



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DOS TÉCNICAS DE CONTROL APLICADAS A UNA PLANTA DE RECIRCULACIÓN DE LÍQUIDOS EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR SUCRE

EDUARDO SIMÓN VELASCO PULLUPAXI

Trabajo de Titulación modalidad: Proyecto de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Riobamba – Ecuador

Octubre 2021

©2021, Velasco Pullupaxi Eduardo Simón

Se autoriza la producción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyecto de Investigación y Desarrollo, denominado: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DOS TÉCNICAS DE CONTROL APLICADAS A UNA PLANTA DE RECIRCULACIÓN DE LÍQUIDOS EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR SUCRE”, de responsabilidad del Ingeniero Velasco Pullupaxi Eduardo Simón, ha sido minuciosamente revisado y se autoriza su presentación.

Ing. Oswaldo Geovanny Martínez Guashima, Mag.

PRESIDENTE

Ing. Fabricio Manuel Tipantocta Pillajo, Mag.

DIRECTOR

Ing. Nancy del Rocío Velasco Erazo, Mag.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Henry Ernesto Vallejo Vizhuete, Mag.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Riobamba, octubre 2021

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Velasco Pullupaxi Eduardo Simón, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



EDUARDO SIMÓN VELASCO PULLUPAXI.

No. Cédula: 171474382-8

DECLARACIÓN DE AUTENCIDAD

Yo, Eduardo Simón Velasco Pullupaxi, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.



EDUARDO SIMÓN VELASCO PULLUPAXI.

No. Cédula: 171474382-8

DEDICATORIA

Dedico este logro principalmente a Dios, por colmarme de sus bendiciones y por permitirme dar un paso más en mi vida profesional. A mis amados padres Luis Velasco y Carmen Pullupaxi por enseñarme a luchar por mis sueños y objetivos y ser el pilar más importante, demostrándome siempre su amor y apoyo incondicional.

A todas y cada una de las personas que ayudaron directa e indirectamente en la culminación de este proyecto.

Eduardo.

AGRADECIMIENTO

Ante todo, agradezco a Dios por guiar mis pasos hacia la culminación de todos los proyectos que he emprendido en mi vida. A mi esposa Gladys Herrera y a mi pequeña hija Doménika que han sido mi pilar fundamental en la conclusión del presente proyecto.

Además, extiendo mis más sinceros agradecimientos a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial al Instituto de Posgrados y Educación Continua por su programa de Maestría en Sistemas de Control y Automatización Industrial.

De manera especial agradezco a los miembros del tribunal, al Máster Fabricio Tipantocta en calidad de director, a la Máster Nancy del Rocío Velasco y al Máster Henry Vallejo por guiarme en el transcurso de la elaboración del proyecto de titulación, sus enseñanzas y tiempo que han permitido culminar el proyecto de titulación.

Por último, agradezco a todas las personas que de una u otro forma aportaron para que el presente proyecto haya llegado a feliz término.

Eduardo.

CONTENIDO

RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Formulación del problema.....	6
1.3. Justificación de la investigación	6
1.4. Objetivos	8
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	8
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	8
1.5. Hipótesis.....	8
CAPÍTULO II	9
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Antecedentes	9
2.2. Bases Teóricas.....	9
2.3. Marco Conceptual	10
2.3.1. <i>Sistemas de Control</i>	10
2.3.1.1 <i>Sistemas de control en lazo cerrado</i>	11
2.3.1.2 <i>Sistemas de control en lazo abierto</i>	11
2.3.1.3 <i>Comparación entre los sistemas de control</i>	12
2.3.2. <i>Técnicas de control</i>	12
2.3.2.1 <i>Control Proporcional –Integral – Derivativo (PID)</i>	12
2.3.2.2 <i>Objeto Tecnológico PID Compact</i>	16
2.3.2.3 <i>Control Predictivo</i>	18
2.3.3. <i>Software Matlab</i>	24
2.3.3.1 <i>Modelado de la planta por identificación</i>	24

2.3.4.	<i>Controlador Lógico Programable</i>	27
2.3.4.1	<i>Simatics S7-1200</i>	27
2.3.5.	<i>Variador de velocidad SINAMICS V20</i>	27
CAPÍTULO III		28
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	28
3.1.	Tipo de investigación	28
3.1.1.	<i>Métodos de investigación</i>	28
3.1.2.	<i>Técnicas de investigación</i>	29
3.2	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.	30
3.2.1	<i>Análisis de Información</i>	30
CAPÍTULO IV		31
4.	PRUEBAS Y RESULTADOS	31
4.1.	Pruebas de funcionamiento	31
4.1.1.	<i>Resultados obtenidos con el bloque PID_Compact.</i>	31
4.1.2.	<i>Resultados obtenidos con el bloque PID diseñado en Matlab.</i>	32
4.1.3.	<i>Resultados obtenidos con el bloque PREDICTIVO diseñado en Matlab</i>	34
4.1.4	<i>Funcionamiento de los controladores ante perturbaciones.</i>	36
4.2.	Demostración de la Hipótesis	39
CAPÍTULO V		44
5.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	44
5.1	Descripción de la planta	44
5.1.1.	<i>Tablero de conexiones para elementos de control</i>	46
5.1.2.	<i>Tablero de conexiones para elementos de control</i>	47
5.1.3.	<i>Tanques Plásticos</i>	48
5.1.4.	<i>Bomba de presión</i>	48
5.1.5.	<i>Bomba de caudal</i>	49
5.1.6.	<i>Válvula proporcional</i>	49
5.1.7.	<i>Sensores de nivel</i>	50
5.1.8.	<i>Sensor de caudal tipo turbina</i>	50

5.1.9. Llaves para vaciado de tanques	51
5.2. Descripción del tablero de control.....	52
5.3. Lazos de control implementados	53
5.4. Pruebas de funcionamiento en lazo abierto	56
5.5. Adquisición de datos de la planta.....	57
5.6. Datos obtenidos en lazo abierto	60
5.7. Datos obtenidos en lazo cerrado.....	64
5.8. Modelación de planta en el software Matlab	65
5.9. Diseño de controladores en Simulink.....	69
5.10. Generación de bloques de control para el software TIA PORTAL	76
5.11. Programación de modos de funcionamiento	80
5.12. Implementación del PID_Compact	83
5.13. Desarrollo del interfaz humano – máquina HMI.....	86
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Automatización en las medianas y pequeñas industrias.....	2
Figura 2-1	Expectativas y posibilidades técnicas	5
Figura 1-2	Sistema de control en lazo cerrado.....	11
Figura 2-2	Sistema de control en lazo abierto	11
Figura 3-2	Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional	13
Figura 4-2	Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional - integral	14
Figura 5-2	Simulación de un sistema en lazo cerrado con control PID.....	14
Figura 6-2	Lazo de control PID con realimentación unitaria	15
Figura 7-2	Respuesta del sistema ante una entrada escalón.....	17
Figura 8-2	Estrategias del Control Predictivo.....	22
Figura 9-2	Estructura básica del control MPC.....	22
Figura 10-2	Etapas de un proceso de identificación	25
Figura 11-2	Modelo de Identificación en línea.....	26
Figura 1-4	Respuesta del sistema con PID_COMPACT.....	31
Figura 2-4	Señal enviada al variador de velocidad	32
Figura 3-4	Respuesta del sistema con PID_MATLAB	33
Figura 4-4	Señal enviada al variador de velocidad	34
Figura 5-4	Respuesta del sistema con control PREDICTIVO	34
Figura 6-4	Señal enviada al variador de velocidad	35
Figura 7-4	Funcionamiento del controlador PID_COMPACT ante perturbaciones.....	36
Figura 8-4	Funcionamiento del controlador PID_MATLAB ante perturbaciones	37
Figura 9-4	Funcionamiento del controlador PREDICTIVO ante perturbaciones.....	38
Figura 10-4	Distribución de los datos del PID_COMPACT.....	40
Figura 11-4	Distribución de diferencia entre PID_MATLAB	40
Figura 12-4	Cuadro de diálogo para parametrizar la Prueba de Wilcoxon.....	41
Figura 13-4	Respuesta obtenida de la comparación entre PID_MATLAB y PID_COMPACT	42
Figura 14-4	Respuesta obtenida de comparar entre el control PREDICTIVO y PID_COMPACT.....	43
Figura 15-4	Respuesta obtenida al comparar el.....	43
Figura 1-5	Vista frontal de la planta	45
Figura 2-5	Vista posterior de la planta	46
Figura 3-5	Disposición de borneras del tablero de conexión de elementos.....	47
Figura 4-5	Borneras de conexión del tablero de bombas	48

Figura 5-5	Diagrama de flujo del programa implementado en el microprocesador Arduino.	51
Figura 6-5	Parte interna del tablero de control	52
Figura 7-5	Parte externa del tablero de control.....	53
Figura 8-5	Diagrama P&ID (Lazo de control de caudal).....	54
Figura 9-5	Diagrama P&ID (Lazo de control de nivel)	56
Figura 10-5	Bloque de creación de registro de datos	57
Figura 11-5	Bloque de datos asociado al DataLogCreate	58
Figura 12-5	Bloque de escritura del registro de datos.....	58
Figura 13-5	Activación del servidor web	59
Figura 14-5	Activación de las marcas de ciclo.	60
Figura 15-5	Bloque de llamada a la comunicación USS_PORT.....	61
Figura 16-5	Bloque de transmisión y recepción	62
Figura 17-5	Curva de reacción de la planta	62
Figura 18-5	Datos de frecuencia vs. tiempo	64
Figura 19-5	Datos de caudal vs tiempo.	65
Figura 20-5	Toolkit del software Matlab para Identificación de Sistemas	66
Figura 21-5	Comparación de los modelos obtenidos	67
Figura 22-5	Modelo desplegado en el área de trabajo del software Matlab	67
Figura 23-5	Lugar geométrico de las raíces.....	68
Figura 24-5	Diagrama de bloques del proceso implementado en Simulink	69
Figura 25-5	Configuración de los parámetros del PID	70
Figura 26-5	Pantalla de sintonización de los parámetros del controlador PID	71
Figura 27-5	Parámetros del PID	72
Figura 28-5	Control PID sometido a varios puntos de consigna.....	72
Figura 29-5	Señal de salida del controlador PID	73
Figura 30-5	Calibración y optimización del controlador Predictivo	74
Figura 31-5	Respuesta del controlador MPC a diferentes puntos de consigna.....	75
Figura 32-5	Señal de salida del controlador Predictivo	76
Figura 33-5	Parámetros calibrados para el subsistema.	77
Figura 34-5	Subsistema creado.	78
Figura 35-5	Parámetros para generar el código compatible con el software TIA PORTAL	78
Figura 36-5	Archivo lazo_caudal.scl importado al software	78
Figura 37-5	Bloque FB creado para el control Predictivo	79
Figura 38-5	Modos de funcionamiento del sistema	81
Figura 39-5	Grafcet interno de la macro MMAN.....	82
Figura 40-5	Grafcet interno de las macros MMAN y MPRED.....	83

Figura 41-5	Bloque PID_Compact	84
Figura 42-5	Configuración del bloque PID_Compact	84
Figura 43-5	Puesta en servicio del bloque PID_Compact.....	85
Figura 44-5	Parámetros cargados en el bloque PID_Compact.....	86
Figura 45-5	Pantalla de presentación del proyecto	87
Figura 46-5	Pantalla de elección de modos de funcionamiento	87
Figura 47-5	Pantalla del sistema de control manual	88
Figura 48-5	Pantalla del sistema de control PID.....	89
Figura 49-5	Pantalla del sistema de control Predictivo	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Estado de las distintas técnicas de control.....	4
Tabla 2-1:	Porcentaje de satisfacción de las distintas técnicas de control.....	5
Tabla 1-2:	Indicadores de rendimiento de un sistema de control en bucle cerrado.....	18
Tabla 1-4:	Datos obtenidos con el bloque de control PID_Compact	32
Tabla 2-4:	Datos obtenidos con el bloque de control PID_MATLAB.....	33
Tabla 3-4:	Datos obtenidos con el bloque de control PREDICTIVO	35
Tabla 4-4:	Resumen de los datos obtenidos para los tres controladores.....	36
Tabla 5-4:	Datos obtenidos del controlador PID_COMPACT ante perturbaciones.	37
Tabla 6-4:	Datos obtenidos del controlador PID_MATLAB ante perturbaciones.	38
Tabla 7-4:	Datos obtenidos del controlador PREDICTIVO ante perturbaciones.....	38
Tabla 8-4:	Resumen de los datos obtenidos para los tres controladores sometidos a.....	39
Tabla 1-5:	Características técnicas obtenidas de la placa de.....	49
Tabla 2-5:	Características técnicas obtenidas de la placa de la bomba de caudal	49
Tabla 3-5:	Características técnicas de la válvula proporcional	49
Tabla 4-5:	Características técnicas de los sensores de nivel	50
Tabla 5-5:	Características técnicas del sensor de caudal.....	50
Tabla 6-5:	Parámetros de calibración del bloque DataLogCreate.....	58
Tabla 7-5:	Calibración de los bloques Step	70
Tabla 8-5:	Parámetros comparables entre los sistemas de control PID y Predictivo.....	76
Tabla 9-5:	Asignación de entradas, salidas, marcas y memorias más relevantes en el PLC....	80

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Guía de puesta en servicio rápida para el variador de velocidad v20

ANEXO B: Elementos y conexiones de los tableros

RESUMEN

En este trabajo se presenta la implementación y comparación de dos técnicas de control para la variable caudal, en el módulo de recirculación de líquidos perteneciente al Instituto Tecnológico Superior Sucre; en primera instancia se realizó la modelación de la planta a través del método de identificación de sistemas, utilizando la herramienta de programación Matlab; a continuación, se implementaron los sistemas de control PID y Predictivo en el software Simulink. El código obtenido fue utilizado para crear los bloques en un controlador lógico programable (PLC) Siemens S7-1200. Para tener los parámetros con los cuales comparar el desempeño de los controladores mencionados anteriormente, se implementa un control PID, pero utilizando el bloque integrado en el software TIA PORTAL; y se observa el funcionamiento dinámico del proceso, para los distintos controladores. Los resultados obtenidos de los experimentos muestran que el sistema de control Predictivo tiene un mejor funcionamiento en el estado dinámico, respecto a los controladores PID diseñado en Matlab y nativo del autómatas programable. Además, se diseñó e implementó una interfaz humano-máquina que permite la interacción con el proceso. La interfaz representa una herramienta indispensable para el estudio de los sistemas de control y por parte de las personas que utilicen el módulo dentro de la institución educativa. Fue factible implementar otros sistemas de control en el autómatas programable utilizando el lenguaje de programación ST (texto estructurado) y la herramienta PLC CODE del software Matlab. Por último, para mejorar la señal de la variable medida se podría incorporar un transmisor de caudal tipo industrial de 4 a 20 mA para obtener una señal sin distorsiones.

Palabras clave: <SISTEMA DE CONTROL>, <CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)>, <CONTROL PREDICTIVO>, <CAUDAL DE AGUA>, <LAZO CERRADO>, <CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)>.

REVISADO

19 FEB 2020

Ing. Jhonatan Parreño Uquillas, MBA
ANALISTA DE BIBLIOTECA


ABSTRACT

This work presents the implementation and comparison of two control techniques for the flow variable, in the liquid recirculation module belonging to the Instituto Tecnológico Superior Sucre; the modeling of the plant was carried out in the first instance using the system identification method, applying the Matlab programming tool; and then the PID and Predictive control systems were implemented in the Simulink software. The code obtained was used to create the blocks in a programmable logic controller (PLC) Siemens S7-1200. To have the parameters with which to compare the performance of the above mentioned controllers, a PID control is implemented, but using the block integrated in the TIA PORTAL software; and the dynamic functioning of the process is observed, for the different controllers. The results obtained from the experiments show that the Predictive control system has a better performance in the dynamic state, compared to the PID controllers designed in Matlab and native to the programmable automaton. In addition, a human-machine interface was designed and implemented to allow interaction with the process. The interface represents an indispensable tool for the study of control systems by people who use the module within the educational institution. It was possible to implement other control systems in the programmable controller using the ST programming language (structured text) and the PLC CODE tool of the Matlab software. Finally, to improve the signal of the measured variable, a 4 to 20 mA industrial-type flow transmitter could be incorporated to obtain a distortion-free signal.

Key words :< CONTROL SYTEM>, < PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) CONTROL >, < PREDICTIVE CONTROL >, <WATER FLOW>, < CLOSED LOOP >, <PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER (PLC)>.



CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Una de las disciplinas de mayor desarrollo tecnológico son los sistemas de control automático. No resulta sencillo enumerar las múltiples aplicaciones que tiene hoy en día el Control Automático, es una disciplina que está ligada al concepto de automatización. Según la revista AT (Automation, 2017) en su edición 50, menciona trabajos y desarrollos relacionados a:

- Fabricación inteligente.
- Maquinaria segura y productiva.
- Conexión de operaciones flujo arriba, optimización de la producción.

Además, el control automático está encontrando muchos campos de aplicación a nivel mundial, según (IFAC, 2019) se mencionan los siguientes:

- Biomedicina.
- Robots en la agricultura.
- Computadoras, inteligencia artificial, inclusive;
- Resolución de Conflictos Internacionales.

En Ecuador, desafortunadamente el desarrollo tecnológico y científico del control automático es reducido. Esto no quiere decir que en Ecuador no se usen tecnologías y sistemas de control automático. En el país han existido y existen empresas que requieren para su operación de un fuerte componente de control como, por ejemplo: empresas petroleras (Petroecuador, Petroamazonas, etc.), cementeras (Cemento Chimborazo C.A), Cervecería Nacional, entre otras. Sin embargo, todas estas empresas, en su mayoría de fuertes capitales externos o apoyo gubernamental, tienen los suficientes recursos para la implementación, mantenimiento y sobre todo capacitación del personal sobre el uso y manejo adecuado de estas tecnologías.

En relación a este tema, en un estudio realizado por la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) en el año 2012 se establece que el nivel de automatización de los procesos productivos en las pequeñas y medianas empresas (PYMES) es de 1,96 en una escala de 5.



Figura 1-1 Automatización en las medianas y pequeñas industrias
Fuente: Flasco-Mipro, 2012

Como se puede observar en la figura 1-1, los procesos de producción son los que tienen el nivel de automatización más alto con un promedio de 2 unidades de un total de 5 y, por otro lado, las industrias donde tienen el menor componente de automatización son las de adquisición de materia prima.

Es aquí donde se ve la necesidad de implementar sistemas automáticos, contando con las ventajas que tienen los mismos, entre las más importantes se pueden mencionar:

- Las empresas que implementan la automatización de procesos se colocan en una posición de ventaja frente a sus competidores, tanto en operatividad como en confiabilidad.
- Incide en la reducción de costos operativos e incrementa la velocidad y confiabilidad en la implementación de las tareas de soporte y desarrollo.
- Favorece que los sistemas trabajen sin interrupciones, satisfaciendo la demanda de otros departamentos y de los sistemas informáticos.
- Permite disponer de mejores análisis y agiliza la instalación de aplicaciones mediante la ejecución automatizada de trabajos.
- Elimina la ejecución de secuencias de comandos manuales que pueden estar sujetas al error humano, aumentando la eficiencia y la productividad de la organización.
- Permite la visibilidad y control de todos los flujos de trabajo y de las tareas, ofreciendo reportes del estado de los procesos terminados, en proceso y futuros.

En la medida que los investigadores participen en dar solución a problemas de automatización industrial, se lograrán que se desarrolle más y se participe en su desarrollo a través de la vinculación de universidades e institutos técnicos y tecnológicos para dar una respuesta a los problemas de automatización a nivel industrial, se alcanzarán mayores oportunidades de crecimiento del área de control en el medio local y nacional.

La implementación de los sistemas de control en la actualidad hace uso de otras ciencias como la informática, electrónica, telemática, matemáticas, análisis de señales, entre otras. El desarrollo de sistemas de control adecuados, y que garanticen una alta calidad y eficiencia requiere que se trabaje en tiempo real; para lo cual se hace necesario utilizar dispositivos, sistemas y softwares adecuados.

Por otro lado, uno de los dispositivos electrónicos más utilizado para la automatización de procesos es el Controlador Lógico Programable (PLC), el mismo ha ido evolucionando desde los años 60, sustituyendo la lógica cableada basada en relés, contactores, temporizadores, entre otros.

En la actualidad tiene la posibilidad de realizar comunicación con diferentes tipos de protocolos, lo que ha permitido una expansión de este dispositivo a nivel mundial. Tanto es así, que existen muchas marcas, modelos y tipos de autómatas programables. Una de las marcas más reconocidas es Siemens, que cuenta con diferentes modelos y tipos de autómatas programables, según la empresa los dispositivos de este tipo se clasifican de la siguiente manera:

- Gama baja, relés programables (la versión más actual es el Logo 8).
- Gama media, micro autómatas de la serie S7-1200.
- Gama alta, incluye las series S7-300, S7-400 y S7-1500.

La serie S7-1200 es actualmente muy utilizada en las pequeñas y medianas industrias debido a su equilibrio entre costo / beneficio.

Por último, la versiones S7-1200 cuentan con funciones avanzadas incorporadas en el software de programación Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal), una de las cuales es de especial interés para el presente proyecto; ya que se tiene la posibilidad de implementar sistemas de control en lazo cerrado, con el bloque de nombre PID_Compact, de fácil uso y sintonización.

Aunque las efectivas teorías y metodologías de diseño se desarrollan continuamente en el campo del control automático, los controladores en lazo cerrado y sobre todo los del tipo Proporcional- Integral-Derivado (PID) son, con mucho, los controladores más ampliamente adoptados en la industria debido a la ventajosa relación costo / beneficio que son capaces de proporcionar. De hecho, aunque son relativamente fáciles de usar, pueden proporcionar un rendimiento satisfactorio en muchas tareas del control de procesos.

Además, existen gran cantidad de técnicas de control, tanto en textos como en publicaciones; sin embargo, el control Predictivo al igual que el PID se ha abierto espacio en el ámbito industrial. La diferencia entre las diversas técnicas de control radica básicamente en la formulación matemática de los criterios de funcionamiento y en la elección de la manera de representar el proceso.

Los resultados de un estudio realizado por (Takatsu, Itoh, & Arak, 1998) son indicativos de las necesidades futuras de la industria en el ámbito del control. En este informe se analizan los principales problemas del control que se encuentran en la industria de procesos, el estado de aplicación de las tecnologías avanzadas, el grado de satisfacción de los usuarios con cada una de ellas y las expectativas que cada una genera.

Según el informe de (Takatsu, Itoh, & Arak, 1998) se pueden extraer conclusiones interesantes sobre el estado y el grado de aceptación de las tecnologías consideradas avanzadas (tabla 1-1). En ella se muestra el porcentaje de plantas que usaron cada técnica en los años 1989 y 1995. Obsérvese que todas crecieron excepto el control adaptativo y el autoajuste que tuvieron un ligero descenso.

Tabla 1-1: Estado de las distintas técnicas de control

Tipo de Técnica de control	% del grado de aceptación en el año de 1989	% del grado de aceptación en el año de 1995
Compensación de retardo	29.6	52.4
Borroso	9.9	38
Control Predictivo	25.4	37.2
Gain-scheduling	25.7	32.5
PID avanzado	24.8	29.4
Autoajuste	32.2	29.1
Desacoplo	17.5	28.6
Basado en reglas	6.3	17.9
Filtro de Kalman	9.1	15.5
Neuronal	0	11.8
LQ	8.2	11
Observador	8.2	9.8
Control Adaptativo	10.3	7
H_{∞}	0	9.3

Fuente: Future needs for the control theory in industries

Elaborado por: Eduardo Velasco

Con el fin de evaluar el grado de satisfacción del usuario con las distintas técnicas se detallan en la tabla 2-1 el porcentaje de usuarios que están satisfechos con cada una de las técnicas que han empleado. Como conclusión interesante, se destaca el hecho de que prácticamente todos los usuarios de Control Predictivo están satisfechos.

También resulta interesante intentar cuantificar la evolución futura de las distintas técnicas. Para ello, en la figura 2-1 se muestran las posibilidades técnicas y las expectativas despertadas por cada una de ellas. Posibilidad técnica que se refiere a la facilidad de implementación y expectativas al efecto esperado de uso de cada técnica.

El punto de partida de cada flecha es la media de todas las respuestas a la encuesta, mientras que su extremo corresponde a la media de las 15 plantas consideradas líderes en temas de control. El citado artículo interpreta la flecha como tendencia futura.

Según esto, el PID avanzado, compensación de retardo, borroso, desacoplo y control predictivo (MPC) serán técnicas ampliamente usadas con grandes expectativas.

Tabla 2-1: Porcentaje de satisfacción de las distintas técnicas de control

Tipo de Técnica de control	% de usuarios satisfechos 1989	% de usuarios satisfechos en el año de 1995
Control Predictivo	76	9
PID Avanzado	77	8
Compensación de retardo	72	8
Gain-scheduling	78	8
Borroso	67	8
LQ	79	7
Neuronal	-	6
Desacoplo	64	6
Filtro de Kalman	70	6
Autoajuste	60	6
Observador	67	6
Basado en reglas	43	6
Control Adaptativo	50	5
Hoo	-	5

Fuente: Future needs for the control theory in industries

Elaborado por: Eduardo Velasco

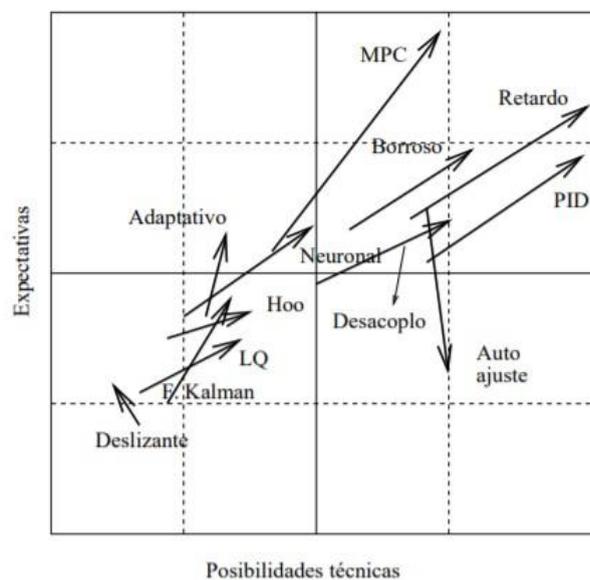


Figura 2-1 Expectativas y posibilidades técnicas

Fuente: Future needs for the control theory in industries

Por lo que las futuras tendencias en el campo del control de procesos industriales indican que el Control Predictivo Basado en Modelo se puede considerar como una tecnología suficientemente introducida en la industria y que además sigue despertando muchas expectativas. Estos hechos, unidos a la existencia de campos abiertos tanto en investigación como en temas relacionados con la implementación justifican un estudio más detallado de esta tecnología aplicada a diferentes procesos y controlando diferentes tipos de variables.

Por todo lo anteriormente descrito, se diseñó un sistema de control PID y un sistema de control Predictivo basándose ambos en el modelo matemático de la planta obtenido por métodos de identificación de sistemas y posteriormente implementados en un autómata programable S7-1200; con ello se pudo comparar y analizar las características de los sistemas de control implementados, para establecer cuál de ellos tiene el mejor desempeño, poniendo énfasis en el análisis de la respuesta en el estado dinámico de los controladores.

1.2. Formulación del problema

Se realizará el diseño e implementación de dos técnicas de control aplicadas a una planta de recirculación de líquidos en el Instituto Tecnológico Superior Sucre.

1.3. Justificación de la investigación

Existe un amplio número de metodologías para el control de procesos, todos ellos para cumplir el objetivo que consiste en actuar sobre las variables manipuladas de forma que puedan satisfacer múltiples y cambiantes criterios de funcionamiento (económicos, de seguridad, medioambientales o de calidad) en presencia de cambios en las características del proceso, la implementación de dichas técnicas se pueden realizar en varios dispositivos electrónicos uno de los cuales es el autómata programable.

Los autómatas programables por excelencia han sido diseñados para controlar procesos discretos, basados en señales todo / nada (0 o 1); sin embargo, a través del tiempo han ido incorporando más características hasta que en la actualidad cuentan con la posibilidad de controlar sistemas en lazo cerrado, mediante la utilización de entradas y salidas analógicas o dispositivos de comunicación.

La versión de la marca Siemens S7-1200, cuenta mediante software con la posibilidad de incorporar controles en lazo cerrado tipo PID, el mismo basa su sintonización (calibración) en la curva de reacción del sistema ante una entrada tipo escalón; dicho de otra manera, no toma en cuenta el modelo matemático de la planta; sin embargo, hay que destacar que la utilización es muy intuitiva, fácil de utilizar y poner en servicio.

Por el grado de precisión y de las características de la respuesta en estado dinámico como en estado estable del sistema a controlar, suele ser suficiente el diseño del controlador PID propio del dispositivo; sin embargo, en muchos casos la respuesta obtenida no cumple con los parámetros deseados por más calibraciones y optimizaciones que se realicen al controlador.

Es por esto que se implementarán en el mencionado autómeta programable un controlador PID y uno Predictivo, pero basados en el modelo matemático de la planta, para comparar la respuesta de los mismos versus el controlador integrado y determinar cuál de ellos proporciona las mejores características de funcionamiento a la planta de recirculación de líquidos perteneciente al Instituto Tecnológico Superior Sucre.

Además, es importante mencionar que para la realización del proyecto se utilizarán en gran medida programas computacionales como por ejemplo: Matlab (Identificación del modelo matemático de la planta y diseño de los sistemas de control), TIA Portal (Programación del autómeta programable), Movicon (Diseño de HMI), entre otros; de tal manera que el método de desarrollo del proyecto no contempla un componente matemático fuerte; sino más bien, una forma accesible para la interpretación de resultados basados lógicamente en el conocimiento teórico fundamental.

Otro parámetro a tomar en cuenta es que no se utilizarán otros dispositivos, como por ejemplo tarjetas de adquisición de datos, sino más bien se explotarán al máximo las características del autómeta programable; es decir, el mismo servirá para obtener los datos de la planta.

Como ya se mencionó anteriormente, las dos técnicas de control escogidas son PID y Predictivo; respecto a la primera es la más utilizada en la actualidad para el control de sistemas en lazo cerrado a nivel industrial, de ahí su importancia para el estudio y análisis de las respuestas obtenidas del controlador a diferentes variables y procesos. La segunda técnica escogida dentro de todo el abanico de posibilidades para la implementación, es el control Predictivo, debido a que como ya se manifestó en líneas anteriores; es uno de los tipos de control con más éxito en el ámbito industrial.

La situación de las aplicaciones del Control Predictivo en la industria está bien reflejada en la recopilación de (Qin & Badgwell, 2000), que recoge unas 2200 aplicaciones, principalmente en el sector petroquímico (desde entonces el número de aplicaciones puede estimarse en torno a las 3000). La mayoría de las aplicaciones son en procesos multivariable, registrándose casos como un controlador con 40 entradas y 80 salidas.

El éxito del control Predictivo en la industria se debe a tres razones principales:

- La incorporación de un modelo explícito del proceso en los cálculos permite al controlador tratar con todas las características importantes de la dinámica del proceso.
- La consideración del comportamiento del proceso a lo largo de un horizonte futuro permite tener en cuenta el efecto de las perturbaciones en realimentación, permitiendo al controlador conducir la salida a la trayectoria de referencia deseada.
- La consideración de restricciones en la fase del diseño del controlador evita en lo posible su quebrantamiento, resultando en un control más preciso en torno al punto.

Por último, al implementar las dos técnicas de control sobre la misma variable, se podrá comparar el desenvolvimiento de cada una de ellas, teniendo un criterio adecuado sobre cual tiene el mejor desempeño.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Integrar técnicas de control en lazo cerrado a una planta de recirculación de líquidos, a través de la implementación de sistemas de control PID y Predictivo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Modificar la planta de recirculación de líquidos para la implementación de sistemas de control en lazo cerrado.
- Identificar el modelo matemático más adecuado de la planta y diseñar los sistemas de control PID y Predictivo en software computacionales.
- Implementar los sistemas de control en un autómata programable Siemens S7-1200, para determinar la posibilidad de integrar otros sistemas de control al dispositivo e identificar el funcionamiento de los mismos aplicados a la planta.

1.5. Hipótesis

El diseño de controladores PID y Predictivo basados en modelo e implementados en un PLC S7-1200 permiten mejorar las características dinámicas del control en lazo cerrado para la variable caudal en el proceso de recirculación de líquidos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Desde que empezó la revolución industrial, la prioridad de los seres humanos ha sido crear procesos cada vez más independientes, en donde el ser humano cumple un papel de supervisor de máquinas autónomas, lo que permite tener procesos industriales eficientes con mayor producción y mejor calidad, esto ayuda a las industrias a volverse más competitivas cada día.

Según (Morales & Ramírez, 2013) “muchos mecanismos automatizados aparecieron durante el medioevo, específicamente para el control de temperatura concebidos por Cornelius Drebbel (1572 – 1663) e implementados por René – Antonie Ferchault de Réaumur, (1683 – 1757)”.

Hoy en día las tendencias de los sistemas de control van enfocadas hacia la optimización de los procesos y la digitalización de los controladores.

2.2. Bases Teóricas

Actualmente no se podría concebir una industria que no posea algún tipo de sistemas de control retroalimentado, una de las técnicas más utilizadas es el control PID cuya lógica se puede desarrollar dentro de un controlador lógico programable (PLC), un avance a este tipo de control es el control Predictivo, el cual permite tener un control más fino de los procesos industriales.

Con la ayuda de software matemáticos especializados como Matlab resulta más fácil simular el funcionamiento de estas técnicas de control en un proceso específico, una vez comprobado la respuesta del sistema de control se puede realizar la programación del mismo a distintos PLC, debido a que los autómatas han ido incorporando lenguajes de programación cada vez más sofisticados como, por ejemplo: texto estructurado (ST), Grafcet, entre otros.

Con respecto a la simulación (Gutarra, 2016) en su trabajo de tesis para obtener el título de Máster en Ingeniería Mecánica – Eléctrica con mención en Automática y optimización, titulado “Modelación y control de un sistema de cuatro tanques acoplados”, menciona: “La simulación de las técnicas de control resulta una herramienta muy útil para estudiar cómo será el desenvolvimiento del controlador una vez implementado en el módulo”.

Lo cual demuestra que, al tener la posibilidad de simular los procesos de control; en este caso haciendo uso del software Matlab, permite no solamente comprobar el funcionamiento del controlador sino sintonizar y optimizar de una mejor manera el mismo, hasta que el sistema de control tenga las mejores características posibles; es decir, cumpla con los parámetros de funcionamiento establecidos para el mismo.

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. *Sistemas de Control*

Según (Pérez, Pérez, & Pérez, 2008) “los sistemas de control son sistemas dinámicos y un conocimiento de la teoría de control proporcionará una base para entender el comportamiento de tales sistemas”. En este sentido, la teoría de control automático no es sino una pequeña parte de una teoría más general que estudia el comportamiento de todos los sistemas dinámicos.

Por otra parte los controladores son elementos que se le agregan al sistema original para mejorar sus características de funcionamiento, con el objetivo de satisfacer las especificaciones de diseño tanto en régimen transitorio como en estado estable.

Para entender de mejor manera los sistemas de control se deben conocer las definiciones más relevantes de esta temática, a saber:

- **Variable controlada:** Es la variable física que se desea medir o controlar.
- **Variable manipulada:** Es la variable que se manipula mediante el actuador y la cual de manera indirecta cambiará el valor de la variable controlada.
- **Planta:** Se considera como un conjunto de elementos o equipos que pueden ser controlados.
- **Proceso:** Es el conjunto de pasos determinados que al ser ejecutados se cumple con un propósito.
- **Sistema:** Conjunto de elementos que actúan juntos para lograr un fin común.
- **Perturbación:** Es una señal interna o externa que puede alterar la señal de salida de un proceso controlado.
- **Control Realimentado:** Es aquel control que toma en cuenta la salida del sistema para ejecutar una acción de control, evitando así que una perturbación pueda afectar el control del proceso.

2.3.1.1 Sistemas de control en lazo cerrado

El objetivo de un sistema de control es obtener una respuesta deseada para un sistema dado. Esto se puede hacer con un sistema de control en lazo abierto, donde el controlador determina la señal de entrada al proceso basándose únicamente en la señal de referencia, o con un sistema de control en lazo cerrado, donde el controlador determina la señal de entrada al proceso utilizando también la medición de la salida (es decir, la señal de realimentación).

En la figura 1-2 se pueden observar los componentes típicos de un sistema de control realimentado, como son: el controlador, el actuador también llamado elemento final de control, el proceso (planta o sistema) y el elemento sensor (incluye el acondicionamiento necesario).

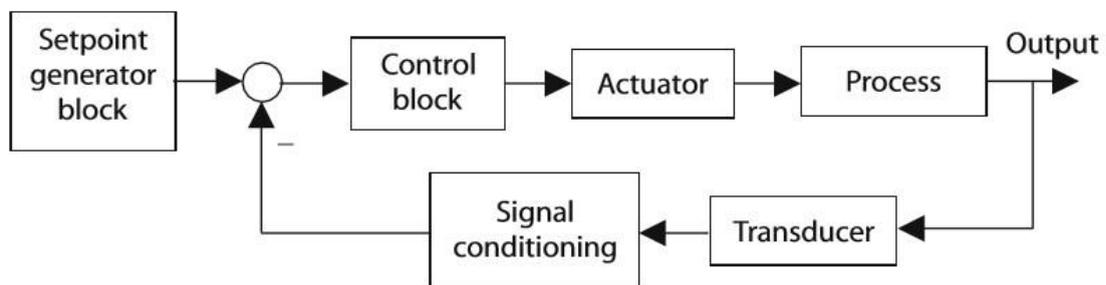


Figura 1-2 Sistema de control en lazo cerrado
Elaborado por: (Johnson & Moradi, 2005)

2.3.1.2 Sistemas de control en lazo abierto

En este sistema de control la señal de salida no afectará a la señal de control, por lo cual no existe realimentación, estos sistemas son usados en procesos en los cuales se tiene claro los efectos que causará un valor dado en la entrada sobre la salida, el inconveniente más relevante de este tipo de control es que de existir algún tipo de perturbación se afectará la señal de salida. La figura 2-2 muestra los componentes de un sistema de control en lazo abierto como son: el controlador y la planta; es decir, no existe el elemento sensor por tanto no hay la realimentación entre la entrada y la salida del sistema.



Figura 2-2 Sistema de control en lazo abierto
Elaborado por: (Pérez, Pérez, & Pérez, 2008)

2.3.1.3 Comparación entre los sistemas de control

Los sistemas de control en lazo abierto son sencillos de implementar en sistemas en donde se tengan parámetros específicos de funcionamiento y adicionalmente se tenga la certeza de que no estarán sometidos a perturbaciones.

Según (Ogata, 2010) “una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema”.

A nivel industrial la utilización de una u otra técnica está determinada por las características propias de la aplicación; por ejemplo, analizando la variable temperatura; realizar un control de esta variable en una oficina no requeriría un control en lazo cerrado, puesto que la variación de 1, 2 o 3 grados centígrados no afectan de manera significativa; sin embargo, en un cultivo de bacterias, una variación de 1 grado centígrado puede significar la pérdida de todo un lote de producción. De ahí, que los sistemas de control tanto en lazo abierto como cerrado se implementan de acuerdo a las necesidades de cada una de las aplicaciones.

2.3.2. Técnicas de control

2.3.2.1 Control Proporcional –Integral – Derivativo (PID)

El controlador PID es una unidad diseñada para crear un lazo de control estable y alcanzar el desempeño deseado mediante tres tipos de acciones básicas de corrección de error: proporcional, integral y derivativo, que dan origen al acrónimo PID. Cada una de estas acciones resuelve un problema específico relativo al error.

Además, un controlador PID es la extensión natural del control ON-OFF, da solución a muchos problemas de control, más del 95% de los lazos de control utilizan el PID, además que ha sobrevivido a los cambios tecnológicos; tanto es así, que en la actualidad está vigente y sigue siendo utilizado a nivel industrial.

Según (Casas), “el controlador PID anticipa cual será el error en un futuro inmediato y aplica una acción de control proporcional a la velocidad del cambio del error. Esta acción preventiva viene marcada por una nueva constante, T_D que corresponde a la constante de tiempo derivativo”, a continuación, se analizan cada una de las acciones de control que intervienen en un controlador PID.

Acción proporcional: En el caso de un control netamente proporcional se tiene que la señal de control es solamente proporcional al error existente en el proceso (con el signo adecuado), se interpreta con las siguientes ecuaciones:

$$u_c(t) = Kp * e(t) + u_b \text{ (En el dominio del tiempo)}$$

$$U_c = Kp * E(s) \text{ (En el dominio de Laplace)}$$

En donde la variable u_b es una polarización o reset, Kp es la constante de proporcionalidad, la cual tomará un mayor valor para disminuir el error existente.

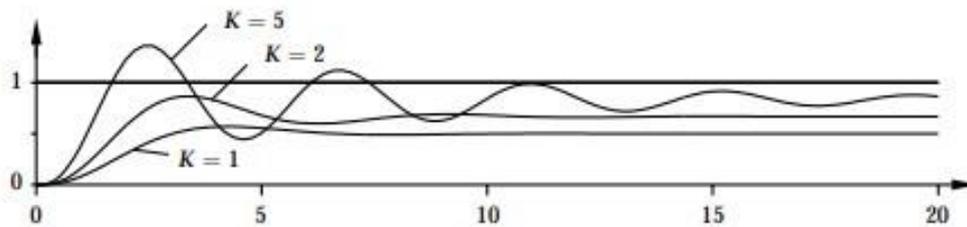


Figura 3-2 Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional
Elaborado por: (Astrom & Haggglun, 2009)

En la figura 3-2 se observa que al incrementar la constante K el error tiende a disminuir; sin embargo, por más que se aumente dicha constante jamás se conseguirá eliminar el error; es más, el aumento excesivo de la constante proporcional (para la figura $K = 5$) puede hacer que el sistema se vuelva oscilatorio.

Vale la pena señalar que en los productos comerciales la ganancia proporcional a menudo se reemplaza por la banda proporcional PB , que es el rango de error que causa un cambio de rango completo de la variable de control, y se expresa como:

$$PB = \frac{100}{Kp}$$

Acción Integral: Esta acción permite asegurarse de que la señal de salida del proceso coincida con el SP en estado estacionario, la señal de control viene dada por las siguientes ecuaciones:

$$u_0 = K \left(e_0 + \frac{e_0}{T_i} t \right) \text{ (En el dominio del tiempo)}$$

Donde:

$$u_0 = \text{señal de control}$$

$e_0 = \text{error constante}$

$$U_c(s) = \frac{K_I}{s} * E(s) (\text{En el dominio de la Laplace})$$

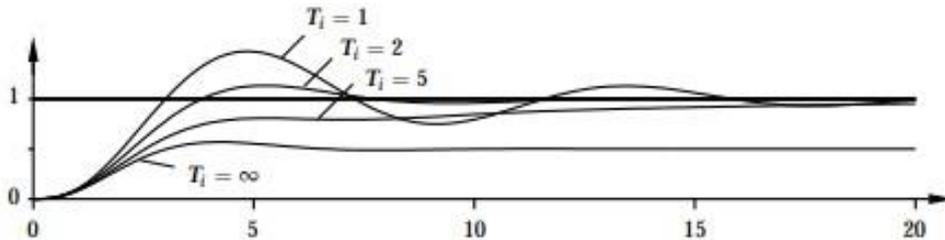


Figura 4-2 Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional - integral

Elaborado por: (Astrom & Hagglun, 2009)

Como se puede observar en la figura 4-2, cuando se coloca un $T_i = \infty$ se tendrá solo la acción proporcional; para grandes valores del tiempo de integración, la repuesta se mueve lentamente hacia el punto de consigna, en cambio la respuesta es más rápida para valores más pequeños de T_i ; sin embargo, valores muy pequeños hacen que la respuesta del sistema tenga un sobre impulso más elevado y tarde más tiempo en estabilizarse.

Acción Derivativa: Al tener solamente un sistema PI se obtiene una señal oscilatoria a su salida, por lo cual para reducir este efecto se coloca la acción derivativa, su objetivo es mejorar la estabilidad en lazo cerrado, volviéndose una acción predictiva al error de la planta.

La acción derivativa se expresa con las siguientes ecuaciones:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{de(t)}{dt} \right] (\text{En el dominio del Tiempo})$$

$$U_c(s) = [K_D(s)] * E(s) (\text{En el dominio de Laplace})$$

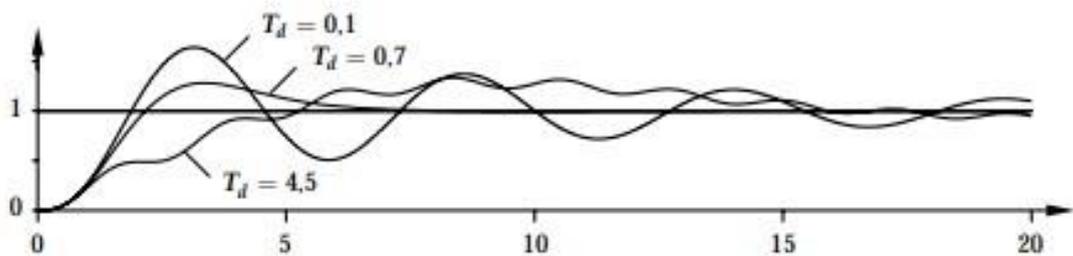


Figura 5-2 Simulación de un sistema en lazo cerrado con control PID

Elaborado por: (Astrom & Hagglun, 2009)

En la figura 5-2 se observa que un valor alto para T_d genera un tiempo de estabilización demasiado extenso y con oscilaciones sostenidas, por el contrario, un valor pequeño ($T_d = 0.1$) no realiza ninguna compensación y el sistema sigue manteniéndose oscilatorio; un valor adecuado como muestra la figura sería la constante $T_d = 0.7$, mismo que estabiliza el sistema y elimina el error en estado estable.

Una vez analizadas las acciones de control de manera independiente a continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes al algoritmo teórico elemental de un control PID paralelo con las tres acciones incorporadas:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \text{ (En el dominio del Tiempo)}$$

$$U_c(s) = \left[K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s \right] E(s) \text{ (En el dominio de Laplace)}$$

Resumiendo, el controlador PID se encuentra conformado por los siguientes parámetros:

- Constante proporcional
- Tiempo integral
- Tiempo derivativo

En la figura 6-2 se muestra una representación más simplificada de un sistema de control en lazo cerrado PID en la cual la salida del sistema $y(t)$ se compara directamente con la referencia $r(t)$ y se obtiene la señal de error $e(t)$; a esta representación se la conoce como realimentación unitaria.

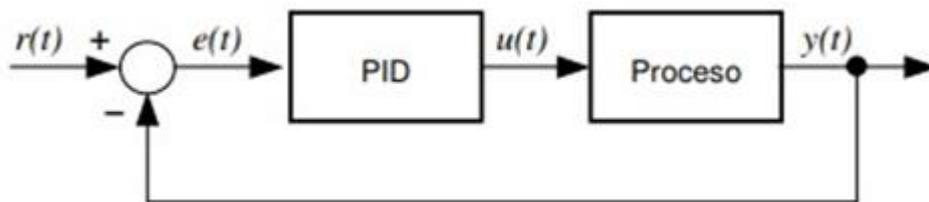


Figura 6-2 Lazo de control PID con realimentación unitaria
Elaborado por: (Cova, 2005)

Según (Cova, 2005) para tener un buen controlador PID se debe considerar los siguientes puntos:

- Filtrado de ruidos y respuesta en alta frecuencia.
- Diseño de dos grados de libertad con asignación de peso en el punto de ajuste.
- Efecto winup debido a la saturación del actuador.
- Ajuste (tuning) de los parámetros.

Para la sintonización (ajuste de los parámetros) de controladores PID correctamente y con un mínimo esfuerzo se pueden recurrir, empezando por las fórmulas de Ziegler–Nichols (Ziegler & Nichols, 1942), en los últimos sesenta años se han ideado un gran número de reglas de sintonía (Astrom & Hagglun, 2009) y (O'Dwyer, 2006). Intentan abordar los posibles requisitos de control y se basan generalmente en un modelo simple de la planta. Se han derivado empíricamente o analíticamente. Por lo tanto, el operador debe obtener un modelo adecuado de la planta y seleccionar la regla de ajuste más conveniente con respecto a los requisitos de control dados.

“Una función que en la actualidad tienen muchos de los controladores comerciales es el auto-tuning que no es más que la funcionalidad de identificar automáticamente el modelo del proceso y ajustar el controlador según ese modelo. En particular, se realiza un experimento de identificación después de una solicitud explícita del operador y los valores de los parámetros PID se actualizan al final de la misma” según manifiesta (Visioli, 2006).

Además, vale la pena destacar que muchos paquetes de software se han desarrollado y están disponibles en el mercado, lo que ayuda a los profesionales a diseñar el controlador general; también permiten identificar el modelo matemático del proceso basándose en los datos de entrada y salida disponibles (modelo de identificación caja negra), para ajustar el controlador según los requisitos dados.

2.3.2.2 Objeto Tecnológico PID Compact

Este bloque se encuentra integrado para los autómatas programables S7-1200, su funcionamiento es el siguiente, registra de forma continua el valor real medido (realimentación) dentro de un lazo de regulación y lo compara con la consigna deseada (Set Point).

A partir del error de regulación resultante, la instrucción calcula un valor de salida, con el que el valor real se iguala con la consigna con la máxima rapidez y estabilidad.

Según (Siemens AG, 2018) la calibración del PID se lo realiza determinando el comportamiento del tiempo a partir de la repuesta inicial; es decir, la respuesta temporal del sistema regulado se puede determinar a partir de la evolución temporal del valor real $x(t)$ tras un cambio brusco del valor de salida y (t) , como se muestra en la figura 7-2.

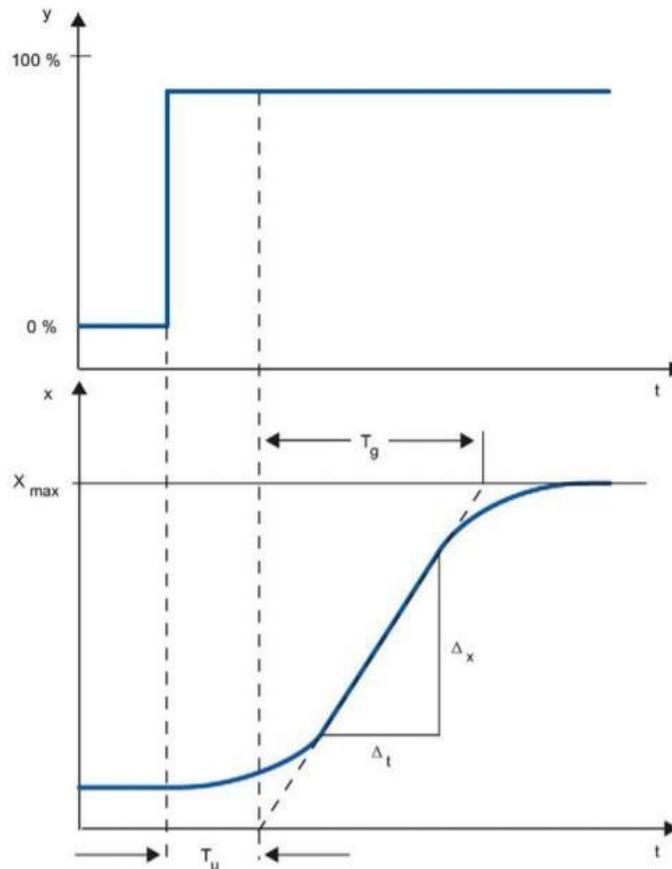


Figura 7-2 Respuesta del sistema ante una entrada escalón
 Elaborado por: (Siemens AG, 2018)

En la figura anterior se puede observar; que al sistema se lo excita con una entrada escalón unitario, lo cual genera a la salida $y(t)$ una respuesta en porcentaje aproximadamente del 90%; a partir de este impulso inicial se obtiene la evolución del sistema en tiempos a través del elemento sensor llamado $x(t)$.

El comportamiento de tiempo se puede definir aproximadamente con las magnitudes tiempo de retardo T_u , tiempo de compensación T_g y valor máximo X_{max} . Las magnitudes se determinan posicionando tangentes en el valor máximo y en el punto de inflexión de la respuesta inicial.

En muchos casos no es posible aceptar la respuesta transitoria hasta el valor máximo debido a que el valor real no puede rebasar ciertos valores. Luego se utiliza la velocidad de aumento V_{max} para identificar el sistema regulado ($V_{max} = \Delta x / \Delta t$).

Finalmente, en la tabla 1-2 se muestran los índices más comúnmente utilizados para la especificación del rendimiento de un sistema de control en lazo cerrado.

Tabla 1-2: Indicadores de rendimiento de un sistema de control en bucle cerrado

Índices de rendimiento en el dominio del tiempo	
Constante de tiempo τ	Posiciones de los polos
Tiempo de subida t_r (10%,90%)	Tiempo de establecimiento t_s (2%) o t_s (10%)
Porcentaje de sobre impulso Mp%	Error en estado estable
Relación de amortiguación ζ	Máximo valor de la perturbación
Frecuencia natural w_n	
Índices de rendimiento en el dominio de la frecuencia	
Margen de ganancia GM	Margen de fase PM
Sensibilidad máxima S_{max}	Margen de retraso DM

Fuente: (Johnson & Moradi, 2005)

Elaborado por: Eduardo Velasco

2.3.2.3 Control Predictivo

El control predictivo Basado en Modelo (MPC) no es una técnica de control particular sino un conjunto de métodos de control, que toma en cuenta las perturbaciones que pueden afectar el sistema.

Según (Bordóns, 2000) el MPC presenta una serie de ventajas, entre las que se destacan las siguientes:

- La sintonización es relativamente fácil y sus conceptos son intuitivos para el personal.
- Toma en cuenta las restricciones del actuador.
- Pueden ser utilizados en una gran variedad de procesos.
- Tiene un fácil manejo para procesos multivariable.
- Es útil cuando se conocen las futuras referencias.
- Es una metodología abierta.

Según manifiesta (Dale, Thomas, Duncan, & Francis, 2017) si se dispone de un modelo dinámico del proceso razonablemente preciso, se puede utilizar el modelo y las mediciones actuales para predecir los valores futuros de las salidas. Luego, los cambios apropiados en las variables de entrada se pueden calcular basándose tanto en las predicciones como en las mediciones. En esencia, los cambios en las variables de entrada individuales se coordinan después de considerar las relaciones de entrada-salida representadas por el modelo de proceso. El objetivo general del diseño del modelo de control predictivo es calcular la trayectoria de una variable manipulada para optimizar el comportamiento futuro de la producción de la planta. La optimización se realiza dentro de una ventana de tiempo limitado dando información de la planta al inicio de la ventana de tiempo.

A continuación, se describen algunos términos y conceptos a tomar en cuenta para entender de mejor manera la base teórica de un control predictivo:

1. Ventana de horizonte móvil: es la ventana dependiente de un tiempo arbitrario t_i a $t_i + T_p$. La longitud de la ventana T_p permanece constante.
2. Horizonte de predicción: determina qué tan lejos se quiere predecir el futuro. Este parámetro es igual a la longitud de la ventana del horizonte móvil, T_p .
3. Control del horizonte de retroceso: aunque la trayectoria óptima de la señal de control futura se describe completamente dentro de la ventana del horizonte en movimiento, la entrada de control real a la planta solo toma la primera muestra de la señal de control, mientras que se descuida el resto de la trayectoria.
4. Por ello se requiere la información en ese instante para poder predecir el futuro. Esta información se denota como $x(t_i)$, que es un vector que contiene muchos factores relevantes y que se mide directamente o se estima.
5. Un modelo de la planta que describa la dinámica del sistema es primordial en el control predictivo. Un buen modelo dinámico dará una predicción consistente y precisa del futuro.
6. Para tomar la mejor decisión, se necesita un criterio para reflejar el objetivo. El objetivo está relacionado con una función de error basada en la diferencia entre la respuesta deseada y la real. Esta función objetivo a menudo se denomina función de costo J , y la acción de control óptima se encuentra minimizando esta función de costo dentro de la ventana de optimización.

Los sistemas de control predictivo están diseñados en base a un modelo matemático de la planta. El modelo que se utilizará en el diseño del sistema de control se considera un modelo de espacio de estado. Al usar un modelo de espacio de estado, la información actual requerida para predecir el futuro se representa mediante la variable de estado en el momento actual.

Sistema de entrada única y salida única

También conocido como sistemas SISO (single input, single output), se analizará este sistema debido a que el proceso a controlar tiene esa forma:

$$x_m(k + 1) = A_m x_m + B_m u(k)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) + D_m u(k)$$

Donde:

$u(k)$ es la variable manipulada o variable de entrada, $y(k)$ es el resultado del proceso; y x_m es el vector variable de estado con una dimensión de n_1 . Sin embargo, debido al principio de retroceso del horizonte de control, donde se requiere una información actual de la planta para la predicción y el control, se asume implícitamente que la entrada no puede afectar la salida al mismo tiempo. Por lo tanto, $D_m = 0$ en el modelo de planta.

Realizando operaciones con diferencias en ambos lados de la ecuación, y las operaciones matemáticas correspondientes se obtiene:

$$\begin{aligned} \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} &= \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & oT_m \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \\ y(k) &= \overbrace{\begin{bmatrix} o_m & 1 \end{bmatrix}}^C \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}} \end{aligned}$$

Donde $o_m = \overbrace{[0 \ 0 \ \dots \ 0]}^{n_1}$. Las matrices (A, B, C) se denominan modelo aumentado, que se utilizará en el diseño del control predictivo.

Tras la formulación del modelo matemático, el siguiente paso en el diseño de un sistema de control predictivo es calcular la salida prevista de la planta con la señal de control futura como las variables ajustables. Esta predicción se describe dentro de una ventana de optimización. Suponiendo que en el instante de muestreo ki , $ki > 0$, el vector variable de estado $x(ki)$ está disponible a través de la medición, el estado $x(ki)$ proporciona la información actual de la planta, la futura trayectoria de control se denota por:

$$\Delta u(ki), \Delta u(ki + 1), \dots \dots \Delta u(ki + Nc - 1)$$

Donde, Nc se llama el horizonte de control que dicta el número de parámetros utilizados para capturar la futura trayectoria de control. Con la información dada por $x(ki)$, las variables de estado futuras se predicen para Np número de muestras, donde Np se llama horizonte de predicción. Np es también la longitud de la ventana de optimización.

El horizonte de control Nc se elige para ser menor que (o igual a) el horizonte de predicción Np . Basado en el modelo de espacio de estado (A, B, C), las variables de estado futuras se calculan secuencialmente usando el conjunto de parámetros de control futuros.

Optimización

Para una señal de punto de ajuste dada $r(ki)$ en el tiempo de muestra ki , dentro de un horizonte de predicción, el objetivo del sistema de control predictivo es acercar la salida predicha lo más posible a la señal del punto de ajuste, donde se supone que la señal del punto de ajuste permanece constante en la ventana de optimización.

Este objetivo se traduce luego en un diseño para encontrar el mejor vector de parámetros de control ΔU , de modo que se minimice una función de error entre el punto de ajuste y la salida predicha.

Se define la función de costo J que refleja el objetivo de control como:

$$J = (R_s + Y)^T + (R_s + Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U$$

Donde, el primer término está vinculado al objetivo de minimizar los errores entre la salida pronosticada y la señal de punto de ajuste, mientras que el segundo término refleja la consideración dada al tamaño de ΔU cuando la función objetivo J se hace lo más pequeña posible.

\bar{R} es una matriz diagonal que se utiliza como parámetro de ajuste para el rendimiento deseado del lazo cerrado.

Para minimizar el error se deriva parcialmente la función de costo J ; es decir, $\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0$. Realizando los respectivos cálculos matemáticos y reemplazos necesarios se obtiene:

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - (F x(k_i)))$$

A la matriz $(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1}$ se la conoce como matriz Hessiana, como se puede intuir, la solución óptima de la señal de control está vinculada a la señal de punto de ajuste $r(k_i)$ y la variable de estado $x(k_i)$.

Las matrices $F x(k_i)$ y Φ , están definidas como:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2 B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ CA^{N_p-1} B & CA^{N_p-2} B & CA^{N_p-3} B & \dots & CA^{N_p-N_c} B \end{bmatrix}$$

Las matrices (A, B, C), son correspondientes al modelo de la planta expresado en variables de estado.

Estrategia de los controladores

1. En cada instante t y haciendo uso del modelo del proceso se predicen las futuras salidas para un determinado horizonte N_p , llamado horizonte de predicción, como se puede observar en la figura 8-2.
2. El conjunto de señales de control futuras se calcula optimizando un determinado criterio en el que se pretende mantener el proceso lo más próximo posible a la trayectoria de referencia.
3. La señal de control es enviada al proceso mientras que las siguientes señales de control calculadas son desechadas, puesto que en el siguiente instante de muestreo ya se conocen.

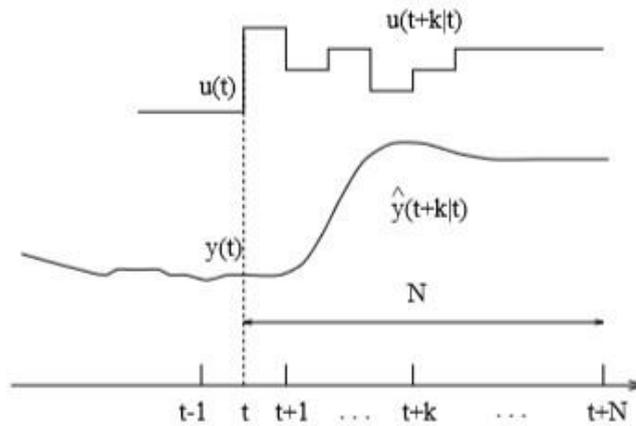


Figura 8-2 Estrategias del Control Predictivo
 Elaborado por: (Bordóns, 2000)

Según (Bordóns, 2000) para implementar esta estrategia se hace uso de un modelo para predecir las salidas futuras del proceso basándose en las futuras señales de control propuestas. Estas señales son calculadas por el optimizador teniendo en cuenta la función de coste (donde aparece el futuro error de seguimiento) así como las restricciones. Por tanto, el modelo juega un papel decisivo en el controlador.

En la figura 9-2 se muestra la estructura básica de un controlador predictivo basado en modelo; se puede apreciar que consta de dos elementos, el modelo de la planta; a este bloque ingresa los controles futuros y las entradas / salidas pasadas, y se obtienen las salidas predichas. El bloque optimizador que está integrado por la función de coste y las restricciones, como entradas al mismo se tienen los errores futuros y como salida los controles futuros.

Las acciones de control son proporcionadas por el optimizador si la función de coste es cuadrática, el mínimo se puede obtener como una función explícita de las entradas y salidas pasadas.

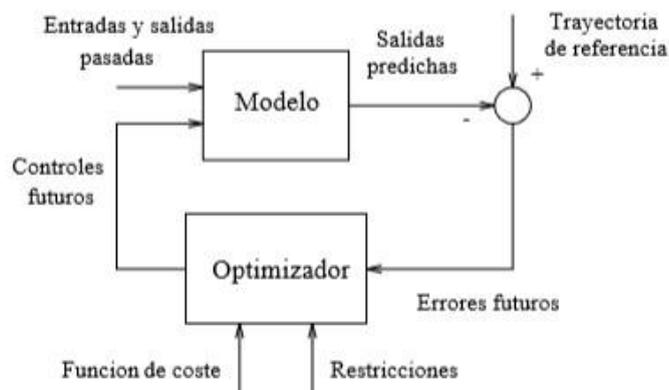


Figura 9-2 Estructura básica del control MPC
 Elaborado por: (Bordóns, 2000)

Controladores Predictivos

Todos los controladores predictivos poseen elementos comunes y para cada uno de estos elementos se pueden elegir diversas opciones, dando lugar a distintos algoritmos. Estos elementos son:

- Modelo de predicción
- Función objetivo
- Obtención de la ley de control

Modelo de Predicción

La parte fundamental del MPC es el modelo; un diseño completo debe incluir los mecanismos necesarios para la obtención del mejor modelo posible, el cual debe ser lo suficientemente apropiado para capturar al máximo la dinámica del proceso y debe ser capaz de permitir el cálculo de las predicciones.

Casi todas las formas posibles de modelar un proceso aparecen en alguna formulación de MPC siendo las más usadas las siguientes:

- Respuesta impulsional
- Respuesta ante escalón
- Función de transferencia
- Espacio de estados

Función Objetivo

Los diversos algoritmos de MPC proponen distintas funciones de coste para la obtención de la ley de control. En general se persigue que la salida futura en el horizonte considerado siga a una determinada señal de referencia al mismo tiempo que se puede penalizar el esfuerzo de control requerido para hacerlo. La expresión general de tal función objetivo es:

$$J(N1, N2, Nu) = \sum_{j=N1}^{N2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{Nu} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2$$

En algunos métodos el segundo sumando, que considera el esfuerzo de control, no se toma en cuenta, mientras que en otros también aparecen directamente los valores de la señal de control (no sus incrementos).

Obtención de la ley de control

Para obtener los valores $u(t + k|t)$ será necesario minimizar la funcional J de la ecuación.

Para ello se calculan los valores de las salidas predichas $\hat{y}(t + j|t)$ en función de valores pasados de entradas y salidas y de señales de control futuras, haciendo uso del modelo que se haya elegido y se sustituyen en la función de coste, obteniendo una expresión cuya minimización conduce a los valores buscados.

2.3.3. Software Matlab

Matlab es un software con lenguaje de alto rendimiento utilizado para cálculos numéricos y técnicos, que actúan al mismo tiempo como un entorno y un lenguaje de programación.

Uno de los puntos fuertes de Matlab según (Casado, 2000) es que “permite construir herramientas reutilizables propias. Se puede crear fácilmente funciones propias y programas especiales (conocidos como M-archivos) en código Matlab”. Además cuenta con un subprograma, llamado Simulink, que es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

Siendo ésta una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos.

2.3.3.1 Modelado de la planta por identificación

El modelado por identificación estudia metodologías para obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de mediciones sobre el sistema, lo cual permite obtener un modelo experimental aproximado a la planta.

Para la identificación del modelo de un sistema se deben tomar en cuenta las siguientes actividades y herramientas:

- Planificación de experimentos
- Selección del tipo de modelo
- Elección de un criterio
- Estimación de los parámetros de modelo
- Validación del modelo obtenido

En la figura 10-2, se muestran las etapas de un proceso de Identificación según (Gómez, 2005):

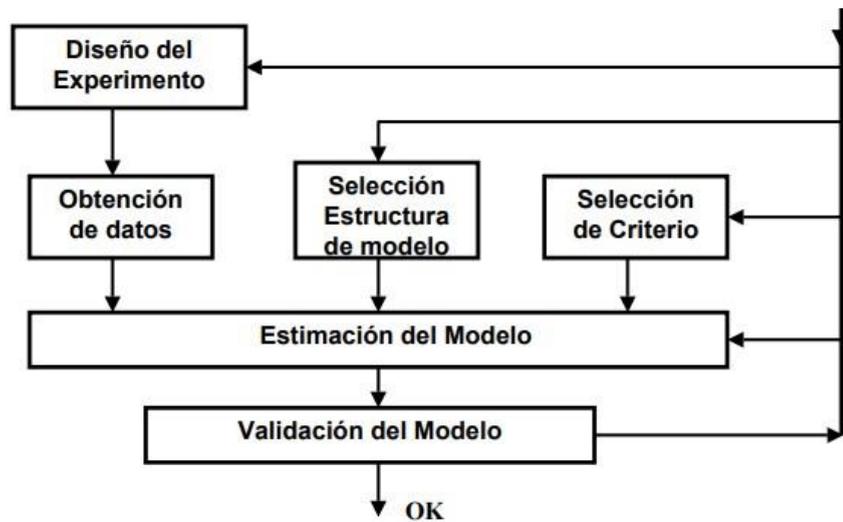


Figura 10-2 Etapas de un proceso de identificación
Elaborado por: (Gómez, 2005)

A continuación, se detalla la manera correcta de realizar dichas actividades.

a) Planificación de experimentos

Generalmente para poder identificar el modelo de un sistema se debe someter al mismo a condiciones extremas de funcionamiento, para que el modelo sea el más aproximado al real, lo cual puede ser muy costoso de implementar en los procesos industriales.

b) Selección del tipo de modelo

Según (Rodríguez & Bordóns, 2005) “la selección del tipo de modelo se deben analizar las perturbaciones y tener un conocimiento adecuado del proceso”, los modelos se clasifican como:

- Modelos de Caja Blanca: Son los que se obtienen a partir de leyes físicas.
- Modelos de Caja Negra: Se postula una estructura matemática con parámetros libres, de los cuales se obtiene un modelo matemático que sigue a los datos obtenidos en los experimentos.
- Modelos de Caja Gris: Es una combinación en donde parte del modelo se obtiene basándose en leyes físicas y la otra parte se basa en experimentos realizados.

c) Elección de un criterio

Es necesario tener un criterio que permita evaluar el ajuste y la calidad del modelo a implementar, para (Rodríguez & Bordóns, 2005) los criterios toman la siguiente forma:

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N g(e(k))$$

Donde:

θ = vector de parámetros que se trata de ajustar

$e(k)$ = error de estimación

N = es el número de medidas disponibles

d) Estimación de los parámetros.

Para realizar una estimación correcta se deben considerar todos los parámetros mencionados anteriormente, para esto se puede utilizar dos métodos: identificación en línea o identificación fuera de línea.

➤ **Identificación en línea**

Este tipo de identificación se lleva a cabo en tiempo real, posee una etapa de supervisión que permite evitar errores como por ejemplo que el modelo se salga de los límites establecidos para el proceso o se dé un cambio brusco.

En la figura 11-2, se muestra el modelo en bloques de un sistema de identificación en línea.

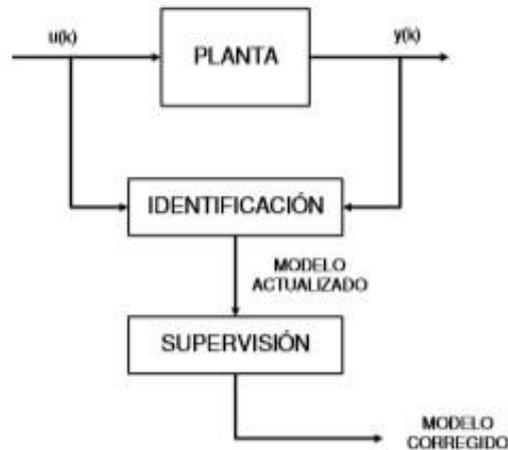


Figura 11-2 Modelo de Identificación en línea
Elaborado por: (Rodríguez & Bordóns, 2005)

➤ **Identificación fuera de línea**

En este método se toma los datos del proceso para posteriormente realizar el ajuste del modelo, se considera que este proceso es más preciso y fiable.

e) **Validación del modelo.**

En el proceso de validación se busca comprobar que el modelo obtenido cumpla con las características establecidas y, sobre todo refleje las condiciones dinámicas de la planta.

2.3.4. Controlador Lógico Programable

“El controlador lógico programable o mejor conocido como PLC es un dispositivo que procesa señales binarias de entrada y las convierte en señales de salida, mediante las cuales se puede controlar cualquier tipo de proceso industrial”. (Ackermans, y otros, 1994).

Existe una gama amplia de controladores lógicos programables desarrollados por las empresas Siemens, Allen Bradley, Koyo, Schneider, entre otros.

Para esta aplicación se utilizará un autómata programable de la marca Siemens de la gama S7-1200.

2.3.4.1 Simatics S7-1200

Es un controlador semi-modular para tareas de automatización sencillas que requieren de alta precisión.

Características del dispositivo:

- Alta capacidad de procesamiento. Cálculo de 64 bits.
- Interfaz Ethernet / PROFINET integrado.
- Entradas analógicas integradas.
- Bloques de función para control de ejes conforme a PLCopen.
- Programación mediante la herramienta de software TIA PORTAL.

2.3.5. Variador de velocidad SINAMICS V20

“SINAMICS V20 es una gama de convertidores diseñados para regular la velocidad de motores asíncronos trifásicos”. (AG, 2013). En el anexo A se muestra la guía de configuración rápida, para la programación del variador de frecuencia.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

Experimental

Según (Hernández, Ramos, 2018) El diseño experimental es utilizado solamente cuando el método a emplear es el experimento, es decir cuando hay una manipulación directa de la variable independiente por parte del investigador, para determinar su influencia sobre la variable dependiente bajo condiciones de control de las variables ajenas.

El presente proyecto utiliza un diseño de tipo experimental debido a que se procederá a manipular la señal que controla al variador de velocidad dependiendo de la señal que presente el caudal en cierto instante de tiempo, adicionalmente se verificará el comportamiento del controlador cuando el proceso es sometido a perturbaciones.

Cuantitativa

Busca recolectar datos numéricos o exactos, sus técnicas son estandarizadas, sistemáticas y buscan obtener datos precisos. Por esta razón tienen mayor aplicación en estadística o en las ciencias exactas. (Caro, 2020).

Este tipo de investigación será usada al momento de realizar la recopilación de datos concernientes a las variables involucradas en el proceso, como son el caudal y la frecuencia, a través de estos datos se realizó el diseño y posterior análisis del controlador.

3.1.1. *Métodos de investigación*

➤ **Método Inductivo**

En este tipo de investigación, el conocimiento se genera a partir de lo particular para llegar a una generalización. Se basa en la recolección de datos específicos para poder crear nuevas teorías.

Se utiliza este tipo de método de investigación debido a que a partir de los datos medidos en el sistema se procede a la obtención del modelo matemático usando el método de caja negra, el cual permitirá diseñar los diferentes métodos de control.

➤ **Método Deductivo**

En este tipo de investigación, la realidad se explica a partir de leyes generales que apuntan hacia conclusiones particulares. Se espera que las conclusiones formen parte de las premisas del problema, por lo tanto, si las premisas son correctas y el método inductivo es aplicado adecuadamente, la conclusión también será correcta.

Este método es aplicado puesto que se utilizará modelos de control ya establecidos de forma general dentro del proceso de control de caudal y se determinará cual presenta mejores características al momento de implementarlo.

3.1.2. Técnicas de investigación

➤ **Documentales**

Son aquellas que recopilan información acudiendo a fuentes previas, como investigaciones ajenas, libros, información en soportes diversos, y emplea instrumentos definidos según dichas fuentes, añadiendo así conocimiento a lo ya existente sobre su tema de investigación.

Para el diseño de los controladores se utiliza la técnica de documentación, la cual permitirá verificar el tipo de controlador recomendado para el proceso de caudal, y poder así verificar como se puede mejorar dicho proceso mediante el análisis de documentos o libros.

➤ **Experimentales**

Son aquellas que parten de la reproducción, en un ambiente controlado, de los fenómenos que busca estudiar. Para ello, se emplean herramientas y saberes tanto prácticos como teóricos, documentales o no, y se registra lo observado para tratar de dar con la verdad de cómo y por qué ocurren las cosas.

Se aplica en la programación del Controlador Lógico Programable debido a que se tiene experiencia en el manejo de dicho dispositivo y se ira configurando el controlador, a partir de los resultados obtenidos, este proceso se realizará varias veces hasta obtener los mejores resultados en ambos controladores.

3.2 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.

Durante el desarrollo del proyecto se utilizan las siguientes técnicas:

3.2.1 Análisis de Información

El análisis de información, es una forma de investigación, cuyo objetivo es la captación, evaluación, selección y síntesis de los mensajes subyacentes en el contenido de los documentos, a partir del análisis de sus significados, a la luz de un problema determinado. Así, contribuye a la toma de decisiones, al cambio en el curso de las acciones y de las estrategias. Es el instrumento por excelencia de la gestión de la información. (Caro, 2020)

Esta técnica ha sido aplicada para la recolección de datos referentes a las características técnicas de los sensores, actuadores y controlador, adicionalmente ha permitido revisar el comportamiento de los diferentes métodos de control aplicados a distintos procesos.

CAPÍTULO IV

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. Pruebas de funcionamiento

En el anexo B se muestran los diagramas de conexiones correspondientes, entre los diferentes tableros de la planta y el tablero de control, para el correcto funcionamiento del proceso.

Una vez realizadas las conexiones de todos los componentes se pone a prueba el sistema de control incluida la interfaz HMI; cabe destacar que la información más relevante son las gráficas obtenidas para los diferentes modos de funcionamiento, de este modo se obtienen los siguientes resultados:

4.1.1. Resultados obtenidos con el bloque PID_Compact.

En la figura 1-4, se puede observar la respuesta del sistema con respecto a cambios en el Set Point, como se puede apreciar no tiene máximo sobre impulso, el tiempo de establecimiento para el Set Point de 40 l/min es de 28.4 segundos y al realizar el cambio de consigna a 60 l/min el tiempo de establecimiento se lo puede calcular con los datos de la gráfica, de la siguiente manera: $T_s = (122.1 - 101.6) = 20.5$ segundos.

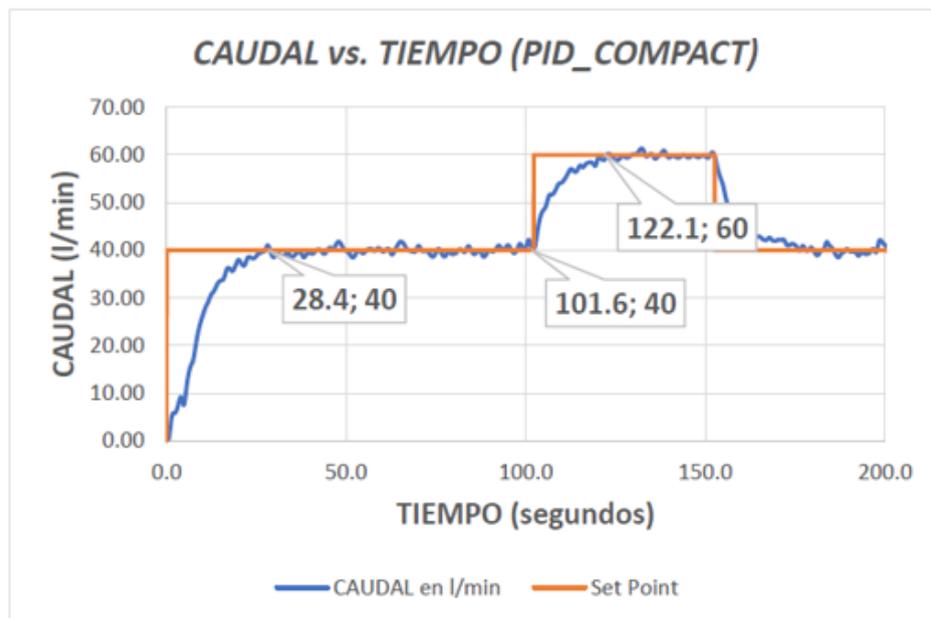


Figura 1-4 Respuesta del sistema con PID_COMPACT
Elaborado por: Eduardo Velasco

Por otra parte, en la figura 2-4 se observa la señal de la frecuencia enviada hacia el variador de velocidad, para los mismos Set Point de 40 y 60 l/min. Como se observa no existen sobre impulsos, el pico más alto registrado para el primer valor de caudal es 25.67 Hz en un tiempo de 51.2 segundos. Para 60 l/min se tiene un pico máximo de 34.51 Hz.

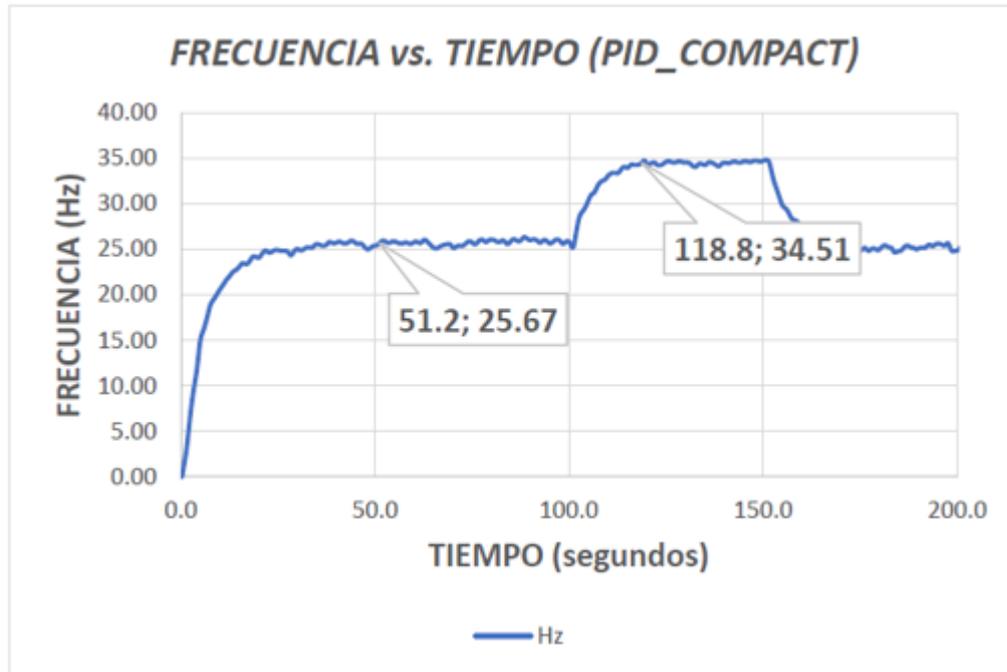


Figura 2-4 Señal enviada al variador de velocidad
Elaborado por: Eduardo Velasco

La tabla 1-4 muestra la recopilación de los datos más relevantes.

Tabla 1-4: Datos obtenidos con el bloque de control PID_Compact

Set Point	Control PID_Compact	
	40 l/min	60 l/min
Máximo sobre impulso Mp	0 %	0 %
Tiempo de establecimiento Ts	28.4 segundos	20.5 segundos
Pico máximo de frecuencia	25.67 Hz	34.51 Hz

Elaborado por: Eduardo Velasco

4.1.2. Resultados obtenidos con el bloque PID diseñado en Matlab.

En la figura 3-4 se puede observar el comportamiento del sistema con el control PID diseñado en Matlab, como se puede apreciar tiene un máximo sobre impulso que alcanza 48.52 l/min en un tiempo de 6.9 segundos; realizando los cálculos necesarios esto representa un $M_p = 21.3 \%$ el tiempo de establecimiento para el Set Point de 40 l/min es de 26.7 segundos.

Al realizar el cambio de consigna a 60 l/min el tiempo de establecimiento se lo puede calcular con los datos de la gráfica, de la siguiente manera: $T_s = (131.7 - 105.0) = 26.7$ segundos.

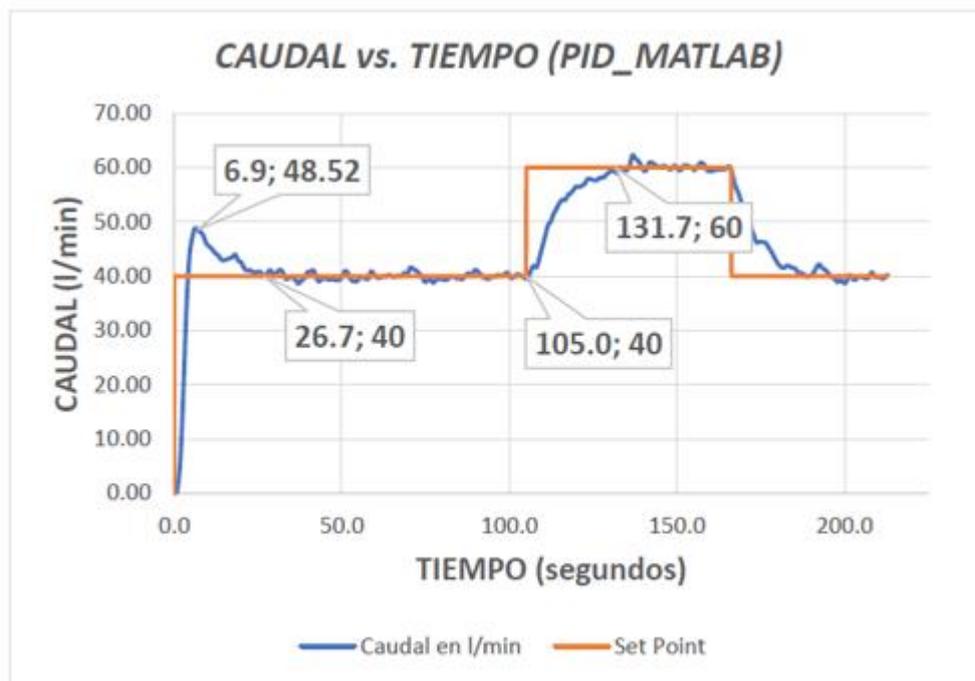


Figura 3-4 Respuesta del sistema con PID_MATLAB

Elaborado por: Eduardo Velasco

Por otra parte, en la figura 4-4 se observa la señal de la frecuencia enviada hacia el variador de velocidad, para los mismos Set Point de 40 y 60 l/min. Como se observa existe un máximo sobre impulso con un valor de 49.03 Hz, cuando existe el cambio de consigna a 60 l/min la frecuencia se eleva a 57.96 Hz. La tabla 2-4 muestra la recopilación de los datos más relevantes.

Tabla 2-4: Datos obtenidos con el bloque de control PID_MATLAB.

Set Point	Control PID_MATLAB	
	40 l/min	60 l/min
Máximo sobre impulso M_p	21.3 %	0 %
Tiempo de establecimiento T_s	26.7 segundos	26.7 segundos
Pico máximo de frecuencia	49.03 Hz	57.96 Hz

Elaborado por: Eduardo Velasco

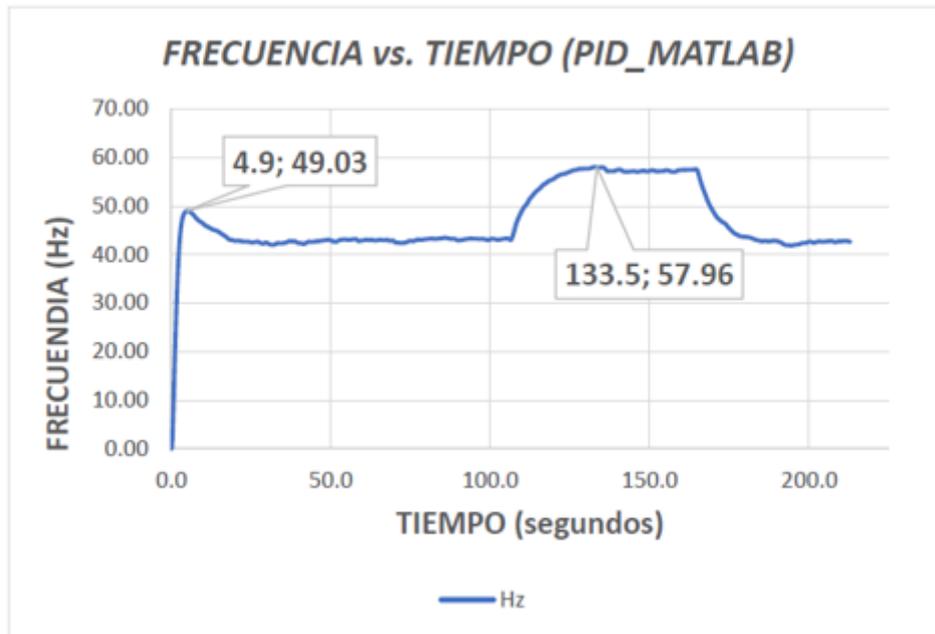


Figura 4-4 Señal enviada al variador de velocidad
 Elaborado por: Eduardo Velasco

4.1.3. Resultados obtenidos con el bloque PREDICTIVO diseñado en Matlab

En la figura 5-4, se puede observar la respuesta del sistema con respecto a cambios en el Set Point, como se puede apreciar no tiene máximo sobre impulso, el tiempo de establecimiento para el Set Point de 40 l/min es de 9.9 segundos y al realizar el cambio de consigna a 60 l/min el tiempo de establecimiento se lo puede calcular con los datos de la gráfica, de la siguiente manera: $T_s = (175.5 - 127.8) = 10.3$ segundos.

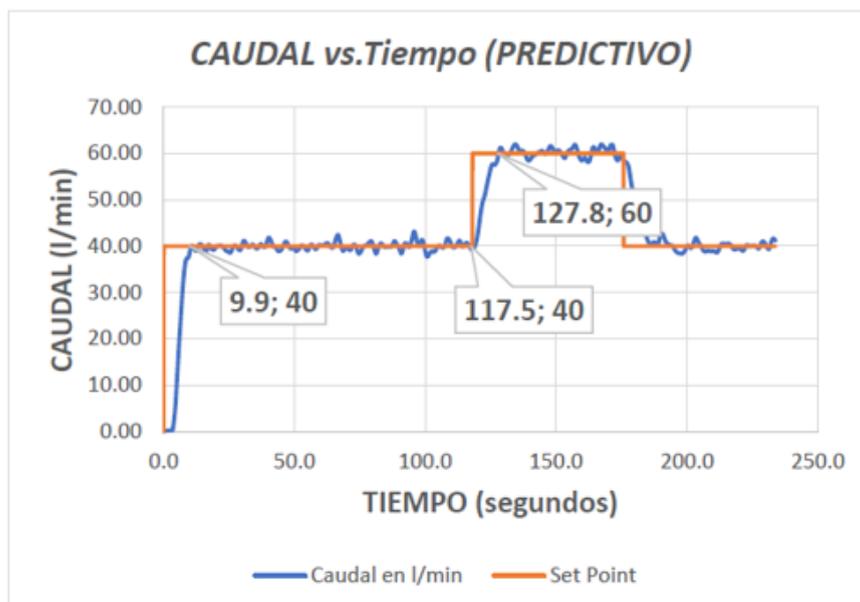


Figura 5-4 Respuesta del sistema con control PREDICTIVO
 Elaborado por: Eduardo Velasco

Por otra parte, en la figura 6-4 se observa la señal de la frecuencia enviada hacia el variador de velocidad, para los mismos Set Point de 40 y 60 l/min. Como se observa no existe un máximo sobre impulso, la frecuencia se mantiene en un valor de 42.93 Hz, cuando existe el cambio de consigna a 60 l/min la frecuencia se eleva a 58.61 Hz. La tabla 3-4 muestra la recopilación de los datos más relevantes.

Tabla 3-4: Datos obtenidos con el bloque de control PREDICTIVO

Set Point	Control Predictivo	
	40 l/min	60 l/min
Máximo sobre impulso Mp	0 %	0 %
Tiempo de establecimiento Ts	9.9 segundos	10.3 segundos
Pico máximo de frecuencia	42.93 Hz	58.61 Hz

Elaborado por: Eduardo Velasco



Figura 6-4 Señal enviada al variador de velocidad

Elaborado por: Eduardo Velasco

En la tabla 4-4 se muestra el resumen general de los parámetros obtenidos para los tres controladores.

Tabla 4-4: Resumen de los datos obtenidos para los tres controladores.

Parámetro	PID_COMPACT		PID_MATLAB		PREDICTIVO	
	Set Point (l/min)	40	60	40	60	40
Mp (%)	0	0	21.3	0	0	0
Ts (segundos)	28.4	20.5	26.7	26.7	9.9	10.3
Pico de Frecuencia (Hz)	25.67	34.51	49.03	57.96	42.93	58.61

Elaborado por: Eduardo Velasco

4.1.4 Funcionamiento de los controladores ante perturbaciones.

La generación de perturbaciones se realiza abriendo o cerrado la válvula manual que se encuentra intercalada en la tubería que conecta el tanque 4 con el 1.

Cabe destacar que, al abrir la válvula de desfogue, el caudal medido por el sensor descenderá y lógicamente este descenso debe ser compensado por el controlador, en el caso opuesto al cerrar la válvula el caudal tiende a elevarse, de igual manera el control debe compensar el desfase.

En la figura 7-4 se observa el funcionamiento del controlador PID_COMPACT ante la generación de perturbaciones para un caudal de 60 l/min.

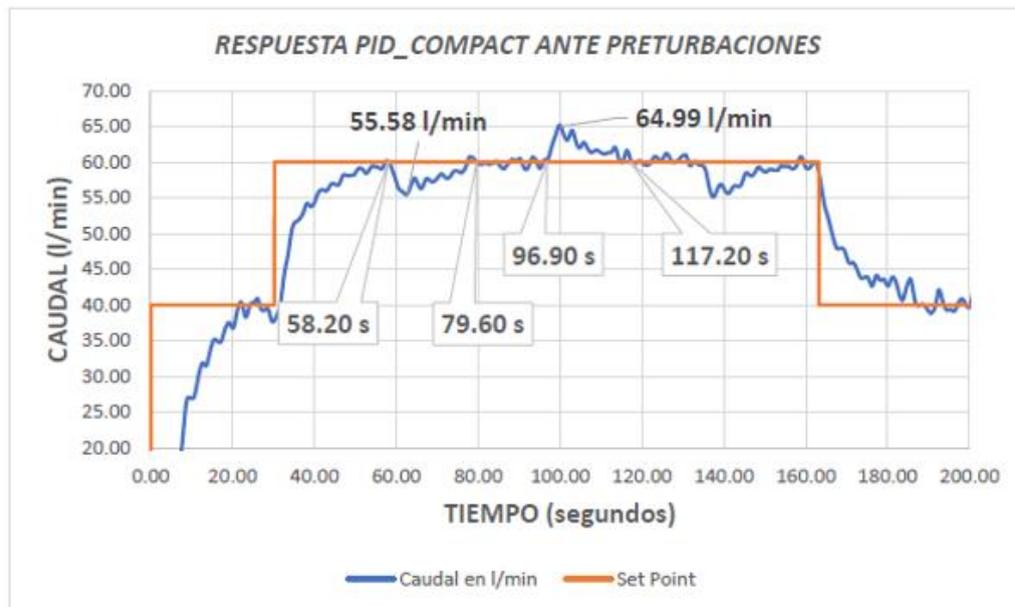


Figura 7-4 Funcionamiento del controlador PID_COMPACT ante perturbaciones

Elaborado por: Eduardo Velasco

La tabla 5-4 muestra el compendio de los datos que se visualizan en la figura 7-4.

Tabla 5-4: Datos obtenidos del controlador PID_COMPACT ante perturbaciones.

Parámetros	PID_COMPACT	
Set Point	60 l/min	
Caudal al abrir la válvula de desfogue	55.58 l/min	Descenso de 4.42 l/min
Tiempo de recuperación	21.4 segundos	
Caudal al cerrar la válvula de desfogue	64.99 l/min	Aumento de 4.99 l/min
Tiempo de recuperación	20.3 segundos	

Elaborado por: Eduardo Velasco

En la figura 8-4 se observa el funcionamiento del controlador PID_MATLAB ante la generación de perturbaciones para un caudal de 60 l/min.

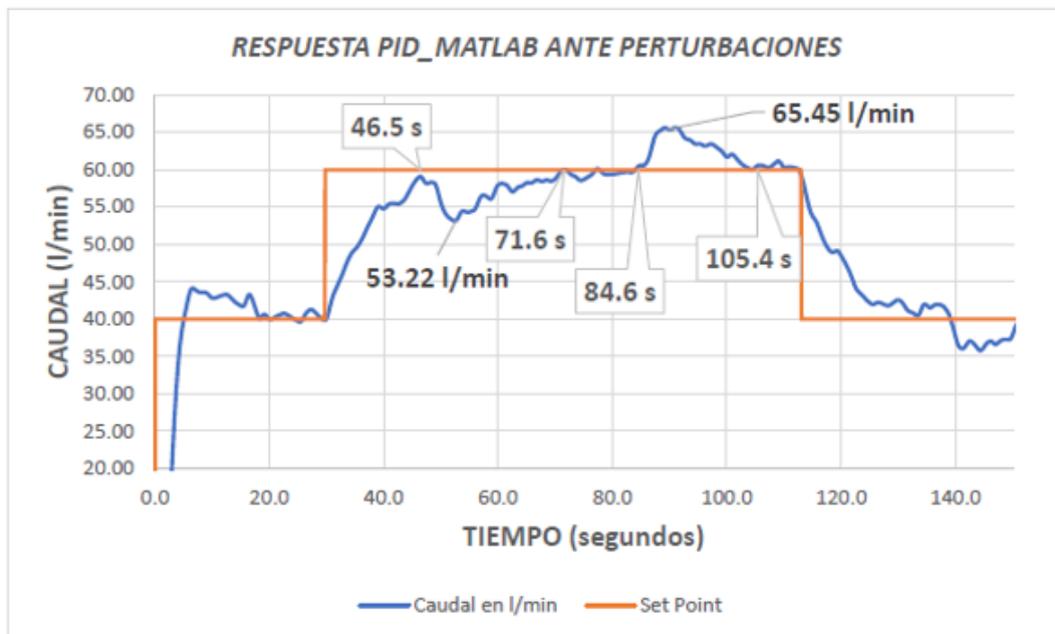


Figura 8-4 Funcionamiento del controlador PID_MATLAB ante perturbaciones

Elaborado por: Eduardo Velasco

La tabla 6-4 muestra el compendio de los datos que se visualizan en la figura 8-4.

Tabla 6-4: Datos obtenidos del controlador PID_MATLAB ante perturbaciones.

Parámetros	PID_MATLAB	
Set Point	60 l/min	
Caudal al abrir la válvula de	53.22 l/min	Descenso de 6.78 l/min
Tiempo de recuperación	25.1 segundos	
Caudal al cerrar la válvula de	65.45 l/min	Aumento de 5.45 l/min
Tiempo de recuperación	20.8 segundos	

Elaborado por: Eduardo Velasco

En la figura 9-4 se observa el funcionamiento del controlador PREDICTIVO ante la generación de perturbaciones para un caudal de 60 l/min.

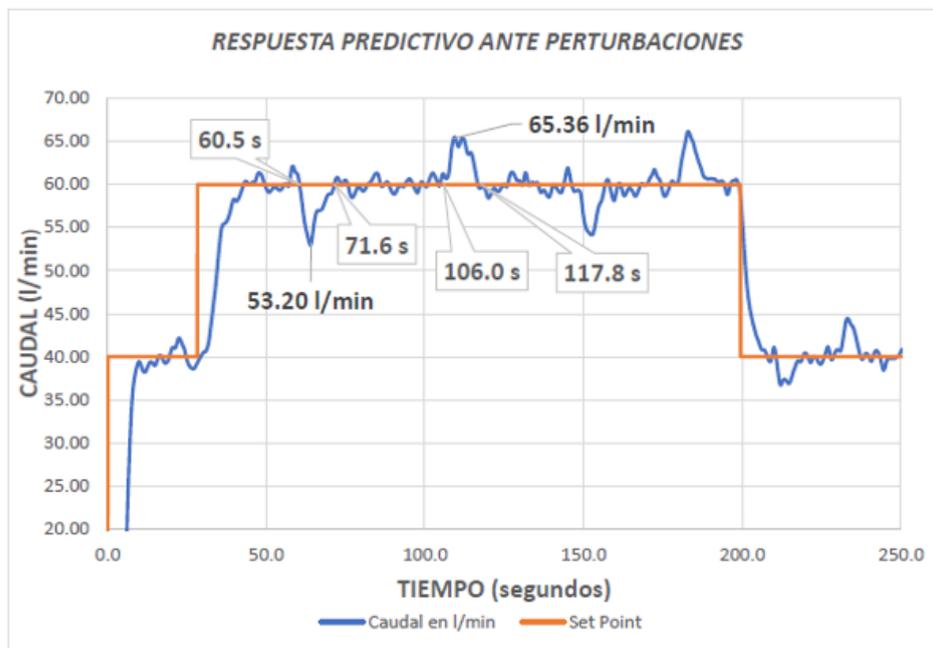


Figura 9-4 Funcionamiento del controlador PREDICTIVO ante perturbaciones

Elaborado por: Eduardo Velasco

La tabla 7-4 muestra el compendio de los datos que se visualizan en la figura 9-4.

Tabla 7-4: Datos obtenidos del controlador PREDICTIVO ante perturbaciones

Parámetros	PREDICTIVO	
Set Point	60 l/min	
Caudal al abrir la válvula de desfogue	53.20 l/min	Descenso de 6.8 l/min
Tiempo de recuperación	11.1 segundos	
Caudal al cerrar la válvula de desfogue	65.36 l/min	Aumento de 5.36 l/min
Tiempo de recuperación	11.8 segundos	

Elaborado por: Eduardo Velasco

La tabla 8-4 muestra el resumen comparativo de los resultados obtenidos, es importante apreciar que el control predictivo responde más rápido a las perturbaciones con un tiempo de recuperación de 11.1 segundos, mientras que para los otros controladores el tiempo supera los 20 segundos.

Tabla 8-4: Resumen de los datos obtenidos para los tres controladores sometidos a perturbaciones.

Parámetro	PID_COMPACT		PID_MATLAB		PREDICTIVO	
Set Point (l/min)	60					
Caudal mínimo / máximo (l/min)	55.58	64.99	53.22	65.45	53.20	65.36
Tiempo de recuperación (s)	21.4	20.3	25.1	20.8	11.1	11.8

Elaborado por: Eduardo Velasco

4.2. Demostración de la Hipótesis.

La hipótesis planteada para el proyecto manifiesta: El diseño de controladores PID y Predictivo basados en modelo e implementados en un PLC S7-1200 permitirá mejorar las características dinámicas del control en lazo cerrado para la variable caudal en el proceso de recirculación de líquidos.

Para realizar los cálculos estadísticos necesarios se hará uso del software SPSS. Lo primero es verificar si los datos son paramétricos o no paramétricos, para seleccionar el estadístico de prueba adecuado.

Para ello se obtiene el histograma correspondiente a los datos del PID_COMPACT en el intervalo de 0 a 40 segundos, que es donde se producen las características dinámicas más importantes. En la figura 10-4 se observan los datos del PID_COMPACT con respecto a la curva de distribución normal.

Como se puede observar en la figura, los datos NO tienen una distribución normal; lo mismo sucede con los datos de los otros controladores.

Como se trata de una prueba pre / post, se puede obtener la diferencia del PID_MATLAD versus el PID_COMPACT, dato a dato y verificar si la respuesta tiene o no distribución normal.

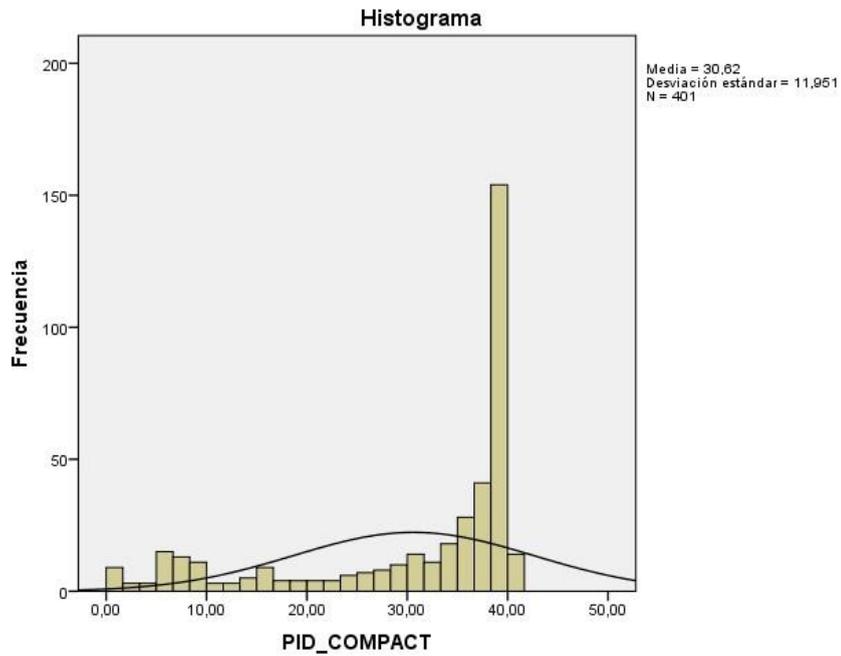


Figura 10-4 Distribución de los datos del PID_COMPACT
Elaborado por: Eduardo Velasco

En la figura 11-4 se muestra el histograma correspondiente a los datos de la diferencia obtenida entre los dos controladores mencionados anteriormente. Como se puede observar la variable diferencia ha sido nombrada como D_PID y tampoco sigue una distribución normal.

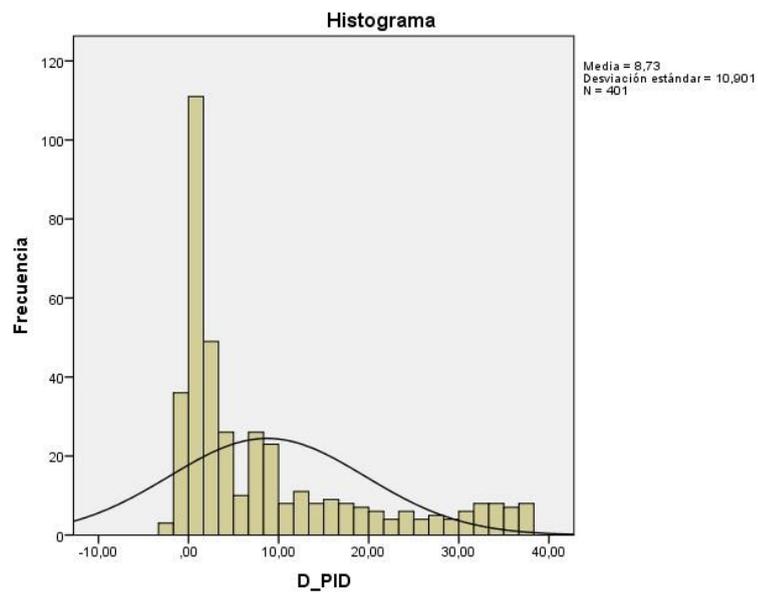


Figura 11-4 Distribución de diferencia entre PID_MATLAB vs. PID_COMPACT
Elaborado por: Eduardo Velasco

Por tanto, se puede determinar que los datos son NO PARAMÉTRICOS, por lo que el estadístico de prueba adecuado es el de RANGOS de WILCOXON para dos pruebas relacionadas con cualquier tipo de distribución.

La prueba descrita se realizará de la siguiente manera:

- Contrastar PID_MATLAB versus PID_COMPACT
- Contrastar PREDICTIVO versus PID_COMPACT, y
- Contrastar PREDICTIVO versus PID_MATLAB

En la figura 12-4 se observa el cuadro de dialogo que permite ingresar los datos a ser analizados, en este caso la variable 1 es el PID_COMPACT, la variable 2 el PID_MATLAB y el descriptivo es el test de Wilcoxon.



Figura 12-4 Cuadro de diálogo para parametrizar la Prueba de Wilcoxon

Elaborado por: Eduardo Velasco

Otros parámetros importantes que se deben mencionar, es que las pruebas se realizarán con un intervalo de confianza del 95%; es decir con un nivel de significancia del 5%, este valor es muy importante, debido a que:

- Valor $P \leq$ nivel de significancia, SE RECHAZA la hipótesis nula
- Valor $P >$ nivel de significancia, SE ACEPTA la hipótesis nula

Antes de realizar la prueba como tal, es necesario establecer la hipótesis NULA y la alternativa, descritas de la siguiente manera:

- H0: El controlador PID_MATLAB **NO MEJORA** las características dinámicas del proceso respecto del PID_COMPACT.
- H1: El controlador PID_MATLAB **SI MEJORA** las características dinámicas del proceso respecto del PID_COMPACT.

Para los otros controladores lo único que cambia son los nombres, por lo que la hipótesis nula H0 y alternativa H1 se mantienen, por tanto, no se volverán a redactar.

La figura 13-4 muestra la respuesta del test de Wilcoxon obtenida del software SPSS, en la cual el parámetro más importante es el de la significancia asintótica (bilateral) que tiene un valor de 9,7825E-60 (es un valor muy reducido, por esta razón el software muestra 0); esto significa que, se rechaza la hipótesis nula y, por tanto, el controlador PID_MATLAB mejora las características dinámicas del proceso respecto del PID_COMPACT, además como es una comparación de valores en tiempo, se determina que el controlador PID_MATLAB es más rápido que el controlador PID_COMPACT.

Estadísticos de prueba^a

	PID_MATLAB - PID_COMPA CT
Z	-16,301 ^b
Sig. asintótica (bilateral)	,000

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon
b. Se basa en rangos negativos.

Figura 13-4 Respuesta obtenida de la comparación entre PID_MATLAB y PID_COMPACT

Elaborado por: Eduardo Velasco

El procedimiento se repite para cada una de las comparaciones, en la figura 14-4, se muestra el resultado del PREDICTIVO vs PID_COMPACT, donde el grado de significancia asintótica (bilateral) toma un valor de 2,4253E-31 (es un valor muy reducido, por esta razón el software muestra 0), por lo que, el controlador PREDICTIVO mejora las características dinámicas del proceso respecto del PID_COMPACT, además como es una comparación de valores en tiempo, se determina que el controlador PREDICTIVO es más rápido que el controlador PID_COMPACT.

Estadísticos de prueba^a

	PREDICTIVO - PID_COMPACT
Z	-11,645 ^b
Sig. asintótica (bilateral)	,000

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon
b. Se basa en rangos negativos.

Figura 14-4 Respuesta obtenida de comparar entre el control PREDICTIVO y PID_COMPACT

Elaborado por: Eduardo Velasco

Por último, se van a comparar los controladores PREDICTIVO vs PID_MATLAB, de esta forma en la figura 15-4 se muestra el resultado obtenido con un grado de significancia asintótica (bilateral) de 1,055E-48 (es un valor muy reducido, por esta razón el software muestra 0); por tanto, el controlador PREDICTIVO mejora las características dinámicas del proceso respecto del PID_MATLAB, además como es una comparación de valores en tiempo, se determina que el controlador PID_PREDICTIVO es más rápido que el controlador PID_MATLAB.

Estadísticos de prueba^a

	PREDICTIVO - PID_MATLAB
Z	-14,667 ^b
Sig. asintótica (bilateral)	,000

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon
b. Se basa en rangos positivos.

Figura 15-4 Respuesta obtenida al comparar el PREDICTIVO y PID_MATLAB

Elaborado por: Eduardo Velasco

CAPÍTULO V

5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

5.1 Descripción de la planta

Al realizar el análisis de la estructura y funcionamiento de la planta de recirculación de líquidos perteneciente al Instituto Tecnológico Superior Sucre, se llegan a las siguientes consideraciones:

- La planta simula la recirculación de agua entre tanques, por medio de la fuerza de gravedad o a su vez utilizando fuerza rotacional a través de bombas.
- Las posibles variables a controlar son: Nivel, Presión o Caudal.
- La planta está diseñada para realizar control de nivel tipo ON / OFF, puesto que consta con sensores de nivel discretos tipo flotador.
- Se necesitan realizar modificaciones a nivel de equipos y dispositivos, para que se pueda realizar un control en lazo cerrado, para alguna de las variables mencionadas.
- Por los equipos disponibles en la institución educativa la mejor opción es realizar el control sobre la variable Caudal.

La planta objeto del control se muestra en las figuras 1-5 y 2-5; en la primera figura respectivamente se observa la vista frontal de los equipos y dispositivos montados en la planta; por otro lado, en la figura 2-5 se observa la vista posterior de la misma.

Es importante destacar, que las figuras anteriormente mencionadas muestran a la planta ya realizadas todas las modificaciones correspondientes para que se pueda realizar el control en lazo cerrado de la variable caudal. Entre las principales modificaciones se pueden destacar:

- Incorporación de una bomba trifásica de caudal.
- Cambio de la tubería de interconexión entre tanques.
- Incorporación de los sensores de caudal visual y electrónico.
- Integración de tableros de conexión para elementos de control y bombas.



Figura 1-5 Vista frontal de la planta
 Elaborado por: Eduardo Velasco

En la figura 1-5 se observan los siguientes elementos:

1. 4 tanques plásticos con su correspondiente identificación.
2. Ubicación de los sensores de nivel discretos con la nomenclatura S para cada uno de los tanques.
3. Tubería de interconexión de elementos.
4. Tablero de conexiones para elementos de control.
5. Tablero de bornes de conexión para bombas.
6. Bomba monofásica de presión (junto al tanque N°3).
7. Bomba trifásica de caudal (junto al tanque N°4).
8. Válvula proporcional (entre tanque N°2 y tanque N°3).

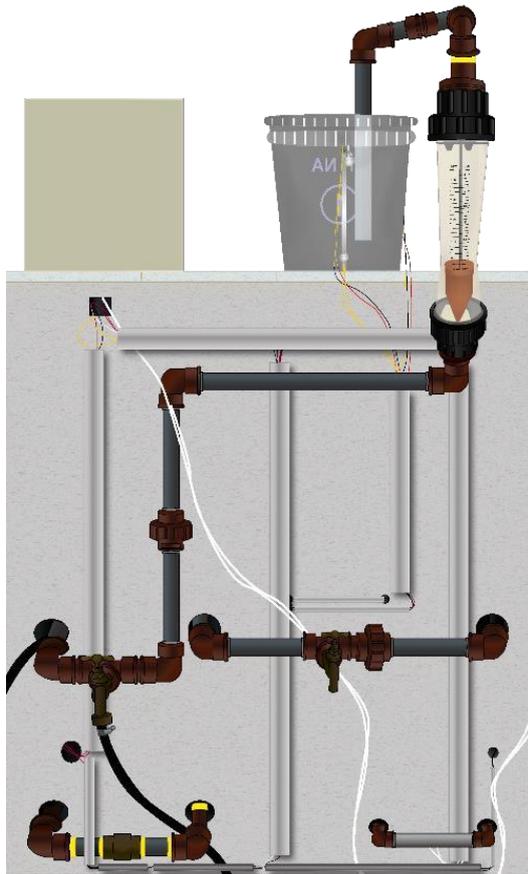


Figura 2-5 Vista posterior de la planta
Elaborado por: Eduardo Velasco

Por otro lado, en la vista posterior (figura 2-5), se visualizan los siguientes elementos:

1. Tuberías de conexión entre los tanques y bombas.
2. Sensor de caudal visual Rotámetro.
3. Sensor de caudal electrónico.
4. Llaves de desfogue de tanques.

Todos y cada uno de los elementos mencionados, cumplen una función específica para el correcto desenvolvimiento del proceso, a continuación, se detallan las características y la función que efectúan cada uno de ellos.

5.1.1. Tablero de conexiones para elementos de control

En este tablero se encuentran borneras de conexión tipo banana (facilitan la interconexión); en la figura 3-5 se puede apreciar el tablero de conexión para los elementos de control instalados en la planta.



Figura 4-5 Borneras de conexión del tablero de bombas

Elaborado por: Eduardo Velasco

Cabe destacar que la razón principal de colocar dos tableros; uno de control (tablero de conexiones) y otro de fuerza (tablero de bombas), es la posibilidad de aislar las señales de los elementos sensores, con el fin de disminuir el ruido eléctrico que puede inducirse en las señales que emiten los diferentes dispositivos de control.

5.1.3. Tanques Plásticos

La planta cuenta con 4 tanques plásticos, los cuales tienen las siguientes características:

- 3 tanques de 20 litros (N°1, N°2 y N°4)
- 1 tanque de 10 litros (N°3).

Los mismos están numerados del 1 al 4 e interconectados con tubería plástica de diámetro 1 pulgada, correspondiente al diámetro de conexión de las bombas.

5.1.4. Bomba de presión

Esta bomba es la encargada de trasladar al agua entre los tanques 3 y 4; las características tanto eléctricas como mecánicas se presentan en la tabla 1-5 mostrada a continuación.

Tabla 1-5: Características técnicas obtenidas de la placa de la bomba de presión

Marca	Pietro Italy
Caudal	5 a 40 l/min
Voltaje	110 VAC
Frecuencia	60 Hz
Revoluciones	3400 rpm
Potencia	0.37/0.5 (KW/HP)
Corriente	3.4 A

Elaborado por: Eduardo Velasco

5.1.5. Bomba de caudal

Esta es la bomba a la cual se le va a controlar a través de la variación de voltaje y frecuencia en sus bornes de conexión, por medio de un variador de velocidad; su objetivo es el de trasladar el agua desde el tanque 4 hacia el tanque 1; las características tanto eléctricas como mecánicas se presentan en la tabla 2-5 mostrada a continuación.

Tabla 2-5: Características técnicas obtenidas de la placa de la bomba de caudal

Marca	WEG
Caudal	5 m ³ /h – 80 l/min
Voltaje	220/380/440 VAC Trifásico
Frecuencia	60 Hz
Revoluciones	3470 rpm
Potencia	0.75/1.00 (KW/HP)
Corriente	4.31/2.49/2.16 A
Rendimiento	80.0%
Protección IP	21

Elaborado por: Eduardo Velasco

5.1.6. Válvula proporcional

Encargada de interconectar el tanque 2 y 3, se la puede utilizar para mantener la presión hidrostática en el tanque 2; es decir, regulación indirecta del nivel de líquido. Las características técnicas se presentan en la tabla 3-5 mostrada a continuación:

Tabla 3-5: Características técnicas de la válvula proporcional

Voltaje de alimentación	24 VDC
Voltaje de control	0-5 VDC
Diámetro	1 pulgada
Grados de giro	180°

Elaborado por: Eduardo Velasco

5.1.7. Sensores de nivel

Son dispositivos adecuados para todas aquellas aplicaciones en las que se necesita controlar el nivel de líquidos no corrosivos como depósitos de agua, acuarios, etc.

Están colocados dos por cada uno de los tanques, uno en la parte inferior (medición del nivel bajo) y otro en la parte superior (medición del nivel alto); desde el punto de vista del control son necesarios por seguridad.

El que mide nivel bajo debe garantizar el apagado de la bomba asociada, puesto que una bomba no debe trabajar en vacío, debido que al absorber aire se genera el fenómeno de cavitación, provocando el daño de la misma. El sensor colocado para identificar el nivel alto, tiene como objetivo impedir el desbordamiento del líquido en los tanques. Las características técnicas de los sensores de nivel se presentan en la tabla 4-5 mostrada a continuación:

Tabla 4-5: Características técnicas de los sensores de nivel

Voltaje	110-250 VDC
Corriente máxima	0.5 A
Temperatura de funcionamiento	-10° C a 60° C
Resistencia de aislamiento	≤ 10 ohmios
Tamaño	36*18 mm

Elaborado por: Eduardo Velasco

5.1.8. Sensor de caudal tipo turbina

Su objetivo es el de medir el caudal de líquido entre los tanques 4 y 1; hay que aclarar que entre los tanques mencionados se encuentra intercalada la bomba de caudal y el rotámetro. Las características técnicas se presentan en la tabla 5-5 mostrada a continuación:

Tabla 5-5: Características técnicas del sensor de caudal

Referencia	E3L4C1
Caudal	1-80 l/min
Precisión	+/- 3%
Voltaje	5-24 VDC
Corriente máxima	0.5 A
Temperatura de funcionamiento	-10° C a 60° C
Resistencia de aislamiento	≥ 10 Mega ohmios
Diámetro	1 pulgada

Elaborado por: Eduardo Velasco

Este sensor trabaja bajo el principio de funcionamiento del efecto hall; es decir, se pueden contar los pulsos de salida del sensor, para esto se utilizó un microprocesador de la marca Arduino basado en una tarjeta ATmega328.

En la figura 5-5 se muestra el diagrama de flujo del programa implementado en el software Arduino IDE.

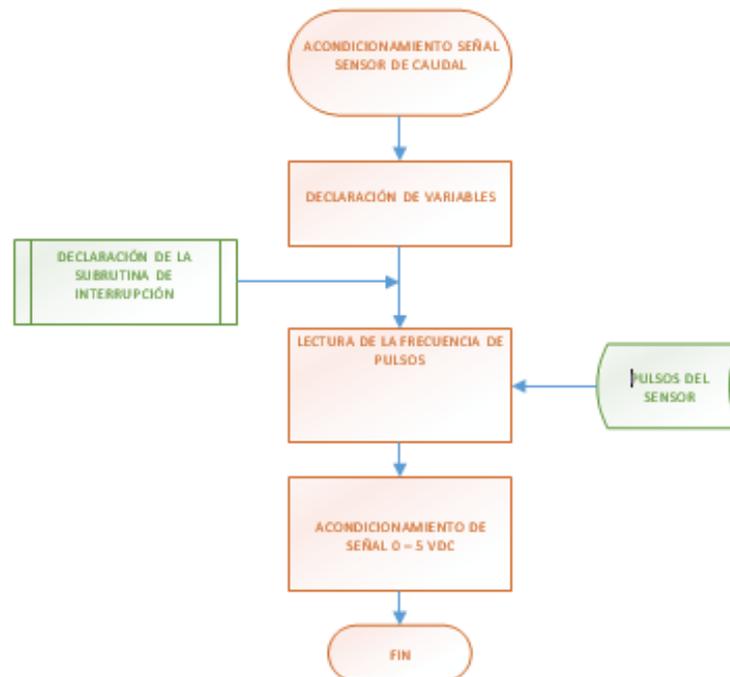


Figura 5-5 Diagrama de flujo del programa implementado en el microprocesador Arduino.

Elaborado por: Eduardo Velasco

La ventaja de utilizar este dispositivo, es debido a que el acondicionamiento se lo realiza vía programación, de tal manera que a la salida del microprocesador se obtiene una señal analógica de 0 a 5 VDC, equivalente al flujo del proceso; esta señal posteriormente irá a la entrada analógica del autómatas programable.

5.1.9. Llaves para vaciado de tanques

Como su nombre lo indica son llaves de ½ pulgada, que tienen por objetivo permitir el vaciado de los tanques, para periodos largos de tiempo en los cuales no se utilice el módulo y además para simular perturbaciones en el sistema.

5.2. Descripción del tablero de control

Este tablero contiene los elementos necesarios que permiten manipular la planta anteriormente descrita. En la figura 6-5 se muestra la parte interna y en la 6-7, la parte externa del mismo.

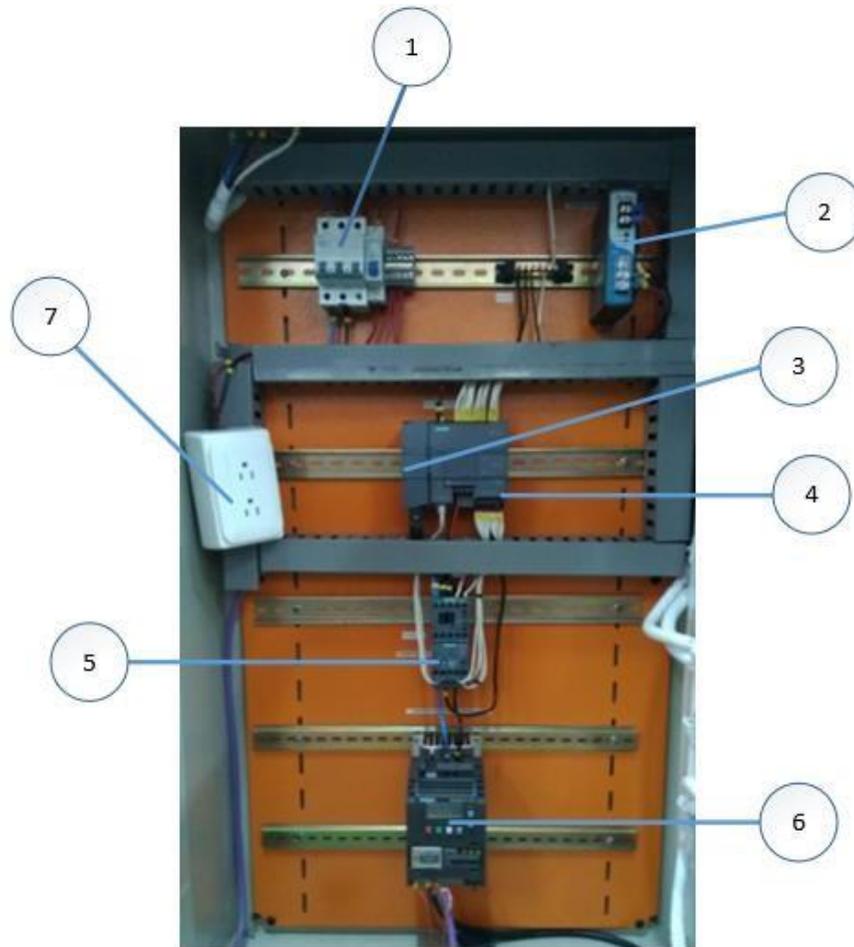


Figura 6-5 Parte interna del tablero de control
Elaborado por: Eduardo Velasco

Se pueden identificar los siguientes elementos:

1. Dispositivo de protección (breaker) contra sobre cargas y cortocircuitos.
2. Fuente de alimentación de 24 VDC.
3. Módulo de comunicación CM 1241 RS422/485.
4. CPU 1212C AC/DC/RLY.
5. Contactor Siemens Sirius 3RT-2016-1AP01.
6. Variador de velocidad SINAMICS V20.
7. Toma corriente, para usos varios.

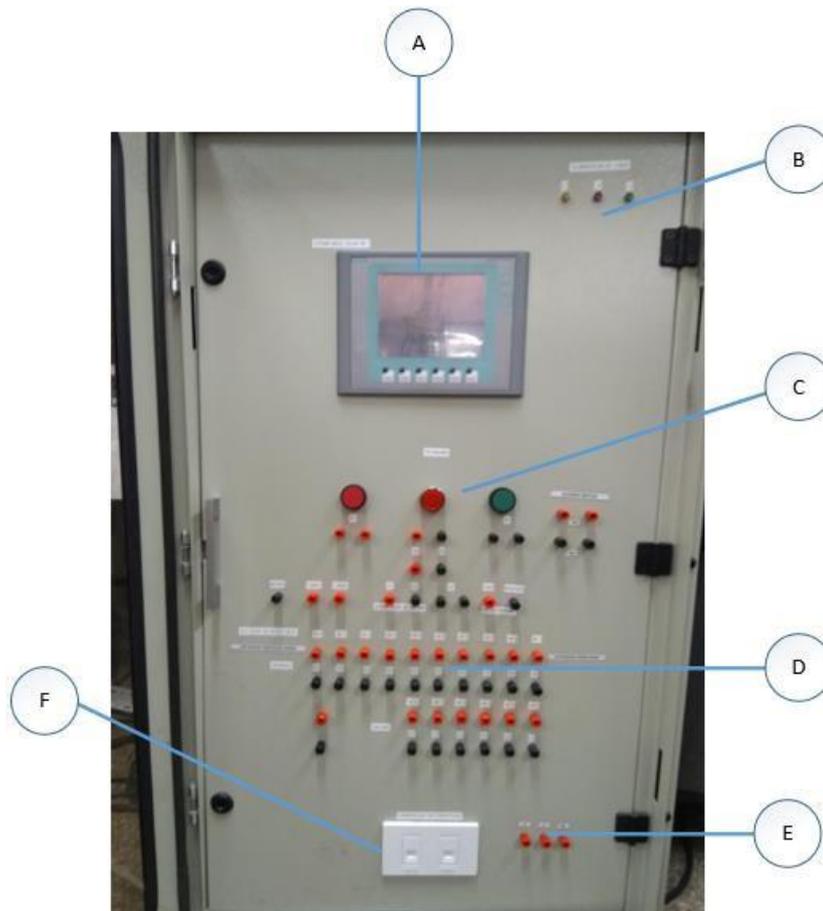


Figura 7-5 Parte externa del tablero de control
 Elaborado por: Eduardo Velasco

En la figura 7-5 se identifican los siguientes elementos:

- A. Pantalla táctil Siemens KTP 600 Basic color PN.
- B. Leds indicadores de alimentación del tablero de control.
- C. Pulsantes NA y NC.
- D. Borneras de conexión de entradas digitales, entradas analógicas, salidas digitales, bobina de contactor y fuente de 24 VDC.
- E. Borneras de conexión de las salidas del variador de velocidad nombradas como U, V y W.
- F. Conectores RJ45 para comunicación y programación de CPU y pantalla HMI.

5.3. Lazos de control implementados

Una vez expuestos cada uno de los componentes que intervienen en el sistema, a continuación, se explica cómo están interconectados los mismos, dependiendo del lazo de control a través de diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID).

El lazo cerrado correspondiente a la variable caudal se encuentra entre el tanque N°1 y el tanque N°4, la figura 8-5 muestra el diagrama respectivo.

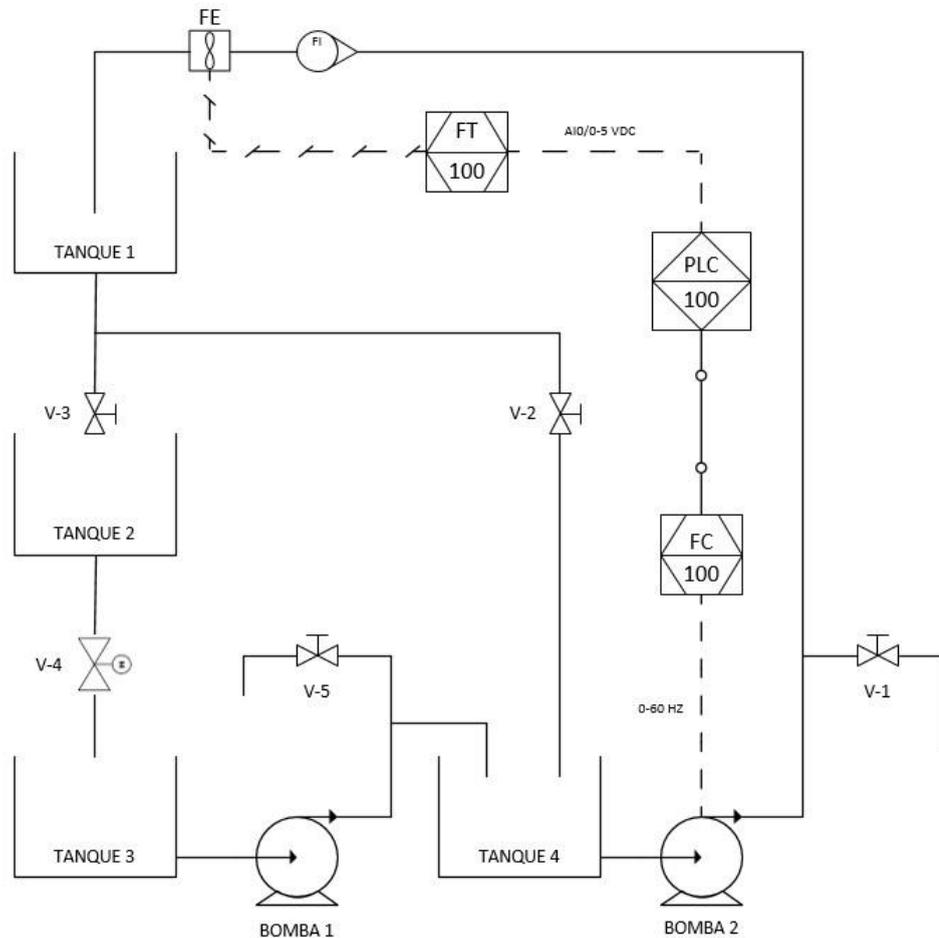


Figura 8-5 Diagrama P&ID (Lazo de control de caudal)
Elaborado por: Eduardo Velasco

Como se puede apreciar en la figura, los tanque N°4 y N°1 se unen a través de la bomba 2 (bomba de caudal trifásica), el sensor de caudal visual FI (rotámetro) y el sensor de caudal electrónico FE, también se puede apreciar que existe una derivación en la tubería hacia la válvula manual V-1; la misma cumple dos objetivos, a saber:

- Vaciar el tanque reservorio N°4 para periodos largos de tiempo en los cuales no se utilice el módulo.
- Generar la perturbación necesaria para comprobar el funcionamiento de los controladores implementados.

El sensor de caudal electrónico FE, envía la señal hacia el transmisor de caudal FT por medio de pulsos eléctricos; en este instrumento internamente se realiza el acondicionamiento necesario, de tal manera que a la salida se obtiene una señal analógica de 0 a 5 VDC correspondiente al caudal, esta señal ingresa al autómatas programable como la señal de realimentación del control en lazo cerrado.

El PLC envía la señal de control vía comunicación por medio del protocolo Modbus RS-485 al actuador FC (variador de frecuencia Sinamics V-20), quien a su vez controla la velocidad de la bomba de caudal trifásica.

Además, se puede apreciar que el tanque 1 y el tanque 4 cuentan con una conexión de retorno entre los mismos a través de la válvula manual V-2, esto justamente es para evitar el vaciado inmediato del tanque 4 objeto del sistema a controlar.

Por último, los 4 tanques cuentan con sensores de nivel con flotador para identificar nivel bajo y alto según las necesidades y como medio de protección y seguridad, la conexión de los mismos se aprecia en el diagrama P&ID del lazo de nivel en la figura 9-5.

En la figura se puede apreciar los diferentes sensores identificados como LSH (sensor de nivel alto) y LSL (sensor de nivel bajo), el indicativo  se refiere a la conexión hacia una entrada digital del autómatas programable LIC (controlador indicador de nivel); tomando como referencia el tanque N°1, los sensores de nivel alto y bajo irán conectados a las entradas %I0.0 e %I0.1 respectivamente, esto de igual manera para el resto de sensores.

La válvula proporcional V-4 se comanda a través de una salida analógica de 0 a 10 VDC desde el controlador.

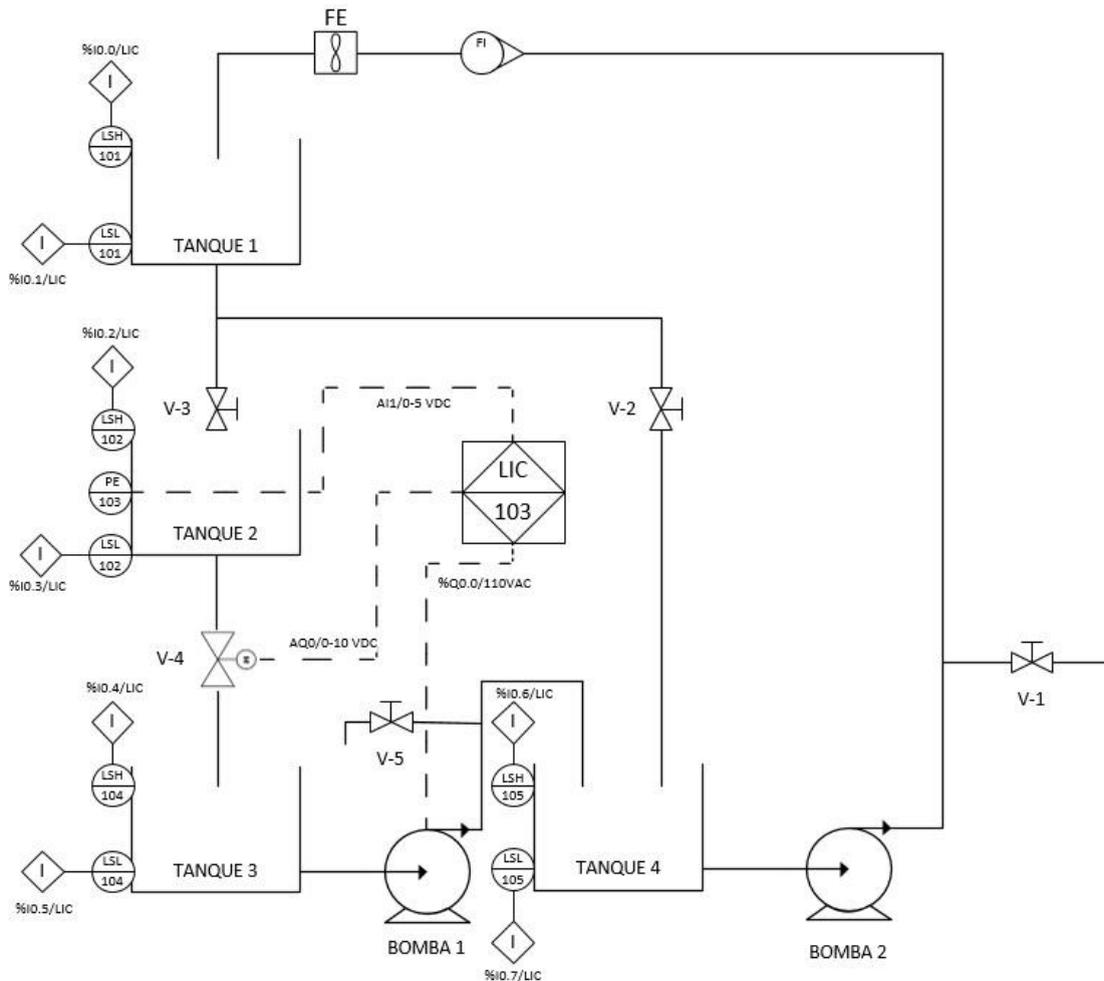


Figura 9-5 Diagrama P&ID (Lazo de control de nivel)
 Elaborado por: Eduardo Velasco

5.4. Pruebas de funcionamiento en lazo abierto

Para realizar cualquier sistema de control es necesario establecer las características de funcionamiento de la planta, para identificar los límites máximos y mínimos de trabajo. El procedimiento que se realizó fue el siguiente:

- Programación del variador de velocidad, con los parámetros de la placa de características de la bomba de caudal. Para realizar la variación de frecuencia hacia la bomba, se configuró en modo manual por medio de la botonera del variador.
- Se realizó la conexión de la bomba de caudal para el voltaje de 220 VAC según el diagrama de conexiones de la misma.

Se realizaron las pruebas obteniendo los siguientes resultados; a saber:

1. La frecuencia mínima a la cual la bomba de caudal puede movilizar el líquido del tanque N°4 al tanque N°1 es de 10 Hz.

2. Trabajar a una frecuencia mayor a 55 Hz, produce un vaciado demasiado rápido del tanque N°4 que sirve como reservorio.
3. La lectura de los pulsos del sensor de caudal se estabiliza a una frecuencia mayor a 15 Hz.
4. Se establece que la zona de funcionamiento óptimo está en el rango de 30 a 50 Hz, para evitar vaciados y llenados de los tanques demasiado rápidos.

5.5. Adquisición de datos de la planta

Los datos obtenidos serán utilizados para la posterior identificación del modelo matemático de la planta. Los mismos se pueden obtener utilizando algunos dispositivos como por ejemplo tarjetas de adquisición; sin embargo, se utilizó el mismo autómatas programable, con los bloques de función de Data Logging (Registro de datos). En la figura 10-5 se presenta la función creación de registro de datos en el software TIA PORTAL.

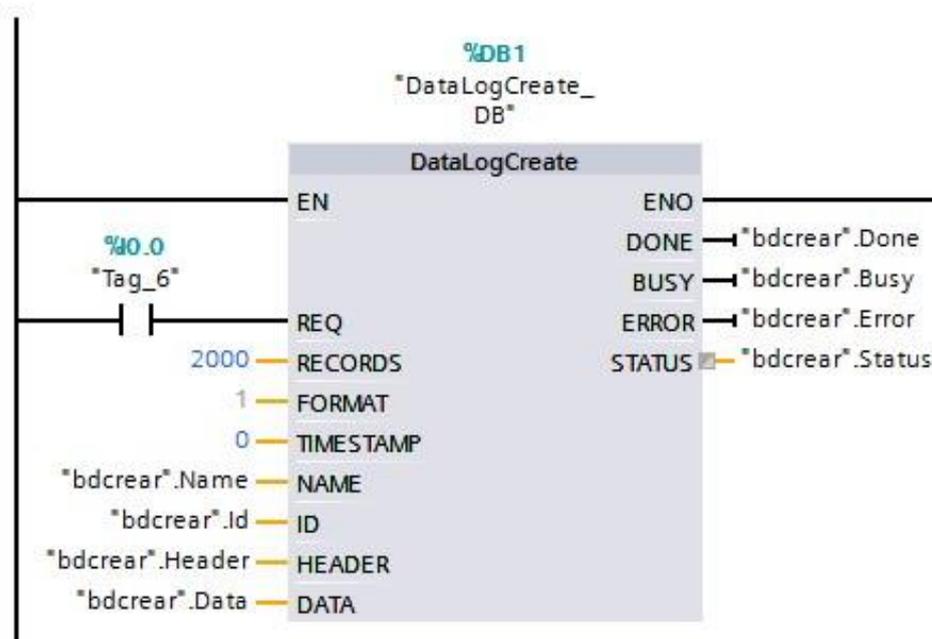


Figura 10-5 Bloque de creación de registro de datos

Elaborado por: Eduardo Velasco

Los parámetros más importantes para la calibración de este bloque se explican en la tabla 6-5 mostrada a continuación:

Tabla 6-5: Parámetros de calibración del bloque DataLogCreate.

	Tipo de datos	Descripción
REQ	Bool	Ejecución de la instrucción. El Data Log se crea cuando se detecta un flanco ascendente en el parámetro REQ. En la figura el bloque se crea con la entrada física %I0.0
RECORDS	UDInt	Número máximo de registros en el Data Log. En este caso 2000
FOTMAT	UInt	Formato de datos: 0: Interno
TIMETAMP	UInt	Sellado horario 0: Sin sello horario

Elaborado por: Eduardo Velasco

El resto de parámetros se crean en un bloque de datos y se asignan según el nombre correspondiente. En la figura 11-5 se puede observar el bloque de datos creado con el nombre “dbcrear” y asociado al anterior bloque. El tipo de dato para cada variable fue obtenido de la ayuda del software.

bdcrear								
Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ..	Valor de a..	
Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Name	String	'registrotemp'	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Id	DWord	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Header	String	'Time,Tcelsius,T...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Data	Struct		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Done	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Busy	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Error	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Status	DWord	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 11-5 Bloque de datos asociado al DataLogCreate

Elaborado por: Eduardo Velasco

Para la escritura del registro se utiliza la función escritura de registros de datos DataLogWrite, en la figura 12-5 se puede observar el bloque mencionado.

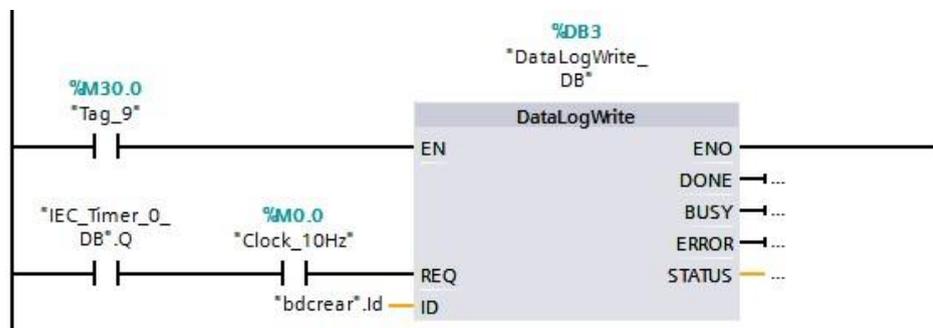


Figura 12-5 Bloque de escritura del registro de datos

Elaborado por: Eduardo Velasco

En la figura anterior se muestra que el bloque se habilita (entrada EN), a través de un contacto de la marca %M30.0, dicha marca se establece en 1 cuando el registro de datos ha sido creado. Para recopilar los datos (REQ) se utilizan dos contactos, el primero representa el tiempo total de adquisición y el segundo es el intervalo con el que se guardan los datos, en este caso cada 10 Hz; es decir, cada 0.1 segundos se guarda un dato.

Es importante mencionar que el tiempo de muestreo (Sample Time) escogido, es el reloj interno del autómata programable configurado a un valor de 10 Hz; es decir, se tomará una muestra cada 0.1 segundos, siendo este tiempo el más rápido que proporciona el autómata programable; este parámetro es de mucha importancia debido a que para la identificación de la planta y diseño de los controladores discretos se debe colocar el mismo valor. En la figura 14-5 se muestra la activación de las marcas de ciclo para el reloj interno y el direccionamiento de la memoria correspondiente.

Por último, para poder acceder a los datos se debe activar la opción del servidor web. En la figura 13-5 se puede observar la activación que se realiza en la configuración del dispositivo.

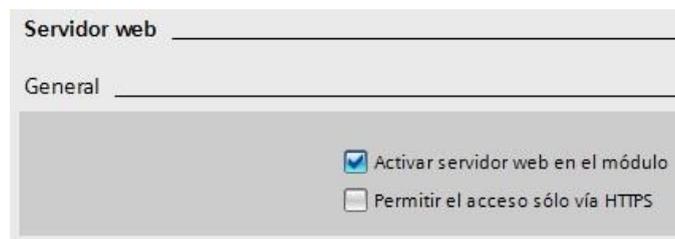


Figura 13-5 Activación del servidor web

Elaborado por: Eduardo Velasco

Para descargar los registros guardados en el autómata programable se debe acceder al web server que poseen los dispositivos de esta marca, solamente ingresando a cualquier navegador de internet y colocando en la barra de direcciones la dirección IP configurada en el dispositivo siempre y cuando se haya activado esta opción, para el proyecto se trabajó con la dirección 192.168.0.1. El archivo descargado está en formato .csv delimitado por comas; el mismo se lo puede abrir con el software Microsoft Excel.

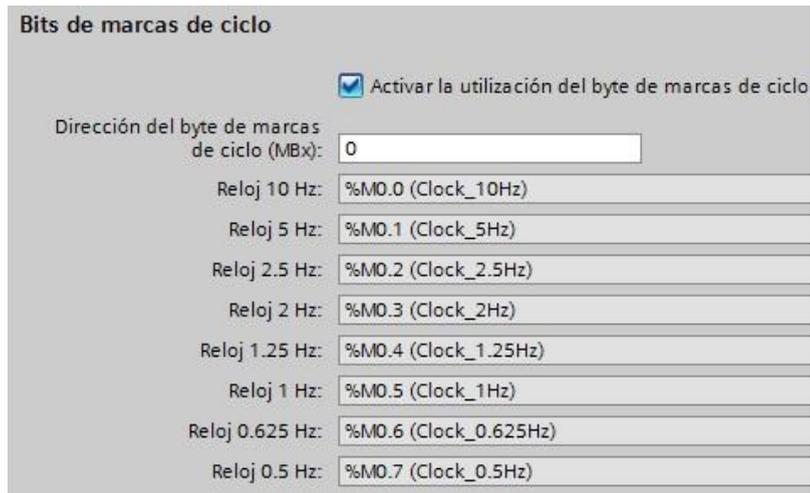


Figura 14-5 Activación de las marcas de ciclo.
Elaborado por: Eduardo Velasco

Como se puede observar en la figura anterior, al activarse los bits de marcas de ciclo se puede asignar el byte correspondiente para dichas marcas, por defecto el byte es el 0; por tanto, se empieza con la marca %M0.0 hasta %M0.7 respectivamente.

5.6. Datos obtenidos en lazo abierto

Para obtener la curva de reacción de la planta, a la misma se le hace funcionar de manera estable a un caudal de 20 l/min y luego se le aplica un escalón de 10 l/min de tal manera que llegue a un caudal de 30 l/min.

En este punto es importante mencionar que el valor de frecuencia enviada desde el PLC hacia el variador de velocidad, se la realizó mediante el protocolo de comunicación llamado USS basado en RS-485, propia de los dispositivos de la marca Siemens. La configuración del variador de velocidad Sinamics V-20 se la realiza mediante la utilización de macros de comunicación (funciones preestablecidas para facilitar el uso del dispositivo); donde el parámetro más importante es la velocidad de transmisión de datos, calibrada para esta aplicación a 9600 baudios.

En la figura 15-5 se observa el bloque de llamado a la comunicación USS_PORT; en el cual se observa el puerto de comunicación RS-845 y la velocidad de transmisión calibrada, como datos más relevantes. Las configuraciones restantes están basadas en la ayuda que proporciona el software TIA PORTAL. Es importante mencionar que este bloque USS_PORT, debe estar aterrizado en un bloque OBXXX ciclic interrupt; estos bloques se encuentran numerados a partir del número 200.

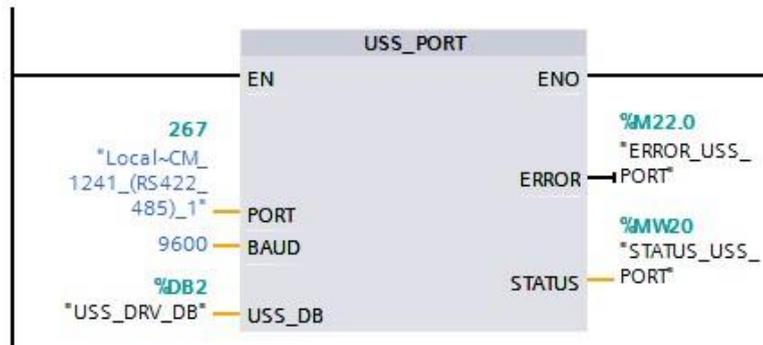


Figura 15-5 Bloque de llamada a la comunicación USS_PORT
 Elaborado por: Eduardo Velasco

Para configurar la transmisión y recepción (Tx/Rx) de datos se utiliza el bloque USS_DRV. En la figura 16-5 se observa el bloque mencionado; en el cuál la entrada SPEED_SP es la frecuencia enviada al variador de velocidad en porcentaje, de tal manera que 0% equivale a 0 Hz y 100% equivale a 60 Hz.

Las configuraciones más importantes corresponden a la dirección del dispositivo a controlar (entrada DIR); en este caso 1 y la configuración de arranque del bloque a través de la marca %M0.0. También es importante colocar las marcas y espacios de memoria correspondiente a los errores, para determinar el estado del bloque.

Por último, el bloque USS_DRV va aterrizado en el bloque principal del programa llamado OB1 (MAIN).

Una vez establecida y probada la comunicación entre el autómatas programable y el variador de velocidad, se realiza la obtención de los datos de la planta en lazo abierto, la figura 17-5 muestra la curva de reacción de la misma; en el eje Y, en color naranja se encuentra la señal tomada directamente del sensor y el color azul representa el valor del Set Point ambos expresados en l/min. El eje X, representa el tiempo; reiterando que se está tomando 1 dato cada 0.1 segundos.

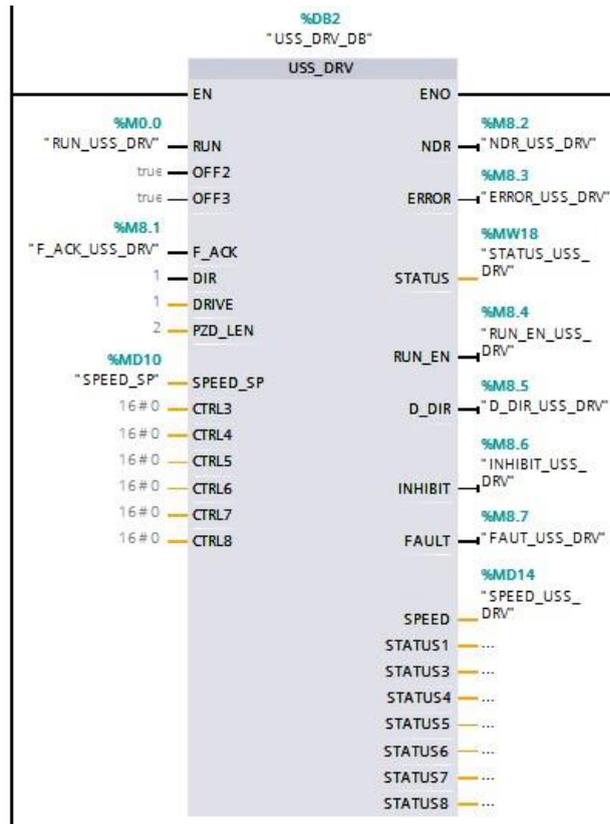


Figura 16-5 Bloque de transmisión y recepción USS_DRV

Elaborado por: Eduardo Velasco

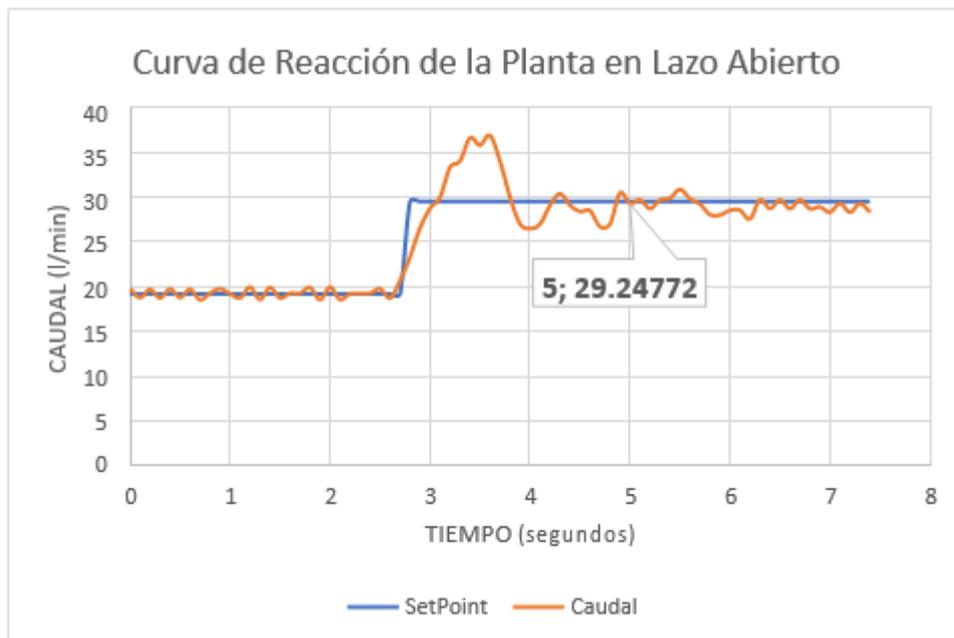


Figura 17-5 Curva de reacción de la planta

Elaborado por: Eduardo Velasco

Analizando la figura; se determina que el tiempo de establecimiento se encuentra a los 5 segundos, con una variación permanente en la señal del sensor debido al ruido del mismo.

Para los cálculos se debe tomar en cuenta el tiempo más pequeño; debido a que, es el tiempo más corto en el cual se estabiliza la planta ante un cambio en el Set Point.

Con este dato se puede determinar la frecuencia natural Wn , aplicando la siguiente ecuación:

$$Ts = \frac{4}{\zeta * Wn}$$

Donde:

- Ts es el tiempo de establecimiento
- ζ es la constante de amortiguamiento y puede tomar valores entre $0.4 \leq \zeta \leq 0.7$, para un máximo sobre impulso: $Mp \leq 20\%$, y
- Wn es la frecuencia natural

Entonces:

Despejando la frecuencia natural Wn , se obtiene:

$$Wn = \frac{4}{Ts * \zeta} = \frac{4}{5 * 0.7} = 1.14 \frac{rad}{s}$$

El tiempo de muestreo se calcula con la siguiente ecuación:

$$0.2 \leq Wn * Tm \leq 0.6$$

Donde:

- Tm es el tiempo de muestreo

Calculando:

$$0.17 \leq Tm \leq 0.52$$

Se determina que el periodo de muestreo Tm debe estar en el rango de 0.17 a 0.52 muestras por segundo. Con lo que se ratifica que la frecuencia del reloj escogido en el PLC de 10 Hz (0.1 muestras por segundo), es correcto.

5.7. Datos obtenidos en lazo cerrado

Para realizar la identificación de un modelo matemático se debe contar con la mayor cantidad de datos posibles; puesto que, una parte servirá para la modelación en sí, y otra para la validación de la misma. Basándose en ese criterio se programa en el PLC una señal triangular constante en el rango de operación óptimo de 20 a 40 Hz, que representa de 30 a 70 l/min.

La figura 18-5 muestra la gráfica de un fragmento de los datos correspondientes a la variable controlada; es decir, la frecuencia expresada en Hz con respecto al tiempo expresado en segundos. Para efecto de la modelación estos datos corresponden a la variable de entrada.

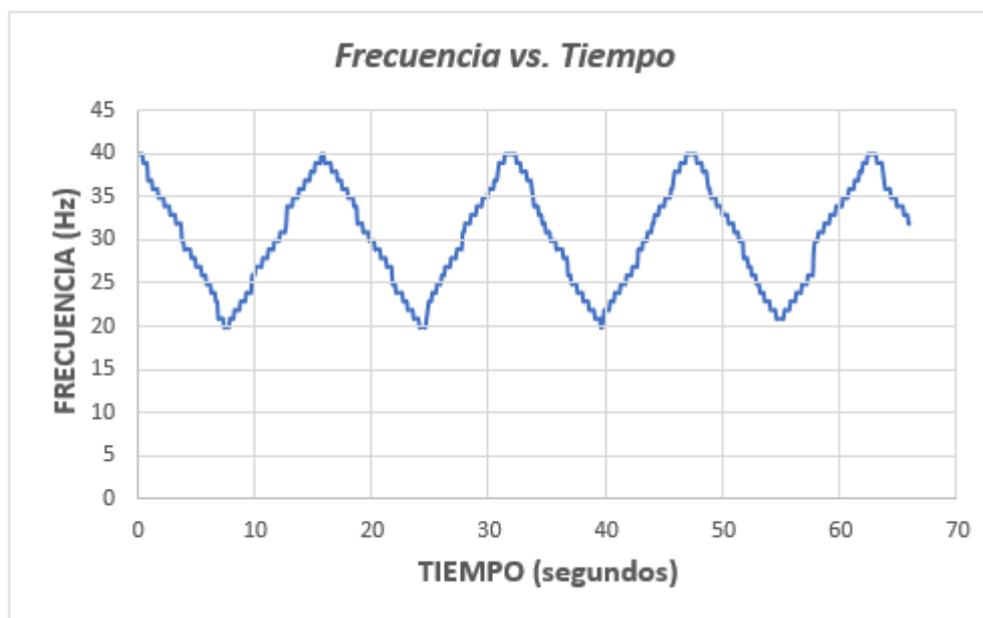


Figura 18-5 Datos de frecuencia vs. tiempo
Elaborado por: Eduardo Velasco

Por otro lado, en la figura 19-5, se observa una fracción de los datos obtenidos del sensor expresados en l/min con respecto al tiempo; la distribución de los datos es similar a la variación de frecuencia, para la modelación de la planta estos son los datos de salida.

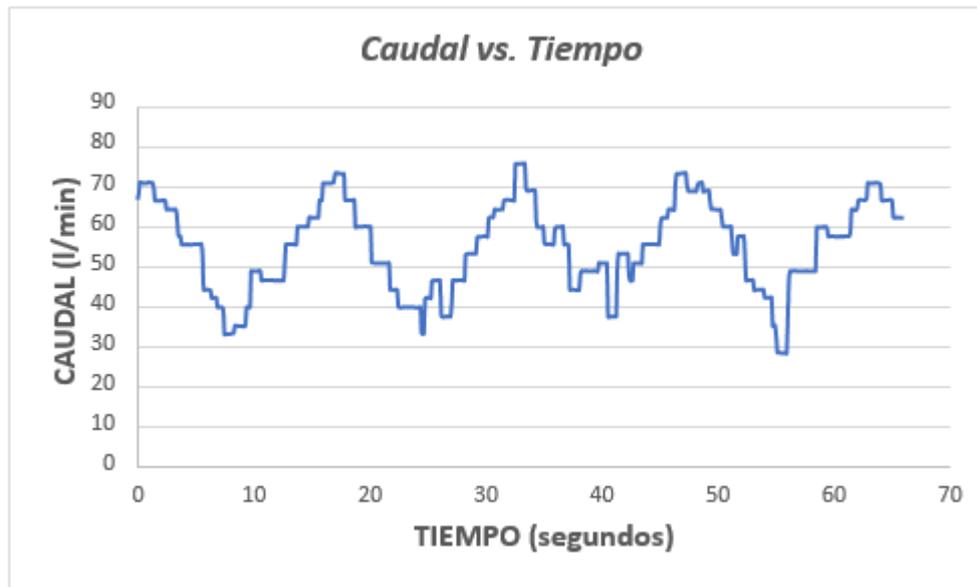


Figura 19-5 Datos de caudal vs tiempo.

Elaborado por: Eduardo Velasco

5.8. Modelación de planta en el software Matlab

Para la modelación de la planta se utilizó el software Matlab, el mismo cuenta con el toolkit de identificación de sistemas, los pasos seguidos para identificar la planta fueron:

1. Tener los datos correspondientes de la planta.
2. Importar los datos al software en forma de vectores para cada una de las columnas.
3. Cargar los datos al toolkit de identificación. Es importante tener en cuenta que el tiempo de muestreo es de 0.1 segundos.
4. Definir tramo de datos para identificación y tramo de datos para validación.
5. Escoger el tipo de modelo para la estimación, dentro de este parámetro se tienen las siguientes posibilidades: función de transferencia, variables de estado, modelos polinomiales, entre otros.
6. Estimar la planta para diferentes modelos.
7. Determinar el modelo que mejor se adapte a los datos de la planta, a través del parámetro Best Fits. Este valor está expresado en porcentaje y toma valores de 0 al 100 por ciento; un Fit de 0% significa que el modelo escogido no se relaciona a los datos; en cambio un valor de 100% quiere decir que se ha obtenido un modelo matemático que se adapta perfectamente a los datos.
8. Exportar el modelo con el mejor Fit al área de trabajo, para poder utilizar el mismo en el diseño de los controladores.

En la figura 20-5 se muestra la interfaz del toolkit de identificación de sistemas, en el cual se observan cargados los datos de entrada (Planta) y salida (Modelo), de igual manera se ha segmentado un fragmento de los datos para la validación de la misma, además se puede apreciar que se han identificado 4 tipos de modelos.

Los modelos estimados fueron: función de transferencia (tf1), variables de estado con 2 y 4 estados nombrados (ss2) y (ss1) correspondientemente y un modelo polinomial del tipo arx.

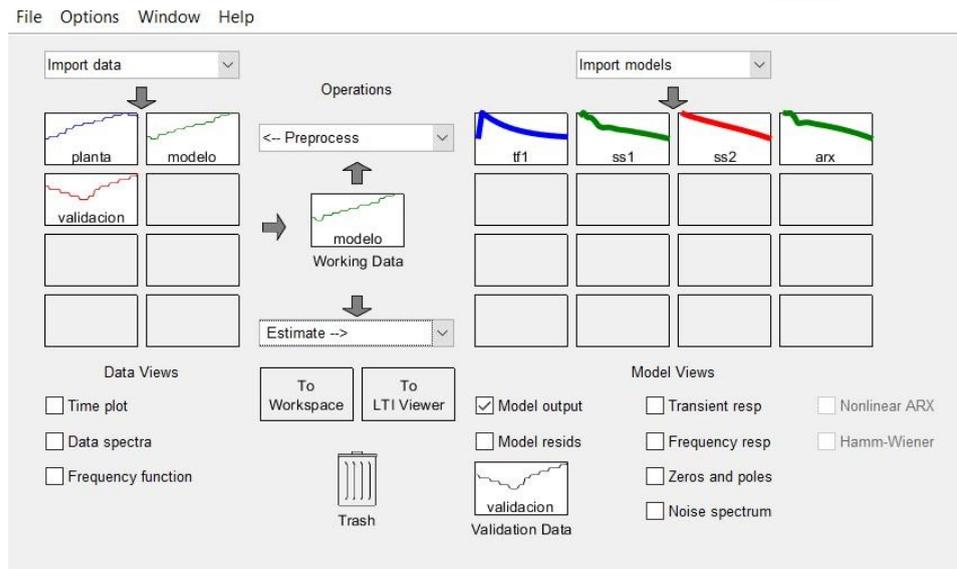


Figura 20-5 Toolkit del software Matlab para Identificación de Sistemas
Elaborado por: Eduardo Velasco

La figura 21.5 muestra la comparación entre los diferentes modelos y el valor Best Fits, que permite identificar cual es el mejor modelo que se adapta a los datos obtenidos de la planta. Como se puede apreciar en la figura 21-5, el modelo SS2 (Modelo en variables de estado con 2 estados) es el mejor modelo matemático que se adapta a los datos de entrada y salida con un porcentaje de aproximación del 82.44%; un modelo que esté por encima del 75% se considera aceptable; por lo tanto, el modelo matemático que representa a la planta y que tiene el nombre SS2 es el que se utilizará para el diseño de los controladores.

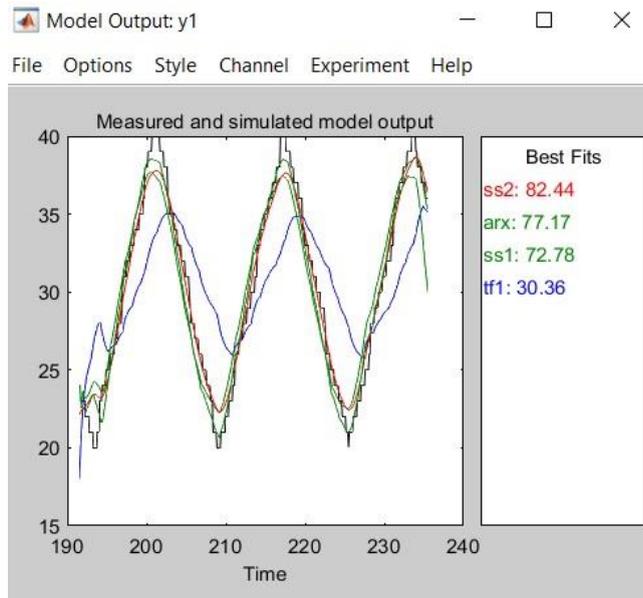


Figura 21-5 Comparación de los modelos obtenidos
 Elaborado por: Eduardo Velasco

Es importante mencionar que, al colocar el parámetro de tiempo de muestreo, el modelo obtenido ya se encuentra discretizado.

Como ya se mencionó anteriormente, el último paso del proceso de identificación de la planta es la exportación del modelo al área de trabajo; como resultado en la figura 22-5 se observa el modelo SS2, con las respectivas matrices A, B, C, D y K.

```

Command Window

A =
      x1      x2
x1  1.003  0.1217
x2  0.03934  0.9363

B =
      u1
x1 -0.001713
x2 -0.006882

C =
      x1      x2
y1  60.69 -1.909

D =
      u1
y1  0

K =
      y1
x1  0.01153
x2  0.002547

Name: ss2
Sample time: 0.1 seconds
  
```

Figura 22-5 Modelo desplegado en el área de trabajo del software Matlab
 Elaborado por: Eduardo Velasco

Una vez obtenido el modelo matemático de la planta y mediante instrucciones específicas del software Matlab, se le van a realizar comprobaciones al modelo matemático, sobre criterios de: estabilidad y controlabilidad.

Se aplica el comando rlocus el cual proporciona el lugar geométrico de las raíces. El comando en

Matlab es el siguiente:

```
>> rlocus(tf_planta_caudal)
```

Al ser un sistema discreto el mismo se supone estable si los polos y ceros se encuentran dentro de una circunferencia de radio 1. En la figura 23-5 se puede observar que el sistema cumple con la condición, mencionada anteriormente; es decir, los polos y ceros se encuentran dentro de la circunferencia; por lo tanto, al sistema se lo considera estable.

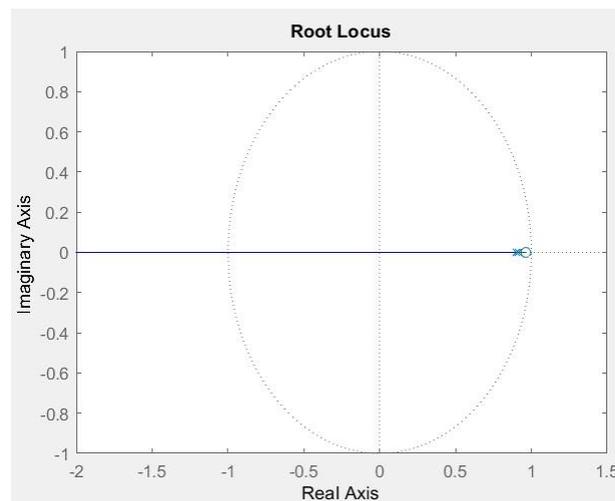


Figura 23-5 Lugar geométrico de las raíces
Elaborado por: Eduardo Velasco

Por otra parte, para determinar si el sistema es controlable se aplica en Matlab el comando ctrb, como se muestra a continuación: }

```
>> G=ctrb(planta_caudal)
```

Obteniéndose la matriz G:

G =

```
-0.0017 -0.0026
```

```
-0.0069 -0.0065
```

Al analizar dicha matriz, se determina que los elementos son linealmente independientes por lo que al sistema se lo considera controlable. Una vez definido que el modelo matemático obtenido es estable y controlable se procede al diseño de los controladores PID y Predictivo utilizando el software Simulink.

5.9. Diseño de controladores en Simulink

Una vez obtenido el modelo matemático de la planta el paso siguiente es el diseño de los sistemas de control; para el presente proyecto se implementó un control PID y Predictivo con el objetivo de realizar la comparación entre los mencionados sistemas de control y el PID nativo del PLC S7-1200.

El diseño de los controladores es mejor realizarlo de forma gráfica; debido a que es más entendible, para esto el software Matlab posee un subprograma llamado Simulink, en el cual se puede trabajar con diagrama de bloques, que permite una mejor comprensión del sistema.

En la figura 24-5 se muestran los bloques implementados en Simulink del sistema de control en lazo cerrado con realimentación unitaria. En la figura se pueden apreciar los dos sistemas de control, el PID discreto y el control Predictivo aplicados sobre la misma planta de nombre planta_caudal, las señales de salida se colocan a un multiplexor y posteriormente a un osciloscopio; esto se debe a que al tener las dos señales se puede realizar la comparación entre los dos sistemas de control.

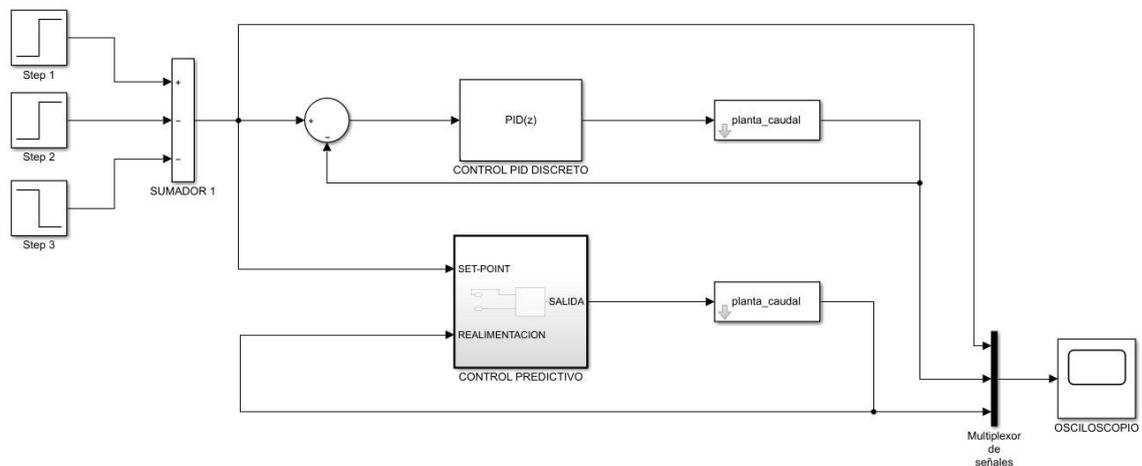


Figura 24-5 Diagrama de bloques del proceso implementado en Simulink
Elaborado por: Eduardo Velasco

Empezando la descripción de la figura 24-5 de izquierda a derecha se tiene:

1. Función Paso (Step):

Permite simular el cambio en el punto de consigna (SetPoint); se debe configurar el valor inicial, final y el tiempo de muestreo. Como se puede apreciar en la figura, existen 3 bloques de este tipo, en la tabla 7-5 se describen los valores con los cuales están calibrados los mencionados bloques.

Tabla 7-5: Calibración de los bloques Step

	Tiempo de paso	Valor inicial	Valor Final	Tiempo de Muestreo (segundos)
STEP 1	1	0	40	0.1
STEP 2	20	0	20	0.1
STEP 3	40	0	-20	0.1

Elaborado por: Eduardo Velasco

2. Función Sumador (Sum)

Como su nombre lo indica permite sumar las señales de entrada, dependiendo del signo con el que se coloque; de esta manera el signo + implica suma y el signo – resta.

3. Control PID discreto

Bloque del controlador proporcional, integral y derivativo PID; el mismo permite la sintonización del controlador. En la figura 25-5 se muestra la ventana de configuración de los parámetros iniciales, se ha seleccionado un controlador en tiempo discreto, el método de integración después de haber realizado varias pruebas es trapezoidal debido a que genera la mejor respuesta del sistema; y por último el tiempo de muestreo es 0.1 segundos.

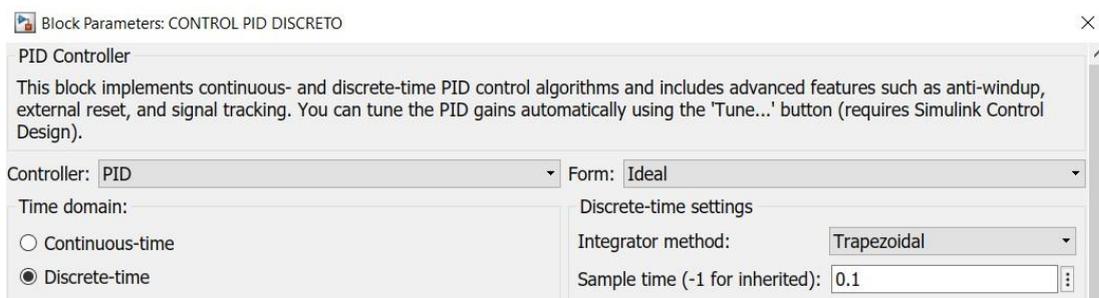


Figura 25-5 Configuración de los parámetros del PID

Elaborado por: Eduardo Velasco

En la figura 26-5 se aprecia la ventana en la cual se puede realizar la optimización de los parámetros del PID para mejorar la respuesta del sistema.

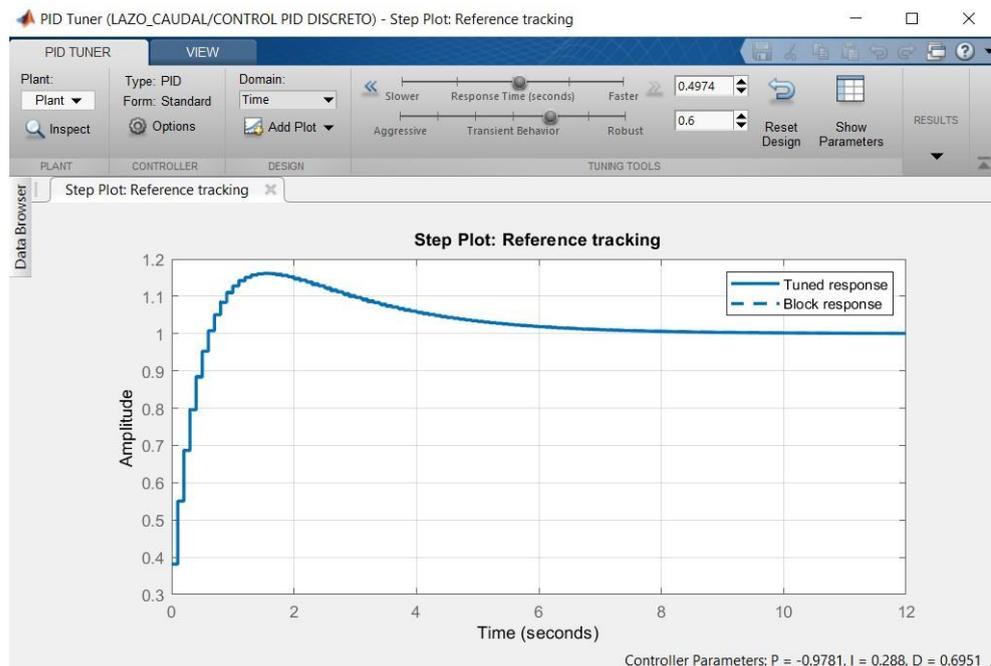


Figura 26-5 Pantalla de sintonización de los parámetros del controlador PID
Elaborado por: Eduardo Velasco

Para ingresar a la opción que se muestra en la figura se debe presionar el botón TUNE que quiere decir sintonización del PID. En esta pantalla se puede mejorar la respuesta del controlador, moviendo los deslizadores ubicados en la parte superior; sin embargo, así como se puede mejorar la respuesta también es posible dañar la misma, haciéndolo al sistema inclusive oscilatorio. Una vez realizadas varias pruebas, la respuesta que se muestra en la figura 26-5 es la mejor que se puede obtener con este tipo de controlador a la planta identificada. También se puede apreciar que en la parte inferior izquierda se muestran los parámetros calculados de las constantes del controlador.

Al analizar la gráfica obtenida se identifican dos aspectos principales; el primero tiene que ver con el valor del máximo sobre impulso M_p , como se puede apreciar la curva toma un valor máximo aproximado de 1.15, esto significa que se ha elevado el 15% del valor de entrada (función paso con el valor de 1).

Un sistema de control se considera aceptable si el valor del máximo sobre impulso (M_p) es menor o igual al 20%; por lo tanto, el controlador cumple con esta característica.

El otro factor a tomar en cuenta es el tiempo de establecimiento T_s (tiempo en el cual el valor de la salida del sistema se iguala al de la entrada), como se puede apreciar esto sucede a los 8.5 segundos.

Una vez que se ha obtenido la mejor respuesta del sistema se carga el bloque con los parámetros de las constantes proporcional, integral y derivativo. En la figura 27-5 se muestran los parámetros cargados al bloque; donde $K_p = -0.978$, $T_i = 0.287$ y $T_d = 0.695$.

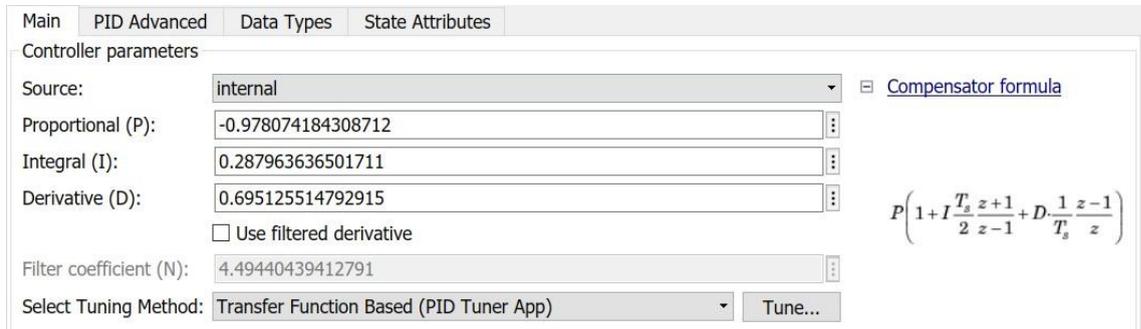


Figura 27-5 Parámetros del PID
Elaborado por: Eduardo Velasco

Como verificación final del controlador se somete a cambios del punto de consigna por medio de las funciones paso (STEP), para comprobar la respuesta del sistema. En la figura 28.5 se observa la respuesta de la planta (curva de color azul) ante cambios en el Set Point (curva de color rojo).

Analizando la figura en el intervalo de tiempo de 0 a 10 segundos, se puede determinar que existe un pico máximo de 46 l/min, lo que significa que el sistema tiene un máximo sobre impulso $M_p = 15\%$, el tiempo de estabilización es de 11.58 segundos. Además, se puede observar que cuando se genera el cambio en el Set Point también se produce un pico, pero de menor dimensión que el inicial y además el tiempo de estabilización medido entre los cursores 1 y 2 se reduce a 8.793 segundos.

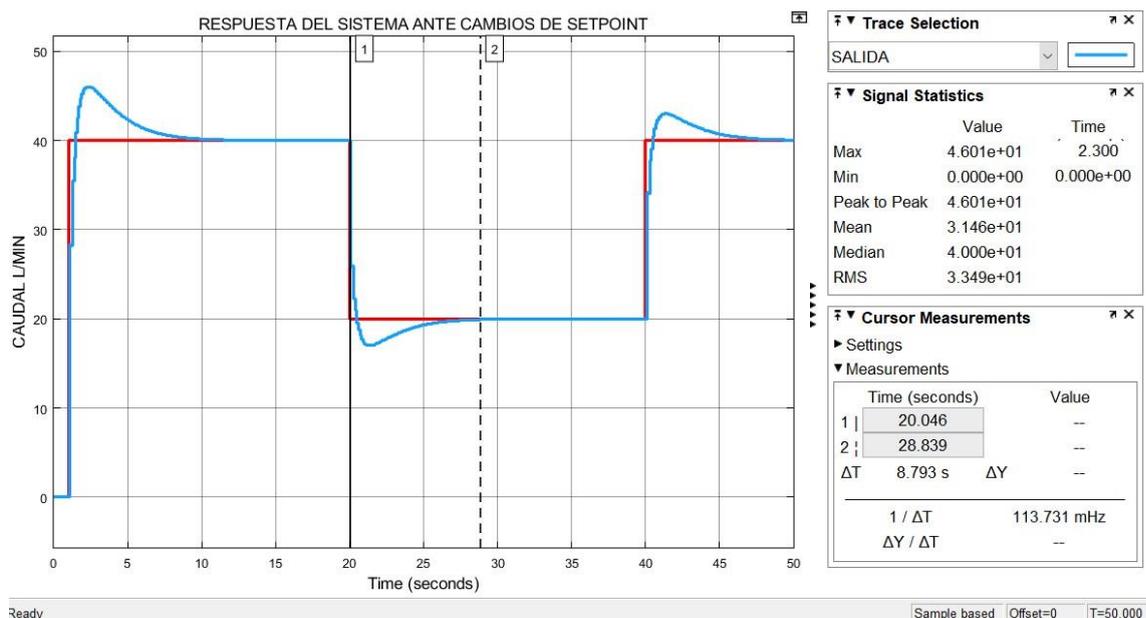


Figura 28-5 Control PID sometido a varios puntos de consigna
Elaborado por: Eduardo Velasco

También es necesario analizar el esfuerzo que va a realizar el actuador; es decir, el variador de velocidad, para verificar si no sobrepasa los valores máximos; este análisis se lo va a realizar en el arranque del sistema, debido a que en esos primeros instantes de funcionamiento de la planta se producen las mayores variaciones en la señal de control.

En la figura 29-5 se observa la señal de salida del controlador PID expresada en Hz y en función del tiempo; cómo se puede observar cuando se da la entrada escalón calibrada a 40 l/min al tiempo de 1 segundo, el controlador envía una señal que alcanza 31.16 Hz; por lo tanto, no se sobrepasa los 60 Hz que es el valor máximo de funcionamiento de la bomba de caudal.

Continuando con el análisis, en un segundo instante se produce un descenso de la señal de control, alcanzando 17.97 Hz; es decir que, para ninguno de los dos picos más pronunciados, se sobrepasa el valor máximo admisible en frecuencia hacia la bomba de caudal.

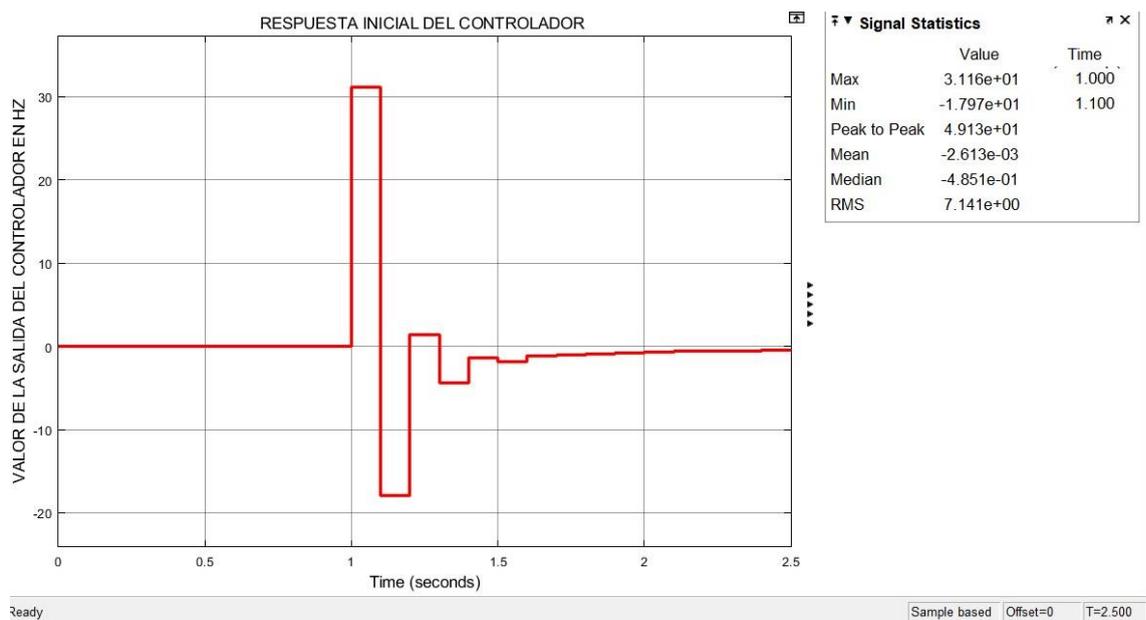


Figura 29-5 Señal de salida del controlador PID
Elaborado por: Eduardo Velasco

4. Control Predictivo

De la misma manera que el controlador PID, el control predictivo es un bloque perteneciente a la librería de Simulink. Existen diferentes tipos de controladores de este tipo, por ejemplo: controlador MPC adaptativo, controlador MPC explícito, controlador MPC múltiple explícito, controlador MPC, etc.

Para el proyecto se utilizó el controlador MPC debido a que es el único que se puede exportar al autómata programable; con el bloque en el área de trabajo se deben calibrar los siguientes parámetros:

- Tiempo de muestreo: al igual que todos los procedimientos realizados anteriormente, el valor es de 0.1 segundos; recordando que es la velocidad a la cual se tomaron los datos.
- Horizonte de control: Es el valor que permite que la respuesta de la planta sea más rápida o lenta; y
- Horizonte de predicción: Este valor permite generar una curva más suave; es decir, modificación de la pendiente y aumento o disminución del sobre impulso.

La figura 30-5 muestra la ventana de calibración y optimización del controlador predictivo; se puede observar que se ha calibrado el tiempo de muestreo a 0.1 segundos, el horizonte de predicción a 30 y el horizonte de control a 2, además se ha procurado que el controlador no sea agresivo sino más bien robusto moviendo el deslizador correspondiente a este parámetro. Los datos anteriormente mencionados fueron obtenidos tras realizar varias pruebas, obteniendo así la mejor respuesta posible.

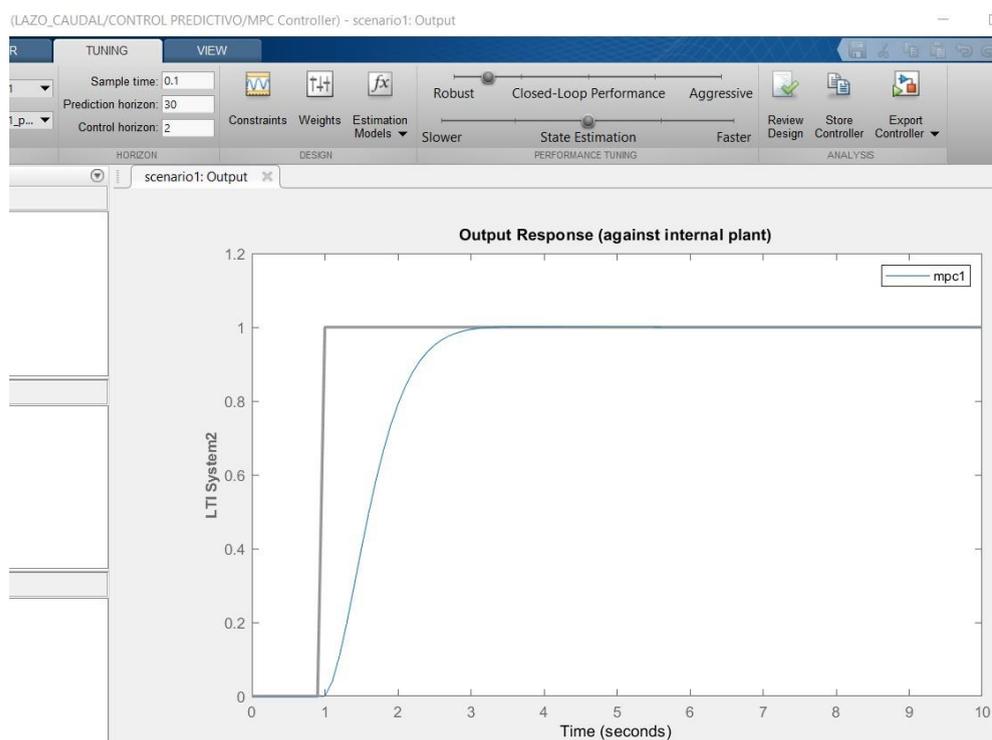


Figura 30-5 Calibración y optimización del controlador Predictivo
Elaborado por: Eduardo Velasco

Analizando la respuesta obtenida ante una entrada paso calibrada a 1, se puede observar que no existe máximo sobre impulso y que el tiempo de establecimiento es de 3 segundos.

Una vez calibrado el controlador MPC se exportan los valores al bloque. Para verificar el correcto funcionamiento del mismo, se somete al control y planta a cambios en los valores de la consigna. En la figura 31-5 se puede observar que la respuesta del sistema (curva el color azul) no tiene sobre impulsos, ante cambios en el valor del Set Point (curva color rojo); por otra parte, se puede apreciar la medición del tiempo de establecimiento tomada entre los cursores 1 y 2, y que corresponde a un valor de 2.497 segundos.

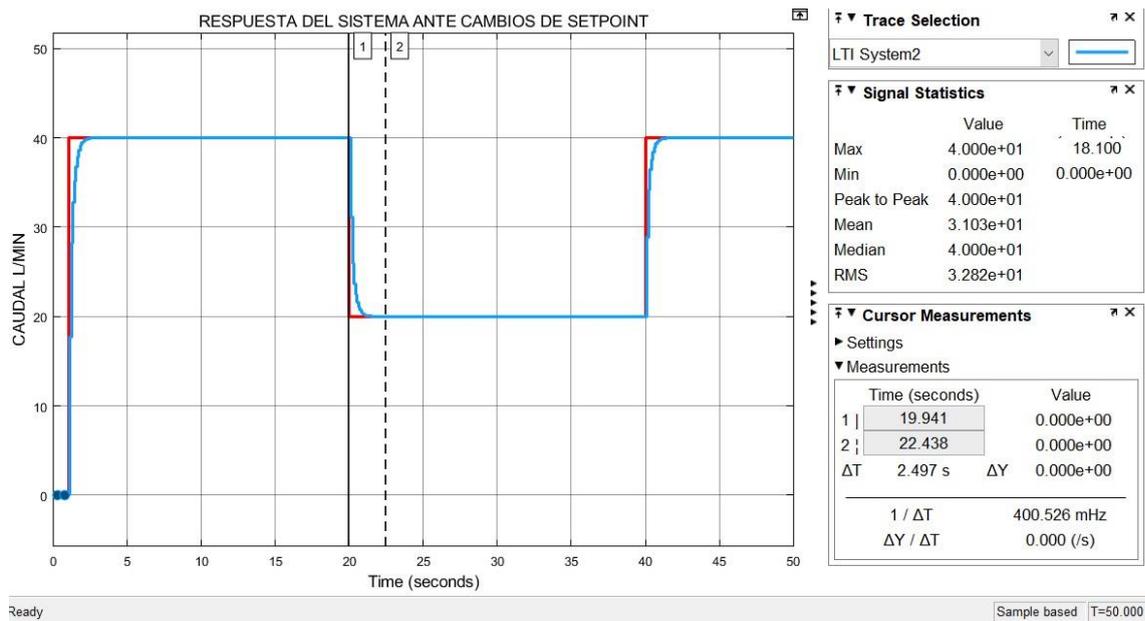


Figura 31-5 Respuesta del controlador MPC a diferentes puntos de consigna.
Elaborado por: Eduardo Velasco

De la misma manera que en el controlador anterior; se va analizar el esfuerzo que va a realizar el actuador. En la figura 32-5 se observa la señal de control cuando arranca el proceso (tiempo de simulación 2.5 segundos), debido a que es donde se obtienen los picos más elevados.

Como se puede apreciar en la figura 32-5 el pico inicial toma un valor 19.53 Hz; y el pico descendente de 5.81 Hz; por lo tanto, se determina que el esfuerzo que va a realizar el actuador está dentro de los límites admisibles.

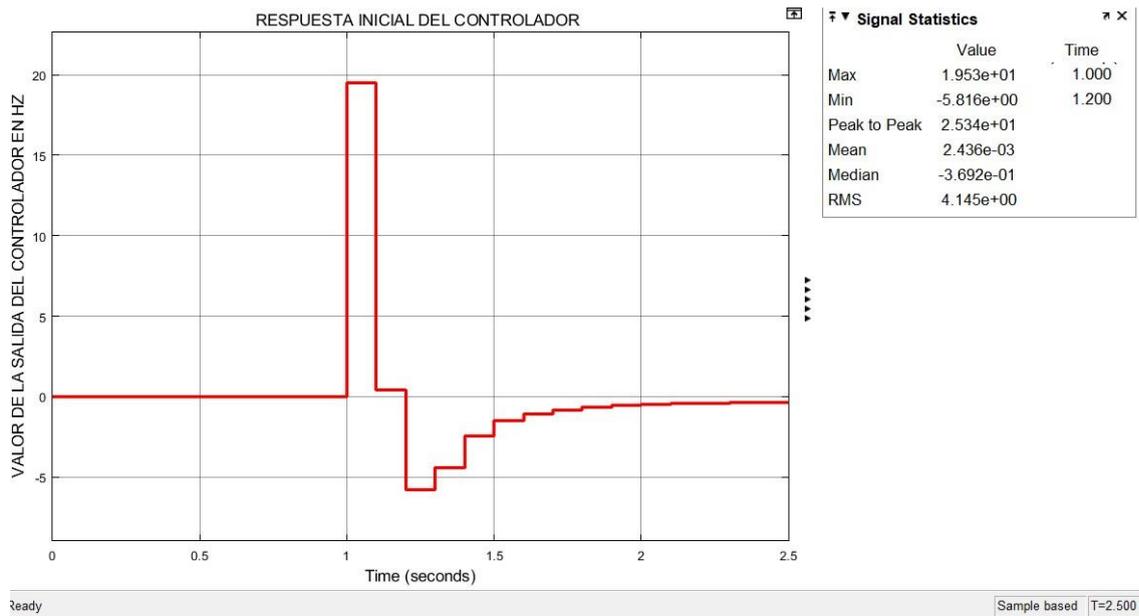


Figura 32-5 Señal de salida del controlador Predictivo

Elaborado por: Eduardo Velasco

De los valores obtenidos en las simulaciones, respecto a los parámetros de máximo sobre impulso M_p y tiempo de establecimiento T_s ; la tabla 8-5 muestra los valores comparativos obtenidos.

Tabla 8-5: Parámetros comparables entre los sistemas de control PID y Predictivo

	Control PID	Control Predictivo
Set Point	40 l/min	
Máximo sobre impulso	15 %	0 %
Tiempo de establecimiento	11.58 segundos	2.495 segundos
Pico máximo de frecuencia en el arranque	31.16 Hz	19.53Hz

Elaborado por: Eduardo Velasco

5.10. Generación de bloques de control para el software TIA PORTAL

Una vez diseñados los controladores, el siguiente paso es la programación de los mismos en el autómatas programable; para esto, a partir de la versión del software Matlab 2014 Rb es posible la generación del código fuente para diferentes marcas de autómatas programables mediante la herramienta PLC CODE.

Las consideraciones principales para que se pueda generar el código son las siguientes:

- Solo se puede generar el código si el bloque es discreto.

- Si el bloque es continuo se debe generar un subsistema que contenga al mencionado bloque. En los parámetros de configuración del subsistema elegir la opción de unidad de tratamiento atómico y especificar el tiempo de muestreo.

Con respecto al bloque PID éste fue diseñado directamente en el campo discreto por lo que la obtención del código para el PLC fue directa; sin embargo, para el bloque de control Predictivo se siguieron los parámetros anteriormente mencionados.

La figura 33-5, muestra la configuración de los parámetros necesarios para la creación del subsistema.

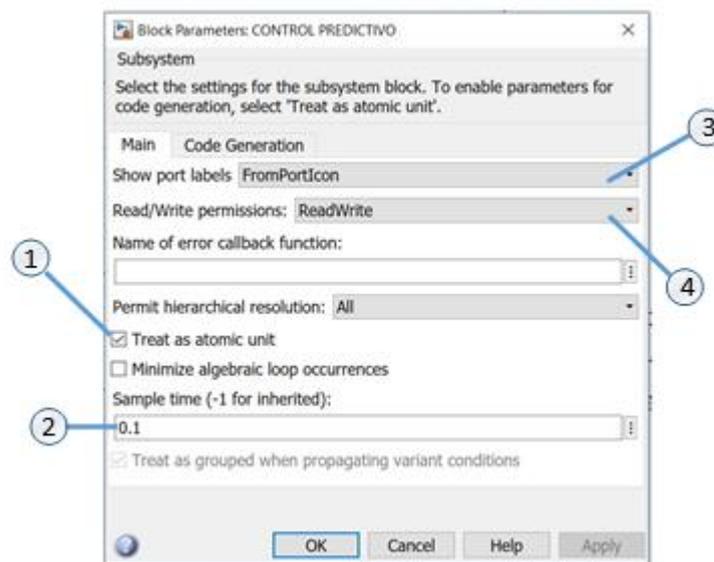


Figura 33-5 Parámetros calibrados para el subsistema.

Elaborado por: Eduardo Velasco

Donde:

1. Unidad como tratamiento atómico.
2. Tiempo de muestreo equivalente al utilizado para la obtención de los datos.
3. Colocar puertos de entrada y salidas visibles.
4. Bloque con permisos de lectura y escritura.

En la figura 34-5 se observa el subsistema creado para el control Predictivo, este nuevo bloque tiene dos entradas, la primera toma el nombre de Set Point, la función es correspondiente a su nombre; la otra entrada se denomina realimentación, en la misma se colocará la señal del sensor de caudal.

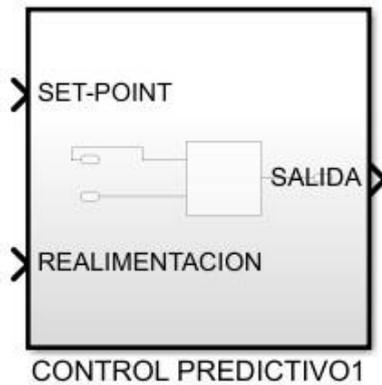


Figura 34-5 Subsistema creado.
Elaborado por: Eduardo Velasco

Para la obtención de los bloques, se deben configurar en la herramienta PLC CODE los parámetros que se muestran a continuación en la figura 35-5.



Figura 35-5 Parámetros para generar el código compatible con el software TIA PORTAL
Elaborado por: Eduardo Velasco

Cabe destacar que los códigos generados por Matlab son en base a la programación de texto estructurado (ST), basado en sentencias como: case, for, while, if-else, etc.

Una vez que se cuenta con los archivos creados, los mismos se abren en el software TIA PORTAL, a través del directorio Fuentes externas como muestra en la figura 36-5, en la cual ya se ha importado el archivo de nombre LAZO_CAUDAL.scl, correspondiente al control Predictivo.

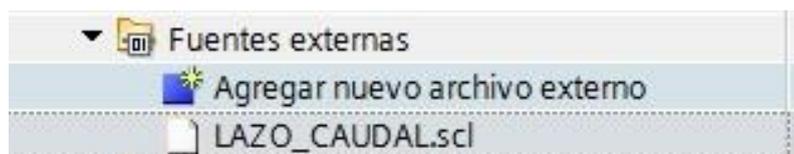


Figura 36-5 Archivo lazo-caudal.scl importado al software
Elaborado por: Eduardo Velasco

Una vez que se tiene el archivo en el software TIA PORTAL, es necesaria la creación de bloques de función FB a partir de los mismos, para ello se hace clic derecho sobre el archivo y se escoge la opción Generar bloque a partir de archivo, la figura 37-5 muestra el bloque creado para el control Predictivo, como se puede observar, conserva los parámetros de entrada y salida respecto del software Matlab; sin embargo, se ha creado una entrada con nombre ssMethodType, la cual acepta dos posibles valores:

- 1, para funcionamiento normal del bloque con la lógica programada, y
- 0, para detener el bloque y regresarlo a las condiciones iniciales; es decir un Reset.

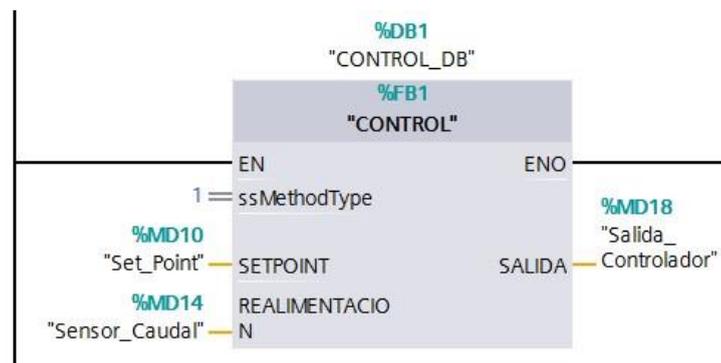


Figura 37-5 Bloque FB creado para el control Predictivo
Elaborado por: Eduardo Velasco

Las memorias colocadas en el bloque corresponden a:

1. %MD10 (Memoria Doble Word tipo Real), en la misma se podrán calibrar los valores del Set Point a través del HMI.
2. %MD14 (Memoria Doble Word tipo Real), en la cual se encuentra la señal del sensor de caudal.
3. %MD18 (Memoria Doble Word tipo Real), que envía la señal de control al variador de velocidad.

Hay que destacar que no se puede enviar el dato de forma directa ya que el bloque de comunicación USS_DRV solo acepta valores en porcentaje, por tanto, el dato debe ser escalado.

El procedimiento para el bloque PID es exactamente igual. Es importante mencionar que los dos bloques creados para los controladores deben ser colocados en bloques OB con interrupción cíclica a partir de la dirección 200. Antes de la realización de las pruebas correspondientes de los controladores, es necesaria la programación de las condiciones iniciales y parámetros de seguridad, que debe tener la planta para el correcto funcionamiento del sistema.

5.11. Programación de modos de funcionamiento

Se ha determinado que el módulo debe tener tres modos de funcionamiento:

1. Modo PID
2. Modo Predictivo, y
3. Modo Manual

Estos modos de funcionamiento se podrán escoger desde la interfaz gráfica y solo deberá funcionar uno a la vez. El modo de funcionamiento manual, tiene el objetivo de realizar la calibración de la planta; es decir, llevar al sistema a tener las condiciones iniciales necesarias. Para poder comprender de mejor manera se realizan los diagramas GRAFCET (Gráfico de funciones, estados y transiciones) del sistema; en la tabla 9-5 se muestran los tags de asignación de entradas y salidas desde y hacia el sistema.

Tabla 9-5: Asignación de entradas, salidas, marcas y memorias más relevantes en el PLC

Nombre	Tipo de	Dirección	Descripción
M_PID	Bool	M0.0	Modo de funcionamiento PID
M_PRED	Bool	M0.1	Modo de funcionamiento Predictivo
M_MAN	Bool	M0.2	Modo de funcionamiento Manual
START	Bool	M0.3	Arranque del sistema de control, para el control PID y Predictivo
STOP	Bool	M0.4	Parar/Salir, detiene el sistema de control y se sale del modo de funcionamiento
V_PRO	Bool	M0.7	Permite activar la válvula proporcional
S1	Bool	I0.1	Sensor alto del tanque N°1
S2	Bool	I0.2	Sensor bajo del tanque N°1
S3	Bool	I0.3	Sensor alto del tanque N°2
S4	Bool	I0.4	Sensor bajo del tanque N°2
S5	Bool	I0.5	Sensor alto del tanque N°3
S6	Bool	I0.6	Sensor bajo del tanque N°3
S7	Bool	I0.7	Sensor alto del tanque N°4
S8	Bool	I1.0	Sensor bajo del tanque N°4
B_Presión	Bool	Q0.0	Bomba de Presión
SV_Pro	Real	QW64	Salida analógica para controlar la válvula proporcional
In_sensor_caudal	Int	IW64	Entrada analógica del sensor de caudal
Set_Point	Real	MD10	Memoria para calibrar el punto de consigna desde el HMI
Valor_Hz	Real	MD50	Memoria que envía el porcentaje de 0 al 100% para el

Elaborado por: Eduardo Velasco

Por supuesto existen otras marcas y memorias utilizadas; sin embargo, las mismas se utilizan solo dentro del programa para el correcto funcionamiento del mismo.

En la figura 38-5 se muestra el diagrama GRAFCET que rige los modos de funcionamiento del sistema.

Como se puede observar solo una opción puede estar en funcionamiento debido a la condición OR implementada; no existe la posibilidad de ingresar a dos modos de funcionamiento al mismo tiempo.

Estando en funcionamiento alguno de los modos, no se podrá salir sino se cumple la condición de STOP, con lo que se garantiza que para ingresar a otro modo el anterior ha sido desactivado.

Además, es importante mencionar que, al salir de cualquiera de los modos de funcionamiento, todas las memorias, marcas y demás parámetros establecidos son reseteados; es decir, colocados a 0.

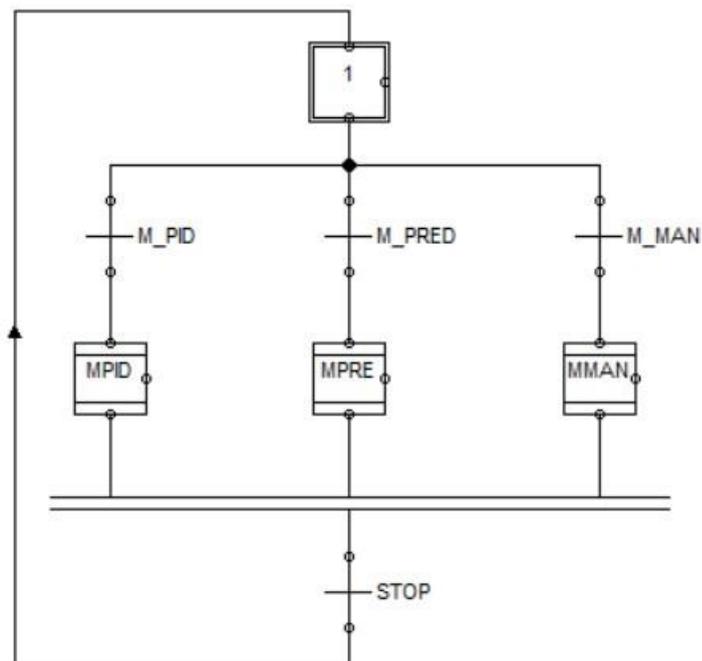


Figura 38-5 Modos de funcionamiento del sistema
Elaborado por: Eduardo Velasco

Por otro lado, la figura 39-5 muestra el diagrama GRAFCET interno de la subrutina llamada MMAN (modo manual), como se puede apreciar, se tienen acceso al control de las dos bombas y a la válvula proporcional. Es importante identificar que el sistema está protegido a través de los sensores de nivel descritos con la letra S.

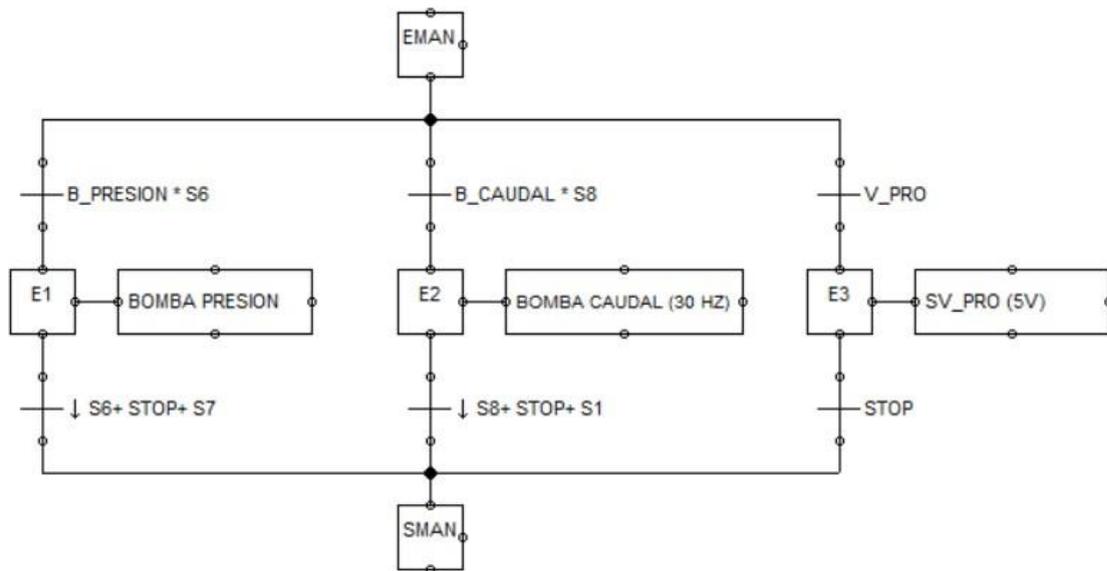


Figura 39-5 Grafcet interno de la macro MMAN
 Elaborado por: Eduardo Velasco

Cuando se presiona B_CAUDAL o B_PRESION desde el HMI, se acciona la bomba respectiva siempre y cuando exista un nivel de líquido mayor al nivel bajo del tanque al cual está conectada la entrada de la bomba; la desactivación se realiza de tres formas distintas: si el nivel del tanque desciende del mínimo establecido (se detecta el flanco negativo del sensor correspondiente; es decir, cuando se desactiva el sensor por falta de líquido), la segunda forma es si se presiona STOP, y por último se apagan las bombas si el tanque asociado a la salida de la bomba respectiva se encuentra lleno, esto se determina por medio de los sensores de nivel alto. Al activar V_PRO se activa la válvula proporcional con un valor de 5 VDC (Abre la válvula al 50%).

La figura 40-5 muestra el funcionamiento del diagrama GRAFCET interno de las subrutinas MPID y MPRED. Como se puede observar, las condiciones de las transiciones son exactamente las mismas para cualquiera de los dos sistemas de control; una vez escogido alguno de los modos de funcionamiento, el programa verifica que: exista líquido en el tanque N°4 (sensor S8 activo), que el tanque N°1 no esté lleno (sensor S1 inactivo) y que además se presione START para que inicie el funcionamiento del sistema de control escogido.

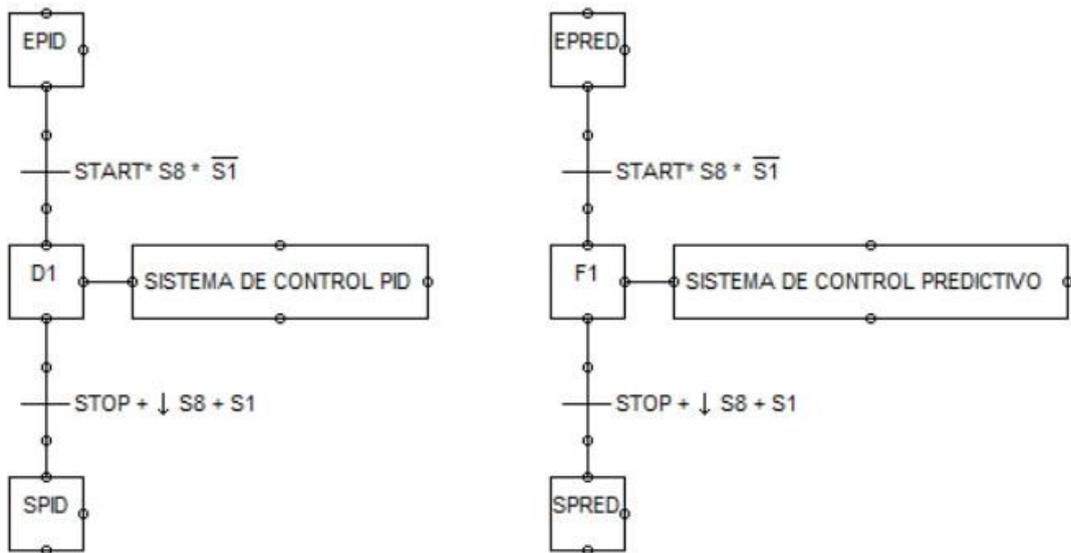


Figura 40-5 Graficet interno de las macros MMAN y MPRED

Elaborado por: Eduardo Velasco

Para detener el sistema se puede presionar STOP (forma manual de detener el sistema), la otra forma es de manera automática; si el tanque N°4 se queda sin líquido (S8 inactivo) o su vez, si el tanque N°1 está lleno (S1 activo).

5.12. Implementación del PID_Compact

Para poder contar con parámetros de comparación respecto de los controladores implementados, se hace necesario encontrar la respuesta de la planta, pero con el bloque de nombre PID_Compact incorporado en el software TIA PORTAL, para establecer las diferencias de la respuesta del proceso en estado dinámico.

Por lo anteriormente mencionado a continuación se va a indicar la forma adecuada de calibración y puesta en servicio el bloque PID_Compact. El bloque como tal se lo encuentra en el directorio Objetos Tecnológicos, el fabricante recomienda aterrizar el mismo en bloques OB con interrupción cíclica y calibrarlo con un tiempo de ejecución menor o igual a 20 milisegundos.

La figura 41-5 muestra el bloque PID_Compact, se puede observar que cuenta con tres entradas: Set Point, Input (ingreso de señal de realimentación en formato real) e Input_PER (ingreso de señal de realimentación directamente desde una entrada analógica), y cinco salidas: Output (salida en formato real), Output_PER (señal de salida directa, hacia una salida analógica física), Output_PWM (salida

con modulación por ancho de pulso), State (estado activo 1, o 0 inactivo) y Error (Memoria donde se visualiza el código de error, para identificar el mismo remitirse a la ayuda correspondiente)

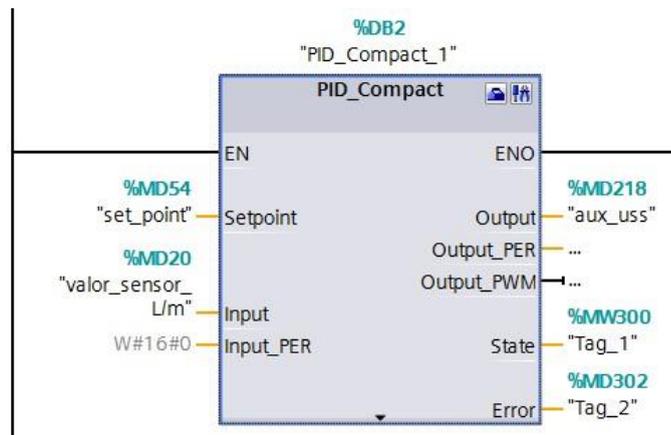


Figura 41-5 Bloque PID_Compact
Elaborado por: Eduardo Velasco

La calibración de parámetros se muestra en la figura 42-5, como se puede visualizar en tipo de regulación, se ha escogido la variable caudal y la unidad de medida correspondiente en litros/min además se ha activado la casilla para el modo de funcionamiento tras el arranque de la CPU.

Para los parámetros de entrada/salida se ha escogido Input y Output (están en formato real), debido a que los mismos son escalados antes y después para obtener los valores reales correspondientes.

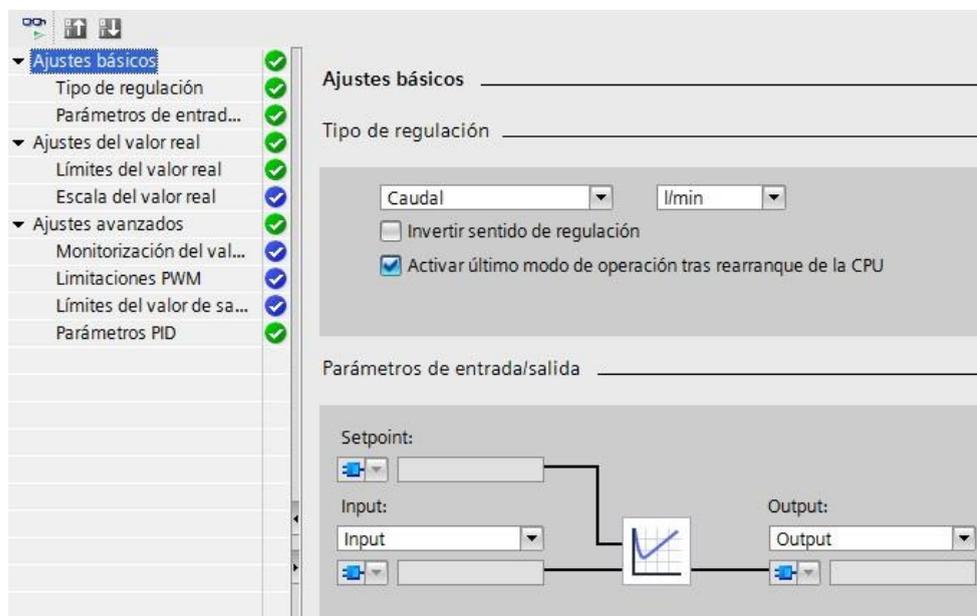


Figura 42-5 Configuración del bloque PID_Compact
Elaborado por: Eduardo Velasco

Es importante mencionar que todos los parámetros deben estar con un visto sea en color azul (parámetros por default que no se han modificado) o en color verde (parámetros modificados y coherentes al bloque).

Para la puesta en servicio del bloque, en la figura 43-5 se observa que el tiempo de muestreo se ha establecido en 0.3 segundos (valor mínimo utilizable), el Set Point se ha calibrado a 40 l/min y en modo de ajuste se utilizado la optimización fina.

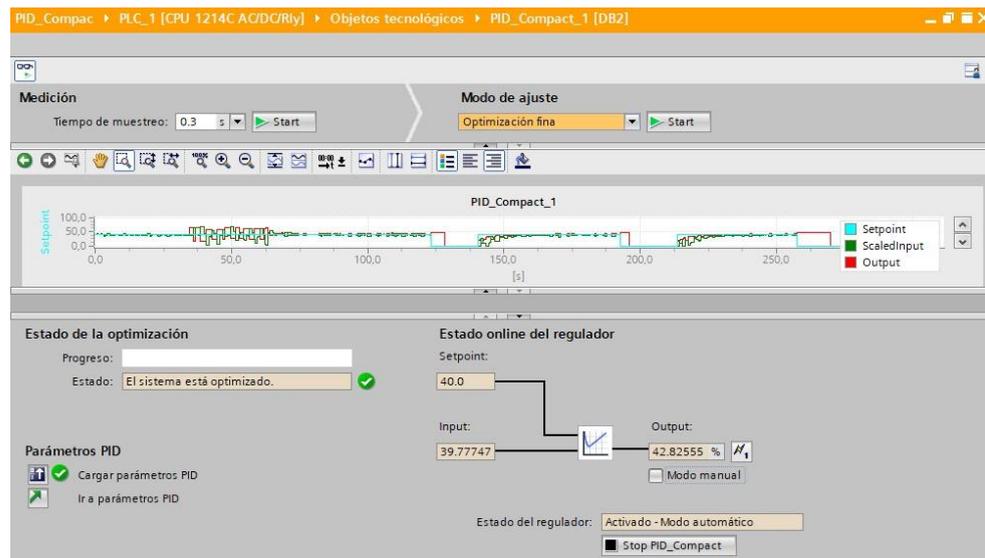


Figura 43-5 Puesta en servicio del bloque PID_Compact
Elaborado por: Eduardo Velasco

Adicionalmente se puede observar que el bloque ha sido optimizado y los parámetros K_p , T_i y T_d fueron cargados exitosamente, esto se puede verificar en la figura 44-5 que se muestra a continuación.

Como se puede apreciar la ganancia proporcional K_p tiene un valor de 0.27, el tiempo de integración T_i es igual a 1.61 segundos y el tiempo derivativo T_d toma el valor de 0.43 segundos; el resto de parámetros sirven para optimizar al bloque PID, obteniéndose de esta manera la mejor respuesta posible.

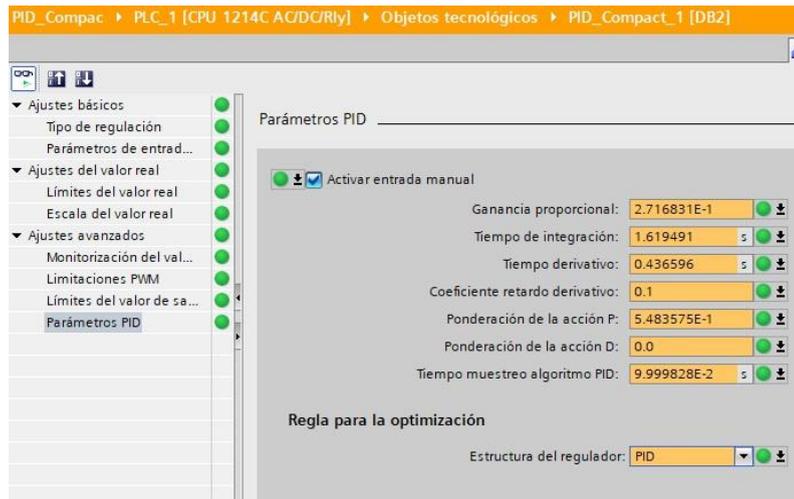


Figura 44-5 Parámetros cargados en el bloque PID_Compact
Elaborado por: Eduardo Velasco

5.13. Desarrollo del interfaz humano – máquina HMI

Para el diseño de la interfaz hombre-máquina, en primera instancia se desarrolló en la pantalla KTP 600 implementada en el tablero de control; sin embargo, por las pequeñas dimensiones que posee la misma, no se lograba apreciar correctamente sobre todo las gráficas y además debido a que el tiempo de adquisición de los datos resultaba demasiado lento para poder apreciar correctamente la información. Por lo que se decidió realizar el HMI en un software computacional; dentro del abanico de posibilidades que se tiene se decidió implementar la interfaz en el software MOVICON, debido a dos características importantes que posee este paquete computacional:

- Tiene incorporado directamente los drives de comunicación para distintos tipos de PLC. No hay necesidad de utilizar softwares adicionales, por ejemplo: OPC.
- La versión de prueba tiene todo el paquete completo del programa. EL tiempo de ejecución de la interfaz es de 2 horas, tiempo suficiente para poner a funcionar el sistema. Otros softwares requieren licencias.

La interfaz está distribuida en cinco sinópticos principales (pantallas del HMI). La figura 45-5 muestra la pantalla de presentación del proyecto con los datos informativos como: nombre y logo de la institución donde se realiza el proyecto, tema, gráfico de la planta, autor, fecha y un botón llamado PROCESO que permite acceder a la siguiente pantalla.



Figura 45-5 Pantalla de presentación del proyecto
 Elaborado por: Eduardo Velasco

La segunda pantalla está diseñada para escoger los modos del funcionamiento del sistema; en la figura 46-5 se muestra el sinóptico correspondiente a la misma; se puede acceder a los sinópticos correspondientes al nombre a través de los botones: Sistema de control PID, Sistema de control Manual y Sistema de control Predictivo, además se cuenta con un botón adicional Regresar/Presentación que da acceso a la pantalla de presentación.



Figura 46-5 Pantalla de elección de modos de funcionamiento
 Elaborado por: Eduardo Velasco

Al presionar el botón Sistema de control Manual se accede al sinóptico que se muestra en la figura 47-5, en dicha pantalla se tiene acceso a los siguientes parámetros:

- Bomba monofásica: Se la controla mediante pulsantes
- Bomba trifásica: Se la controla desde una slider calibrada de 0 al 100%, representa la variación de 0 a 60 Hz.
- Válvula proporcional: Se controla desde un potenciómetro calibrado de 0 a 10, que representa la salida analógica con un voltaje de 0 a 10 VDC.

Adicionalmente, se han colocado figuras y animaciones de las bombas y de los tanques correspondientes para mejorar la presentación. El botón activar modo manual da acceso a todos los parámetros y se coloca automáticamente a cero cuando se sale de esta pantalla.

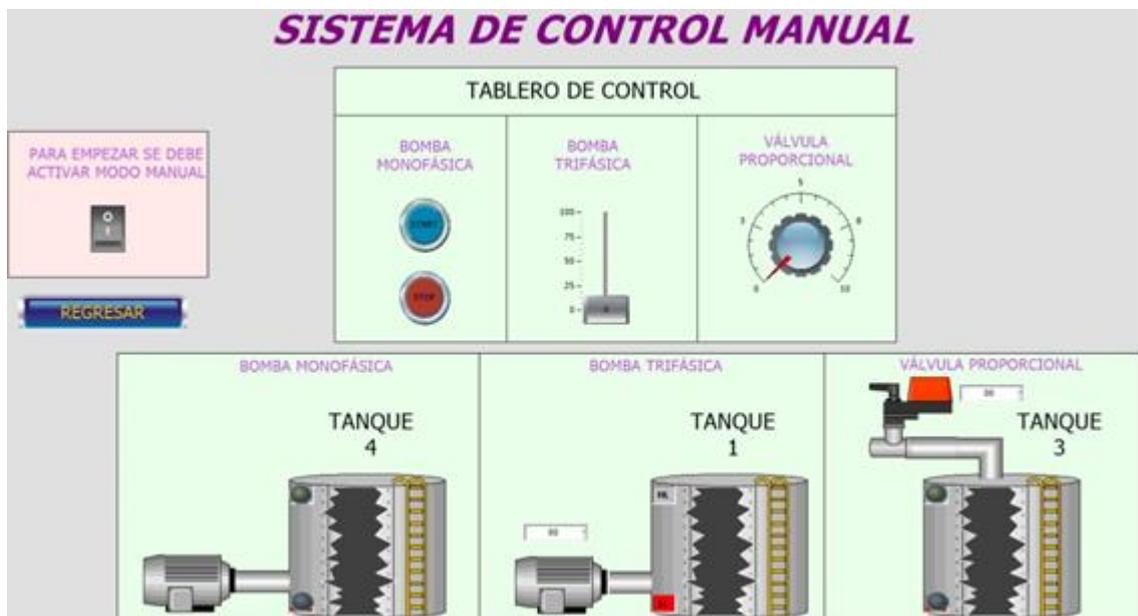


Figura 47-5 Pantalla del sistema de control manual
Elaborado por: Eduardo Velasco

En la figura 48-5 se muestra la interfaz diseñada para el sistema de control PID. Como se puede apreciar existen diferentes parámetros, dentro de los cuales se destacan: Pulsadores para activar y desactivar el proceso, cuadros de ingreso de valores de Set Point, K_p , K_i y K_d , pantalla de visualización de gráficas, cuadro de indicadores, figuras y gráficos animados.

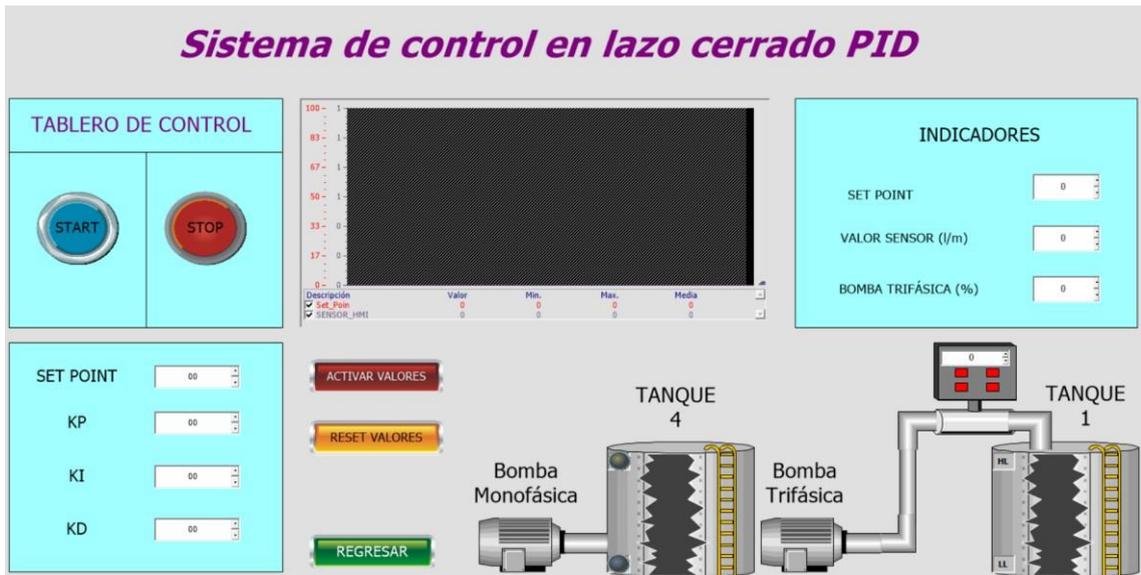


Figura 48-5 Pantalla del sistema de control PID
 Elaborado por: Eduardo Velasco

El botón RESET VALORES sirve para cargar los valores por defecto de las constantes del PID calculadas en Matlab, en cambio el botón ACTIVAR VALORES, tiene la función de habilitar las casillas para ingresar manualmente las constantes del controlador; esta opción sirve si se requiere realizar la sintonización del mismo de forma manual.

Por último, en la figura 49-5 se puede ver la pantalla de manejo del sistema de control Predictivo. Como se puede observar el diseño es similar al del PID, con la diferencia que se han eliminado los recuadros de ingreso de las constantes.

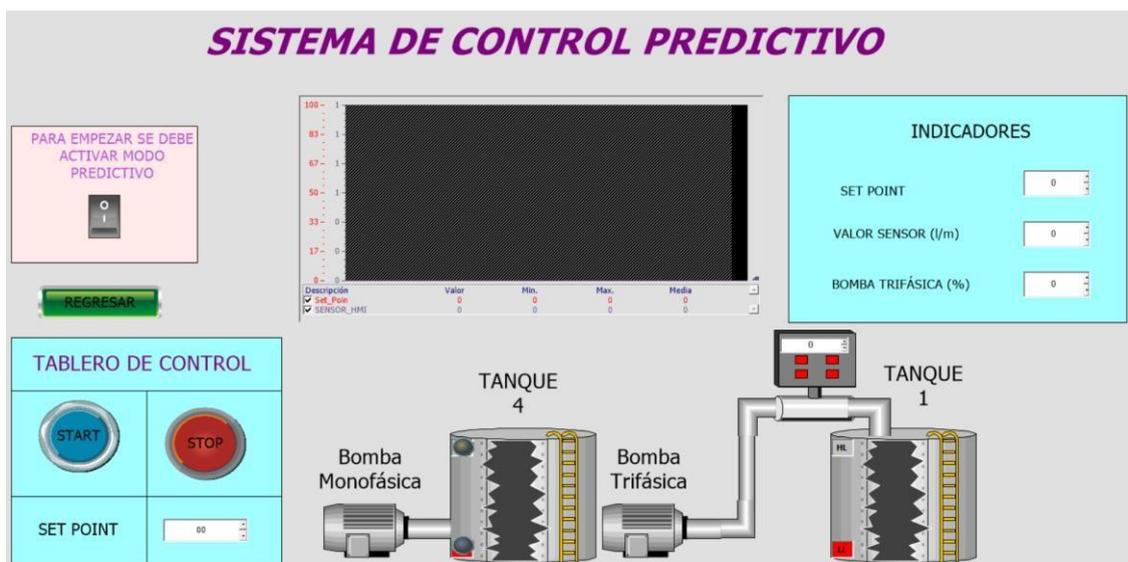


Figura 49-5 Pantalla del sistema de control Predictivo
 Elaborado por: Eduardo Velasco

CONCLUSIONES

- La identificación del sistema basado en el método de caja negra fue consistente ya que se consiguió un valor del mejor ajuste superior a 75%.
- Se pueden programar otros sistemas de control en lazo cerrado, para autómatas programables de la marca Siemens y modelo S7-1200, a través del lenguaje de programación ST (texto estructurado) que permite la importación de controladores diseñados en MATLAB por medio de la herramienta PLC CODE.
- El control predictivo presentó un mejor comportamiento frente al PID en lo que respecta a las características dinámicas. El tiempo de establecimiento del control predictivo fue de 9.9 segundos, frente a los 26.7 segundos del control PID. Ambos controladores superan al control interno del autómata programable que obtuvo un tiempo de 28.4 segundos.
- Los controladores interno y PREDICTIVO no tienen máximo sobre impulso; es decir, $M_p = 0\%$ mientras que el controlador PID_MATLAB tiene un $M_p = 21.3\%$. El control PREDICTIVO responde mejor ante perturbaciones, volviendo al punto de consigna en 11.1 segundos, mientras que al control PID le toma 25.1 segundos.
- Al comparar el funcionamiento de los tres controladores con respecto a la variable manipulada (frecuencia en Hz), ninguno sobrepasa el valor máximo de 60 Hz, por lo cual se garantiza que la bomba de caudal no entrará en la zona de debilitamiento (pérdida de torque).
- Después de un sinnúmero de pruebas, con los distintos modos de funcionamiento e implementadas las seguridades tanto en el programa como en el HMI, el módulo de recirculación es totalmente funcional bajo los parámetros establecidos.

RECOMENDACIONES

- El módulo debe ser manipulado siempre bajo la supervisión de personal capacitado en la utilización del mismo; preferentemente por un docente perteneciente al área de Electrónica o carreras afines.
- Previo a la utilización del módulo en lazo cerrado, se debe verificar el funcionamiento de cada uno de los elementos de la planta en lazo abierto, para ello se debe utilizar la opción en el HMI de operación manual.
- Aunque toda la operación de la planta se la puede realizar desde el HMI, es importante colocar al menos un pulsante de PARO de manera física, para poder detener el proceso en caso de un funcionamiento inadecuado.
- Como el sistema de control es tipo modular; es decir, no está anclado al proceso, puede ser utilizado para controlar otros módulos, de tal manera que cuando se lo haga funcionar con el módulo implementado en el presente proyecto, se deben revisar previamente las configuraciones necesarias respecto a: módulo de comunicación, módulo de salidas analógicas y sobre todo los parámetros preestablecidos para el variador de velocidad.
- Una vez utilizado el módulo, es necesario e imprescindible vaciar los tanques, sobre todo cuando el proceso va estar sin manipularse por periodos extendidos; para ello el sistema cuenta con las dos llaves de vaciado.

BIBLIOGRAFÍA

- Ackermans, R., Franz, J., Hartmann, T., Hopf, A., Kantel, M., & Plagemann, B.** (1994). *Controladores Lógicos Programables*. Festo Didactic KG.
- AG, S.** (2013, Febrero). *SIEMENS*. Retrieved from SIEMENS: <https://new.siemens.com/es/es.html>
- Astrom, K., & Haggblun, T.** (2009). *Control PID avanzado*. Madrid: Pearson Educación S. A.
- Automation, R.** (2017). Fabricación Inteligente. *Automation Today*, 9-11.
- Bordóns, C.** (2000). *Control Predictivo: metodología, tecnología y nuevas perspectivas*. Almería: Universidad de Sevilla.
- Casado, C.** (2000). *Manual básico de Matlab*. Servicios informaticos U.C.M.
- Casas, J.** (n.d.). *Control e Instrumentación*. Formic Industries.
- Cova, W.** (2005). *Control PID un enfoque descriptivo*. La Rioja: Universidad Tecnológica Nacional facultad Regional La Rioja.
- Dale, S., Thomas, E., Duncan, M., & Francis, D.** (2017). *Process Dynamics and Control*. Santa Bárbara: Wiley.
- Gómez, J. C.** (2005). *Universidad Nacional de Rosario*. Retrieved from https://www.fceia.unr.edu.ar/isis/Introd_ISIS_bw.pdf
- Gutarra, P.** (2016, Marzo). Modelación y control de un sistema de cuatro tanques acoplados. *Tesis*. Piura.
- IFAC.** (2019). *Federación Internacional e Control Automático*. Retrieved from <http://ifac-control.or>
- Johnson, M., & Moradi, M.** (2005). *PID Control New Identification and Design Methods*. London: Springer.

- Morales, R., & Ramírez, R.** (2013). *Sistemas de Control Moderno Volumen I: Sistemas de tiempo continuo*. MEXICO: Tecnológico de Monterrey .
- O'Dwyer, A.** (2006). *PI and PID Controller Tuning Rules* . London: Imperial College Press .
- Ogata, K.** (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: Pearson Educación .
- Pérez, M., Pérez, A., & Pérez, E.** (2008). *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*.
- Qin, S., & Badgwell, T. A.** (2000). *An overview of nonlinear model predictive control applications*. Birkhauser: Verlag Basel.
- Rodríguez, D., & Bordóns.** (2005). *Apuntes de ingeniería de Control*.
- Siemens AG.** (2018). *S7-1200, S7-1500 Regulación PID Manual de Funciones*. NURNBERG: Division Digital Factory.
- Takatsu, H., Itoh, T., & Arak, M.** (1998). *Future needs for the control theory in industries. Report and topics of the control technology survey in japanese industry*. Japón: Journal of Process Control.
- Visioli, A.** (2006). *Practical PID Control*. Brescia: Springer.
- Ziegler, J., & Nichols, N.** (1942). Optimum setting for automatic controllers. Asme.

ANEXO A: Guía de puesta en servicio rápida para el variador de velocidad v20

5.5 Puesta en marcha rápida

5.5.1 Puesta en marcha rápida a través del menú de configuración

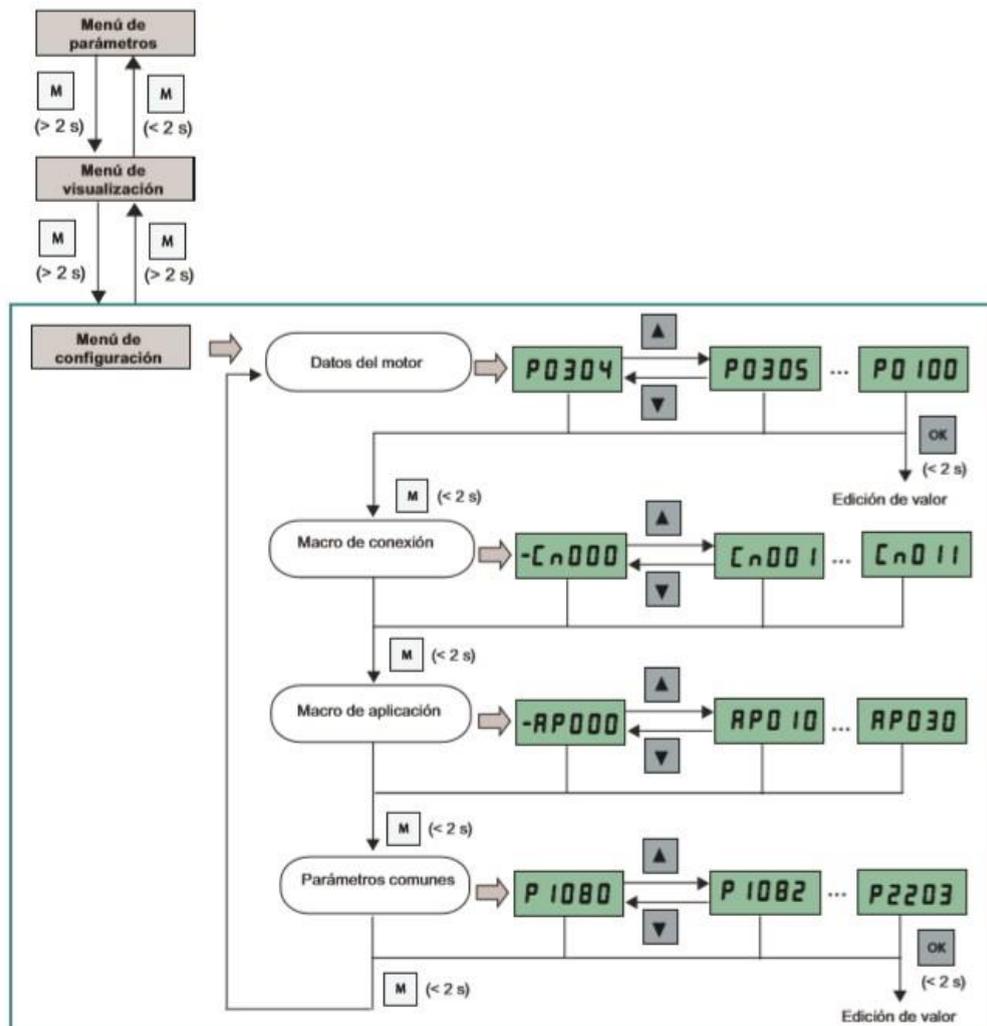
5.5.1.1 Estructura del menú de configuración

Funciones del menú de configuración

El menú de configuración le guía por los pasos necesarios para la puesta en marcha rápida del sistema convertidor. Se compone de los cuatro submenús siguientes:

	Submenú	Funciones
1	Datos del motor	Define los parámetros nominales del motor para la puesta en marcha rápida.
2	Selección de macro de conexión	Define las macros necesarias para las disposiciones de cableado estándar.
3	Selección de macro de aplicación	Define las macros necesarias para determinadas aplicaciones comunes.
4	Selección de parámetros comunes	Define los parámetros requeridos para la optimización del rendimiento del convertidor.

Estructura de menús



5.5.1.2 Configuración de datos del motor

Funciones

Este menú se ha diseñado para la configuración sencilla de los datos nominales de la placa de características del motor.

Menú de texto

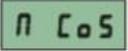
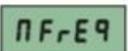
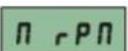
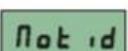
Si establece P8553 en 1, los números de los parámetros de este menú se sustituyen por un texto breve.

Configuración de parámetros

Nota

En la tabla siguiente, "●" indica que el valor de este parámetro se debe introducir según la placa de características del motor.

Parámetro	Nivel de acceso	Función	Menú de texto (si P8553 = 1)
P0100	1	Selección de 50/60 Hz =0: Europa [kW], 50 Hz (valor predeterminado de fábrica) =1: Norteamérica [hp], 60 Hz =2: Norteamérica [kW], 60 Hz	EU-US (EU - US)
P0304[0] ●	1	Tensión nominal del motor [V] Tenga en cuenta que la entrada de los datos de la placa de características tiene que corresponder con el cableado del motor (en estrella/triángulo).	MoU (MOT V)
P0305[0] ●	1	Corriente nominal del motor [A] Tenga en cuenta que la entrada de los datos de la placa de características tiene que corresponder con el cableado del motor (en estrella/triángulo).	MoA (MOT A)
P0307[0] ●	1	Potencia nominal del motor [kW/hp] Si P0100 = 0 o 2, unidad de potencia del motor = [kW] Si P0100 = 1, unidad de potencia del motor = [hp]	P0100 = 0 o 2: MoP (MOT P)
			P0100 = 1: MoHP (MOT HP)

Parámetro	Nivel de acceso	Función	Menú de texto (si P8553 = 1)
P0308[0] •	1	Factor de potencia nominal del motor ($\cos\phi$) Visible solamente cuando P0100 = 0 o 2	 (M COS)
P0309[0] •	1	Eficiencia nominal del motor [%] Visible solamente cuando P0100 = 1 El ajuste 0 produce el cálculo interno del valor.	 (M EFF)
P0310[0] •	1	Frecuencia nominal del motor [Hz]	 (M FREQ)
P0311[0] •	1	Velocidad nominal del motor [RPM]	 (M RPM)
P1900	2	Selección de la identificación de datos del motor = 0: Deshabilitada = 2: Identificación de todos los parámetros en parada	 (MOT ID)

Consulte también

Lista de parámetros (Página 137)

5.5.1.3 Configuración de macros de conexión

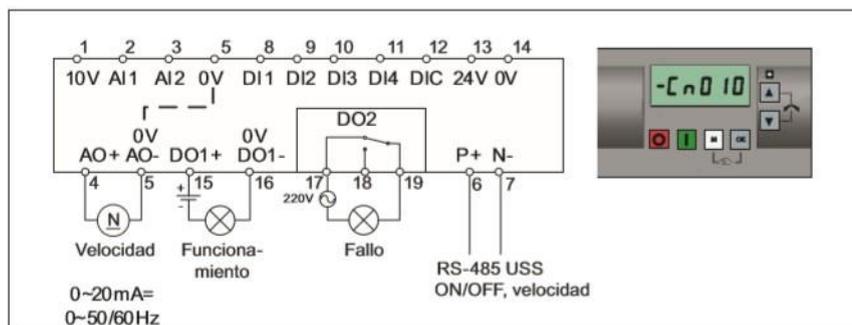
Funciones

En este menú se selecciona qué macro se necesita para las disposiciones de cableado estándar. La macro predeterminada es "Cn000" para la macro de conexión 0.

Todas las macros de conexión solo cambian los parámetros de CDS0 (Command Data Set 0, juego de datos de señales de mando 0). Los parámetros de CDS1 se utilizan para el control de BOP.

Macro de conexión	Descripción	Pantalla de ejemplo
Cn000	Ajuste predeterminado de fábrica. No hace cambios en los parámetros.	  El signo menos indica que esta macro es la macro seleccionada actualmente.
Cn001	BOP como la única fuente de regulación.	
Cn002	Control desde los bornes (PNP/NPN).	
Cn003	Velocidades fijas.	
Cn004	Modo binario de velocidad fija.	
Cn005	Entrada analógica y frecuencia fija.	
Cn006	Control con pulsador externo.	
Cn007	Pulsador externo con consigna analógica.	
Cn008	Regulación PID con referencia de entrada analógica.	
Cn009	Regulación PID con referencia de valor fija.	
Cn010	Regulación USS.	
Cn011	Regulación MODBUS RTU.	

Macro de conexión Cn010: Regulación USS

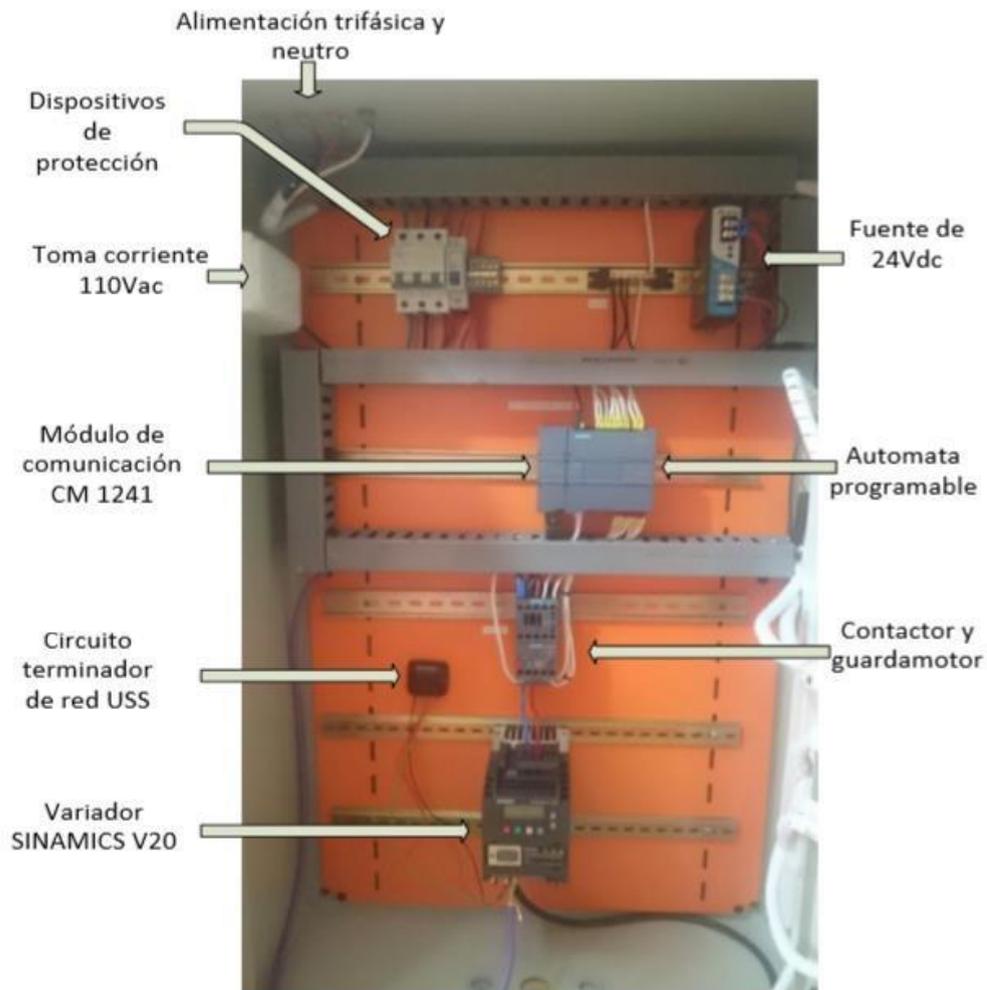


Configuración de macros de conexión:

Parámetro	Descripción	Ajustes predeterminados de fábrica	Ajustes predeterminados de Cn010	Observaciones
P0700[0]	Selección de la fuente de señales de mando	1	5	RS485 como la fuente de señales de mando
P1000[0]	Selección de frecuencia	1	5	RS485 como la consigna de velocidad
P2023[0]	Selección de protocolo RS485	1	1	Protocolo USS
P2010[0]	Velocidad transmisión USS/MODBUS	8	8	Velocidad transmisión 38 400 bps
P2011[0]	Dirección USS	0	1	Dirección USS para convertidor
P2012[0]	Longitud PZD en USS	2	2	Número de palabras PZD
P2013[0]	Longitud PKW en USS	127	127	Palabras PKW variables
P2014[0]	Tiempo de interrupción de telegrama USS/MODBUS	2000	500	Tiempo para recibir datos

ANEXO B: Elementos y conexiones de los tableros

Parte interna del tablero de conexión de sensores



1. **DISYUNTOR:** Para el cálculo del disyuntor se tomó en cuenta que este va a alimentar a una lámpara y la fuente de poder de la planta, se determinó con los cálculos respectivos que el amperaje con el que va a trabajar es de 5A.
2. **RIEL.** – Esta placa metálica permite montar sobre ella elementos como las borneras y el disyuntor sujetándolas de manera ordenada y firme.
3. **FUENTE DE PODER.** – Permite alimentar de voltaje continuo a los siguientes dispositivos: sensor de caudal (5V), válvula proporcional (10V) y microcontrolador (10V).
4. **MICROCONTROLADOR ARDUINO.** – La función principal del microcontrolador es el recibir la señal de diferentes sensores de tipo analógicos (sensor de caudal), mediante programación se trata estos valores para su correcta interpretación y posteriormente ser enviados al PLC

5. BORNERA. – permite las conexiones de los cables para poder identificarlos en caso de daño o fallas.

Parte externa del tablero de conexión de sensores

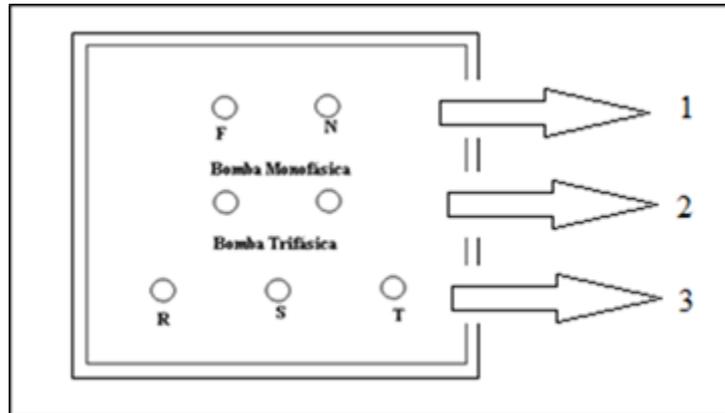


Diagrama eléctrico de alimentación del tablero de conexión de sensores

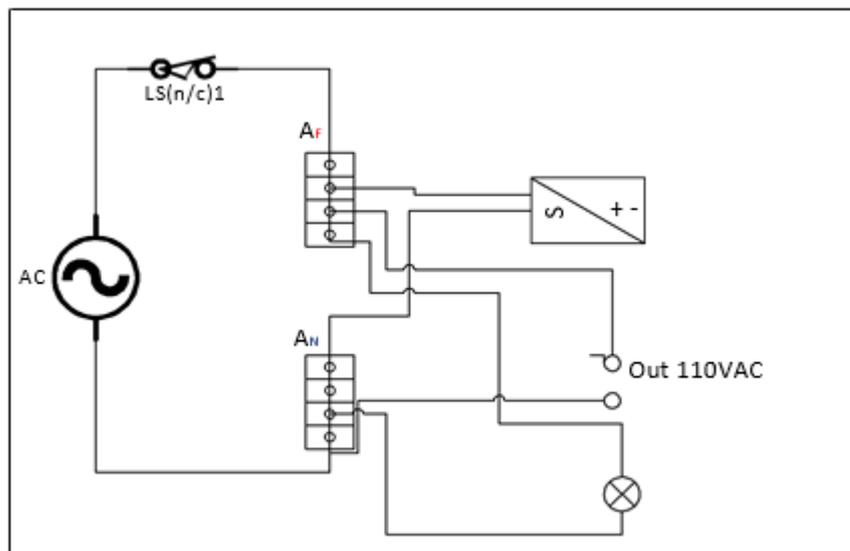
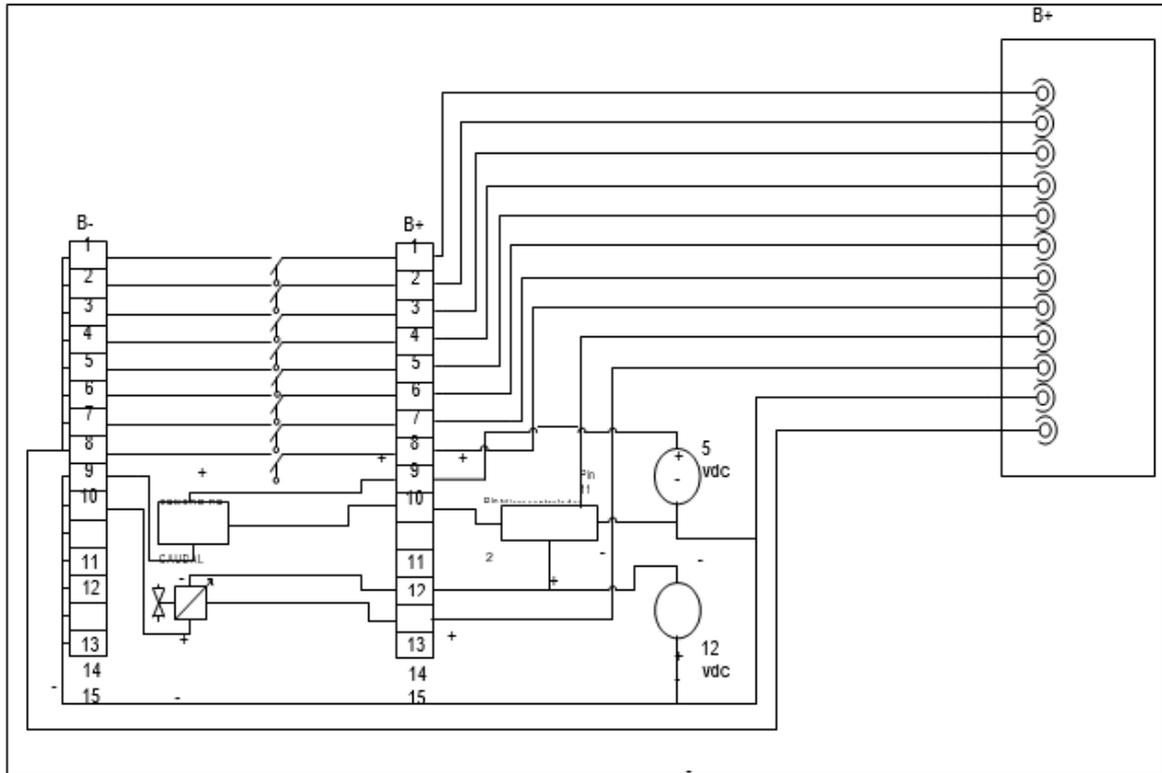


Diagrama eléctrico de conexiones internas del tablero de sensores



Parte externa del tablero de conexión de motores

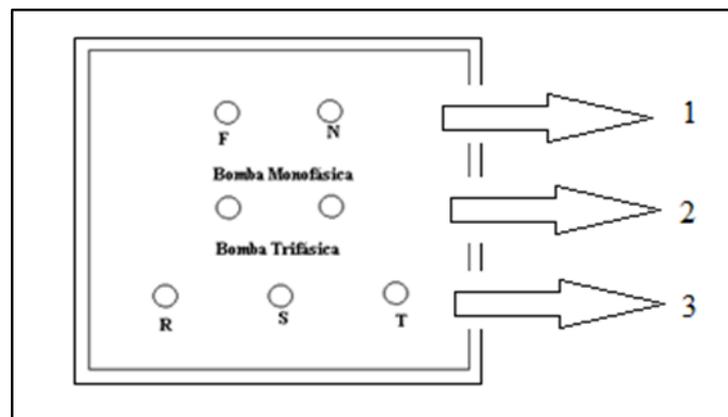
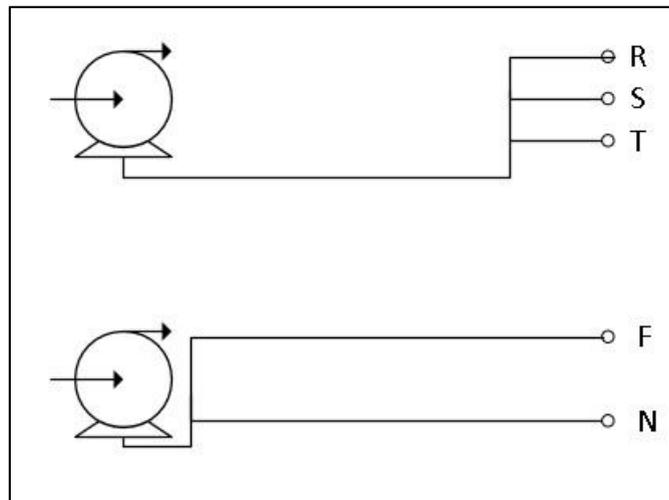
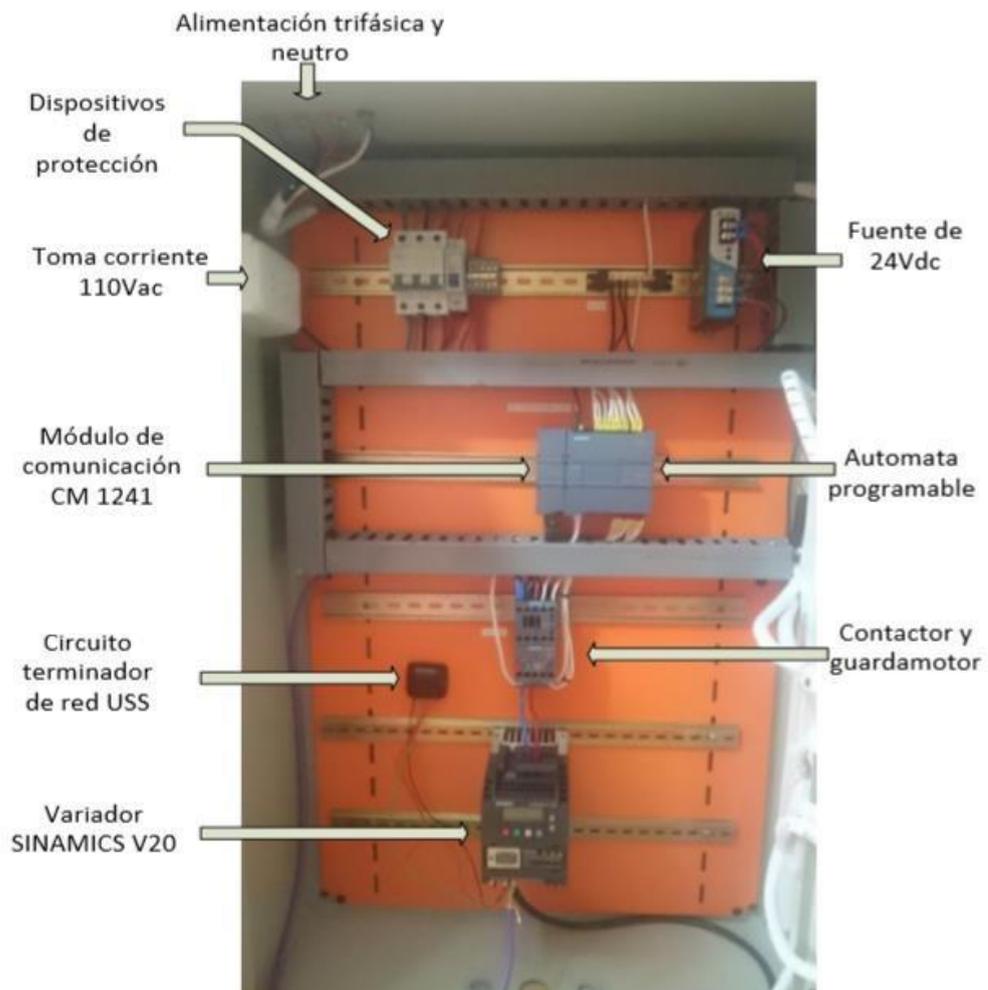


Diagrama eléctrico de conexiones para el tablero de motores



Parte interna del tablero de conexión de control



Parte externa del tablero de conexión de control

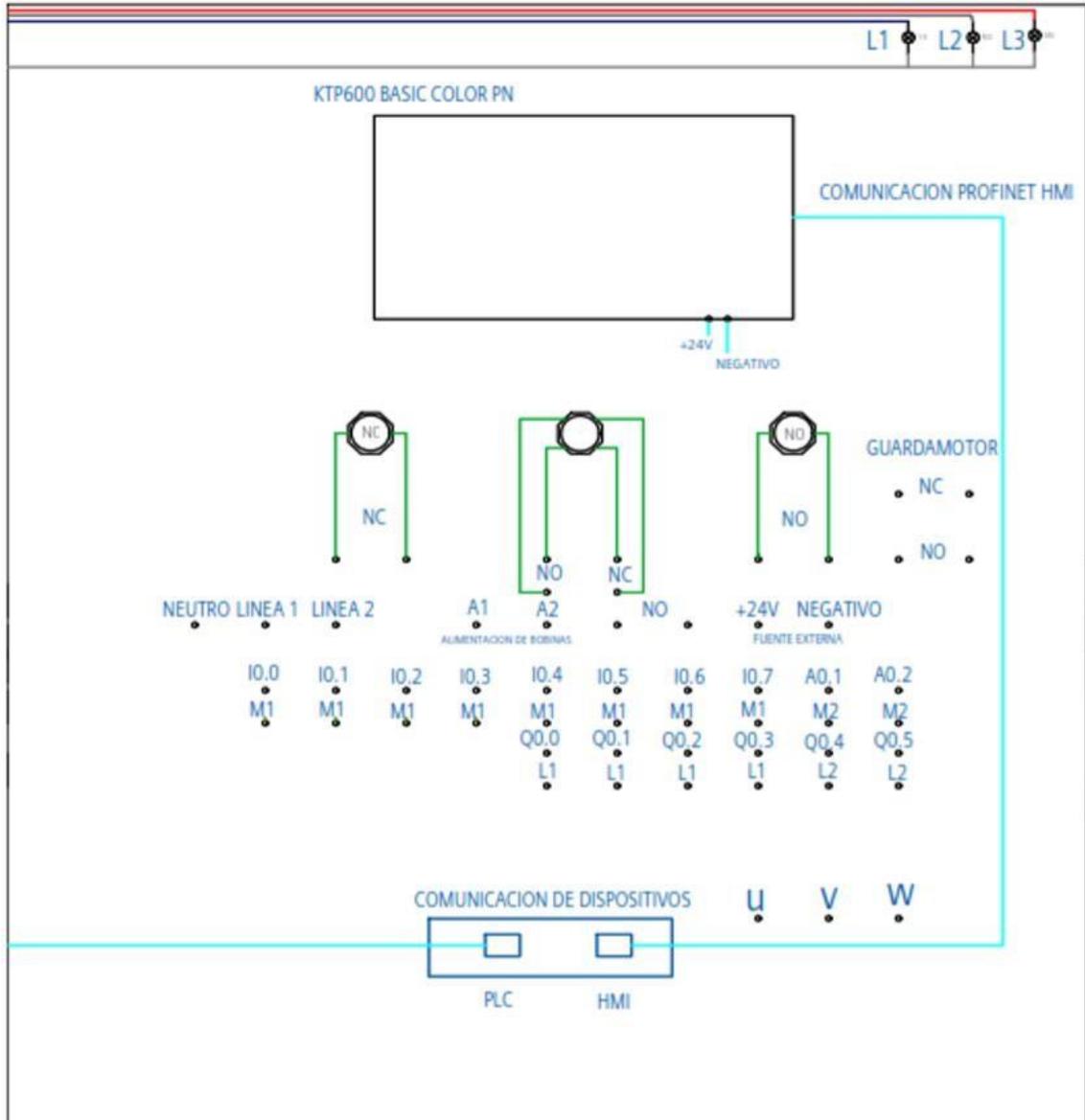


Diagrama eléctrico de fuerza del tablero de control

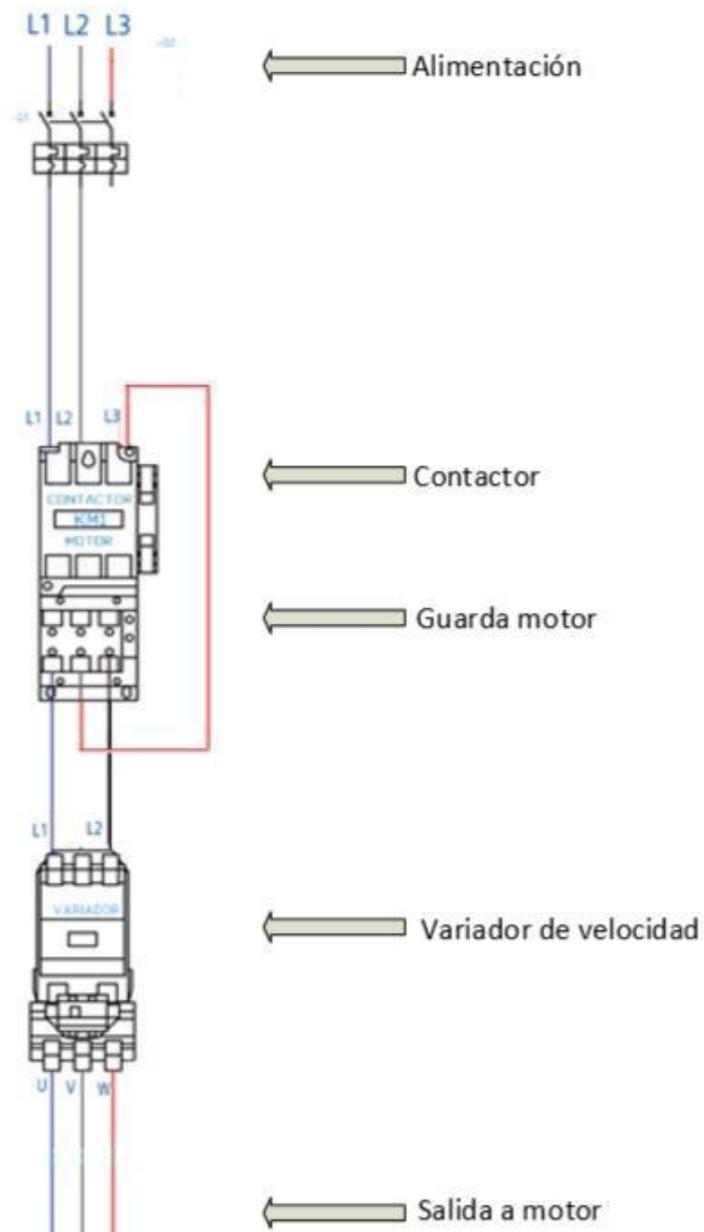


Diagrama de conexiones entre tableros

