLC para sintonización automática.**

Cuando se utilizan entradas o salidas en el PLC es indispensable que las mismas se hayan creado, por esto se necesitó usar la configuración de hardware mostrada en las figuras 2.41 y 2.42 con respecto a las direcciones de las entradas y salidas del controlador SIMATIC S7-300.



**Figura 2.41: Direcciones de entradas y salidas digitales para sintonización.**

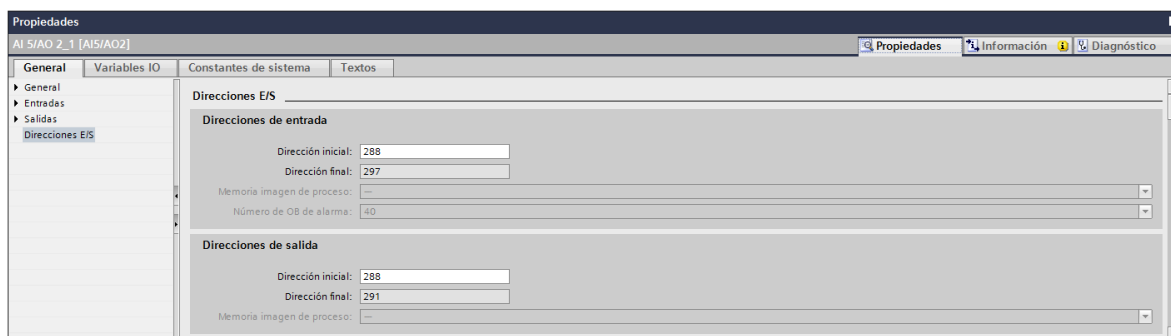


Figura 2.42: Direcciones de entradas y salidas analógicas para sintonización.

### Escalamiento de señales

Se utilizó las variables del proceso de forma escalada para obtener una mejor visualización del trabajo de la planta, por medio de un visor de curvas en una pantalla HMI TP700 Comfort. Esto fue posible por medio del bloque "SCALE" y una adaptación del valor del sensor ultrasónico, pues este mide la columna de aire y nuestra variable de interés es la columna de agua como se ve en la figura 2.43.

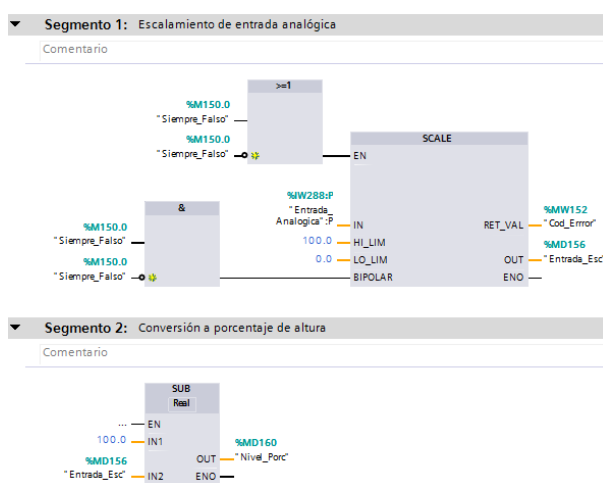
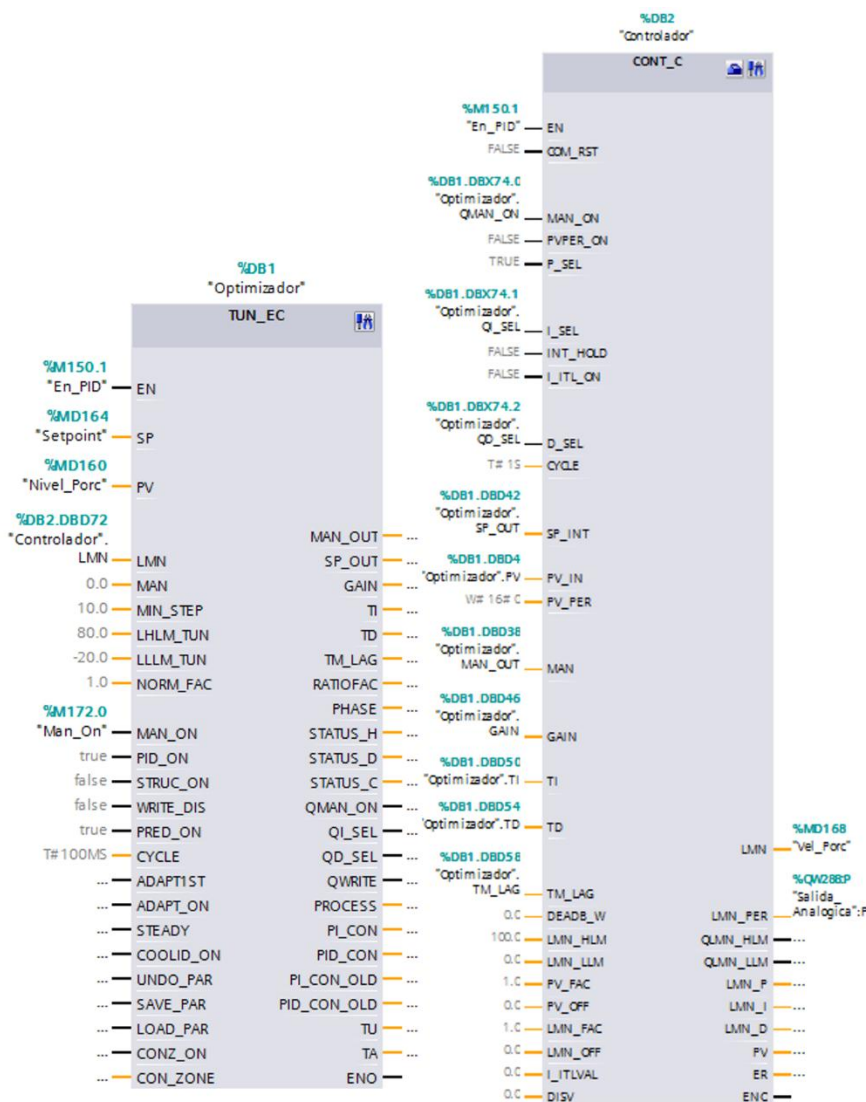


Figura 2.43: Escalamiento de señales.

### Conexión de los bloques TUN\_EC y CONT\_C

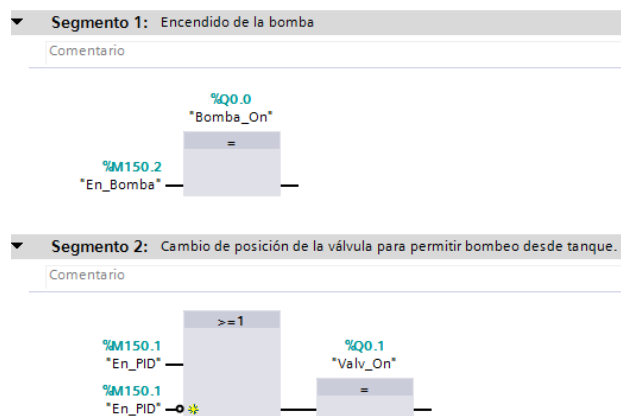
Para el correcto funcionamiento de los bloques "TUN\_EC" y "CONT\_C", es necesario que se encuentren interconectados con la configuración mostrada en la figura 2.44.



**Figura 2.44: Interconexión de los bloques TUN\_EC y CONT\_C en TIA Portal.**

Por otro lado, es necesario que la bomba y la válvula de 3 vías 2 estados se encuentren en estado alto, pues la salida analógica maneja la velocidad de la misma exclusivamente. Por esto, se usó la variable del PLC “En\_Bomba” para encender la bomba y una tautología lógica para siempre tener energizado el solenoide de la válvula de 3 vías 2 estados, lo anterior puede verse en la figura 2.45.





**Figura 2.45: Programación para habilitación de actuadores.**

### Tabla de observación y forzado

En el árbol del proyecto, dentro de la carpeta del PLC se ingresa a la carpeta “Tablas de observación y forzado”, se agrega una nueva tabla de observación con las variables que se muestran en la figura 2.46:

	i	Nombre	Dirección	Formato visualiza...	Valor de observac...	Observar con dis...	Forzar con dispar...
1		"En_PID"	%M150.1	BOOL		Permanente	Permanente
2		"Nivel_Porc"	%MD160	Número en coma...		Permanente	Permanente
3		"Setpoint"	%MD164	Número en coma...		Permanente	Permanente
4		"VeL_Porc"	%MD168	Número en coma...		Permanente	Permanente
5		"Bomba_On"	%Q0.0	BOOL		Permanente	Permanente
6		"Man_On"	%M172.0	BOOL		Permanente	Permanente
7		"En_Bomba"	%M150.2	BOOL		Permanente	Permanente
8		"Salida_Analogica":P	%QW288:P	Hex		Permanente	Permanente
9		"Entrada_Analogica":P	%IW288:P	DEC+/-		Permanente	Permanente
10		"Salida_Analogica"	%QW288	Hex		Permanente	Permanente

**Figura 2.46: Tabla de observación y forzado en TIA Portal.**

De aquí las variables que se forzarán son:

- En\_PID
- Setpoint
- Bomba\_On
- Man\_On
- En\_Bomba

## CAPÍTULO 3

### 3 RESULTADOS OBTENIDOS DE SISTEMA SCADA Y CONTROLADORES PI IMPLEMENTADOS

El presente capítulo detalla los resultados obtenidos durante la ejecución del sistema SCADA, así como la sintonización de los controladores PI y su desempeño al actuar sobre la planta.

#### 3.1 Funcionamiento del sistema SCADA

El sistema SCADA desarrollado, como se mencionó anteriormente, registraba porcentajes de coincidencia del tono de la mezcla elaborada con una referencia previamente configurada.

La referencia previamente configurada es la mostrada en la figura 3.1, la misma se produjo con una mezcla modelo compuesta por 50 ml de agua y 1 ml de cada color de tinta (azul y amarillo).











**Figura 3.1: Referencia de color usada para coincidencia de mezcla.**

El “instrumento virtual (VI)” desarrollado estaba programado para tomar una foto cada vez que una mezcla fuera hecha. La foto toma como nombre: la fecha, hora y número del proceso (lote diario), como se puede ver en la figura 3.2:



**Figura 3.2: Foto de mezcla preparada, tomada por VI del SCADA.**

De manera similar, el sistema SCADA registra la fecha, hora, lote y porcentaje de coincidencia de la mezcla preparada respecto a la referencia previamente establecida. Estos valores se guardan en hojas de cálculo de Microsoft Excel que tienen por nombre el día de trabajo del sistema, como se muestra en la figura 3.3. Por su parte en el interior de cada archivo se tienen dos columnas que representan la hora de la elaboración de la mezcla y su porcentaje de coincidencia como se muestra en la figura 3.4.

 lun, 14 de mar de 2016	3/14/2016 2:11 PM	Hoja de cálculo de M...	2 KB
 mar, 15 de mar de 2016	3/15/2016 9:11 AM	Hoja de cálculo de M...	1 KB
 martes, 05 de abril de 2016	4/5/2016 1:17 PM	Hoja de cálculo de M...	1 KB
 martes, 15 de marzo de 2016	3/15/2016 3:17 PM	Hoja de cálculo de M...	1 KB
 martes, 22 de marzo de 2016	3/22/2016 11:57 AM	Hoja de cálculo de M...	1 KB
 miércoles, 16 de marzo de 2016	3/16/2016 3:48 PM	Hoja de cálculo de M...	1 KB
 miércoles, 23 de marzo de 2016	3/23/2016 10:12 AM	Hoja de cálculo de M...	1 KB
 viernes, 18 de marzo de 2016	3/18/2016 11:10 AM	Hoja de cálculo de M...	1 KB





**Figura 3.3: Formato de nombre de reportes en MS Excel.**

	A	B
1	9:31	54
2	9:39	19
3	10:35	18
4	10:42	17
5	10:49	9
6	11:10	16

**Figura 3.4: Datos almacenados en archivo de MS Excel.**

Finalmente como se mencionó previamente, el SCADA posee el acceso a una carpeta de reportes, donde usuarios autorizados pueden encontrar la información mostrada en la figura 3.4. El sistema también almacena los usuarios cuyos “códigos de respuesta rápida (QR)” fueron aceptados, dándoles el acceso a los reportes.

Los usuarios que ingresaron a la carpeta de reportes se guardan con nombre y hora del ingreso en un archivo de MS Excel, como se muestra en la figura 3.5. El archivo de MS Excel, por otro lado, se guarda con la denominación mostrada en la figura 3.6.

 Control_Users_mar, 15 de mar de 2016	3/15/2016 10:16 AM	Hoja de cálculo de M...	1 KB
 Control_Users_martes, 15 de marzo de 2016	3/15/2016 11:40 AM	Hoja de cálculo de M...	1 KB
 Control_Users_miércoles, 16 de marzo de 2016	3/16/2016 3:27 PM	Hoja de cálculo de M...	1 KB
 Control_Users_miércoles, 23 de marzo de 2016	3/23/2016 8:48 AM	Hoja de cálculo de M...	1 KB

**Figura 3.5: Formato de nombres de reportes de usuarios en MS Excel.**

	A	B
1	Julio Ruano	10:16
2	Julio Ruano	11:40

**Figura 3.6: Registro de usuarios que accedieron a carpeta de reportes.**

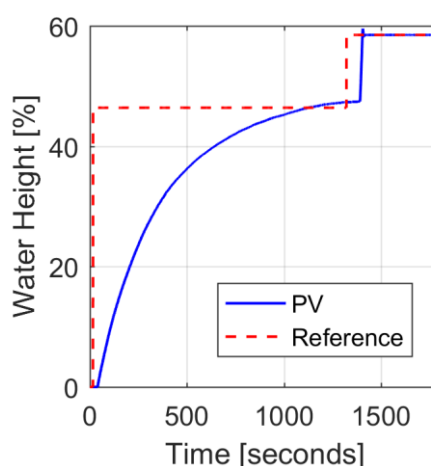
## 3.2 Sintonización de controladores

### 3.2.1 Sintonización automática a través de TIA Portal V13

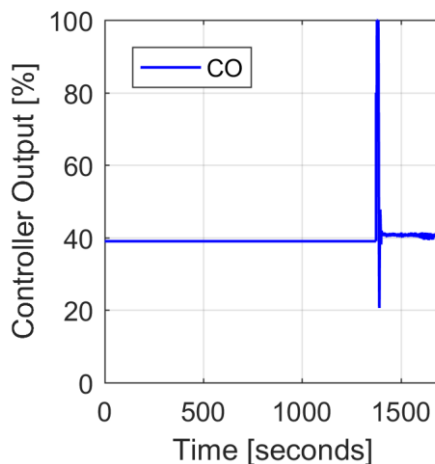
Por medio de la configuración del PLC descrita anteriormente, se usó el diagrama de bloques en modo manual con una salida analógica constante entre 0 y 10V, que correspondía al 39%, hasta que se estabilizó el nivel de agua en el tanque de mezcla. En cuanto ocurrió esto, se incrementó en 10 unidades o más el valor de referencia con respecto al valor actual de la columna de agua en escala de 0 a 100.

Para poder diseñar un controlador PI, fue necesario escoger la estructura del regulador como PI, ya que por defecto es PID y también se debió ajustar el modo del regulador a optimización inicial. Luego, se dió clic en el botón “Iniciar optimización” y después de esto se cambió “MAN\_ON” a un estado bajo, para lo que se forzó la marca que se encuentre asociada a esta variable.

Una vez realizado estos ajustes se pudo observar un comportamiento en la dinámica del sistema y el esfuerzo del controlador como se muestra en la figura 3.7 y 3.8, respectivamente.



**Figura 3.7: Evolución de la columna de agua en el tiempo durante sintonización automática.**



**Figura 3.8: Esfuerzo del controlador a través del tiempo durante sintonización automática.**

Al terminar el proceso de sintonización se las constantes del controlador mostradas en la Tabla 6:

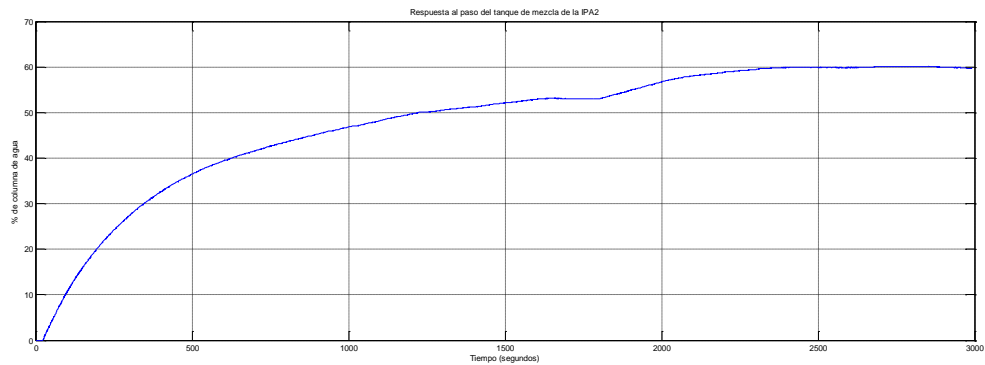
<b>P</b>	13.02853
<b>I</b>	6.836 [seg]
<b>Retardo</b>	1 [seg]

**Tabla 6: Constantes obtenidas de sintonización automática del PLC.**

Estos valores sirvieron para configurar el controlador con el que se realizaron las pruebas a su desempeño.

### 3.2.2 Sintonización a través de manipulación del lugar de las raíces

La aplicación del método de la respuesta al paso alrededor del punto de operación se realizó por doces ocasiones. La forma típica de la respuesta del sistema fue la observada en la figura 3.9.



**Figura 3.9: Forma típica de la respuesta al paso de la estación IPA2.**

Para cada una de las pruebas se modeló la planta usando la expresión de un sistema de primer orden, dado por la ecuación 3.1:

$$\frac{k}{\tau s + 1} \quad (3.1)$$

Dado que se trabajó con datos experimentales se decidió utilizar el criterio de Chauvenet [15] para descartar posibles datos aberrantes.

Fueron once los datos que quedaron tras la aplicación del criterio antes mencionado, los mismos se detallan en la Tabla 7:

<i>k</i>	<i>τ</i>
7,434982	254,97195
7,55994	249,75025
6,647257	306,46644
5,410691	260,75619
8,27774	320,7184
5,78265	172,77125
5,646017	221,23894
6,325417	320,92426
7,0518678	268,74496
5,697623	220,070422
4,939603	215,703192

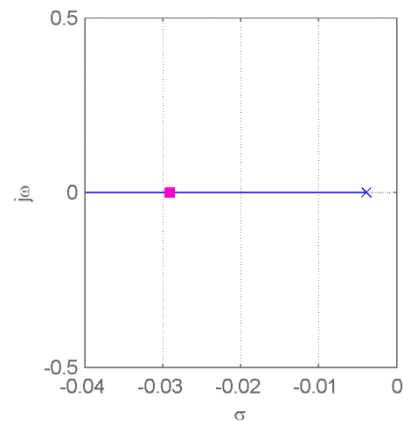
**Tabla 7: Constantes características de la planta IPA2.**

Luego, la función de transferencia que modela a la planta alrededor del punto de operación es la de la ecuación 3.2.

$$G(s) = \frac{6.43398071}{255.646932 s + 1} \quad (3.2)$$

Para la función de transferencia anterior se procedió a diseñar un controlador a través de la herramienta Sisotool de Matlab. El lugar de las raíces original del sistema es el observado en la figura 3.10.



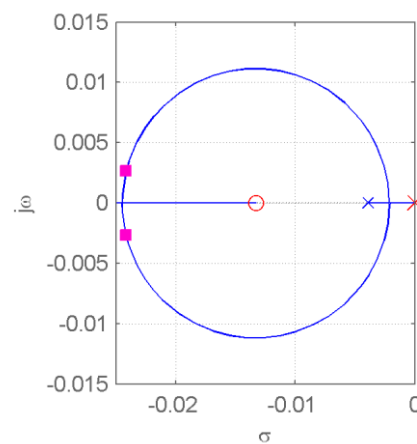


**Figura 3.10: Lugar de las raíces original de la planta IPA2.**

Un controlador que se consideró adecuado para mejorar el desempeño del sistema es el mostrado en la ecuación 3.3, el mismo mejora de manera sustancial el tiempo de respuesta y no mantiene durante mucho tiempo al actuador trabajando al máximo nivel.

$$C(s) = 1.764 \frac{(s + 0.0133)}{s} \quad (3.3)$$

El lugar de las raíces nuevo considerando el controlador de la expresión previa, tiene la forma mostrada en la figura 3.11.



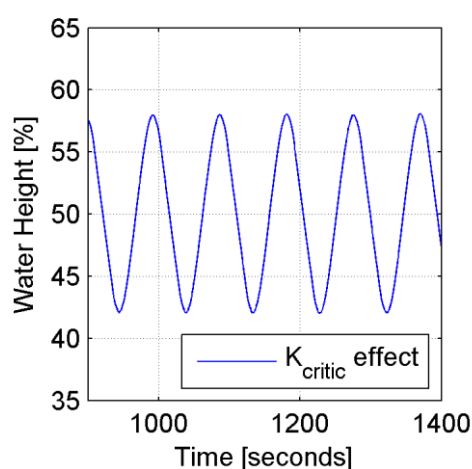
**Figura 3.11: Lugar de las raíces de IPA2 considerando controlador PI diseñado.**

Este controlador se montó en el modelo de Simulink y en secciones posteriores se mostrarán los resultados.

### 3.2.3 Sintonización por el método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado

Por medio del modelo de Simulink previamente descrito se llevó el sistema al punto de operación en modo manual, luego de lo cual se conmutó al modo de operación automático, con el fin de buscar la ganancia crítica del sistema.

Se realizaron varias pruebas para determinar el valor de la ganancia crítica, se inició con un supuesto de 100, para lo cual se obtuvo oscilaciones crecientes en cada período. Reduciendo de 10 en 10, el valor de la ganancia, se observaba que las oscilaciones se volvían algo más constantes en amplitud hasta que con  $k_{critica} = 0.15$  se obtuvo la respuesta oscilatoria de la figura 3.12 alrededor del punto de operación.



**Figura 3.12: Oscilaciones debido a ganancia crítica en lazo cerrado.**

Con la respuesta mostrada anteriormente se puede dimensionar un controlador PD, que con el efecto del integrador agregado previamente, se comporte como un PI.

El método de sintonización de Ziegler-Nichols [11] determina que las constantes para un controlador PD están dadas por los valores de la Tabla 8:

Controlador	$k_p$	$T_d$
PD	$0.8 k_{critica}$	$\frac{T_u}{8}$

**Tabla 8: Cálculo de constantes del controlador PD según método Ziegler-Nichols.**

Como se expresó anteriormente el controlador PD diseñado se comportará como un PI debido al efecto del polo adicionado al sistema. La forma del controlador PI será la dada por la ecuación 3.4:

$$C(s) = \frac{1}{s} k_p (1 + T_d s) = k_p T_d + \frac{k_p}{s} \quad (3.4)$$

Este controlador se ingresó en el bloque respectivo de Simulink para realizar las diversas pruebas a su desempeño.

### 3.3 Funcionamiento de controladores

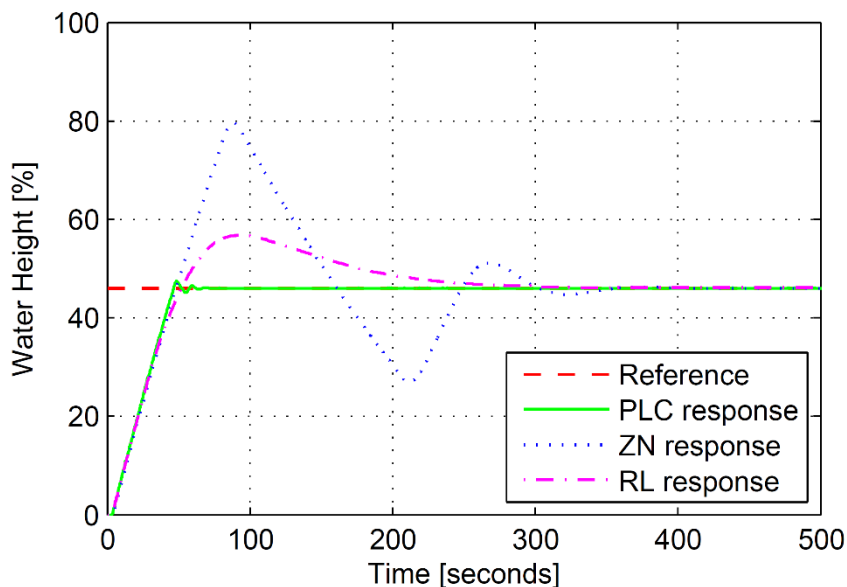
Con el fin de observar la respuesta de los tres controladores, se realizaron dos pruebas a todos ellos. Estas pruebas fueron diseñadas para ver apropiadamente la respuesta de los controladores en dos escenarios que pueden ocurrir en una aplicación real.

La primera prueba consiste en ver la respuesta del controlador cuando el sistema empieza en condiciones iniciales iguales a cero. Para nuestro proyecto, esto significó que el tanque principal de la estación IPA2 esté vacío y la referencia sea ajustada para llenarlo.

La otra prueba fue diseñada para probar la estabilidad del sistema alrededor de un punto de operación. Se usó un tren de pulsos para ajustar referencias cercanas al punto de operación y observar como reaccionaba el controlador cuando la referencia era constantemente cambiada.

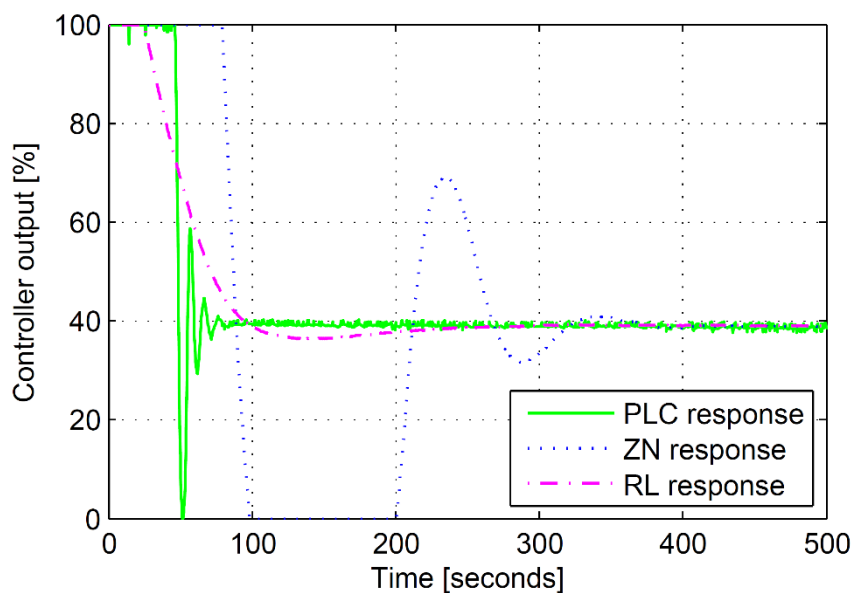
Los resultados son los que se muestran en las subsecciones siguientes.

### 3.3.1 Dinámica del sistema y esfuerzo de controladores en prueba de arranque



**Figura 3.13: Respuesta de los diversos controladores en la prueba de arranque.**

La figura 3.13 muestra la respuesta de los tres controladores cuando el tanque principal de la estación IPA2 estaba vacío y se ajustó una referencia (graficada por la línea roja segmentada) de 46% (punto de operación). Se puede observar la respuesta del controlador diseñado por auto sintonización de TIA Portal V13 (PLC) en la línea verde continua, la del controlador diseñado por Ziegler-Nichols (ZN) en la línea azul punteada y la del controlador diseñado por manipulación del lugar de las raíces (RL) en la línea morada segmentada-punteada.



**Figura 3.14: Esfuerzo de controladores durante prueba de arranque.**

Por otro lado se puede observar en la figura 3.14 el esfuerzo de los tres controladores durante la prueba arranque, los estilos y colores son los mismos que se usaron en la figura 3.13. Este gráfico es un indicador de la energía entregada por el controlador a la bomba para poder alcanzar la referencia deseada.

La respuesta del controlador a esta prueba puede ser resumida en la Tabla 9 donde se muestra sus respectivos tiempos de asentamiento y sobrelongación.

Parámetro	PLC	ZN	RL
Tiempo de asentamiento [seg]	76	290	216
Sobrelongación [%]	1.51157	33.6296	10.8287

**Tabla 9: Resultados de la prueba de arranque para los tres controladores.**

De lo anterior se puede concluir que el mejor controlador en términos de velocidad es el diseñado por los métodos de auto sintonización del PLC. Sin embargo, si se analiza en términos del esfuerzo del controlador, se

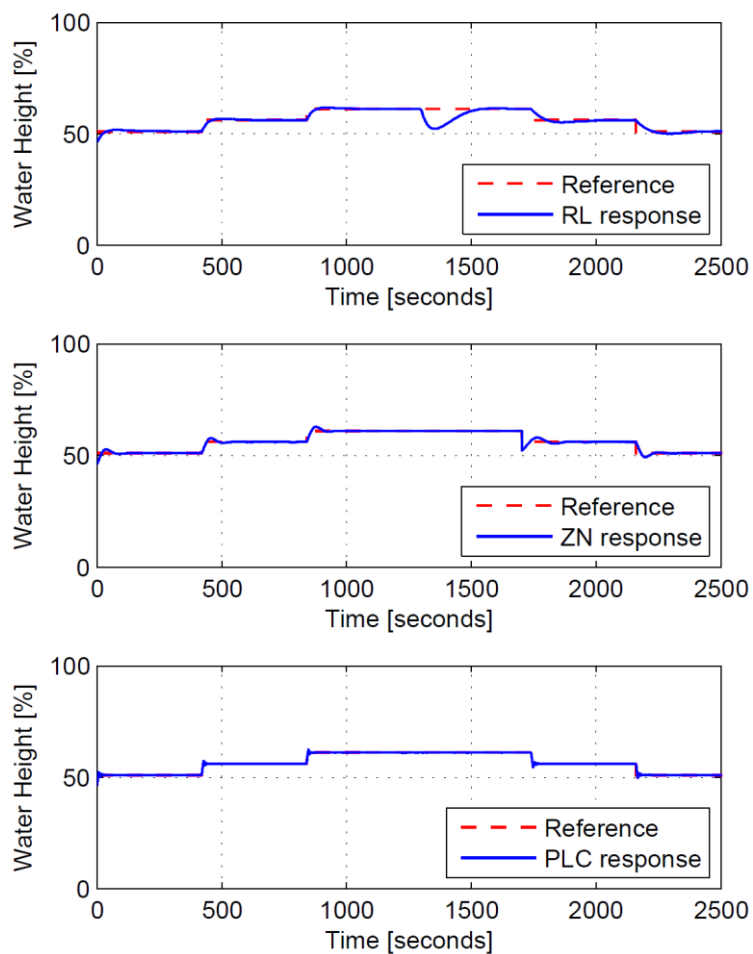
puede observar que el PLC generó un mayor esfuerzo, que puede reducir la vida útil del actuador, que en este caso es una bomba; bajo esta modalidad de comparación el mejor controlador es el diseñado por la manipulación del lugar de las raíces.

### **3.3.2 Dinámica del sistema y esfuerzo de controladores en**

Se aplicó un tren de pulsos como referencia al sistema para poder observar la respuesta del controlador en diferentes puntos de operación cercanos al usado para diseñarlo. En las figuras 3.15 y 3.16 se muestran la respuesta y esfuerzo de los controladores, respectivamente.

Como se puede ver en la figura 3.15, la respuesta del controlador diseñado por el PLC es nuevamente, de entre los tres, el de mejor rendimiento. El diseñado por Ziegler-Nichols también es bueno manteniendo el rendimiento al alejarse del punto de operación.

Sin embargo, el diseñado por manipulación del lugar de las raíces no es tan bueno como los anteriores; se puede observar una distorsión en la región más alejada del punto de operación, donde el controlador falla en tratar de mantener el nivel en un periodo de tiempo considerable.



**Figura 3.15: Respuesta de los diversos controladores a la prueba de tren de pulsos.**

La figura 3.16 brinda información acerca del esfuerzo de los controladores y el efecto de los pulsos cambiantes constantemente en la referencia. El diseñado por manipulación por lugar de las raíces y por PLC son los de mayor interés; ya que mostraron una distorsión significativa y cambio en el esfuerzo del controlador cuando la prueba fue realizada.

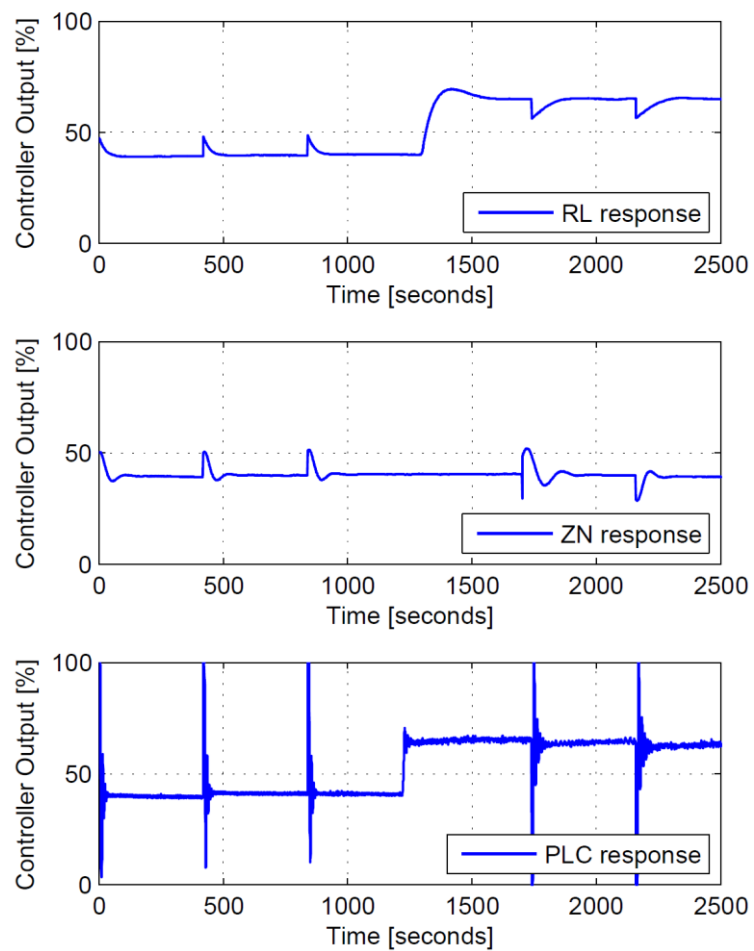
La respuesta del controlador diseñado por manipulación del lugar de las raíces presenta picos durante la prueba y eventualmente un cambio significativo en el valor de estado estable de la energía usada para mantener el nivel de agua en el tanque.

La respuesta del controlador diseñado por el PLC muestra incluso más ruido y picos durante la prueba. Esta grafica indica que cuando la referencia fue cambiada, el controlador presentó picos de casi 100% por una pequeña cantidad de tiempo.

Adicionalmente, como se observa en la gráfica del controlador diseñado por manipulación del lugar de las raíces, el valor estable sufre un cambio cuando la referencia pasa a un valor más alto y esta variación se mantiene durante el resto del tiempo.

El mejor controlador en términos de suavidad es el obtenido por medio de la sintonización por el método de Ziegler-Nichols. La curva mostrada en la figura 3.16, indica que el controlador no solo mantiene un valor estable de energía sino que también no tiene picos considerables durante los cambios de referencia.





**Figura 3.16: Esfuerzo de los diversos controladores a la prueba de tren de pulsos.**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el desarrollo del proyecto presentado en este informe, se aprovecharon las capacidades de la estación de mezcla IPA2, que no fueron utilizadas por el fabricante. Bajo este marco, se diseñó una variedad de controladores PI para la regulación de nivel en el tanque principal de la estación de mezcla IPA2 contrastando su desempeño; además, se implementó un sistema SCADA para el control y monitoreo de la estación de mezcla IPA2.

Por otro lado, se rediseñó la interfaz HMI de la estación de mezcla IPA2. Paralelamente se elaboraron guías de pre-prácticas, prácticas y aprendizaje para el Laboratorio de Control de Procesos Industriales.

De los resultados obtenidos, se puede afirmar que el controlador diseñado por el algoritmo nativo del PLC tiene el mejor desempeño cuando se considera la velocidad y estabilidad de la respuesta en regiones lejanas al punto de operación.

En cuanto al controlador diseñado por el método de Ziegler-Nichols, este tiene el mejor desempeño cuando a esfuerzo se refiere. El actuador usa menos energía en este caso, lo cual se traduce en una vida útil más larga para el dispositivo.

Respecto al controlador diseñado por manipulación del lugar de las raíces, el cual representa una manera más tradicional de sintonización de un controlador, se encontraron comportamientos indeseables al alejarse del punto de operación de la planta. Donde este comportamiento se debe a que el modelo obtenido de la planta no provee información sobre no linealidades.

Teniendo en cuenta todo lo expresado, se sugiere, continuar equipando los laboratorios de la FIEC con equipos de fabricantes ampliamente encontrados en el mundo laboral.

Así como, mantener el impulso a la innovación e investigación dentro de la facultad y en general la universidad, para generar nuevos conocimientos y profesionales cada vez mejor formados.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lucas-Nülle, «IPA Industrial Process Automation,» [En línea]. Available: <http://www.lucas-nuelle.com/316/apg/7808/IPA-Industrial-Process-Automation.htm>. [Último acceso: 1 Mayo 2016].
- [2] L. Corrales, «SISTEMAS SCADA,» de *Interfaces de Comunicación Industrial*, 2007.
- [3] Lucas-Nülle, IPA2: Mixing station.
- [4] Siemens, Getting started for first time users, 2007.
- [5] Siemens, «PROFINET - the Ethernet standard for automation,» [En línea]. Available: <http://w3.siemens.com/mcms/automation/es/industrial-communications/profinet/pages/default.aspx>. [Último acceso: 1 Mayo 2016].
- [6] National Instruments, «NI OPC Servers,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/209059>. [Último acceso: Mayo 2016].
- [7] NATIONAL INSTRUMENTS, «LabVIEW Datalogging and Supervisory Control (DSC) Module,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/labview/labviewdsc/>.
- [8] National Instruments, «NI Vision Acquisition Software,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/12892>. [Último acceso: 1 Mayo 2016].
- [9] National Instruments, «Vision Development Module,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/209860>. [Último acceso: 1 Mayo 2016].
- [10] V. Mazzone, «<http://iaci.unq.edu.ar/caut1>,» Marzo 2002. [En línea]. Available: <http://tinyurl.com/z3d46dq>.

- [11] C. A. Smith, Principles and Practice of Automatic Process Control, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [12] D. C. B. P. P. Gregory S. Patience, Communicate Science Papers, Presentations, and Posters Effectively, Academic Press, 2015.
- [13] J. G. Ziegler y N. B. Nichols, «Optimum Settings for Automatic Controllers,» New York, 1942.
- [14] Industry Online Support, SIEMENS, «Industry Online Support,» Diciembre 1999. [En línea]. Available: <http://tinyurl.com/jsykr4w>. [Último acceso: Abril 2016].
- [15] MathWorks, «Read and Write to an OPC Data Access Server from Simulink,» [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/help/opc/examples/read-and-write-to-an-opc-data-access-server-from-simulink.html>.
- [16] Kepware Technologies, OPC Server Help, 2009.
- [17] L. Lin y P. D. Sherman. [En línea]. Available: <http://analytics.ncsu.edu/sesug/2007/SA11.pdf>. [Último acceso: 15 Mayo 2016].

## **ANEXO 1**

### **Guía de Aprendizaje del Laboratorio de Control de Procesos Industriales**

## **ANEXO 2**

# **Guía de Pre prácticas del Laboratorio de Control de Procesos Industriales**

## **ANEXO 3**

# **Guía de Prácticas del Laboratorio de Control de Procesos Industriales**