



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PROPUESTA TECNOLÓGICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO PARA UN
PROCESO MULTIVARIABLE DE NIVEL Y CAUDAL**

Proyecto de titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero en
Electromecánica

Autores:

Andrade Moreno Steven Alberto

Rea Calle Luis Fernando

Tutor:

Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas M.Sc.

LATACUNGA – ECUADOR

MARZO 2022



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Steven Alberto Andrade Moreno y Luis Fernando Rea Calle declaramos ser autores de la presente Propuesta Tecnológica: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO PARA UN PROCESO MULTIVARIABLE DE NIVEL Y CAUDAL”**, siendo el Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas Ms.C. tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en la presente propuesta tecnológica, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, Marzo 2022

.....
Steven Alberto Andrade Moreno
C.C. 172736488-5

.....
Luis Fernando Rea Calle
C.C. 055015515-4



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica sobre el título:

“Implementación de un Control Predictivo para un Proceso Multivariable de Nivel y Caudal”, de Andrade Moreno Steven Alberto y Rea Cale Luis Fernando, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Marzo, 2022

El Tutor

.....

Ing. MSc. Byron Paúl Corrales Bastidas

C.I.: 050234776-8



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS; por cuanto, los postulantes: Andrade Moreno Steven Alberto y Rea Calle Luis Fernando con el título de Proyecto de titulación; “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO PARA UN PROCESO MULTIVARIABLE DE NIVEL Y CAUDAL”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúnen los méritos suficientes para ser sometidos al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Marzo 2022

Para constancia firman:

.....
Lector 1 (Presidente)
Ing. Paulina Freire Ms.C.
C.C: 050205622-9

.....
Lector 2
Ing. Héctor Laurencio Dr.C.
CC: 175836725-2

.....
Lector 3
Ing. Luigi Freire Ms.C.
CC: 050252958-9



Agradecimiento

Como no agradecer a Dios y a todas las personas que depositaron su grano de confianza en mí y me apoyaron para poder conseguir mi tan anhelado sueño de ser un profesional, en especial a mis padres y mi hermano quienes han estado siempre a mi lado apoyándome en lo que pueden sin dejarme caer a pesar de las adversidades que conlleva ser un estudiante.

Agradecer a cada una de mis mejores amistades realizadas en la Universidad ya sea dentro de la institución como fuera de ella al igual a todos los docentes que me han impartido sus conocimientos, como no olvidar a las personas que laboran en el área administrativa de la institución.

Steven



Dedicatoria

Este trabajo de titulación lo dedico principalmente a mi padre Raúl Andrade y a mi madre Lucrecia Moreno quienes han sido el pilar fundamental en mi vida, quienes me han sabido guiar por el camino de la vida, a mi hermana Gabriela Andrade que a pesar de la distancia que nos separa siempre tengo presente cada uno de los consejos que me ha dado.

Dedico en memoria de mi abuelito Raúl Andrade quien gracias a su elocuencia característica me alentó a seguir una carrera universitaria, a familiares más cercanos a mi entorno que estuvieron siempre a mi lado en incansables ocasiones en las que necesite un apoyo.

Steven



Agradecimiento

Principalmente quiero agradecer a mis padres quienes me han protegido siempre y me han dado la vida para llegar hasta acá y poder compartir este logro con toda mi familia y seres queridos.

Gracias a todas las personas que depositaron su confianza en mí y me apoyaron para poder conseguir este anhelado logro, a mis hermanos que día tras día estuvieron dándome consejos y apoyándome en todo momento de este largo camino.

Agradecer a la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme las puertas y poder estudiar la prestigiosa carrera de Ingeniería Electromecánica en la cual he aprendido muchas cosas que me servirán en mi vida como profesional.

Fernando



Dedicatoria

A mis padres Marcionilo Rea y Gladys Calle por darme fuerzas y apoyo incondicional, que siempre estuvieron ahí en todo momento que lo necesite desde el día que me trajeron a este mundo, día a día me dieron consejos para ser una persona de bien y conseguir las metas que uno se propone en la vida y este logro es una meta más cumplida.

A mis hermanos Max y Arturo Rea por brindarme su cariño y apoyo incondicional.

Dedico en memoria de mi abuelita Rosa Calle quien gracias a sus consejos me alentó a seguir una carrera universitaria, a familiares más cercanos a mi entorno que estuvieron siempre a mi lado en incansables ocasiones en las que necesite un apoyo.

Fernando



ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	iv
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
AVAL DE TRADUCCIÓN	xix
1. INFORMACIÓN GENERAL	20
2. INTRODUCCIÓN	21
2.1. EL PROBLEMA	22
2.1.1. Situación Problémica	22
2.1.2. Matriz Causa - Efecto	22
2.1.3. Formulación del problema:	23
2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	23
2.3. BENEFICIARIOS:	23
2.3.1. Beneficiarios Directos	23
2.3.2. Beneficiarios Indirectos	23
2.4. JUSTIFICACIÓN	23
2.5. HIPÓTESIS	24
2.6. OBJETIVOS	24
2.6.1. Objetivo general	24
2.6.2. Objetivos específicos	24
2.7. SISTEMAS DE TAREAS	24
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	25
3.1 ANTECEDENTES	25
3.2 SISTEMAS DE CONTROL	26
3.2.1. Análisis de sistemas	26
3.2.2. Sistema de control lazo abierto	27
3.2.3. Sistemas de control lazo cerrado	27



3.2.4.	Sistemas de control lineales y no lineales	27
3.2.5.	Sistemas de control continuos y discretos.....	28
3.2.6.	Sistemas de primer orden.....	28
3.2.7.	Sistemas de segundo orden	28
3.2.8.	Respuestas normalizadas con diferentes coeficientes de amortiguamiento	29
3.3.	ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL	30
3.3.1.	Sensor.....	30
3.3.2.	Transductor.....	30
3.3.3.	Transmisor.....	30
3.3.4.	Controlador.....	30
3.3.5.	Actuador.....	30
3.4.	CONTROL PID.....	30
3.4.1.	Función de transferencia	31
3.4.2.	Acción de control proporcional	31
3.4.3.	Acción de control integral.....	32
3.4.4.	Acción de control derivativo	33
3.4.5.	Significado de las constantes.....	33
3.5.	CONTROL PREDICTIVO	34
3.5.1.	Control Predictivo basado en modelo	34
3.5.2.	Principio de funcionamiento de un Control Predictivo	34
3.5.3.	Modelo en Espacio de Estados	36
3.5.4.	Elementos básicos Del MPC	37
4.	METODOLOGÍA.....	39
4.1.	DECLARACIÓN DE VARIABLES	39
4.1.1.	Operaciones de las variables	39
4.1.2.	Procedimientos, métodos y materiales.....	39
4.2.	DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO DE CAUDAL Y NIVEL	40
4.2.1.	Modulo didáctico de caudal	40
4.2.2.	Modulo didáctico de nivel.....	42
4.2.3.	Señales de proceso	42
4.3.	ADQUISICIÓN DE DATOS Y OBTENCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	43
4.4.	RANGO DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	43
4.4.2.	Rango de funcionamiento de la planta.....	44
4.4.3.	Registro de datos y obtención de expresiones matemáticas.....	45



4.4.4.	Procedimiento para la adquisición de datos	47
4.4.5.	Procesamiento de datos.....	49
4.4.6.	Estimación de los modelos matemáticos	50
4.4.7.	Validación de los modelos matemáticos.....	53
4.5.	DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA DE CONTROL	55
4.5.1.	Secuencia de comunicación	55
4.5.2.	Programación de entradas y salidas analógicas en PLC	56
4.5.3.	Comunicación OPC en KepServerEX	58
4.5.4.	Configuración OPC en Simulink	58
4.5.5.	Desarrollo del Control Predictivo en Simulink	59
4.5.6.	Sistema SCADA del MPC	62
4.5.7.	Desarrollo de un PID en Simulink.....	65
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
5.1.	SIMULACIÓN DEL CONTROL MPC	66
5.3.	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS CONTROLES MPC Y PID SIMULADOS	72
5.3.1.	Tiempo de asentamiento	72
5.3.2.	Sobre impulso.....	73
5.3.3.	Estabilidad.....	73
5.4.	IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES.....	74
5.4.2.	Implementación del control PID	76
5.4.3.	Análisis comparativo entre el control MPC y PID implementados.....	77
6.1.	PRESUPUESTO.....	84
6.2.	ANÁLISIS DE IMPACTO	85
6.2.1.	Impacto práctico	85
6.2.2.	Impacto tecnológico.....	85
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
7.1.	CONCLUSIONES.....	86
7.2.	RECOMENDACIONES	87
8.	BIBLIOGRAFÍA	88
9.	ANEXOS.....	91



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Análisis de sistemas	26
Figura 3.2. Sistema de control lazo abierto.....	27
Figura 3.3. Sistemas de control lazo cerrado.....	27
Figura 3.4. Curva característica de un sistema de primer orden.	28
Figura 3.5. Respuestas de sistemas de segundo orden y coeficientes de amortiguamiento....	29
Figura 3.6. Diagrama de control PID.....	31
Figura 3.7. Función de transferencia	31
Figura 3.8. Gráfica de acción de control proporcional.	32
Figura 3.9. Gráfica de acción de control integral.	32
Figura 3.10. Gráfica de acción de control derivativo.....	33
Figura 3.11 Estrategia del Control Predictivo.	34
Figura 3.12. Estructura de un control MPC.	36
Figura 4.1. Diagrama del módulo de Caudal.....	40
Figura 4.2. Diagrama del módulo de nivel.....	42
Figura 4.3. Etapas para la identificación del sistema.....	43
Figura 4.4. Curva de desempeño de la bomba centrífuga.....	44
Figura 4.5. Línea de tendencia y ecuación Voltaje de Variador vs Caudal	46
Figura 4.6. Línea de tendencia y ecuación de Caudal vs Voltaje del Sensor.....	46
Figura 4.7. línea de tendencia y ecuación Voltaje Variador vs Nivel del Tanque	46
Figura 4.8. línea de tendencia y ecuación Nivel del Tanque vs Voltaje del Sensor.....	47
Figura 4.9. Secuencia de componentes para la adquisición de datos.	48
Figura 4.10. Programación y visualización de las variables PV y CV para caudal.....	49
Figura 4.11. Programación y visualización de las variables PV y CV para nivel.....	49
Figura 4.12. CV y PV de la planta para el proceso de caudal.	50
Figura 4.13. CV y PV de la planta para el proceso de nivel.	50
Figura 4.14. Ventana de estimación de modelos “systemIdentification” para caudal.....	51
Figura 4.15. Ventana de estimación de modelos “systemIdentification” para nivel.	51
Figura 4.16. Función de transferencia y Modelo del proceso para caudal.....	52
Figura 4.17. Modelo en espacio de estados de la variable de caudal.	52
Figura 4.18. Función de transferencia y Modelo del proceso para nivel.	53
Figura 4.19. Modelo en espacio de estados de la variable de nivel.....	53
Figura 4.20. Validación del modelo de proceso con función de transferencia para caudal....	54
Figura 4.21. Validación del modelo de proceso con función de transferencia para nivel	54



Figura 4.22. Validación del modelo en espacio de estados para caudal	55
Figura 4.23. Validación del modelo en espacio de estados para nivel	55
Figura 4.24. Comunicación entre planta y software de diseño	56
Figura 4.25. Programación de entradas analógicas en TIA Portal	57
Figura 4.26. Programación de salida analógica en TIA Portal.....	57
Figura 4.27. Configuración de acceso PUT/GET.....	57
Figura 4.28. Ventana de configuración de KepServerEX.....	58
Figura 4.29. Simulink OPC Toolbox	58
Figura 4.30. Estructuras de Control Predictivo para caudal y nivel.	59
Figura 4.31. MPC Designer.....	59
Figura 4.32. Ventanas de sintonización para el proceso de caudal	60
Figura 4.33. Ventanas de sintonización para el proceso de nivel.....	60
Figura 4.34. Programación en bloques para el MPC de caudal por comunicación OPC	61
Figura 4.35. Programación en bloques para el MPC de nivel por comunicación OPC	61
Figura 4.36. Estructura de programación MPC con dos variables.	62
Figura 4.37. Estructura de conexión para el SCADA.....	63
Figura 4.38. Programación en Simulink para la comunicación con el SCADA	63
Figura 4.39. Programación para envío de Set points	64
Figura 4.40. Interfaz visual del SCADA.....	65
Figura 4.41. Estructura de diseño y simulación de un control PID	65
Figura 4.42. Estructura de programación control PID de caudal	66
Figura 4.43. Estructura de programación PID de nivel	66
Figura 5.1. Respuesta del controlador MPC para caudal.	67
Figura 5.2. Respuesta del controlador MPC para nivel.	67
Figura 5.3. Simulación del control MPC para caudal.....	69
Figura 5.4. Simulación del control MPC para nivel	70
Figura 5.5. Sintonización robusta del control PID para caudal.....	70
Figura 5.6. Sintonización agresiva del control PID para caudal	71
Figura 5.7. Respuesta PV con control MPC y respuesta PV con control PID.	72
Figura 5.8. Respuesta PV con control MPC y respuesta PV con control PID.	72
Figura 5.9. Respuesta al sobre impulso con control MPC y PID.	73
Figura 5.10. Respuesta al sobre impulso con control MPC y PID.	73
Figura 5.11. Respuesta del control MPC implementado al proceso de caudal	75
Figura 5.12. Respuesta del control MPC implementado al proceso de nivel.....	75
Figura 5.13. Respuesta del control PID implementado al proceso de caudal	76



Figura 5.14. Respuesta del control PID implementado al proceso de nivel	77
Figura 5.15. Respuesta al sobre impulso con control MPC y control PID para caudal.....	77
Figura 5.16. Respuesta al sobre impulso con control MPC y control PID para nivel	77
Figura 5.17. Tiempo de retardo entre el control MPC y PID para caudal	78
Figura 5.18. Tiempo de retardo entre el control MPC y PID para nivel.....	78
Figura 5.19. Tiempo de retardo en el control MPC y PID para caudal	78
Figura 5.20. Tiempo de asentamiento en el control MPC y PID para caudal	79
Figura 5.21. Tiempo de asentamiento en el control MPC y PID para nivel	79
Figura 5.22. Tiempo de levantamiento en el control MPC y PID para caudal	80
Figura 5.23. Tiempo de asentamiento en el control MPC y PID para nivel.	80
Figura 5.24. Comparación de los controladores MPC y PID a 30L/min	81
Figura 5.25. Comparación de los controladores MPC y PID a 30L/min	81



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Actividades por objetivos	24
Tabla 3.1. Variables de la Estrategia del Control Predictivo	35
Tabla 4.1. Variable Independiente	39
Tabla 4.2. Variable Dependiente	39
Tabla 4.3. Procedimientos, métodos y materiales	39
Tabla 4.4. Rangos de eficiencia de la bomba centrífuga.....	44
Tabla 4.5. Rango de operación del caudal en función del variador (V).....	45
Tabla 4.6. Rango de operación del nivel en función del caudal	45
Tabla 4.7. Normalizado y escalado de entradas analógicas.	56
Tabla 5.1. Parámetros de sintonización para caudal	68
Tabla 5.2. Parámetros de sintonización para nivel	68
Tabla 5.3. Parámetros de sintonía MPC para caudal	68
Tabla 5.4. Parámetros de sintonía MPC para nivel.....	68
Tabla 5.5. Parámetros de sintonización.....	71
Tabla 5.6. Parámetros de sintonización.....	71
Tabla 5.7. Resumen comparativo entre los controles MPC y PID para la variable de caudal	74
Tabla 5.8. Resumen comparativo entre los controles MPC y PID para la variable de nivel ..	74
Tabla 5.9. Resumen de parámetros evaluados para caudal	82
Tabla 5.10. Resumen de parámetros evaluados para nivel.....	83
Tabla 6.1. Materiales y suministros	84
Tabla 6.2. Equipos para uso directo del proyecto.....	84
Tabla 6.3. Gastos Indirectos y Profesionales.....	84



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (3.2) Función de transferencia de un sistema de primer orden	28
Ecuación (3.3) Función de transferencia de un sistema de segundo orden.....	29
Ecuación (3.4) Fórmula del control proporcional.....	32
Ecuación (3.5) Fórmula del control integral.....	33
Ecuación (3.6) Fórmula del control derivativo	33
Ecuación (3.7) Modelo matematico de espacio de estados	36
Ecuación (3.8) Sistema dinamico por espacio de estados.....	37
Ecuación (3.9) Función objetivo.....	37
Ecuación (3.10) Entrada a partir de un instante t de la funcion objetivo	38
Ecuación (3.11) Pesos de la funcion objetivo.....	38
Ecuación (3.12) Trayectoria de referencia	38
Ecuación (4.1) Entrada escalada para caudal	47
Ecuación (4.2) Salida escalada para caudal.....	47
Ecuación (4.3) Entrada escalada para nivel.....	47
Ecuación (4.4) Salida escalada para nivel	47



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO PARA UN PROCESO MULTIVARIABLE DE NIVEL Y CAUDAL”

Autores:

Andrade Moreno Steven Alberto

Rea Calle Luis Fernando

RESUMEN

La presente propuesta tecnológica comprende una metodología para la implementación de un Control Predictivo basado en modelo (MPC) que se establece dentro de la ingeniería de control moderno y que se utiliza como herramienta para la regulación de variables cuando técnicas de control clásicas no han sido capaces de manejar condiciones para la planificar, actuar con anticipación o predecir las acciones del controlador a fin de mantener la o las variables de proceso dentro de rangos aceptables. El resultado experimental de esta propuesta ha sido aplicado a un módulo didáctico para el control de variables de caudal y nivel que ha conllevado la utilización del equipo de control PLC S7-1200 principalmente para recibir señales en voltaje de los sensores y para enviar voltaje al variador de frecuencia iG5A, de la misma manera se ha utilizado el servidor de comunicación KEPServerEX para permitir la interacción entre los softwares TIA Portal y la herramienta Simulink de MATLAB, estos han sido ocupados fundamentalmente para el escalamiento de señales y para enviar datos ocupados en el diseño del modelo del controlador MPC; el cual parte con la obtención de ecuaciones en espacio de estados de cada variable, que incluye etapas de: adquisición de datos, procesamiento de datos, modelamiento y validación. Una vez realizado esto se procede a simular el comportamiento del controlador en lazo abierto, con el fin de obtener ajustes de sintonización como: horizonte de control, predicción y tiempos de muestreo. Finalmente se implementa el controlador a los procesos reales de la planta. Este controlador fue comparado con un control proporcional integral derivativo (PID) sintonizados de forma agresiva para ratificar sus características en iguales condiciones, en cuanto a: tiempos de retardo, tiempos de asentamiento, tiempos de levantamiento, porcentajes de sobre impulso y estabilidad. Dando como resultado que el parámetro más evidente al utilizar el control MPC es el de sobre impulso tanto para el proceso de caudal como para nivel, presentando un porcentaje de 1.57% y 1.20% respectivamente. Sin embargo, la mejor estabilización se aprecia en el MPC; ya que el control PID presenta oscilaciones más notorias.

Palabras Clave: Controlador, MPC, PID, Variable de proceso, Rango, Sintonización.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TOPIC: “IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE CONTROL FOR A MULTIVARIABLE LEVEL AND FLOW PROCESS”

Authors:

Andrade Moreno Steven Alberto

Rea Calle Luis Fernando

ABSTRACT

The present technological proposal comprises a methodology for the implementation of a Model Based Predictive Control (MPC) that is established within modern control engineering and is used as a tool for the regulation of variables when classical control techniques have not been able to handle conditions for planning, acting in advance or predicting the controller's actions in order to maintain the process variable(s) within acceptable ranges. The experimental result of this proposal has been applied to a didactic module for the control of flow and level variables that has involved the use of PLC S7-1200 control equipment mainly to receive voltage signals from the sensors and to send voltage to the frequency inverter iG5A, In the same way, the KEPServerEX communication server has been used to allow the interaction between the TIA Portal software and the MATLAB Simulink tool, these have been used mainly for signal scaling and to send data used in the design of the MPC controller model; which starts with the obtaining of equations in state space of each variable, which includes stages of: data acquisition, data processing, modeling and validation. Once this is done, we proceed to simulate the behavior of the controller in open loop, in order to obtain tuning adjustments such as: control horizon, prediction and sampling times. Finally, the controller is implemented to the real processes of the plant. This controller was compared with a proportional integral derivative control (PID) tuned aggressively to ratify its characteristics in equal conditions, in terms of: delay times, settling times, rise times, percentages of over impulse and stability. As a result, the most evident parameter when using the MPC control is the over impulse for both the flow and level processes, presenting a percentage of 1.57% and 1.20% respectively. However, the best stabilization is seen in the MPC; since the PID control presents more noticeable oscillations.

Keywords: Controller, MPC, PID, process variable, range, tuning.



AVAL DE TRADUCCIÓN

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título:

Implementación de un Control Predictivo para un proceso multivariable de nivel y caudal.

Fecha de inicio:

Octubre 2021

Fecha de finalización:

Marzo 2022

Lugar de ejecución:

El proyecto se desarrolla en el Laboratorio de Automatización y Control de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, campus Matriz, en la Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Parroquia San Felipe.

Facultad que auspicia:

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia:

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Proyecto de investigación vinculado:

Equipo de Trabajo:

Tutor

Nombres: Byron Paúl

Apellidos: Corrales Bastidas

Cédula de Identidad: 050234776-8

Email: byron.corrales@utc.edu.ec

Ponente 1

Nombres: Steven Alberto

Apellidos: Andrade Moreno

Cedula de identidad: 172736488-5

Email: steven.andrade4885@utc.edu.ec

Ponente 2

Nombres: Luis Fernando

Apellidos: Rea Calle

Cedula de identidad: 055015515-4

Email: luis.rea5154@utc.edu.ec

Área de Conocimiento:

Como referencia a la norma CINE – UNESCO las áreas de conocimiento del proyecto se detallan continuación:

Campo amplio

330000 CIENCIAS TECNOLÓGICAS

Campos específicos

3311 Tecnología de la Instrumentación 18

Campo detallado

3311.01 Tecnología de la Automatización

3311.02 Ingeniería de Control

3311.05 Equipos Eléctricos de Control

3311.06 Instrumentos Eléctricos

3313 Tecnología e Ingeniería Mecánicas

3313.25 Bombas y Equipos Para Manipulación de Líquidos

Línea de investigación:

Procesos industriales.

Sub línea de investigación de la Carrera:

Automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos.

2. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto abarca la implementación de un Control Predictivo aplicado a los procesos de nivel y caudal; el cual parte de la obtención del modelo interno de la planta. A partir de aquí se inicia el diseño del control utilizando un software de computo numérico para representar el modelo matemático y ayudado también de un software de automatización de procesos para la lectura y escalado de datos. A la vez estos dos programas se encuentran conectados en tiempo real mediante el uso de una plataforma de comunicación OPC. Ya implementado el controlador se continúa con la realización de pruebas para establecer rangos de operación y sintonía de los procesos.

Por último, un control PID sobre los mismos procesos y partiendo con iguales condiciones de funcionamiento, se ha establecido para determinar características entre controles, en términos de tiempos de estabilización, porcentaje de sobre-impulso y acciones de control.

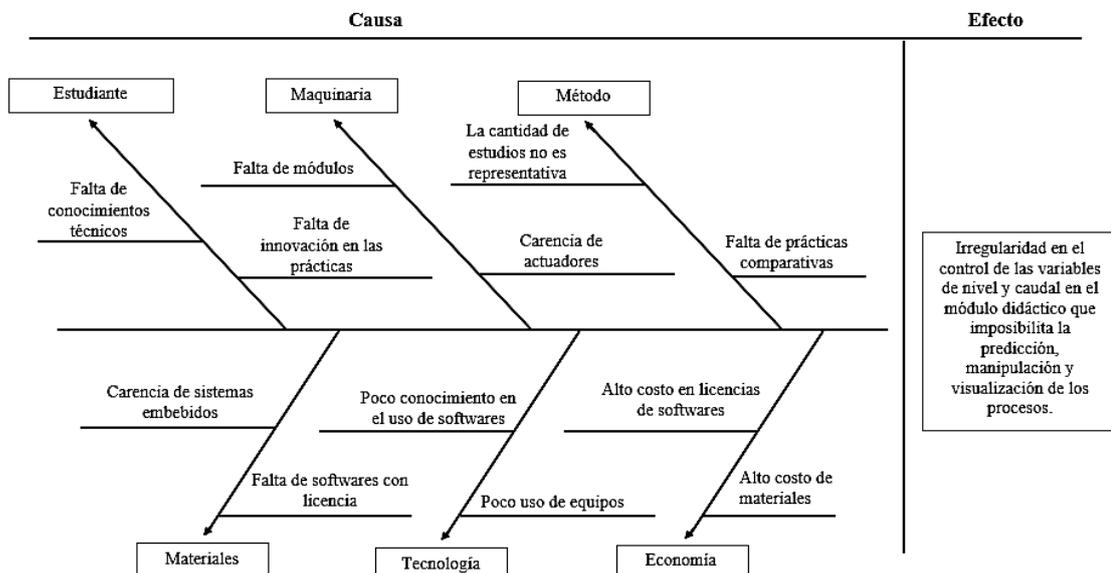
2.1. EL PROBLEMA

En el ámbito académico es poco conocido el uso del controlador predictivo (MPC) para la realización de prácticas en procesos de una sola variable (SISO) y procesos de más de una variable (MIMO). Debido a la falta de conocimiento con respecto este control. Por tanto, la carencia de un estudio comparativo entre dos controladores; uno clásico como el PID y uno moderno como el MPC resulta beneficioso para adquirir habilidades y conocimientos acerca del control de procesos.

2.1.1. Situación Problémica

Hace un tiempo atrás el propósito más importante para llevar el control de un proceso era conseguir una estabilidad en la operación de una planta; no obstante, a partir del constante desarrollo de la industria y la producción que conlleva procesos tan variables y difíciles de predecir, se ha forzado a encontrar la manera de mantenerse en una escalabilidad continua conforme a la competitividad y rentabilidad, mediante el mejoramiento de procesos y a la par del crecimiento de la automatización. En la actualidad, los sistemas de control están sujetos a desempeñar acciones conjuntas en la comunicación y manipulación independiente de procesos para satisfacer ciertas condiciones ligadas a la estructura de una planta, que normalmente resulta variable. El modelo de Control Predictivo (MPC) resulta una valiosa herramienta para hacerle frente a este reto, ya que es capaz de adecuarse a diferentes tipos de modelos, procesos y limitaciones, de esta manera se busca determinar el desempeño a partir de un análisis comparativo de estrategias de control que facilite más directamente el reconocimiento sus principios de funcionamiento y desarrollo.

2.1.2. Matriz Causa - Efecto



2.1.3. Formulación del problema:

Irregularidad en el control de las variables de nivel y caudal en el módulo didáctico que imposibilita la predicción, manipulación y visualización de los procesos.

2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.2.1. Objeto de estudio:

Implementación de un control MPC para los procesos de nivel y caudal

2.2.2. Campo de acción:

El campo de acción en el que se encuentran los sistemas de Control Predictivo y PID es, Automatización e Ingeniería de Control. Ya que este se encarga del control de variables de distinto orden.

2.3. BENEFICIARIOS:

2.3.1. Beneficiarios Directos

La propuesta beneficia directamente a los estudiantes que realizaron esta propuesta tecnológica como a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Electromecánica.

2.3.2. Beneficiarios Indirectos

La propuesta beneficia indirectamente a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, como también al sector industrial e investigativo.

2.4. JUSTIFICACIÓN

La siguiente propuesta tecnológica plantea un recurso a través de la comparación entre un control moderno basado en MPC y un control clásico PID. En donde a partir de la implementación del control para los procesos de caudal y nivel se permitirá manipular rangos de operación lineales y no lineales, además de predecir cambios o perturbaciones en los mismos procesos, lo cual no es posible con un controlador PID.

A través de la utilización de un controlador lógico programable (PLC) y de una comunicación OPC para enviar y recibir datos desde la herramienta Simulink se comprobarán las señales de respuesta de las variables controladas. Y a partir de la utilización de un HMI para la representación de un SCADA se visualizarán los valores obtenidos de ambos controladores que posteriormente serán comparados entre sí.

2.5. HIPÓTESIS

El desarrollo de un Control Predictivo multivariable implementado a una planta de caudal y nivel permitirá la manipulación, visualización y la comparación de sus parámetros con los de un control PID.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. Objetivo general

Desarrollar un Control Predictivo multivariable para el control de los procesos de nivel y caudal en espacios de estados para una planta didáctica, a fin de determinar las características más relevantes de su comportamiento.

2.6.2. Objetivos específicos

- Investigar las características principales de funcionamiento del Control Predictivo.
- Diseñar la estructura de comunicación y control para las variables de proceso.
- Implementar el Control Predictivo en la planta didáctica de forma simulada y real.
- Evaluar el funcionamiento del controlador predictivo a partir de pruebas experimentales que lo compararen con un control PID.

2.7. SISTEMAS DE TAREAS

Tabla 2.1. Actividades por objetivos

Objetivo	Actividades	Resultado de la actividad	Medio de verificación
Investigar las características principales de funcionamiento del Control Predictivo.	Recopilación de información de diversas fuentes bibliográficas sobre Control Predictivo. Recopilación de información de diversas fuentes bibliográficas sobre el control PID.	Representación del modelo matemático de la planta.	Artículos científicos, Tesis, Libros.
Diseñar la estructura de comunicación y control para las variables de proceso.	Recopilación de las lecturas de los sensores de la planta. Aplicación de un estándar de comunicación entre programas.	Escalado y normalización de las datos de entrada.	Ecuaciones de entrada y salida de los procesos, función de transferencia y modelo en espacio de estado.

Implementar el Control Predictivo en la planta didáctica de forma simulada y real.	Programación del Control Predictivo en el software de automatización. Desarrollo de la interfaz de control y visualización.	Dominio de las variables mediante la regulación de la frecuencia.	Simulaciones, aplicación de los controladores en el módulo.
Evaluar el funcionamiento del controlador predictivo a partir de pruebas experimentales que lo compararen con un control PID.	Realización de pruebas de funcionamiento de los parámetros e instrumentos utilizados para la medición de las variables. Generación de un análisis de los datos receptados de la comparación entre el Control Predictivo y el control PID.	Comprobación de los criterios de rendimiento y desempeño del Control Predictivo frente a un control PID en cascada.	Análisis de resultados

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 ANTECEDENTES

En las últimas décadas el Control Predictivo basado en modelo (Model Predictive Control, MPC) se ha desarrollado ampliamente en la industria, así como en la comunidad investigativa. Esto se debe a que el Control Predictivo es quizá la manera más habitual de formular el problema de control sobre variables en el dominio del tiempo. El Control Predictivo se constituye de: control óptimo, control con tiempos muertos, procesos multivariados y utiliza referencias futuras cuando se encuentren disponibles [1].

Los sistemas de automatización de procesos son ampliamente conocidos por ser un elemento crucial en las plantas de procesamiento. Las centrales eléctricas, químicas, petroquímicas, de refinación de petróleo, alimentarias, automotrices y muchos otros procesos en la industria son vastos y complejos, y se dice que están controlados por solo un puñado de jugadores importantes en todo el mundo. Los sistemas de control por computadora y los métodos de ingeniería de control están en el corazón de todos los procesos controlados automáticamente. Motivado por el éxito práctico de los métodos modernos de ingeniería de control en muchos procesos industriales y productos electrónicos de consumo, ha habido una cantidad creciente de trabajo en el desarrollo de nuevos métodos basados en nuevos métodos

robustos y adaptables, técnicas de optimización numérica, estrategias de computación suave, microcomputadoras, control descentralizado Realización de la estructura y hardware de los controladores embebidos. [2]

El MPC es una de las mejores opciones actualmente para sustituir la regulación de variables físicas en los procesos industriales que no operan favorablemente con los tradicionales controladores PID [3].

Debido a los cambios en las condiciones de funcionamiento de los procesos industriales, es necesario ajustar los parámetros PID para cumplir con los requisitos de producción. La tecnología de ajuste automático de los controladores PID supera con eficacia las deficiencias del ajuste humano, que consume mucho tiempo [4].

Actualmente, la mayoría de los proyectos industriales utilizan controladores lineales simples para controlar los sistemas. Dichos controladores no pueden proporcionar un control flexible de las variables. A su vez, los sistemas de control inteligente tienen más ventajas que los controladores lineales. La compleja técnica de aparatos matemáticos de los sistemas inteligentes limita su uso en la industria [5].

3.2 SISTEMAS DE CONTROL

3.2.1. Análisis de sistemas

En análisis y diseño de sistemas de control es primordial tener una base para la comparación los sistemas de control. Esto se lo realiza detallando señales de entrada de prueba y comparando respuestas de distintos sistemas a estas señales de entrada. Las señales de prueba usadas normalmente son: impulso, escalón y rampa [6]. La Figura muestra dichas señales y sus características.

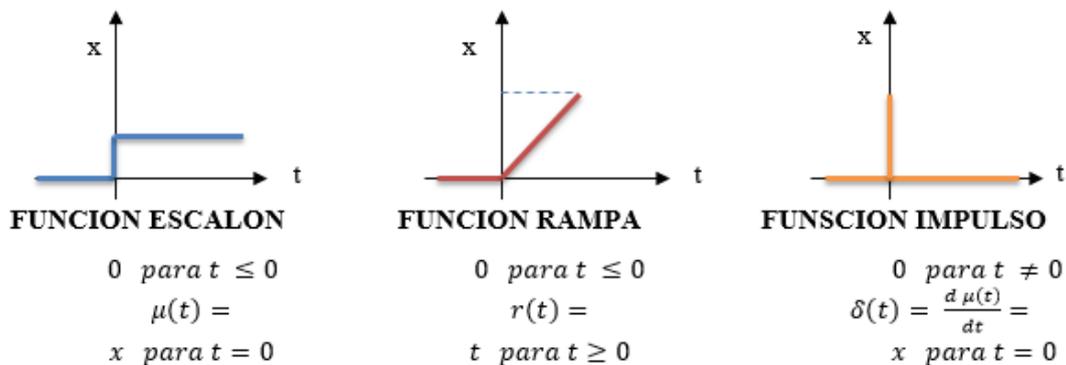


Figura 3.1. Análisis de sistemas [6].

3.2.2. Sistema de control lazo abierto

En sistemas de control lazo abierto la señal de salida no se mide ni se realimenta con el fin de compararla con la entrada. El sistema de control de lazo abierto es un sistema en la cual la salida no tiene consecuencia sobre la señal de control.



Figura 3.2. Sistema de control lazo abierto [6].

3.2.3. Sistemas de control lazo cerrado

Un sistema de lazo cerrado es aquel cuya señal de salida tiene consecuencia directa sobre la acción de control. Los sistemas de control lazo cerrado son sistemas realimentados. La contradicción entre la señal de entrada y salida se denomina error del sistema; esta señal será la que actúe sobre el sistema de modo de llevar la salida a un valor deseado. Dicho de otro modo, la terminología “lazo cerrado” implica el uso de realimentación negativa para disminuir el error del sistema.

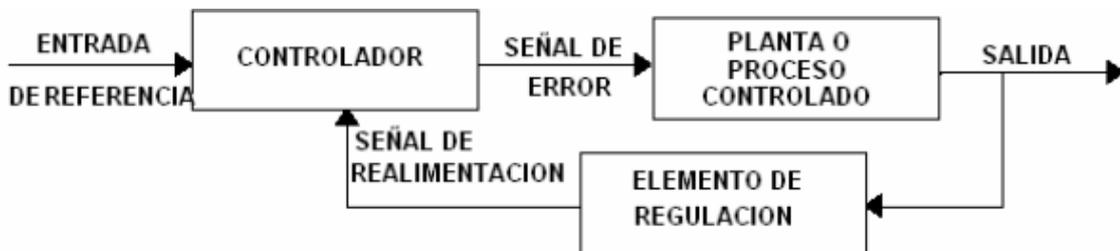


Figura 3.3. Sistemas de control lazo cerrado [7].

3.2.4. Sistemas de control lineales y no lineales

Un sistema es lineal cuando la conducta de su salida depende de la dimensión de la señal de entrada. La mayoría de los sistemas reales no son lineales, porque comúnmente en la práctica en algún sentido resultan ser no lineales; por ejemplo, en efectos de histéresis, saturación, etc. A pesar de esto, si el intervalo de uso no es amplio, el sistema puede linealizarse en un rango relativamente estrecho; es decir, acercarse a un modelo lineal cometiendo un error casi nulo. En los sistemas lineales es posible aplicar el principio de superposición, esto se da cuando en el proceso están presentes varios factores, por ejemplo, A y B, el total se obtiene como la suma

de los resultados de A más los resultados de B. Los sistemas a los que no es posible aplicar este principio se denominan sistemas no lineales. [8].

3.2.5. Sistemas de control continuos y discretos

Un sistema de control de tiempo continuo es aquel e donde todas las partes del sistema son variables, y estas se encuentran en función del tiempo continuo t y, en consecuencia, son evidentes en todo momento. De todas maneras, en un sistema de control de tiempo discreto, son conocidas una o más variables solo en instantes concretos; es decir, los datos son receptados de forma aleatoria. [8].

3.2.6. Sistemas de primer orden

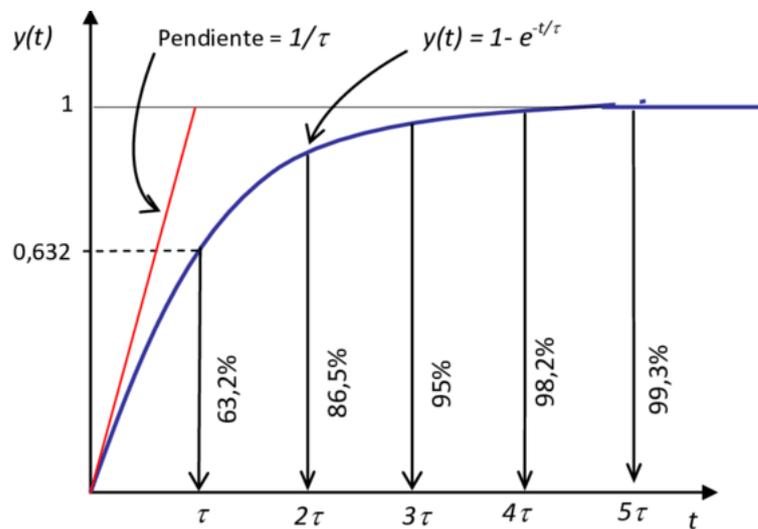


Figura 3.4. Curva característica de un sistema de primer orden [9].

Un sistema de primer orden es aquel cuya mayor derivada de su señal de salida que relaciona sus señales de entrada y salida es de orden uno, lo que quiere decir que su función de transferencia solo tendrá un polo, en la figura [10] se aprecia la curva característica de un sistema de primer orden, la cual es descrita por siguiente ecuación:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{T_{s+1}} \quad (3.2)$$

3.2.7. Sistemas de segundo orden

La forma base de la función de transferencia de un sistema de segundo orden es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{Wn^2}{s^2 + 2\zeta Wns + Wn^2} \quad (3.3)$$

La ganancia estática k , el coeficiente de amortiguamiento ζ , y la frecuencia natural ω_n , son los parámetros de un sistema de segundo orden. En comparación con un sistema de primer orden, un sistema de segundo orden presenta una extensa gama de respuestas que deben ser analizadas. Mientras que cambiar el parámetro de un sistema de primer orden sencillamente cambia la velocidad de la respuesta, los cambios en los factores de un sistema de segundo orden pueden cambiar toda la forma de la respuesta [11].

3.2.8. Respuestas normalizadas con diferentes coeficientes de amortiguamiento

En la figura 3.7 se observa la forma de la señal de salida en función del coeficiente de amortiguamiento. Se puede precisar aún más y añadir una serie de conclusiones que permitirán analizar detalladamente los sistemas de segundo orden.

- **$0 < \zeta < 1$ (polos complejos conjugados):** Como ya se dijo, la respuesta es una oscilación amortiguada. Cuanto más pequeño sea δ (polos más cerca del eje imaginario) es más oscilatoria. Se denominan sistemas subamortiguados.
- **$\zeta = 1$ (polo real doble y negativo):** La respuesta ya no es oscilatoria. Es el caso de amortiguamiento crítico. Se trata del caso más rápido en respuesta de los no oscilatorios.
- **Si $\zeta > 1$ (polos reales, distintos y negativos):** La respuesta es sobreamortiguada, y cuanto mayor es δ la respuesta temporal es más lenta.

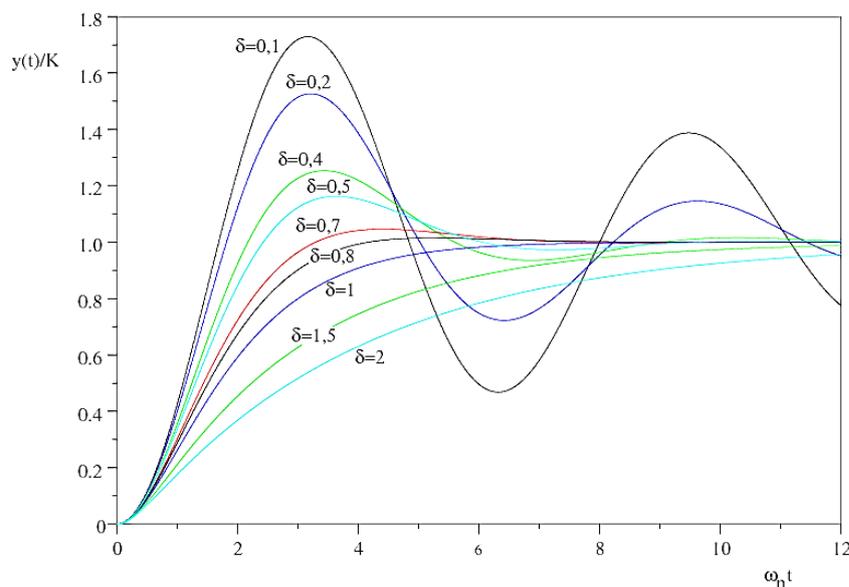


Figura 3.5. Respuestas de sistemas de segundo orden y coeficientes de amortiguamiento [12].

3.3. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL

La medición es una etapa importante de un lazo de control cerrado, ya que es el encargado de captar la señal de la variable de proceso y la lleva a la entrada del controlador para que sea comparada con el punto de consigna, determinando el error y la acción de correctora. Como el controlador lee la señal eléctrica en un rango determinado, la señal física debe ser acondicionada para que pueda ser interpretada por el controlador, por lo cual la etapa de medición consta de tres elementos: sensor, transductor y transmisor [13].

3.3.1. Sensor

Determinan el estado del proceso donde se encuentran instalados, transforman las variaciones de la magnitud física a una señal eléctrica acondicionada, y así pueda ser recibida en su destino.

3.3.2. Transductor

Convierte un determinado tipo de energía, en otra diferente a la salida. Sirve para adquirir información de entornos físicos y químicos y así conseguir señales o impulsos eléctricos.

3.3.3. Transmisor

Establecen la señal medida en valores estándar o en un protocolo de red (acondicionamiento de señal), de tal manera que pueda ser leído por un sistema de supervisión o control.

3.3.4. Controlador

Comparan la variable medida del proceso con un valor de referencia de entrada, además determinan la desviación y es producen una señal de control que disminuye el error a un valor aproximado a cero. La forma en la cual el controlador realiza la señal de control se denomina acción de control. La salida de un controlador alimenta a un actuador [14].

3.3.5. Actuador

Transforma la energía hidráulica, eléctrica o neumática para ejecutar una función que genera una reacción sobre un proceso. El actuador toma la señal desde un controlador y de acuerdo a ella activa un elemento final de control.

3.4. CONTROL PID

Un controlador PID es un dispositivo que controla un sistema de lazo cerrado para que alcance un estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa [15].

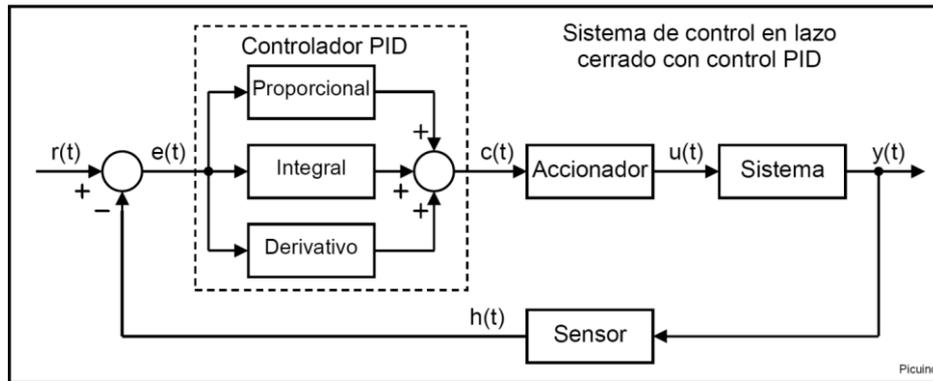


Figura 3.6. Diagrama de control PID [15].

3.4.1. Función de transferencia

Es la relación matemática entre la entrada y la salida de la planta. Se aplica cuando se dice que el sistema está en condiciones iniciales nulas antes de haber aplicado una entrada, lo cual indica que la salida será afectada solamente después de haber aplicado la entrada. No es necesario tener en cuenta la estructura interna del sistema, el único acceso a éste es a través del conocimiento de las entradas y salidas respectivas [9].

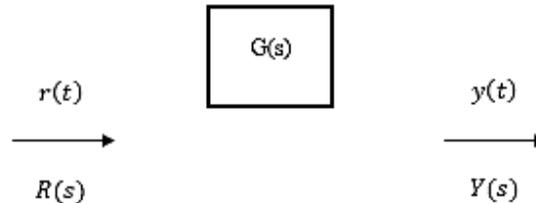


Figura 3.7. Función de transferencia [9]

3.4.2. Acción de control proporcional

La parte proporcional es el producto entre la señal de error y la constante proporcional para conseguir que el error en estado estacionario sea lo más cercano a cero, pero en gran parte de los eventos, los valores únicamente serán aptos en una determinada parte del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango [16].

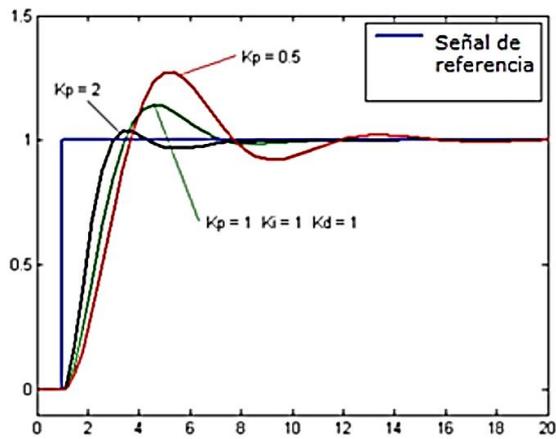


Figura 3.8. Gráfica de acción de control proporcional [16].

La fórmula del control proporcional está dada por:

$$P_{sal} = K_p e(t) \tag{3.4}$$

3.4.3. Acción de control integral

La acción de control Integral tiene como fin reducir y eliminar el error en estado estacionario, causado por la acción proporcional. El control integral actúa cuando existe una desviación entre la variable del proceso y el punto de consigna. La desviación es integrada, y promediada en un período determinado; Luego se multiplica por una constante K_i . La respuesta integral es añadida al modo Proporcional para crear el control P + I con el propósito de obtener una respuesta constante del sistema sin error estacionario [16].

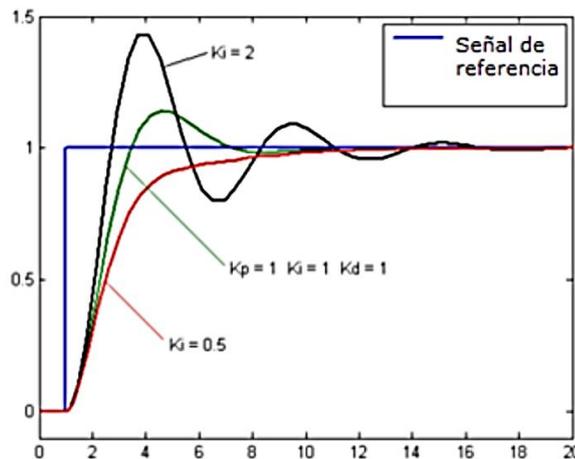


Figura 3.9. Gráfica de acción de control integral [16].

La fórmula del control integral está dada por:

$$I_{sal} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

3.4.4. Acción de control derivativo

La acción derivativa se presenta cuando existe un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es continuo, solo actúan las acciones proporcional e integral). El error es la variación entre el punto de medida y el valor consigna. La acción derivativa mantiene el error al mínimo posible, corrigiéndolo proporcionalmente a la misma velocidad que se produce; de esta forma se evita que el error aumente. Se deriva en relación al tiempo para multiplicarse con una constante D y luego se adiciona a las señales previas (P+I). Es fundamental adecuar el resultado de control a las alteraciones en el sistema, debido a que una mayor derivativa está relacionada a un cambio más rápido para que el controlador pueda responder adecuadamente [15].

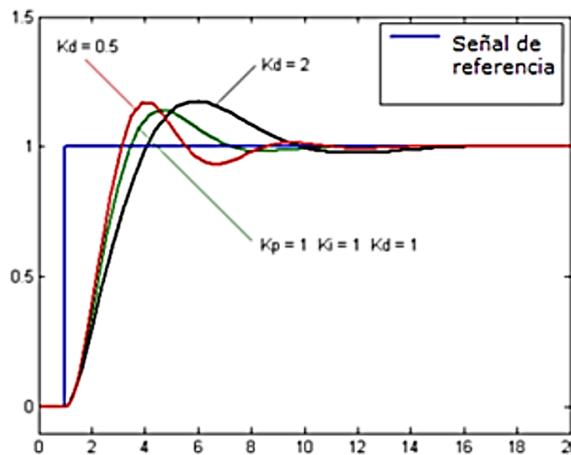


Figura 3.10. Gráfica de acción de control derivativo [16].

La fórmula del derivativo está dada por:

$$D_{sal} = K_d \frac{de}{dt} \quad (3.6)$$

3.4.5. Significado de las constantes

Constante de proporcionalidad K_p : se presenta como el valor de ganancia para el controlador, dicho de otra manera, es el porcentaje de banda proporcional.

Constante de integración K_i : muestra la velocidad con la que se redonda la acción proporcional.

Constante de derivación K_d : Permite mostrar la respuesta de acción proporcional duplicándola, sin esperar a que el error se duplique. El dato establecido por la constante de derivación es el período durante el cual se presentará la acción proporcional relacionado al doble del error y después se eliminará.

3.5. CONTROL PREDICTIVO

El Control Predictivo utiliza el modelo matemático del proceso a controlar para predecir el comportamiento futuro del sistema, y en base a este comportamiento futuro puede predecir la señal de control futura [17].

3.5.1. Control Predictivo basado en modelo

El Control Predictivo integra un mecanismo de optimización el cual trata de encontrar la acción de control más óptima siempre respetando las restricciones establecidas por el ingeniero de control, dentro de una ventana de predicción.

El controlador predictivo tal como su nombre lo indica trata de predecir el comportamiento dinámico de la planta con ayuda de un modelo interno, es por eso que la obtención de este modelo es muy importante para lograr conseguir buenas predicciones de nuestro proceso [18].

3.5.2. Principio de funcionamiento de un Control Predictivo

Según [19] expone a continuación la estrategia que siguen todos los controladores de la familia MPC:

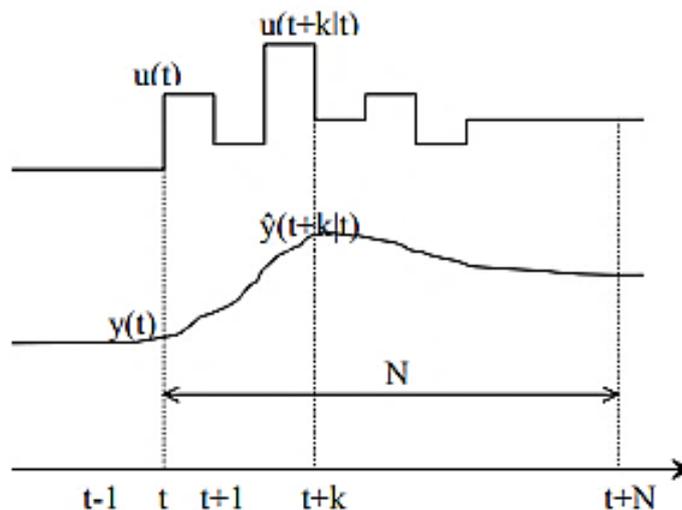


Figura 3.11 Estrategia del Control Predictivo [19].

Tabla 3.1. Variables de la Estrategia del Control Predictivo

Variable	Descripción
t	tiempo
k	instante de muestreo
N	horizonte de predicción
$\hat{y}(t+k t)$	Representa a las salidas predichas
$(t+k t)$	Señales de control futuras
$w(t+k)$	Trayectoria de referencia

En la figura 3.12 se indica el principio de funcionamiento de un control MPC, en el cual para el cálculo de las señales de control futuras es necesario dos fases: la estimación y la optimización.

- **Estimación del control**

En esta fase, el controlador considera todos los cambios previos, es decir los valores actuales de las variables actuales conocidas, además del modelo de la planta para predecir la respuesta de la variable de salida. [20]

- **Optimización del control**

En esta fase, los valores de referencia, perturbaciones y restricciones se definen para un Horizonte de Predicción o tiempos de muestreo, luego con esta información se calcula mediante el controlador futuros movimientos de la variable manipulada para un Horizonte de Control, los que se relacionan a la solución de un problema con restricciones.

Una vez finalizado este proceso el controlador emplea la señal de control restringida a la planta. la cual se ejecuta hasta el próximo intervalo de control donde el controlador tomara nuevas decisiones [20].

Esta estrategia se lleva a cabo usando una estructura como en el de la figura 3.13. en donde se muestra un bloque que incluye el modelo de la planta además de un bloque optimizador que utiliza restricciones y una función de costo los cuales conforman el controlador predictivo.

Para el caso de un controlador predictivo basado en modelo este implica un bloque para la estimación de los espacios de estado [21]

En el controlador se introduce la referencia externa y se deben restar las señales futuras previstas por el modelo. La diferencia resultante o error se inserta en el optimizador que evalúa una

óptima entrada para el proceso. El proceso renueva las salidas pasadas y presentes, y estos valores nuevos se insertan en el controlador que a través del modelo se repite el cálculo de salidas futuras para un nuevo tiempo de muestreo. Para el caso de un modelo en espacio de estados los datos pasados de las entradas, y los datos pasados y presentes de las salidas son empleados por el analizador para evaluar los estados y salidas futuras del modelo. [21]

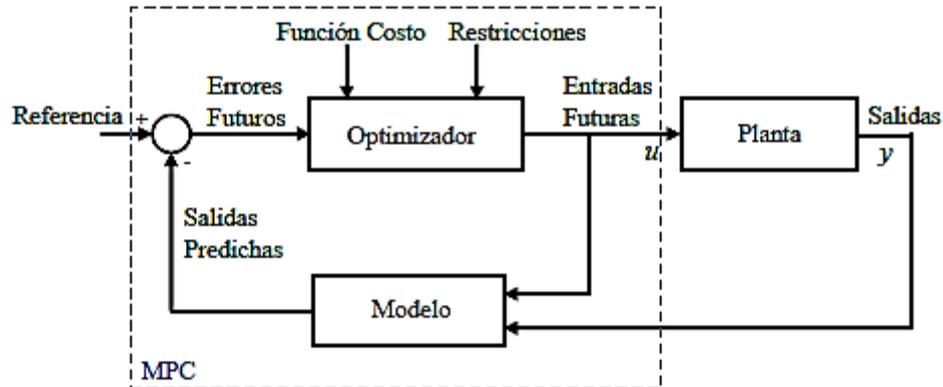


Figura 3.12. Estructura de un control MPC [21].

Como se puede observar en la figura 3.13 el modelo de proceso cumple un papel determinante en el controlador. Este debe estar adecuadamente elaborado para que se ajuste a la dinámica del proceso y así poder predecir de forma acertada la evolución del sistema. Además, debe ser simple de entender para reducir la carga computacional del proceso de predicción [22].

3.5.3. Modelo en Espacio de Estados

El comportamiento de los componentes de la mayoría de los sistemas dinámicos, se rigen en leyes físicas de la materia que también son usadas para determinar el modelo matemático y particularmente para determinar el modelo en espacio de estados. El estado de un sistema depende de un conjunto variables linealmente independientes que lo definen. Un conjunto de variables es linealmente independiente si es imposible encontrar un conjunto de constantes m_i que satisfacen la ecuación exceptuando el caso en que todas las constantes sean cero:

$$x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_n m_n = 0 \quad (3.7)$$

El número de variables de estado representa el orden del sistema. Un sistema dinámico modelado por espacio de estados está representado por:

$$\begin{cases} x = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (3.8)$$

Donde $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times r}$, $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$, $D \in \mathbb{R}^{q \times r}$, $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^q$, $u \in \mathbb{R}^r$. (\mathbb{R} es el conjunto de los reales), r es el número de entradas y q es el número de salidas. Por otro $x(t)$ es llamado el vector de estados, $y(t)$ es llamado el vector de salida, $u(t)$ es llamado el vector de entradas, A es la matriz de estados, B es la matriz de entrada, C es la matriz de salida y D es la matriz de transición directa, que por simplicidad se toma en la mayoría de casos como la matriz cero. [23]

3.5.4. Elementos básicos Del MPC

El modelo de predicción se divide en dos partes, el modelo del proceso y un modelo de las perturbaciones que recoge el efecto de ruido, errores de modelado y entradas no medibles.

- **Modelo de predicción**

Se compone del modelo de proceso y el modelo de perturbaciones.

- **Modelo del proceso**

Consta de las variables manipuladas y de perturbaciones medibles

- **Modelo de las perturbaciones**

Intenta modelar el efecto de perturbaciones externas, como: ruido de medidas y errores de modelado.

- **La función objetivo**

La función objetivo suele tener la forma de un criterio cuadrático en la que aparecen los errores de seguimiento predichos y el esfuerzo de control. De manera general la función objetivo toma la forma:

$$J(u) = \sum_{k=N_1}^{N_2} \delta(k) [\hat{y}(t+k|t) - w(t+k)]^2 + \lambda \sum_{k=1}^{N_u} \lambda(k) \Delta u(t+k-1|t)^2 \quad (3.9)$$

En esta función, N_1 y N_2 determinan el comienzo y el final del horizonte de predicción, mientras que N_u es el horizonte de control. Los dos primeros parámetros marcan los límites de los instantes en los que es deseable que la salida siga a la trayectoria de referencia. Si el retardo del proceso es d el valor más razonable para N_1 es $d + 1$. Por otra parte, el horizonte de control N_u no tiene porque coincidir con N_2 , pudiendo ser un valor menor. Esto trae como consecuencia la reducción del número de variables de decisión por lo que la optimización

conllevará menos calculo. En ese caso se suele suponer que la entrada permanece constante a partir del instante $t + N_u - 1$, es decir:

$$\Delta u(t + k - 1) = 0 \quad k > N_u \quad (3.10)$$

Por otra parte, los coeficientes $\delta(k)$ y $\lambda(k)$ son secuencias de ponderación que usualmente toman la forma:

$$\delta(k) = \alpha^{N2-k} \quad (3.11)$$

Si $0 < \alpha < 1$ los errores futuros más lejos de t tienen más peso, dando lugar a un control más suave. Si $\alpha > 1$ el error en los instantes más cercanos a t tiene más peso, por lo que el control será más rápido. Finalmente hay que destacar que la trayectoria de referencia $w(t + k)$ no tiene porque coincidir con el punto de consigna (set point), empleándose generalmente una trayectoria

que parte del valor de la salida en t y se aproxima suavemente al valor del punto de consigna, generalmente con una dinámica de primer orden:

$$w(t) = y(t) \quad w(t + k) = \alpha w(t + k - 1) + (1 - \alpha)r(t + k) \quad k = 1, \dots, N \quad (3.12)$$

con $0 < \alpha < 1$

4. METODOLOGÍA

4.1. DECLARACIÓN DE VARIABLES

Variable Independiente

Parámetros de funcionamiento del Control Predictivo (MPC)

Variable Dependiente

Operatividad del Controlador Predictivo

4.1.1. Operaciones de las variables

Tabla 4.1. Variable Independiente

Variable Independiente	Unidad de medida	Instrumento de medición
Tiempo de muestreo	- Segundos	- Herramienta Simulink
Horizonte de predicción	- Adimensional	- Herramienta Simulink
Horizonte de control	- Adimensional	- Herramienta Simulink

Tabla 4.2. Variable Dependiente

Variable Dependiente	Unidad de medida	Instrumento de medición
Sobre impulso	- Porcentaje	- Gráfica de tendencias
Tiempo de retardo	- Segundos	- Gráfica de tendencias
Tiempo de asentamiento	- Segundos	- Gráfica de tendencias
Tiempo de levantamiento	- Segundos	- Gráfica de tendencias

4.1.2. Procedimientos, métodos y materiales

Tabla 4.3. Procedimientos, métodos y materiales

Procedimiento	Método	Materiales o instrumentos
Manipular variables y determinar parámetros de ajuste	Experimental	<ul style="list-style-type: none">- Variador de frecuencia- PLC S7-1200- Fuente de voltaje- Software Tia Portal- Software Matlab

Utilizar valores numéricos para obtener expresiones matemáticas que expliquen el modelo de la planta	Cuantitativo	<ul style="list-style-type: none"> - Software Excel - Software Matlab (Herramienta SystemIdentification)
Muestra soluciones basadas en fórmulas matemáticas, donde se definen variables de entrada para el cálculo de variables de salida	Análítico	<ul style="list-style-type: none"> - Software Matlab (Simulink)

4.2. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO DE CAUDAL Y NIVEL

La planta o proceso a controlar se encuentra diseñado como un banco de pruebas para la ejecución de prácticas de laboratorio, en el cual el agua circula desde un tanque de reservorio hacia un tanque elevado principal. El elemento actuador de la planta lo conforma una bomba centrífuga, encargada de hacer circular el agua a través del circuito, misma que es comandada por la señal proveniente de un variador de frecuencia, logrando así que el líquido sea bombeado de acuerdo a los requerimientos del usuario. La Figura 4.1 presenta el esquema P&ID de la planta según la norma ANSI-ISA S5.1.

4.2.1. Módulo didáctico de caudal

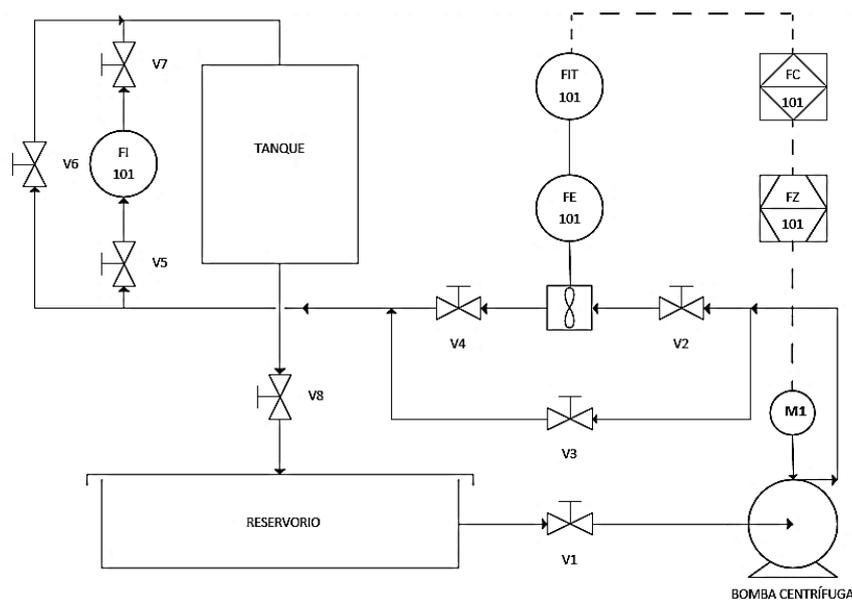


Figura 4.1. Diagrama del módulo de Caudal.

Válvulas de paso manual: La principal función de las válvulas V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8 es la de facilitar el trabajo de mantenimiento de la planta, sin embargo, pueden cumplir con una función adicional generando perturbaciones externas.

Bomba centrífuga (M1): La bomba centrífuga M1 trifásica, con una potencia de 3 HP, tienen la función de impulsar el agua para que circule por el circuito de tuberías.

Elemento primario de caudal (FE-101): Indica el elemento primario de medición de caudal, en este caso un sensor de caudal CX-LTFM-25-304-4-D-D-T de tipo turbina, mismo que se encuentra conectado internamente a un transmisor.

Transmisor indicador de caudal (FIT-101): Transmisor de caudal CX-LTFM-25-304-4-D-D-T con pantalla digital, alimentación de 24V, cuya función es transformar la variable física en una señal de corriente de 4-20mA.

Indicador de caudal (FI-101): Fluviómetro o Rotámetro de área variable, tiene dos escalas para la lectura de la medición, en galones por minuto (20 GPM max) y litros por minuto (70 LPM max), tiene por objetivo visualizar físicamente el caudal de agua que circula por la tubería.

Tanques 1-2: Reservorios construidos de acrílico cuya función es almacenar el líquido circulante. Adicionalmente en el tanque 1 se pueden ejecutar prácticas de control de nivel.

Controlador de caudal (FC-101): PLC SIEMENS S7-1200 es el elemento de control principal, aquí se procesan las señales de entrada y salida del sistema, pudiendo tener conexión directa con un computador externo y visualizar el comportamiento de las variables.

Elemento de control final de caudal: el elemento final de control es un variador de frecuencia iG5A, el cual se encarga de variar la velocidad de la bomba centrífuga, logrando así un control indirecto sobre el caudal de salida de la bomba.

Si se desea saber cómo lograr un efectivo control de caudal de bombas centrífugas en aquellos procesos en los cuales se busca alcanzar un rango de caudal muy amplio, por ejemplo, un rango de 20% a 100% del caudal nominal, se debe utilizar una combinación del mejor método de control de caudal de bombas que es el variador de frecuencia y una válvula de control, con un algoritmo de control de rango dividido, ya que este método regula los altos caudales hasta un cierto mínimo.

4.2.2. Módulo didáctico de nivel

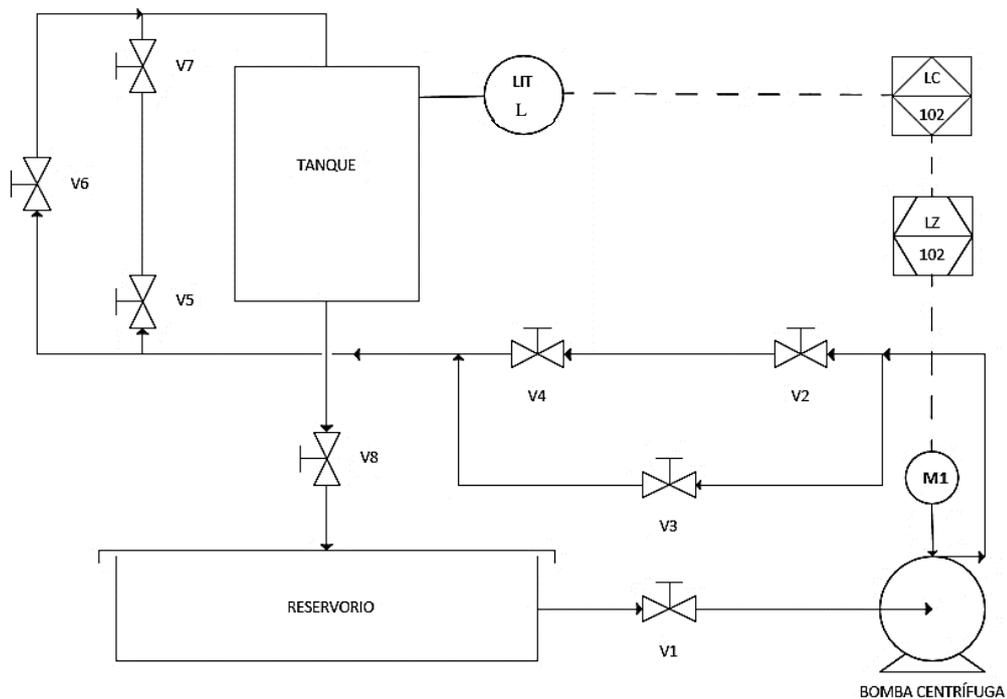


Figura 4.2. Diagrama del módulo de nivel.

Transmisor de nivel (LT-101): Transmisor de nivel T30OUIPAQ con alimentación de 24V, cuya función es transformar la variable física en una señal de corriente de 4-20mA.

Controlador de nivel (LC-101): PLC SIEMENS S7-1200 elemento de control principal, donde se procesan las señales de entrada y salida del sistema, tiene conexión directa con un computador externo para visualizar el comportamiento de las variables.

4.2.3. Señales de proceso

Entrada (Variable de Control): Esta corresponde a una señal de voltaje en el rango de 0 a 10V la cual se envía al variador de frecuencia iG5A por medio del puerto analógico de salida QW0 del PLCS7-1200.

Salida (Variable de Proceso): La señal proveniente del sensor de caudal corresponde a la salida o variable de proceso, misma que genera una señal de corriente en el rango de 4 a 20mA. Para facilitar la adquisición de esta señal es necesario adecuarla a una señal de voltaje, haciendo uso de una resistencia de 250Ω conectada en serie a la señal de corriente que proporciona el sensor, obteniendo así una señal de voltaje en el rango de 1 a 5V tomada en paralelo de la resistencia.

4.3. ADQUISICIÓN DE DATOS Y OBTENCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

La primera etapa sigue la lógica planteada en el diagrama de la Figura 4.3 cuyo objetivo es obtener un modelo matemático tanto en espacio de estados como en función de transferencia.

- Diseño y validación de funcionamiento de los procesos.
- Adquisición de datos de los procesos en un tiempo determinado.
- Procesamiento de datos en un Software de contabilidad.
- Transferencia de datos a un Software de estimación para la obtención de los modelos en espacios de estados y funciones de transferencia.
- Validación de los modelos estimados por el Software siempre que supere el 75% de eficacia.
- Obtención de valores de K_p , K_i y K_d

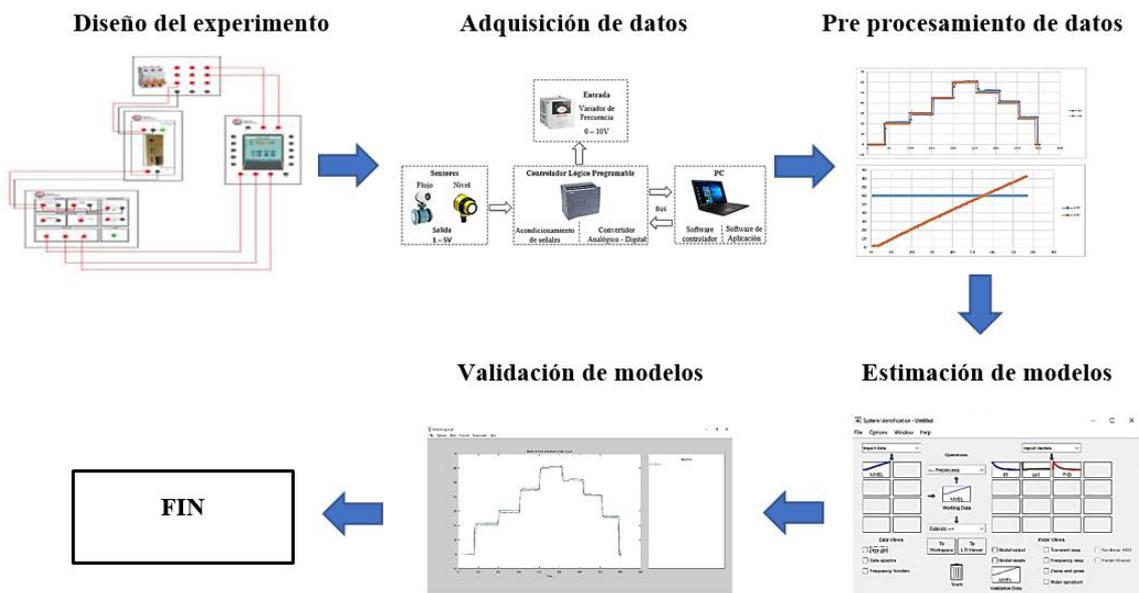


Figura 4.3. Etapas para la identificación del sistema.

4.4. RANGO DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

4.4.1. Curva de eficiencia de la bomba centrífuga

La planta cuenta con una bomba centrífuga que presenta las siguientes curvas de funcionamiento y rendimiento; las cuales son obtenidas del catálogo del fabricante [24]. Aquí se puede observar parámetros como: Revoluciones por minuto, altura, galones por minuto y el dato más importante que es la eficiencia la misma que se encuentra representada por una curva en porcentaje.

CURVAS DE DESEMPEÑO - 60 HZ, 3500 RPM

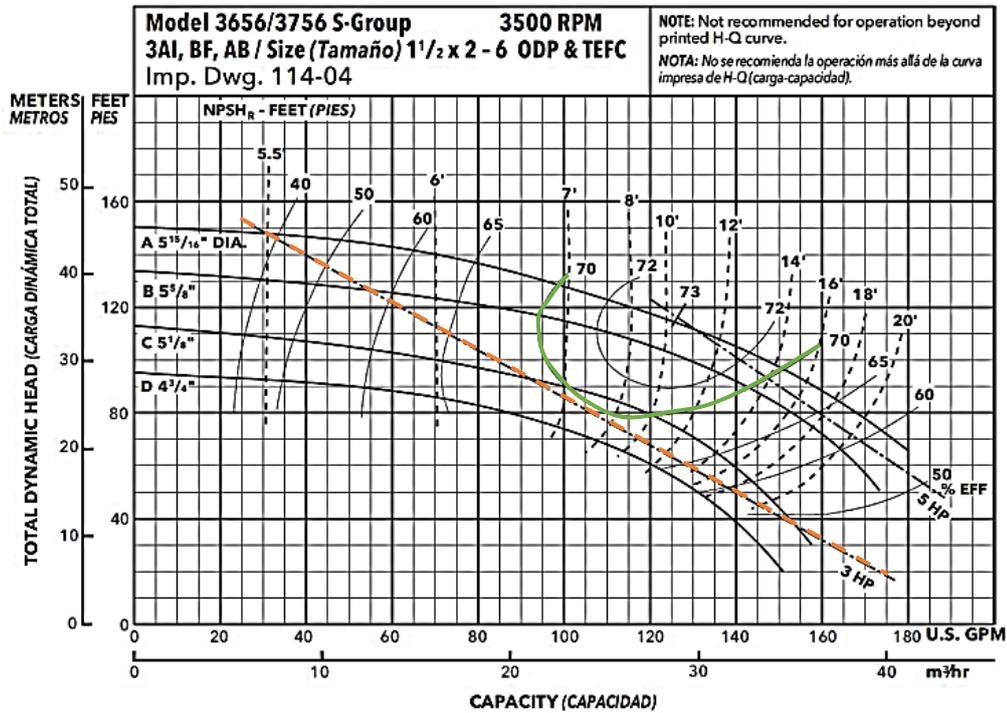


Figura 4.4. Curva de desempeño de la bomba centrífuga [24].

Tabla 4.4. Rangos de eficiencia de la bomba centrífuga

Porcentaje de eficiencia		Altura (cm)	Caudal (L/min)
Rango de mayor rendimiento	70%	2743.2	378.541
		2438.4	454.249
Rango de menor rendimiento	40%	2804.16	90.84

4.4.2. Rango de funcionamiento de la planta

Para la adquisición de datos es necesario determinar los parámetros de operación de la planta, así como también ajustar los rangos de funcionamiento de los sensores de caudal y nivel, además de la programación del variador de frecuencia.

Para establecer el rango de operación de la planta se procede a dar valores de voltaje escalonados en un rango de 0 a 10V hacia el variador de frecuencia con ayuda de una fuente de voltaje variable, y adquiriendo lecturas de respuesta en voltaje de 1 a 5V en los diferentes sensores, obteniendo como resultado las zonas de operación mostrados en la Tabla 4.4. donde

la región más cómoda y estable para la operación de la planta se establece en un rango de 30 a 60LPM para el proceso de caudal y de 1 a 83cm para el proceso de nivel.

El registro completo de lecturas se encuentra en detallado en el Anexo I.

Tabla 4.5. Rango de operación del caudal en función del variador (V).

Variador (V)	Caudal (L/min)	Descripción
0 - 2	0	No hay circulación de caudal
2.1 - 3.9	0	Caudal mínimo. No detectado por el sensor
4 - 5	17.22 - 28.14	Zona inestable (valores erróneos)
5.1 - 7	29.5 - 46.05	Zona estable para las condiciones de la planta
7.1 - 10	46.8 - 63.64	Zona de saturación rápida del tanque de nivel

Tabla 4.6. Rango de operación del nivel en función del caudal

Variador (V)	Nivel (cm)	Descripción
-	0 - 0,99	Zona de nivel fija
0 - 10	1 - 83	Zona de lectura óptima
10	83,1 - 100	Zona de lectura errónea

Una vez establecida la zona de operación de la planta el sensor de caudal entrega una señal máxima de 3.54V a un caudal de 63.64L/min. Mientras que el sensor de nivel entrega una señal máxima de 5.03V a un nivel en el tanque de 83cm.

4.4.3. Registro de datos y obtención de expresiones matemáticas

Con la finalidad de obtener ecuaciones que permitan escalar valores de voltaje provenientes de los sensores. Se registran medidas de caudal y nivel a partir de valores de voltaje entregados por el PLC hacia el variador de frecuencia.

Con estos valores se procede a marcar la tendencia de los puntos en una gráfica y a expresar la ecuación que la define, como observa en la Figura 4.5 y 4.6.

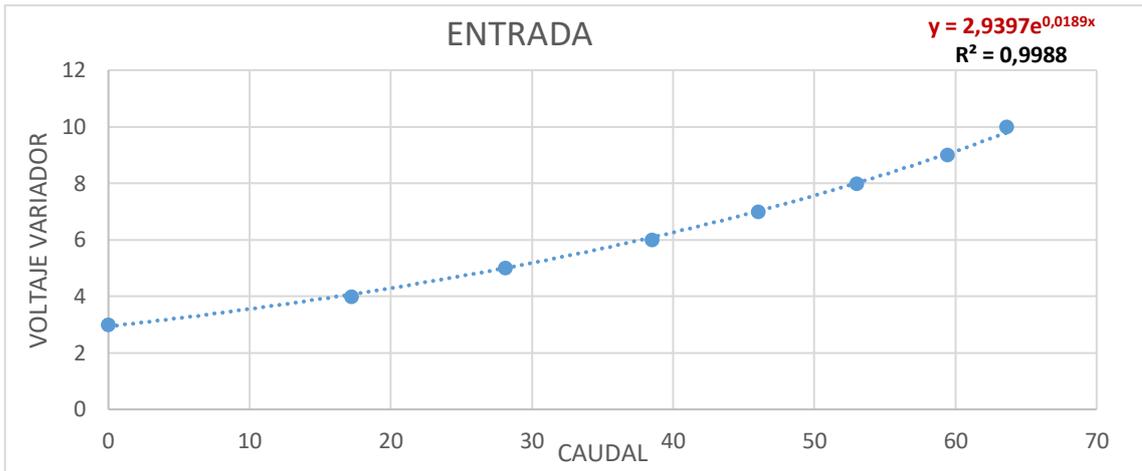


Figura 4.5. Línea de tendencia y ecuación Voltaje de Variador vs Caudal

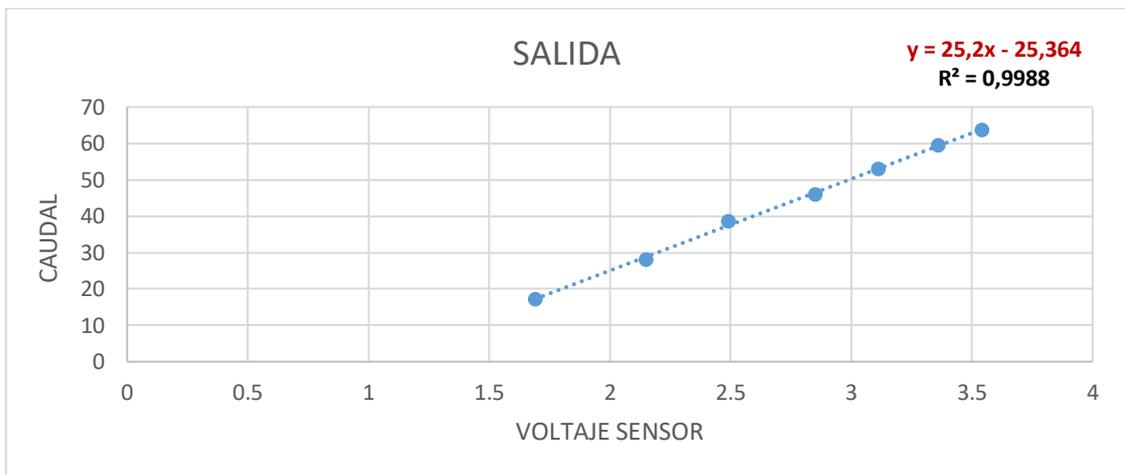


Figura 4.6. Línea de tendencia y ecuación de Caudal vs Voltaje del Sensor

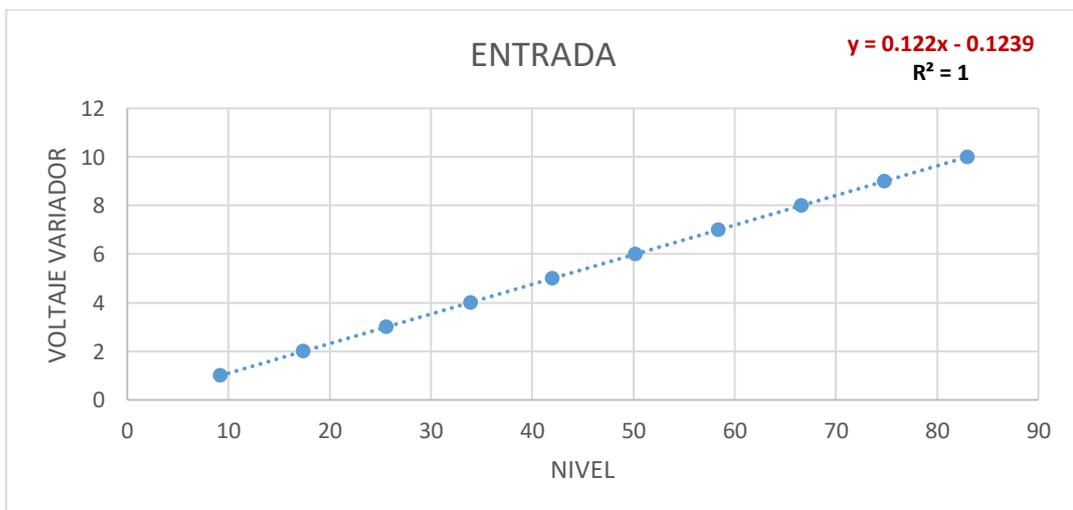


Figura 4.7. línea de tendencia y ecuación Voltaje Variador vs Nivel del Tanque

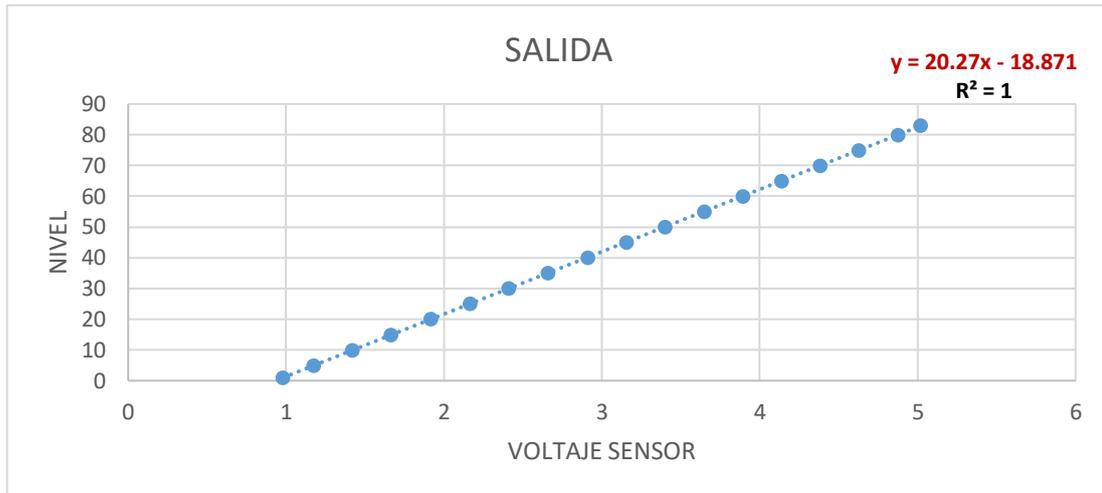


Figura 4.8. línea de tendencia y ecuación Nivel del Tanque vs Voltaje del Sensor

El registro de valores permite representar, a partir de las líneas de tendencia ecuaciones que definen los valores representados en las gráficas para posteriormente utilizarlas en el escalamiento de unidades.

Para el caso del caudal sus unidades son escaladas en voltaje del variador a L/min con el uso de la ecuación 4.1 y para escalar a unidades de L/min a partir de voltaje del sensor se utiliza la ecuación 4.2.

$$y = 2,9397e^{0,0189x} \quad (\text{Entrada}) \quad (4.1)$$

$$y = 25,2x - 25,364 \quad (\text{Salida}) \quad (4.2)$$

Una vez obtenido las ecuaciones de escalado de entrada y salida para el proceso de caudal repetimos el procedimiento para el proceso de nivel como se muestra en la figura 4.3. y 4.4.

En el caso del nivel la adquisición de datos corresponde al registro de valores cuyas unidades serán escaladas a voltaje del variador a partir del nivel mediante la ecuación 4.3. y para escalar a la unidad de cm se utiliza el voltaje del sensor, esto se representa en la ecuación 4.4.

$$y = 0,122x - 0,1239 \quad (\text{Entrada}) \quad (4.3)$$

$$y = + 20,27x - 18,871 \quad (\text{Salida}) \quad (4.4)$$

4.4.4. Procedimiento para la adquisición de datos

Para obtener una variación en la salida del sistema se utilizará el método de respuesta en escalón en el cual se envía una serie de impulsos arbitrarios en escalón en la entrada del sistema y se

obtiene un cambio en la variable de salida como respuesta a dicho estímulo, reflejando así el comportamiento del sistema.

El diagrama para la adquisición de datos se muestra en la Figura 4.7

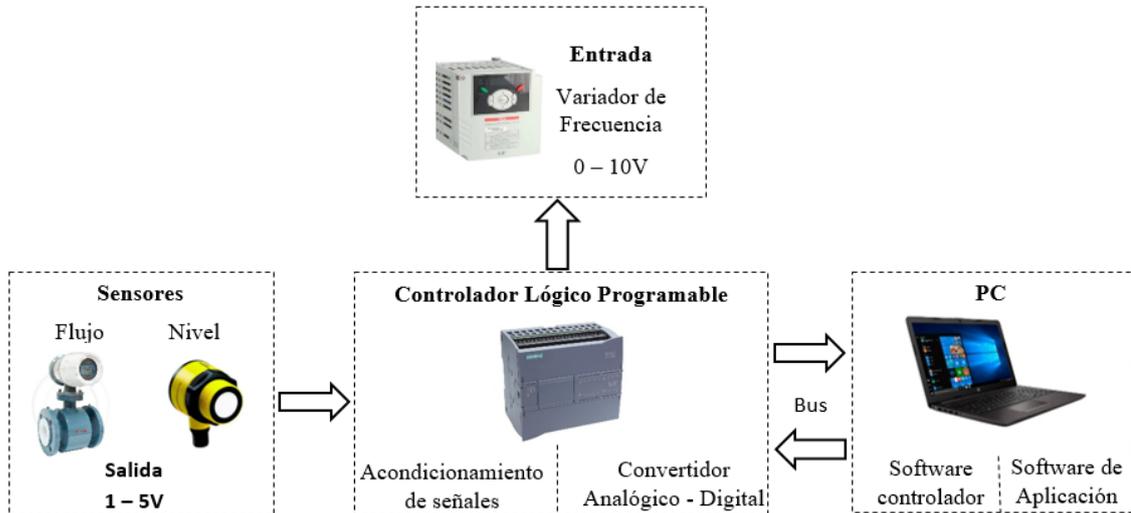


Figura 4.9. Secuencia de componentes para la adquisición de datos.

La adquisición de datos se realiza con la ayuda del software MATLAB, dentro del cual se ocupa la herramienta de Simulink; y a partir de una programación en bloques se realiza el control de variables para almacenar los datos obtenidos después de haber fijado distintos valores.

El control, visualización y registro de las variables se muestra en la figura 4.8 en donde las unidades se representan en L/min tanto para la variable de proceso (PV) como para la variable de control (CV).

Y de la misma manera en la figura 4.9 se puede apreciar la programación y representación de las variables en cm para el proceso de nivel. Todo esto teniendo en cuenta que en los dos procesos se realiza la lectura de los diferentes sensores escalados a sus respectivas salidas de nivel y caudal. Y estos a su vez se encuentran escalados para a través de los bloques de escritura enviar señales en forma de voltaje en una escala de 1 a 10V.

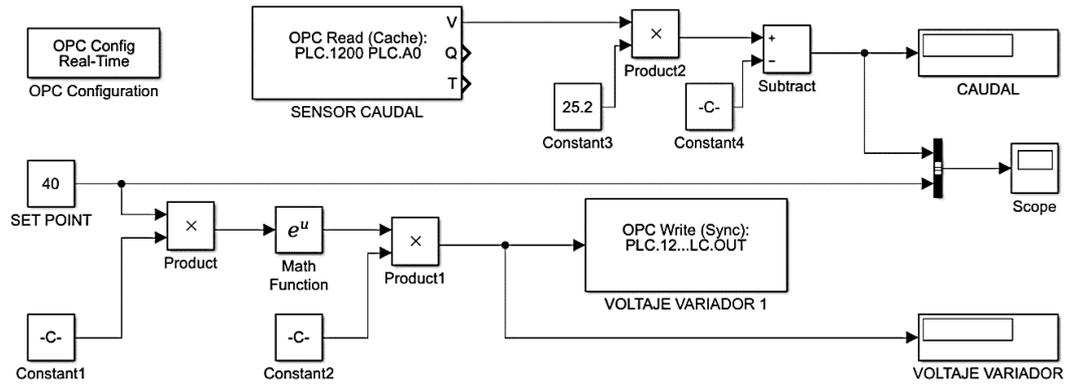


Figura 4.10. Programación y visualización de las variables PV y CV para caudal.

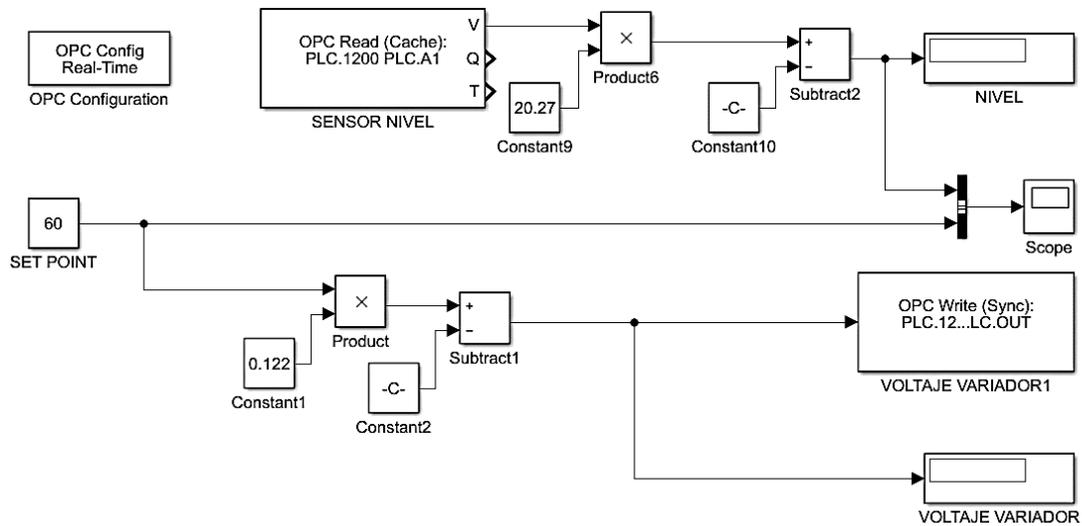


Figura 4.11. Programación y visualización de las variables PV y CV para nivel.

4.4.5. Procesamiento de datos

A continuación, se muestran las señales reales obtenidas de las variables de proceso y control, y que posteriormente son utilizadas para determinar el modelo de la planta en cuanto a los procesos de nivel y caudal.

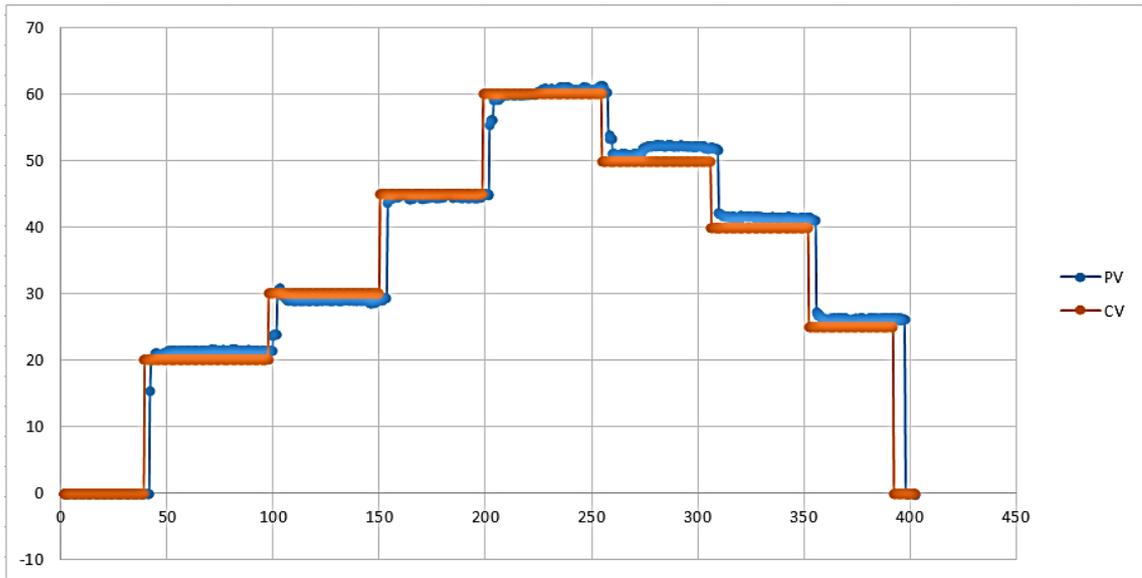


Figura 4.12. CV y PV de la planta para el proceso de caudal.

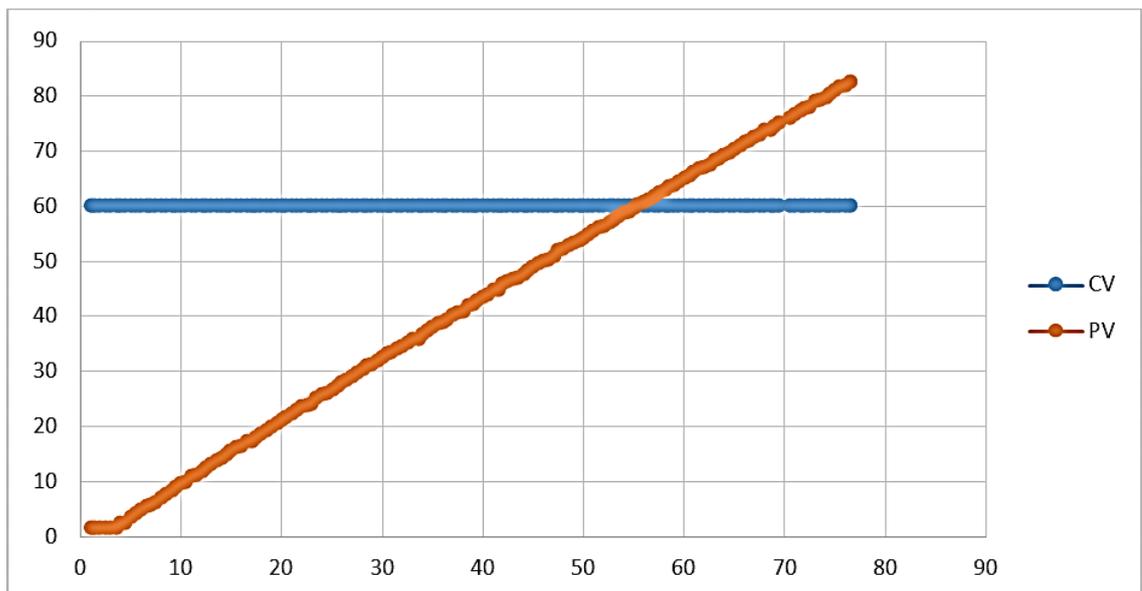


Figura 4.13. CV y PV de la planta para el proceso de nivel.

4.4.6. Estimación de los modelos matemáticos

La estimación de los modelos matemáticos de la planta tanto para los procesos de nivel y caudal se los realiza con la ayuda de la herramienta “systemIdentification” de Matlab.

Una vez abierta la ventana de la herramienta “systemIdentification”, se procede a seleccionar la opción de importar datos en el dominio del tiempo, para lo cual es necesario especificar los datos de entrada “CV” y salida “PV”, así mismo el tiempo de inicio y tiempo de muestreo que para este caso es “0” y “1” respectivamente.

El primer proceso a tomar en cuenta para la obtención de los modelos matemáticos es el de caudal, del cual se obtienen dos expresiones diferentes: el Modelo de Proceso a través de su función de transferencia y el Modelo en espacio de estados.

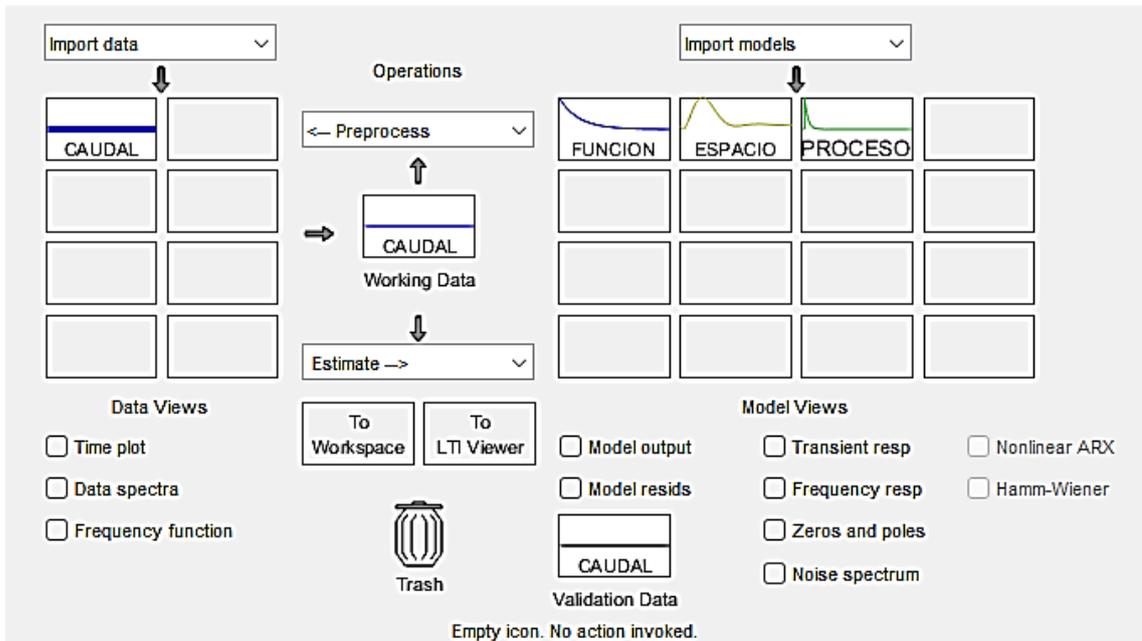


Figura 4.14. Ventana de estimación de modelos “systemIdentification” para caudal.

De la misma manera que en el primer proceso, para el caso del nivel resulta el mismo procedimiento para estimar las expresiones matemáticas resultantes de la planta.

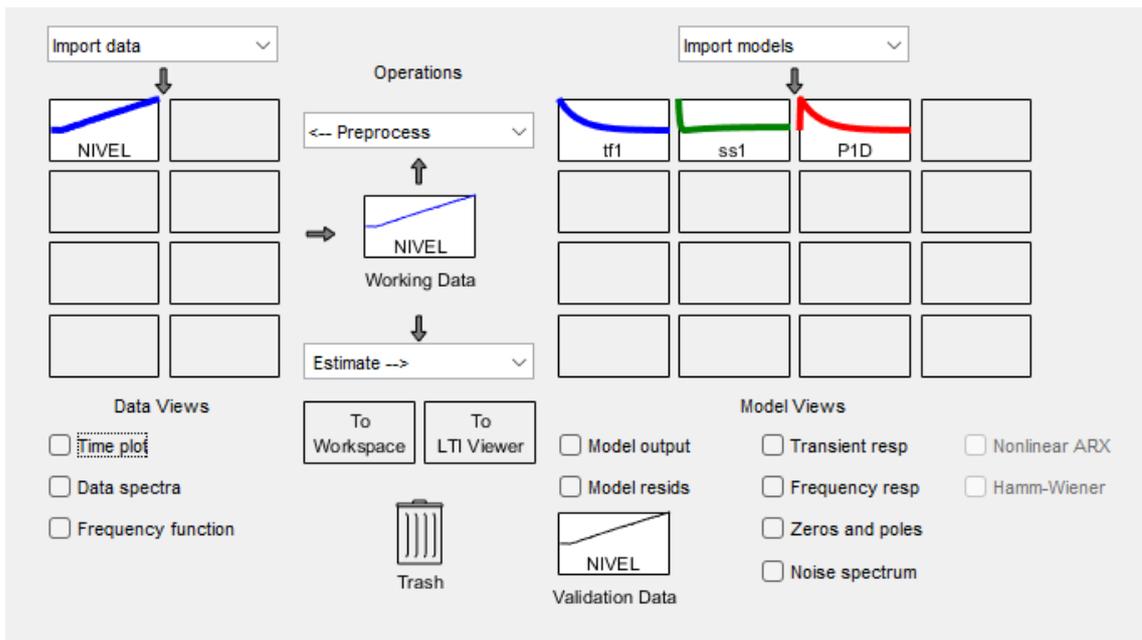


Figura 4.15. Ventana de estimación de modelos “systemIdentification” para nivel.

- **Modelo de proceso y función de transferencia para caudal**

La estimación de la función de transferencia se expresa de dos maneras, para el caso de la figura (a) corresponde a su forma simple de representación, mientras que para la expresión de la figura (b) esta se muestra representando a un modelo de primer orden con retardo (FOTD); el mismo que es ocupado en sistemas que emplean una señal de entrada en forma de escalón; tal y como se encuentra aplicado para este trabajo. Debido a que este modelo facilita las constantes K_p , T_{pl} y T_d es utilizado por el método Lambda para la sintonización del control PID.

$$\frac{-0.3099 s + 0.1488}{s + 0.1462} \quad (a)$$

$$G(s) = \frac{K_p}{1+T_{pl}s} * \exp(-T_d*s)$$

$K_p = 1.0166$
 $T_{pl} = 3.4889$
 $T_d = 4.594$
 (b)

(a) Función de transferencia (b) Modelo del proceso

Figura 4.16. Función de transferencia y Modelo del proceso para caudal

- **Modelo en espacio de estados para caudal**

El sistema dinámico de la planta al representar un conjunto de entradas y salidas es estimado mediante espacios de estados en un tiempo continuo, debido a esto se hace posible modificar el tiempo de muestreo a períodos más extensos, lo cual no es posible hacer en un tiempo discreto.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= A x(t) + B u(t) + K e(t) & C &= \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) + e(t) \end{aligned}$$

$A =$ <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>x1</td> <td>x2</td> <td>x3</td> </tr> <tr> <td>x1</td> <td>-0.1128</td> <td>-0.1445</td> <td>-0.04706</td> </tr> <tr> <td>x2</td> <td>0.1049</td> <td>0.2505</td> <td>0.8588</td> </tr> <tr> <td>x3</td> <td>0.06772</td> <td>-0.4277</td> <td>-0.7207</td> </tr> </table> $B =$ <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>u1</td> </tr> <tr> <td>x1</td> <td>2.209e-05</td> </tr> <tr> <td>x2</td> <td>0.004807</td> </tr> <tr> <td>x3</td> <td>-0.006063</td> </tr> </table>		x1	x2	x3	x1	-0.1128	-0.1445	-0.04706	x2	0.1049	0.2505	0.8588	x3	0.06772	-0.4277	-0.7207		u1	x1	2.209e-05	x2	0.004807	x3	-0.006063	$D =$ <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>u1</td> </tr> <tr> <td>y1</td> <td>0</td> </tr> </table> $K =$ <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>y1</td> </tr> <tr> <td>x1</td> <td>0.007183</td> </tr> <tr> <td>x2</td> <td>0.01041</td> </tr> <tr> <td>x3</td> <td>-0.004727</td> </tr> </table>		u1	y1	0		y1	x1	0.007183	x2	0.01041	x3	-0.004727
	x1	x2	x3																																		
x1	-0.1128	-0.1445	-0.04706																																		
x2	0.1049	0.2505	0.8588																																		
x3	0.06772	-0.4277	-0.7207																																		
	u1																																				
x1	2.209e-05																																				
x2	0.004807																																				
x3	-0.006063																																				
	u1																																				
y1	0																																				
	y1																																				
x1	0.007183																																				
x2	0.01041																																				
x3	-0.004727																																				

Figura 4.17. Modelo en espacio de estados de la variable de caudal.

- **Modelo de proceso y función de transferencia para nivel**

Así como para el caudal, el nivel también se encuentra representado por sus funciones de transferencia en tiempo continuo, para la expresión (a) su representación se encuentra en su

forma común, y para la expresión (b) se representa el modelo del proceso ante una señal de entrada en forma de rampa.

$$\frac{-0.01174 s + 0.009601}{s + 0.0005609} \quad (a)$$

$$G(s) = \frac{Kp}{1+Tp1*s} * \exp(-Td*s) \quad (b)$$

$Kp = 12.845$
 $Tp1 = 1315$
 $Td = 4.276$

(a) Función de transferencia (b) Modelo del proceso
Figura 4.18. Función de transferencia y Modelo del proceso para nivel.

- **Modelo en espacio de estados para nivel**

Para la variable de nivel el modelo en espacio de estados al igual que la variable de caudal se representa por ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo, las cuales se combinan en una ecuación diferencial en forma de matriz de primer orden.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= A x(t) + B u(t) + K e(t) \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) + e(t) \end{aligned}$$

A =	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td style="padding: 2px 10px;">x1</td> <td style="padding: 2px 10px;">x2</td> <td style="padding: 2px 10px;">x3</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x1</td> <td style="padding: 2px 10px;">-0.0006464</td> <td style="padding: 2px 10px;">0.0006308</td> <td style="padding: 2px 10px;">-0.009176</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x2</td> <td style="padding: 2px 10px;">-0.006596</td> <td style="padding: 2px 10px;">-0.4414</td> <td style="padding: 2px 10px;">5.542</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x3</td> <td style="padding: 2px 10px;">0.0523</td> <td style="padding: 2px 10px;">-0.2528</td> <td style="padding: 2px 10px;">-12.35</td> </tr> </table>		x1	x2	x3	x1	-0.0006464	0.0006308	-0.009176	x2	-0.006596	-0.4414	5.542	x3	0.0523	-0.2528	-12.35	C =	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td style="padding: 2px 10px;">x1</td> <td style="padding: 2px 10px;">x2</td> <td style="padding: 2px 10px;">x3</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">y1</td> <td style="padding: 2px 10px;">249.9</td> <td style="padding: 2px 10px;">-1.587</td> <td style="padding: 2px 10px;">6.669</td> </tr> </table>		x1	x2	x3	y1	249.9	-1.587	6.669
	x1	x2	x3																								
x1	-0.0006464	0.0006308	-0.009176																								
x2	-0.006596	-0.4414	5.542																								
x3	0.0523	-0.2528	-12.35																								
	x1	x2	x3																								
y1	249.9	-1.587	6.669																								
B =	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td style="padding: 2px 10px;">u1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x1</td> <td style="padding: 2px 10px;">3.921e-05</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x2</td> <td style="padding: 2px 10px;">0.0006537</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x3</td> <td style="padding: 2px 10px;">0.02922</td> </tr> </table>		u1	x1	3.921e-05	x2	0.0006537	x3	0.02922	D =	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td style="padding: 2px 10px;">u1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">y1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> </table>		u1	y1	0												
	u1																										
x1	3.921e-05																										
x2	0.0006537																										
x3	0.02922																										
	u1																										
y1	0																										
		K =	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td style="padding: 2px 10px;">y1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0.002422</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x2</td> <td style="padding: 2px 10px;">-0.0873</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">x3</td> <td style="padding: 2px 10px;">0.1982</td> </tr> </table>		y1	x1	0.002422	x2	-0.0873	x3	0.1982																
	y1																										
x1	0.002422																										
x2	-0.0873																										
x3	0.1982																										

Figura 4.19. Modelo en espacio de estados de la variable de nivel

4.4.7. Validación de los modelos matemáticos

Para el proceso de comprobar que los modelos estimados para las variables de salida y de estado no son muy diferentes a los datos reales, se utiliza la herramienta “model output” la cual se encuentra dispuesta en la misma ventana de “systemIdentification”. La herramienta una vez ejecutada permite de acuerdo a la visualización de una gráfica y porcentaje representar la parte real del modelo y la parte modelada para poder evaluar su grado de coincidencia. De esta manera es posible corregir o rehacer el proceso para la adquisición de datos; ya que el porcentaje mínimo aceptable para diseñar un controlador se encuentra arriba del 75%.

A continuación, se muestran las figuras que representan el grado de coincidencia entre la estimación del modelo y la salida real para cada variable.

Las figuras (4.18) y (4.19) representan los modelos de proceso con función de transferencia tanto para las variables de caudal y nivel, obteniendo grados de coincidencia de 89.12% y 99.16% respectivamente.

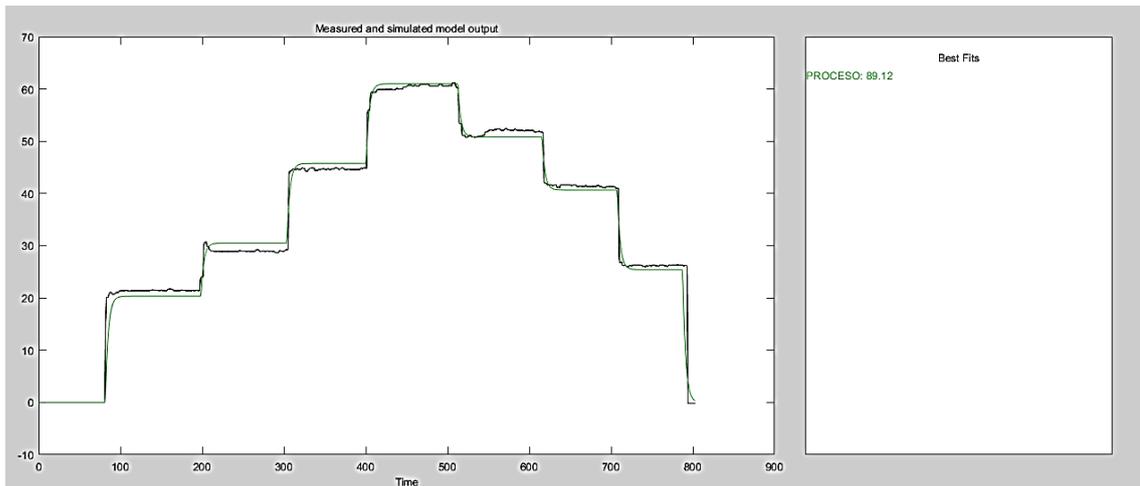


Figura 4.20. Validación del modelo de proceso con función de transferencia para caudal

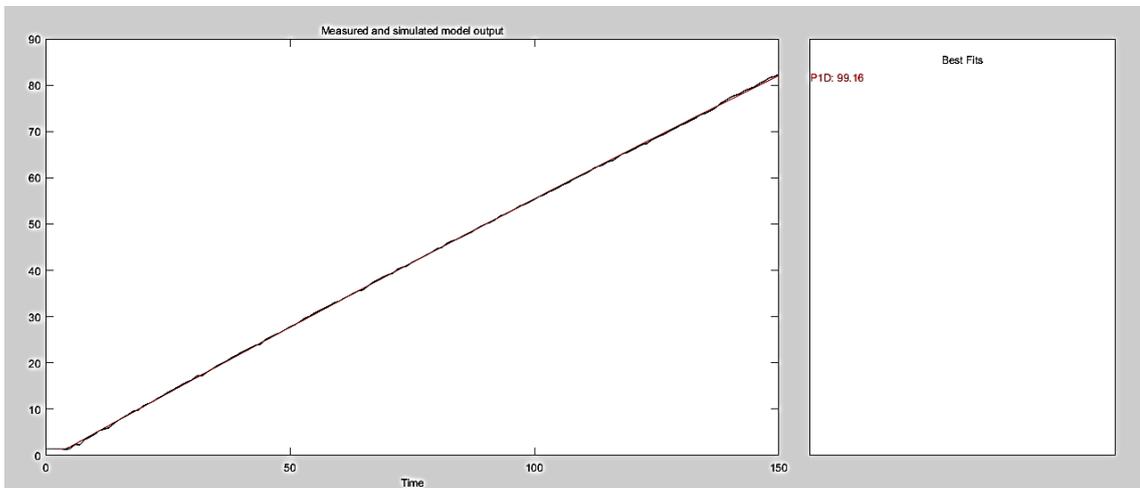


Figura 4.21. Validación del modelo de proceso con función de transferencia para nivel

En el caso de los modelos en espacio de estados las dos variables se encuentran representadas por modelos de grado cuatro.

El grado de coincidencia de la variable caudal mostrada en la figura (4.20) es de 89.16% y para el caso del nivel indicada en la figura (4.21) es de 97.09%.

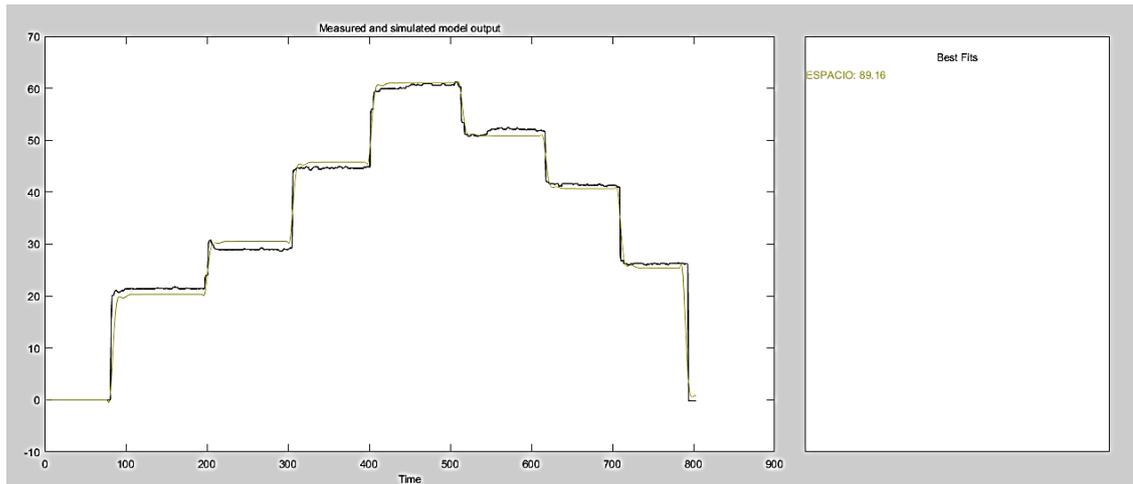


Figura 4.22. Validación del modelo en espacio de estados para caudal

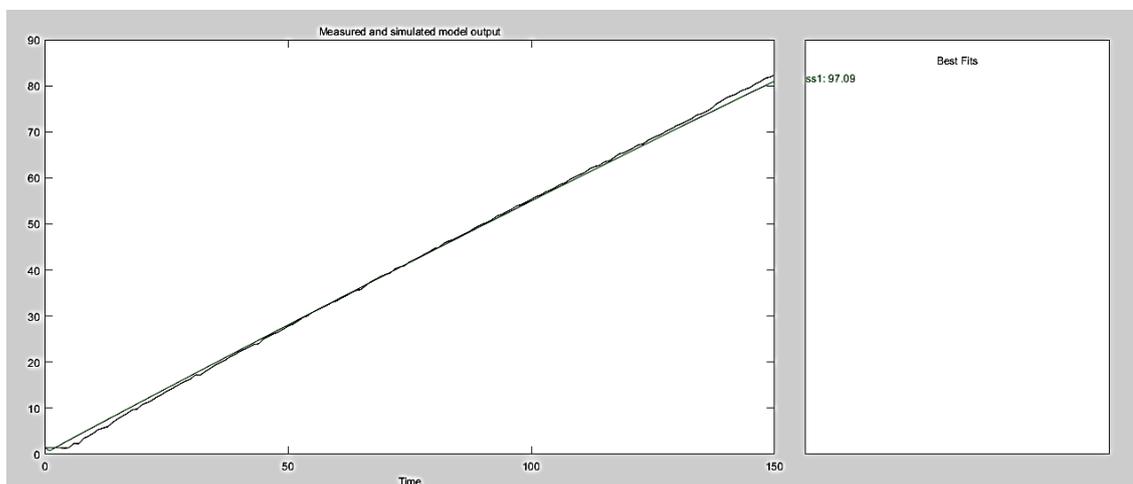


Figura 4.23. Validación del modelo en espacio de estados para nivel

4.5. DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA DE CONTROL

Según las características constructivas de la estación, esta impide realizar el control de las variables de nivel y caudal al mismo tiempo, de esta manera un sistema doble de simple entrada y salida resulta la solución más adecuada para los controles MPC y PID.

Previo al desarrollo de los controladores es necesario tener en cuenta la estructura de comunicación que se tendrá con la planta. Por lo que a continuación se describe este proceso.

4.5.1. Secuencia de comunicación

La figura 4.22 describe la secuencia de comunicación entre el software de diseño de los controladores y la planta. La primera etapa consiste en la adquisición de datos mediante el PLC, mismo que se encarga de enviar y recibir señales entre la planta y la computadora, esto se lleva a cabo mediante una comunicación Ethernet. Posteriormente mediante comunicación OPC se comparte datos desde la herramienta Simulink hacia el PLC y este a su vez con la planta.

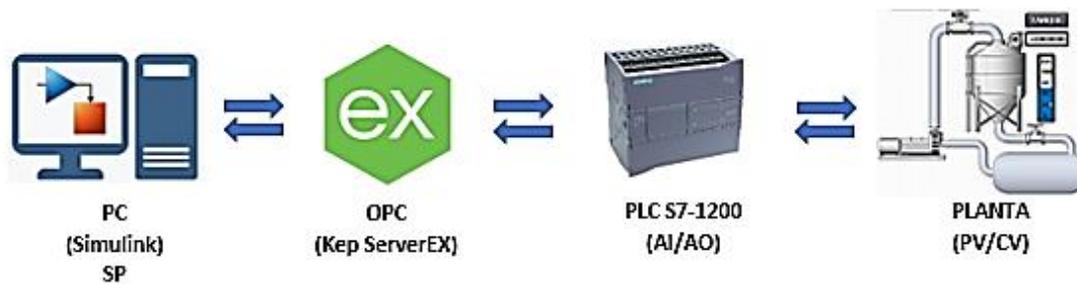


Figura 4.24. Comunicación entre planta y software de diseño

4.5.2. Programación de entradas y salidas analógicas en PLC

Inicialmente se establece una comunicación entre el PLC y la planta habilitando las entradas IW64 e IW66, por las cuales ingresan las señales provenientes de los sensores de nivel y caudal respectivamente. A demás se activa la salida QW80, la cual tiene la función de controlar el variador de frecuencia.

Es importante realizar el normalizado y escalado de estas señales.

- Entradas analógicas IW64 y IW66

Las entradas analógicas del PLC reciben las señales provenientes de los sensores en un rango de voltaje determinado, mismas que deben ser ajustadas en un bloque “NORM_X” a la resolución de la entrada analógica en bits, para posteriormente guardarlos en una memoria y enviarlos a un bloque “ESCALE_X”, donde se escala a un rango de voltaje de operación y finalmente su salida se guarda en otra memoria.

La tabla 4.6 muestra los rangos máximos y mínimos de operación de cada sensor con su correspondiente normalizado y escalado.

Tabla 4.7. Normalizado y escalado de entradas analógicas.

Variables	NORM_X (bits)		SCALE_X (V)	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Caudal	2764	9454	1	3.54
Nivel	2690	13820	1	5.02

En la figura 4.23 se muestra la estructura de conexión en TIA PORTAL de los bloques “NORM_X” y “SCALE_X” de las señales provenientes de los sensores de la planta.

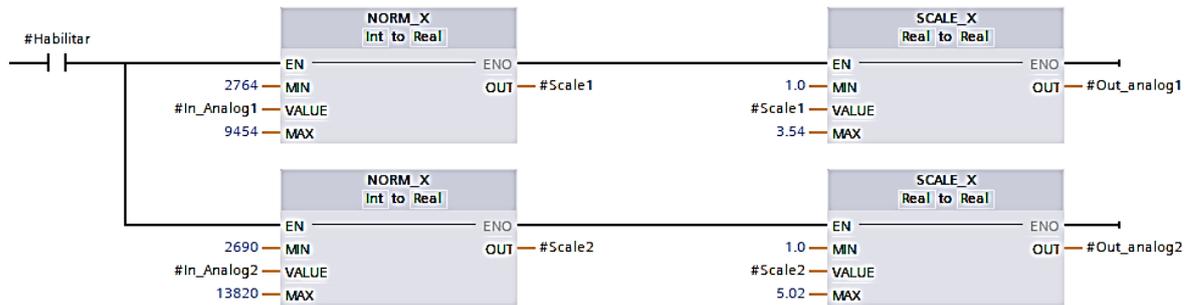


Figura 4.25. Programación de entradas analógicas en TIA Portal

- **Salida analógica QW80**

La salida analógica del PLC cumple la función de enviar la instrucción de control hacia el variador de frecuencia en un rango de operación de 1 a 10V y este a su vez hacia la bomba centrífuga. Así como para las entradas analógicas la señal de salida también requiere de un normalizado y escalado. Para este caso la señal proviene desde Simulink y su valor se almacena en la memoria MD80, luego su salida es almacenada en la memoria MD100 que es utilizada por el bloque “SCALE_X” para escalar a un rango de 0 a 27648 y ser enviada a la salida analógica QW80.

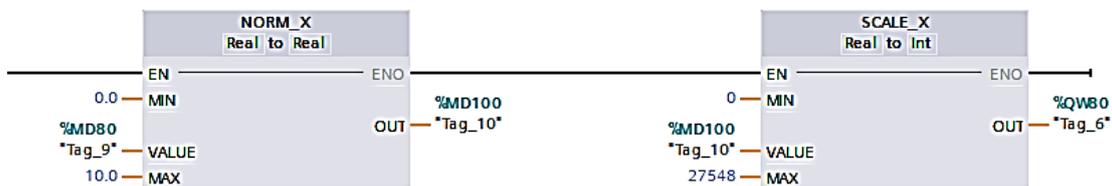


Figura 4.26. Programación de salida analógica en TIA Portal

Cuando se ha finalizado la programación en bloques para entradas y salidas analógicas, es necesario habilitar la opción PUG/GET en las configuraciones del PLC, que sirve para establecer la comunicación OPC con el software de diseño Simulink.

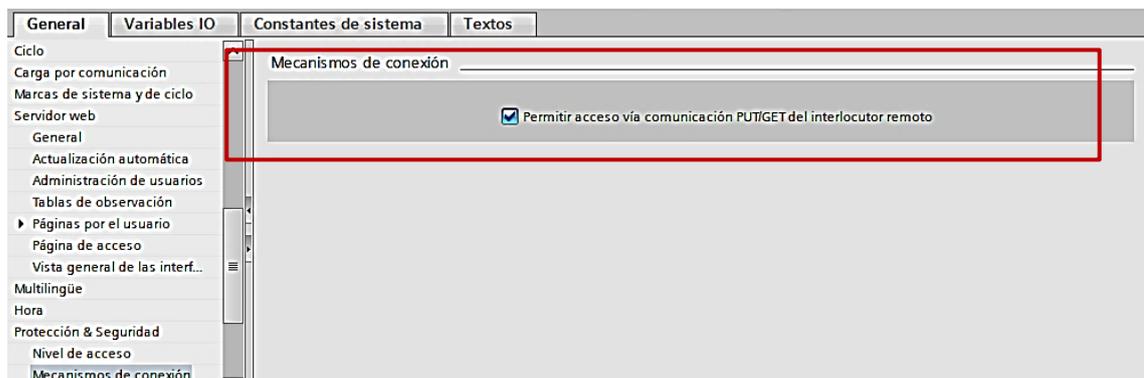


Figura 4.27. Configuración de acceso PUT/GET

4.5.3. Comunicación OPC en KepServerEX

El servidor KepServerEX a través de la tecnología OPC es utilizado para crear los canales de comunicación entre el PLC y la herramienta Simulink. Todo esto se logra a través de comunicación Ethernet, dirección IP y direcciones de las memorias configuradas en TIA Portal. En la figura 4.26 se muestra la ventana de configuración para canales, dispositivos y variables a utilizar.

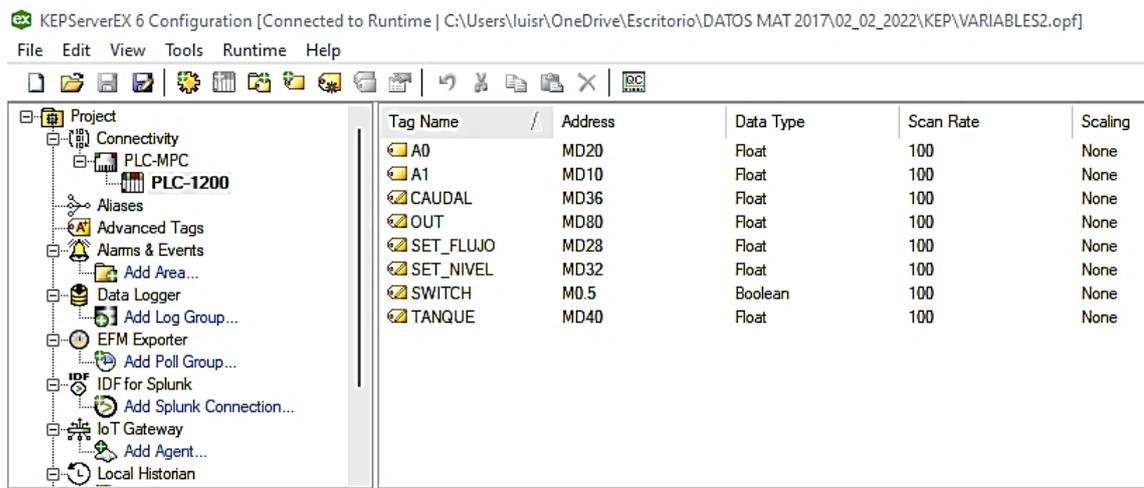


Figura 4.28. Ventana de configuración de KepServerEX

4.5.4. Configuración OPC en Simulink

La herramienta Simulink cuenta con un “toolbox” propio para la comunicación OPC, a continuación, se detalla el funcionamiento de cada uno de los bloques a utilizar:

- OPC Config: Permite trabajar con los datos del servidor OPC en tiempo real.
- OPC Read: Lee los datos provenientes de los sensores de caudal y nivel.
- OPC Write: Envía valores al variador de frecuencia.

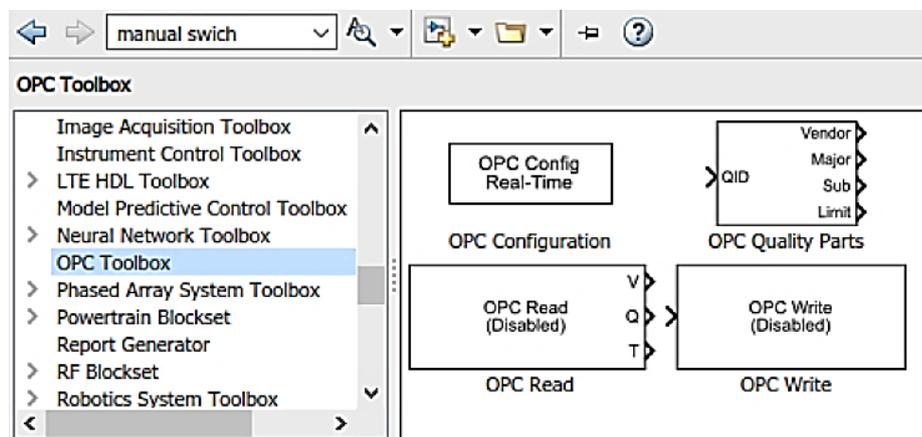


Figura 4.29. Simulink OPC Toolbox

4.5.5. Desarrollo del Control Predictivo en Simulink

La primera parte consiste en simular el Control Predictivo de la planta para cada una de las variables, como se muestra en la figura 4.28.

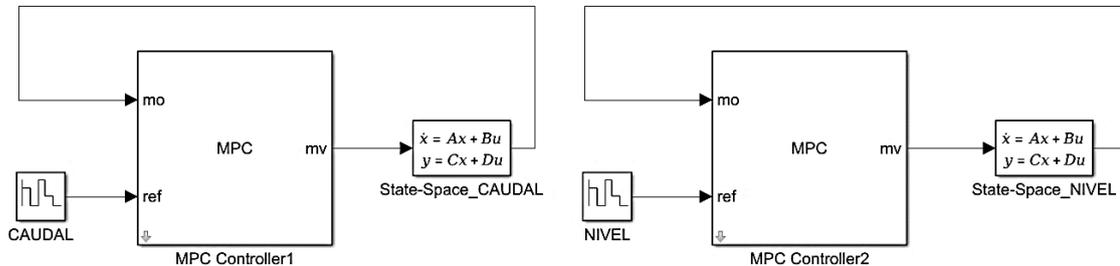


Figura 4.30. Estructuras de Control Predictivo para caudal y nivel

Los modelos matemáticos en espacio de estados que previamente han sido estimados se ubican dentro de los bloques “State Space” para representar a la planta. Una vez hecho esto se ocupa el bloque “MPC Controller” para determinar los modelos de predicción.

La ventana de diseño del “MPC Controller” que aparece en la figura 4.29 detalla la estructura para cada variable, es decir el número de entradas y salidas que tendrá cada control. A demás se define el tiempo de muestreo que para ambos casos es de un segundo.

Finalmente se selecciona “Define and Linearize” para obtener modelos no controlados de las señales de entrada.

Figura 4.31. MPC Designer

Cuando ya se hayan definido los modelos de planta no controlados, es necesario agregar las plantas a ser sintonizadas desde la opción “Import Plant”, las cuales a través de la pestaña de “Tuning” son ajustadas en mejora de respuestas óptimas a la planta.

Los valores de sintonía y simulación son analizados en el capítulo 5 del presente trabajo.

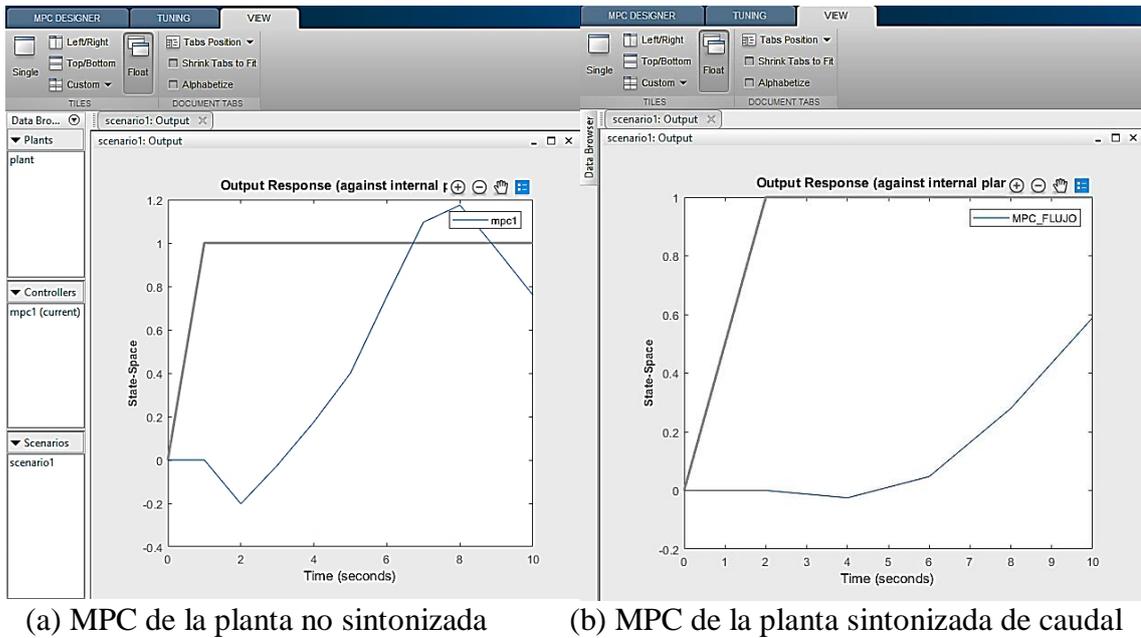


Figura 4.32. Ventanas de sintonización para el proceso de caudal

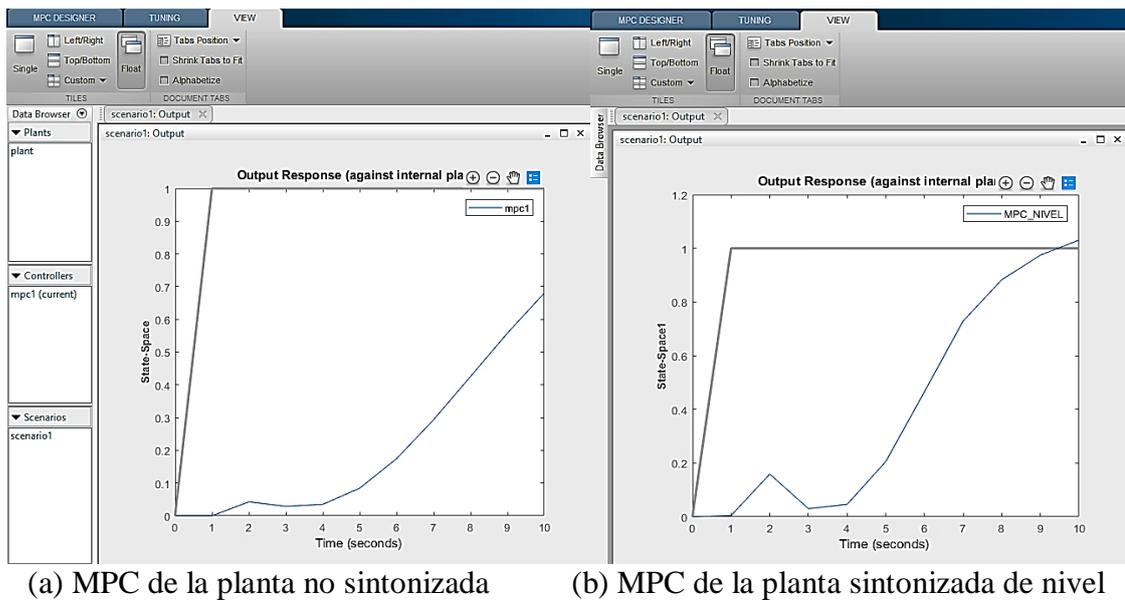


Figura 4.33. Ventanas de sintonización para el proceso de nivel

- **Programación en bloques para los MPC**

Una vez diseñadas y simuladas las plantas, se procede a guardar las estimaciones para ser usadas posteriormente en nuevas secuencias de programación, en donde serán cargadas para efectuar los controles de los datos reales de la planta. A continuación, se presentan las secuencias de control para cada variable de planta.

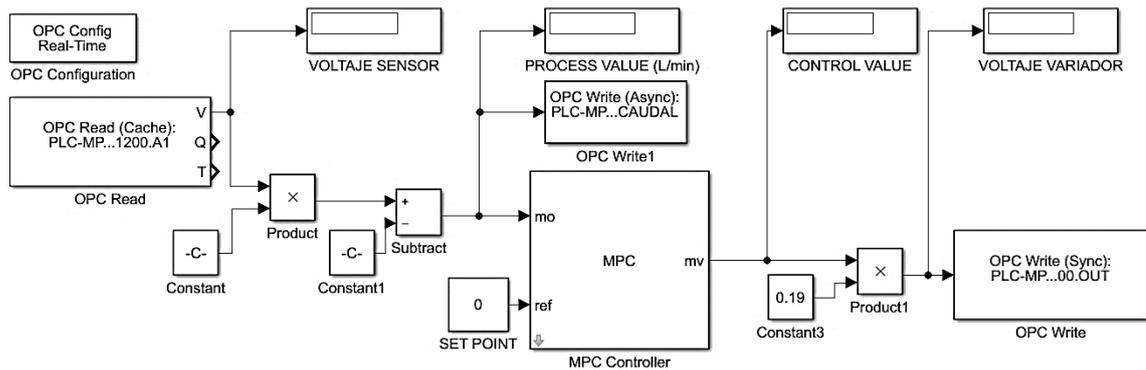


Figura 4.34. Programación en bloques para el MPC de caudal por comunicación OPC

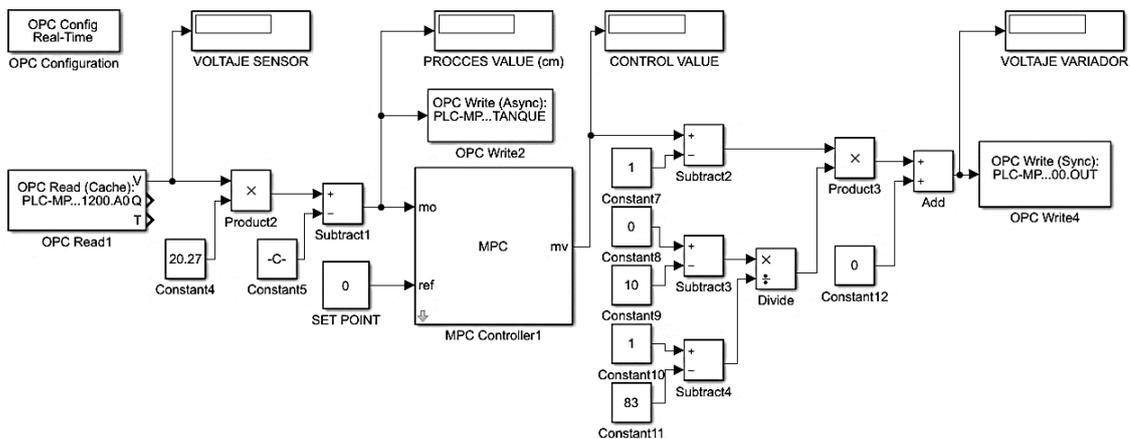


Figura 4.35. Programación en bloques para el MPC de nivel por comunicación OPC

La implementación de los controles MPC en la nueva secuencia de programación conlleva reemplazar cada uno de los bloques de espacio de estados por las lecturas reales de la planta, para tal efecto se utilizan los bloques de lectura y escritura OPC. Es así que sucede la comunicación entre la entrada y salida de la planta. Otros parámetros a tener en cuenta son los escalados de las señales provenientes de los sensores, que pasan de unidades de voltaje a unidades de caudal en L/min y nivel en cm, utilizando las ecuaciones 4.1 y 4.3 respectivamente. Todo esto con el fin de equiparar los valores de los SET POINTS ingresados tanto en L/min como en cm. Luego la señal de control que arroja el bloque MPC es escalado debido a que su

salida se encuentra en porcentaje y el valor que se envía al variador de frecuencia toma valores en una escala de 0 a 10V.

Para el caso del caudal la salida se multiplica por 0.19, y en el caso del nivel se utiliza un escalado en base a la fórmula del punto pendiente para tener la salida adecuada.

- **Estructura de programación con ambas variables**

Después de haber realizado el control MPC para cada una de las variables por separado el siguiente paso es realizarlo en un mismo espacio de programación, teniendo en cuenta que ambas salidas no pueden enviar datos al mismo tiempo al PLC. Para esto la solución más factible es colocar un “Switch” antes del bloque “Write” que comunica al variador de frecuencia. De esta manera es posible seleccionar el proceso a ejecutar.

En la imagen 4.33 se puede apreciar la estructura completa de programación MPC para ambas variables.

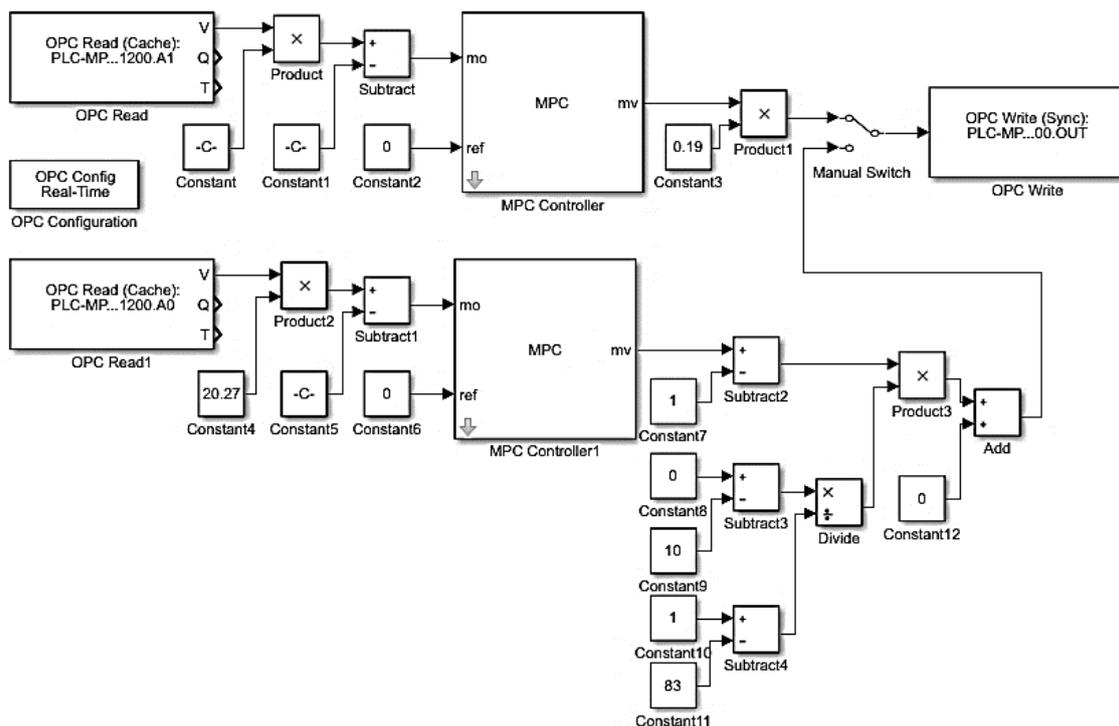


Figura 4.36. Estructura de programación MPC con dos variables.

4.5.6. Sistema SCADA del MPC

Para tener una mejor visualización y manipulación de cada proceso se recurre a implementar un sistema SCADA en un HMI, mismo que se configura en el software TIA Portal, para lo cual se ocupa la comunicación OPC ya antes establecida con el fin de manipular las consignas, y a la vez representar los datos de la planta en tiempo real.

En la figura 4.34 se representa la estructura de conexión para el SCADA.



Figura 4.37. Estructura de conexión para el SCADA

- **Modificación Simulink para el SCADA**

Para la realización del SCADA es necesario agregar bloques de lectura para los Set points y “Switch”, y de escritura para los datos de caudal y nivel.

Para el caso del “Switch” este se sustituye por uno de accionamiento booleano ya que el “Manual Switch” no permite la comunicación OPC.

En la figura 4.35 se aprecian los cambios realizados para la comunicación con el SCADA.

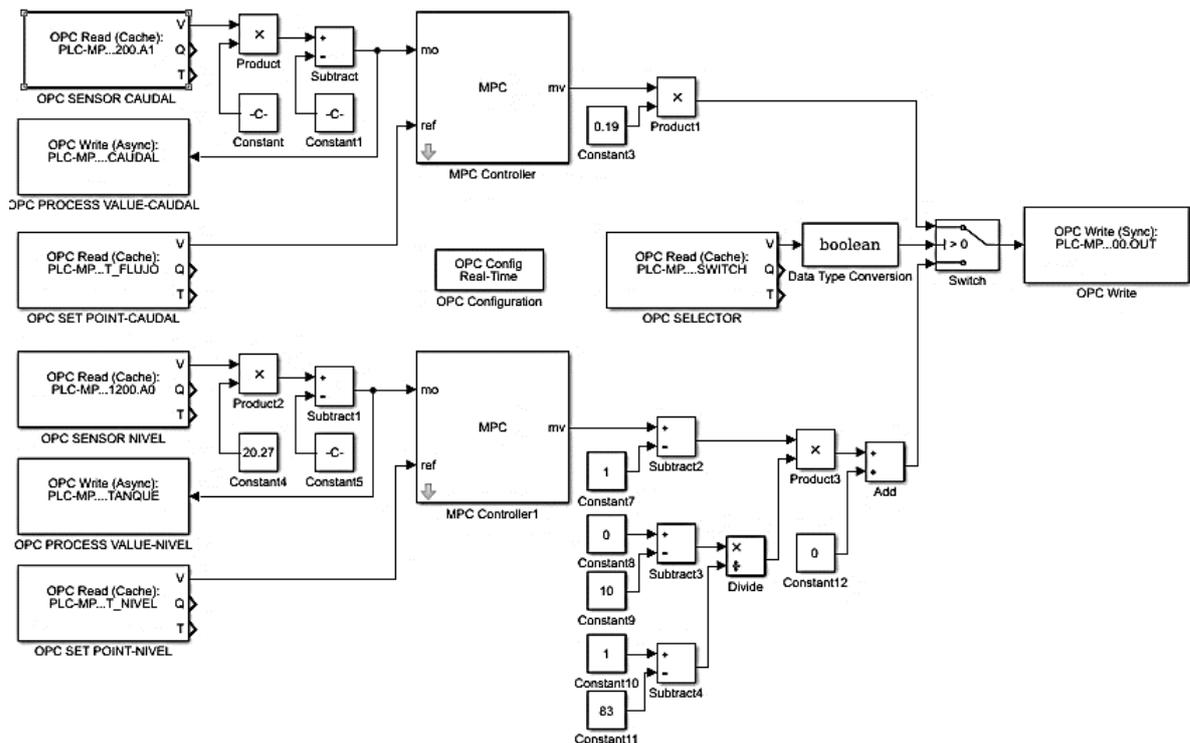


Figura 4.38. Programación en Simulink para la comunicación con el SCADA

- **Programación en TIA Portal para comunicación con SCADA**

La finalidad de la siguiente programación es almacenar los datos: para el caso de la programación (a) se utilizan las memorias MD14 y MD24 para almacenar y enviar los datos de los Set points fijados en el HMI del sistema SCADA. Para el caso (b) la programación se utiliza para guardar los datos en tiempo real de caudal y nivel en las memorias MD36 y MD40.

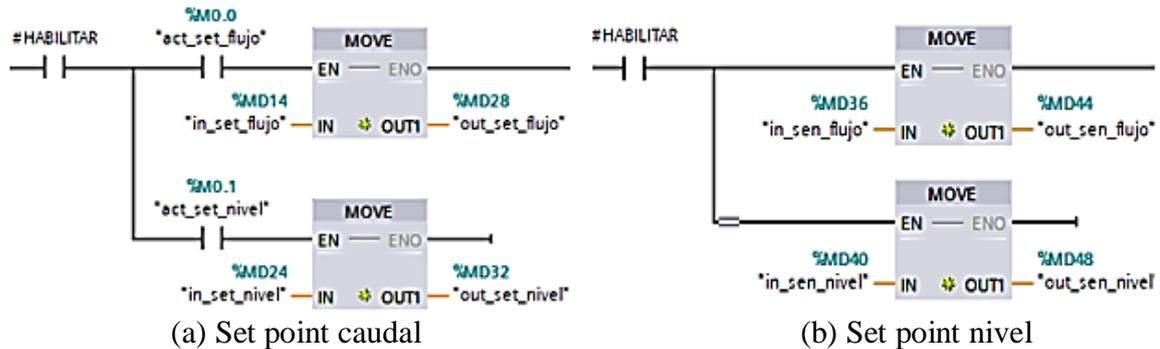


Figura 4.39. Programación para envío de Set points

- **Representación gráfica del MPC en HMI**

Una vez almacenadas las variables necesarias para visualización y control de los procesos el siguiente paso es crear la interfaz visual del SCADA en el HMI (figura 4.37). Lo primero es realizar una representación física de los elementos que conforman la planta: bomba centrífuga, tuberías, válvulas, tanques y sensores. Después se agregan indicadores a los sensores para llamar a las memorias MD36 y MD40.

Para la parte del control se agrega dos cuadros de entrada donde se digitan los valores de Set points para cada una de las variables, estos datos se guardan en las memorias MD28 y MD32 que posteriormente se envían a las referencias de los bloques MPC del Simulink, además se agregan dos botones que realizan la acción de confirmación del dato e inicio del proceso. Finalmente se configura un selector, mismo que envía una señal booleana al “Switch” del Simulink permitiendo realizar el cambio de variable de nivel a caudal y viceversa.

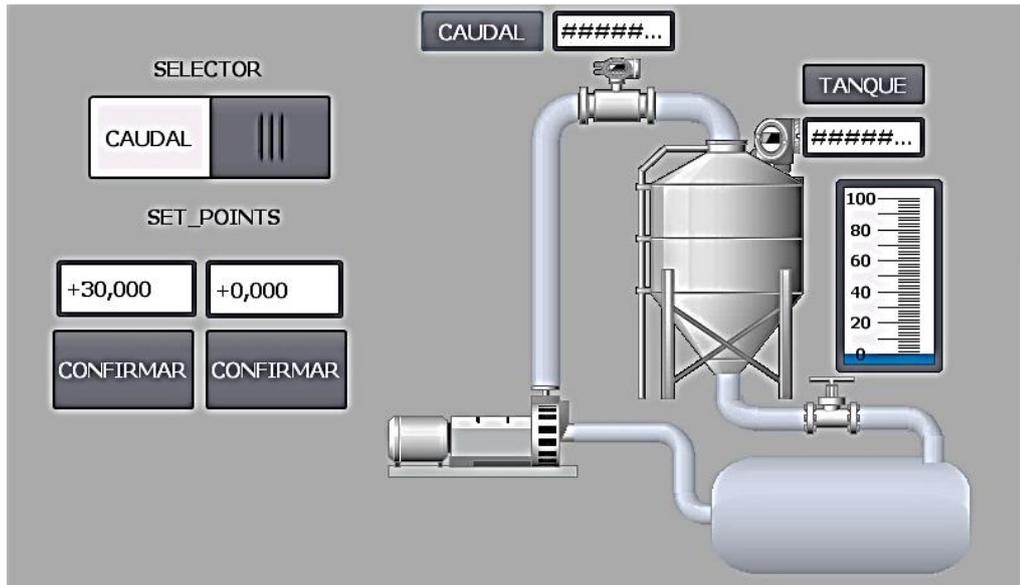


Figura 4.40. Interfaz visual del SCADA

4.5.7. Desarrollo de un PID en Simulink

La estructura utilizada para el diseño y simulación de un control PID se muestra en la figura 4.38 donde ya se ha ingresado los bloques representativos de la planta.

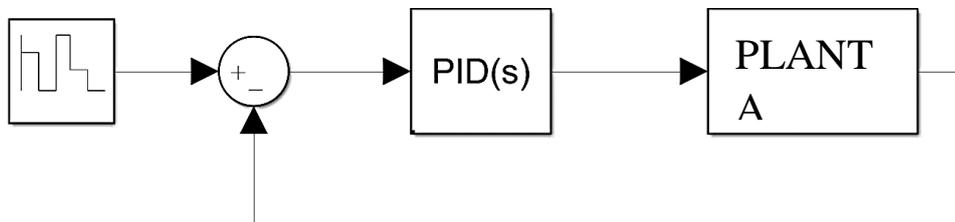


Figura 4.41. Estructura de diseño y simulación de un control PID

- **Programación en bloques para PID**

La estructura de programación para el controlador PID es similar a la utilizada en el MPC, aquí se reemplaza el bloque de modelo matemático por los bloques de lectura y escritura OPC, de la misma forma se escalan las señales de entrada y salida con las ecuaciones obtenidas anteriormente.

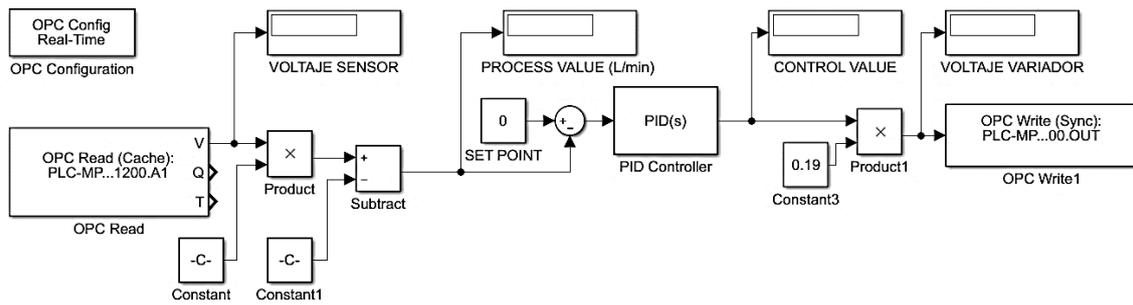


Figura 4.42. Estructura de programación control PID de caudal

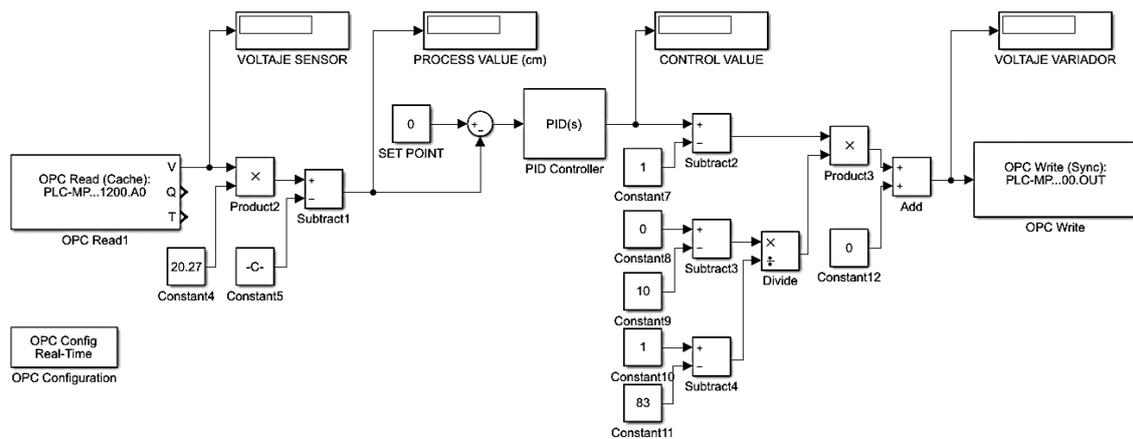


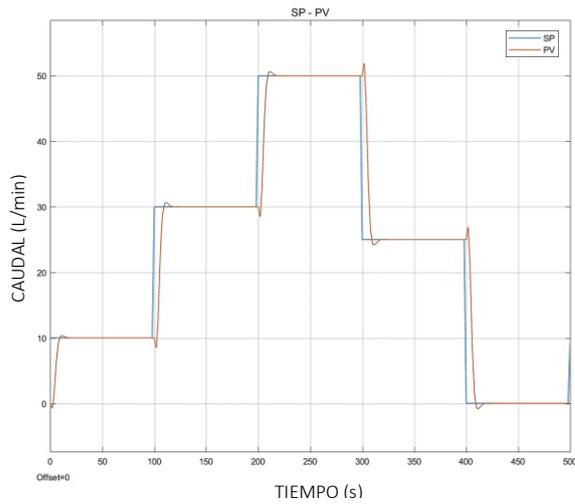
Figura 4.43. Estructura de programación PID de nivel

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

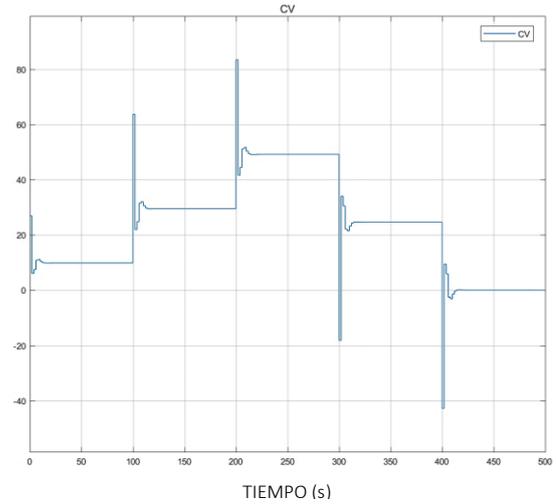
A continuación, se presentan los resultados alcanzados en la simulación e implementación del controlador MPC para la regulación de las variables de caudal y nivel. La evaluación de desempeño del controlador implementado, se lo ha realizado mediante la comparación con un controlador PID aplicado a las mismas variables. Para esto se ha utilizado una entrada escalón tanto en simulación como en la planta real, de esta manera se obtiene una señal de respuesta de tipo transitoria que depende del ancho del escalón que se fije para cada variable; ya sea en L/min o en cm. Para conseguir esto en todos los procesos se establece el mismo valor de Set point, y la diferencia es apreciable en los tiempos de respuesta.

5.1. SIMULACIÓN DEL CONTROL MPC

La simulación del Control Predictivo es realizada a partir de la estructura mostrada en la Figura 5.1 (a) para el caso del caudal y de la Figura 5.2 (b) para el caso del nivel, lo cual implica utilizar los parámetros predeterminados de la ventana de diseño que dan como resultado respuestas subamortiguadas en la variable de control y en consecuencia en la variable de proceso.

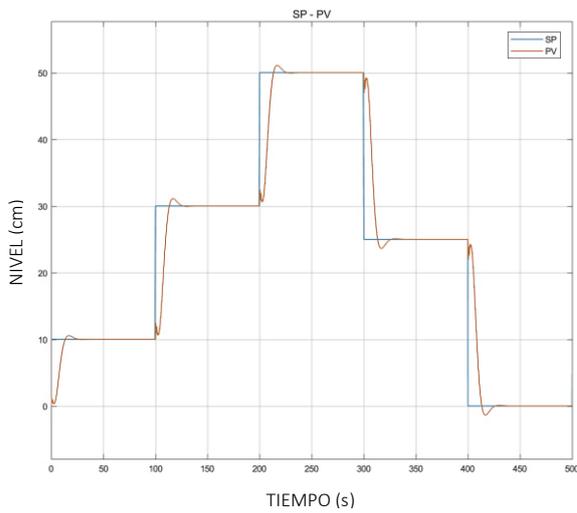


(a) Set point y PV

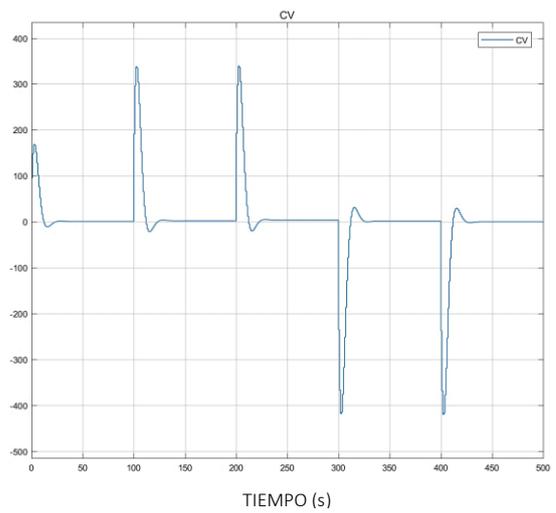


(b) CV

Figura 5.1. Respuesta del controlador MPC para caudal.



(a) Set point y PV



(b) CV

Figura 5.2. Respuesta del controlador MPC para nivel.

Con el propósito de obtener señales de respuesta ideales el controlador es ajustado a restricciones de la planta reales. Para lo cual es necesario realizar varias pruebas en búsqueda del punto de sintonización más apropiado entre el Horizonte de predicción (H_p), Horizonte de control (H_c) y la rapidez de cambio en la acción de control (D_u).

La tabla 5.1 presenta los resultados de sintonización para cada variable.

Tabla 5.1. Parámetros de sintonización para caudal

Hp	1
Hc	10
Du	$\pm\text{inf}$

Tabla .5.2. Parámetros de sintonización para nivel

Hp	1
Hc	10
Du	$\pm\text{inf}$

Los parámetros de sintonización del MPC de caudal y nivel se registran en las tablas 5.2 y 5.3 respectivamente; los cuales responden a valores de operación de la planta real, así como para las restricciones que impone la entrada (variador de frecuencia) con un rango de 0 a 63.40 (0 – 10V) para el caudal y con un rango de 1 a 83 (0 – 10V) para el nivel, además de las restricciones en las salidas (sensores de caudal y nivel) con rangos escalados para cada variable en unidades de L/min para caudal y cm para nivel.

Tabla 5.3. Parámetros de sintonía MPC para caudal

Factores		
Tiempo de muestreo	1	
Horizonte de predicción	30	
Horizonte de control	2	
Restricciones	Min	Max
Entrada	0	100
Salida	0	63.40
Cambio en la señal de control	-1	1
Pesos		
Entrada	0	
Salida	1	

Tabla 5.4. Parámetros de sintonía MPC para nivel

Factores	
Tiempo de muestreo	1
Horizonte de predicción	30
Horizonte de control	2

Restricciones	Min	Max
Entrada	-inf	100
Salida	1	83
Cambio en la señal de control	-5	+5
Pesos		
Entrada	0.1	
Salida	1	

En las Figuras 5.3 y 5.4 se representan las gráficas de sintonización resultantes de las simulaciones del control MPC para las variables de caudal y nivel, las cuales utilizan los parámetros de sintonización de la Tablas 5.2 y 5.3 respectivamente. De esta manera se consiguen obtener comportamientos estables al no presentarse sobre impulsos ni oscilaciones.

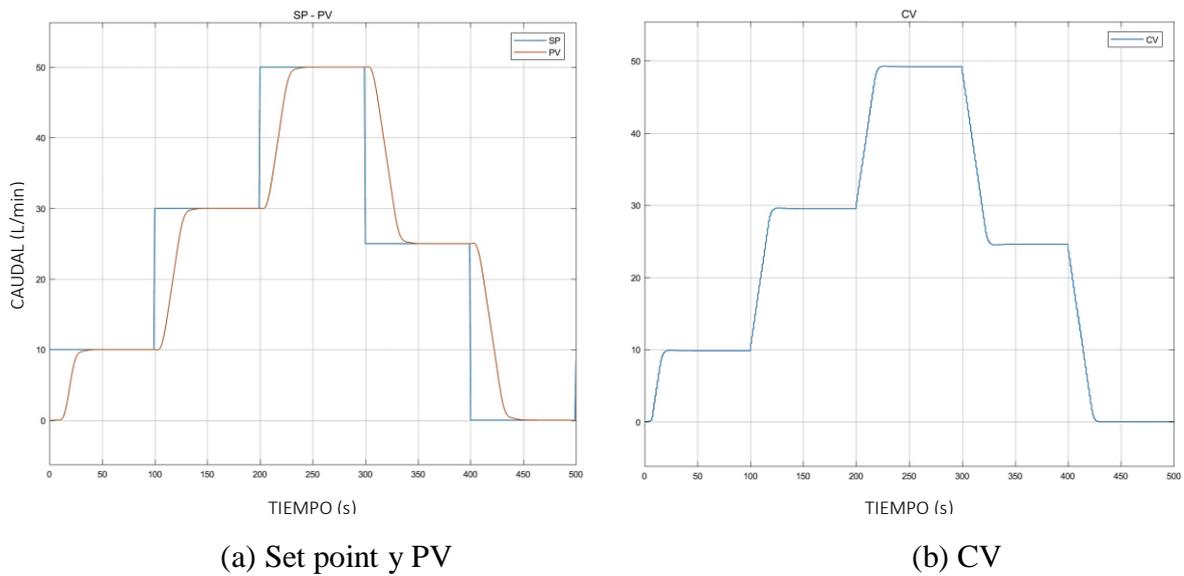
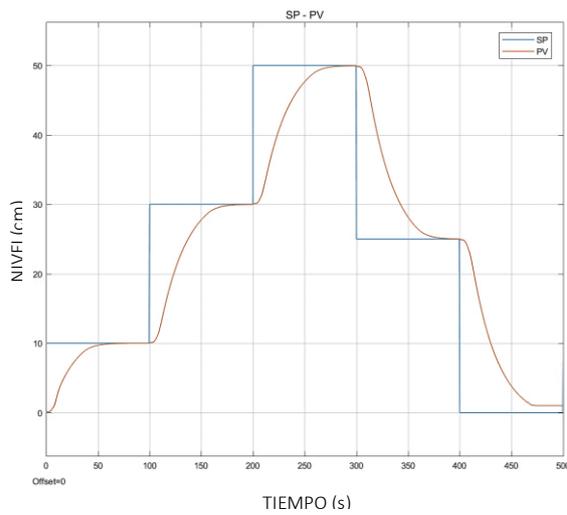
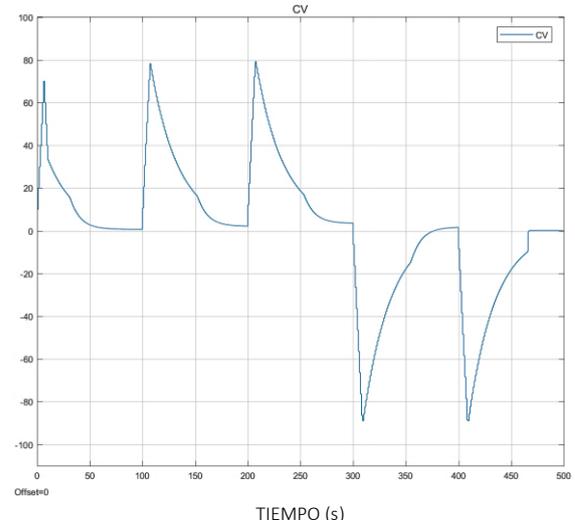


Figura 5.3. Simulación del control MPC para caudal



(a) Set point y PV

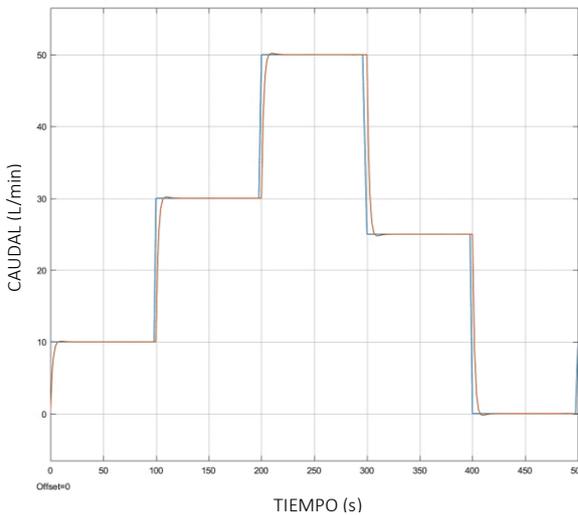


(b) CV

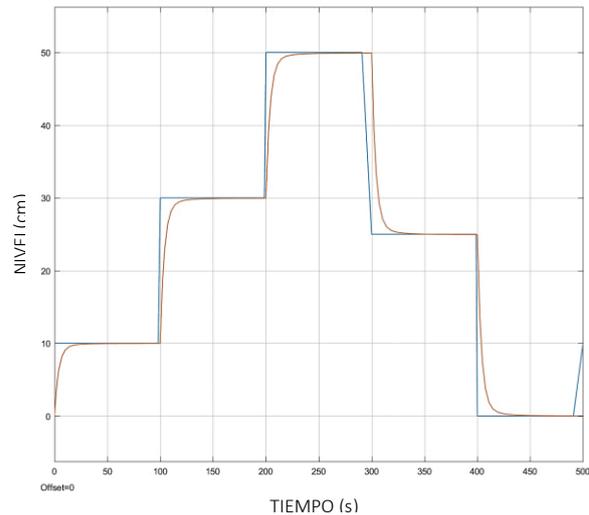
Figura 5.4. Simulación del control MPC para nivel

5.2. SIMULACIÓN DEL CONTROL PID

De la misma manera que con el control MPC, el control PID para cada variable también es simulado utilizando la herramienta Simulink, obteniendo como respuestas las gráficas de la Figura 5.5, las cuales comprenden una sintonía robusta tanto para caudal como para nivel.



(a) Simulación PID para caudal



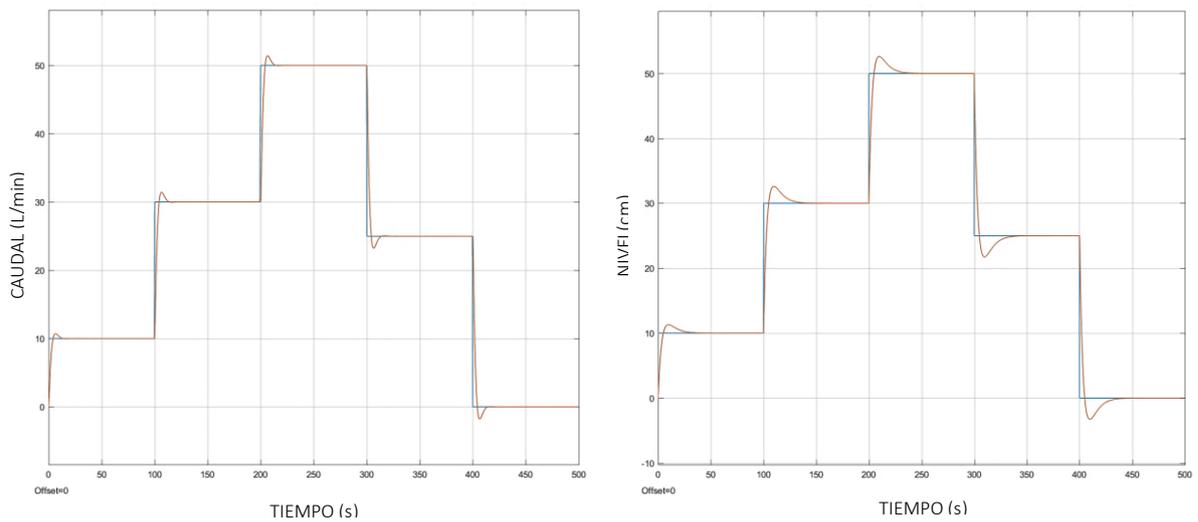
(b) Simulación PID para nivel

Figura 5.5. Sintonización robusta del control PID para caudal.

Tabla 5.5. Parámetros de sintonización

Parámetros	Caudal	Nivel
K	0.38412	37.10606
Ti	0.57696	0.00763
Tp	1.66674	1.5467

Para obtener una comparación que exponga mejor las diferencias entre simulaciones se presenta a continuación la Figura 5.6 que implica para ambas variables una sintonía agresiva.



(a) Simulación PID para caudal

(b) Simulación PID para nivel

Figura 5.6. Sintonización agresiva del control PID para caudal

Tabla 5.6. Parámetros de sintonización

Parámetros	Caudal	Nivel
K	0.38412	25.10333
Ti	0.57696	0.00665
Tp	1.66674	1.3379

Para los dos casos de sintonía se obtienen respuestas estables al no presentarse sobre impulsos ni oscilaciones importantes o indeseadas que perturben la constancia de las variables de proceso en el tiempo.

5.3. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS CONTROLES MPC Y PID SIMULADOS

Como propósito de validación el control MPC es comparado con el control PID, teniendo en cuenta que este último es de sintonía agresiva ya que por su desempeño difiere ligeramente con respecto al MPC.

5.3.1. Tiempo de asentamiento

En el caso del caudal el tiempo de asentamiento para un escalón de 10L/min es de aproximadamente 30 segundos para el caso del MPC y de 12 segundos para el PID.

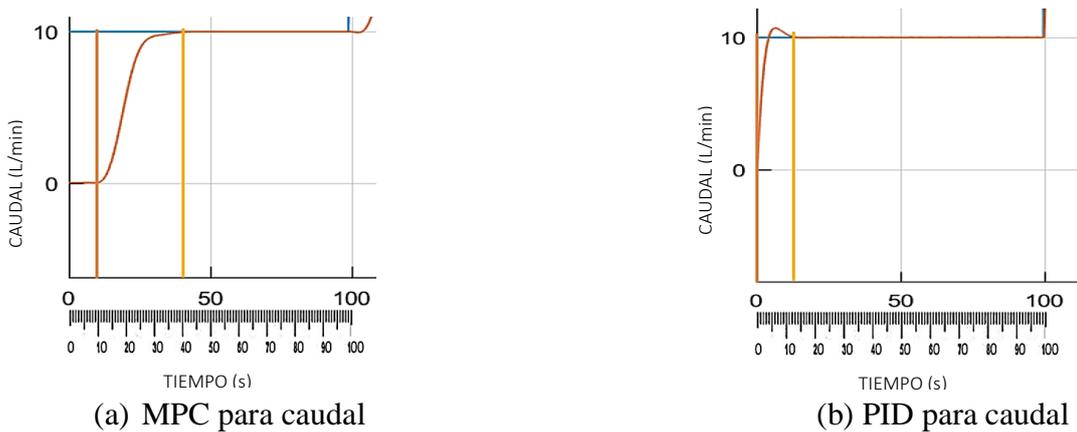


Figura 5.7. Respuesta PV con control MPC y respuesta PV con control PID.

Para el caso del nivel el tiempo de asentamiento es de 70 segundos para una entrada escalón de 10cm en el caso del MPC y en caso del PID el tiempo es de aproximadamente 35 segundos.

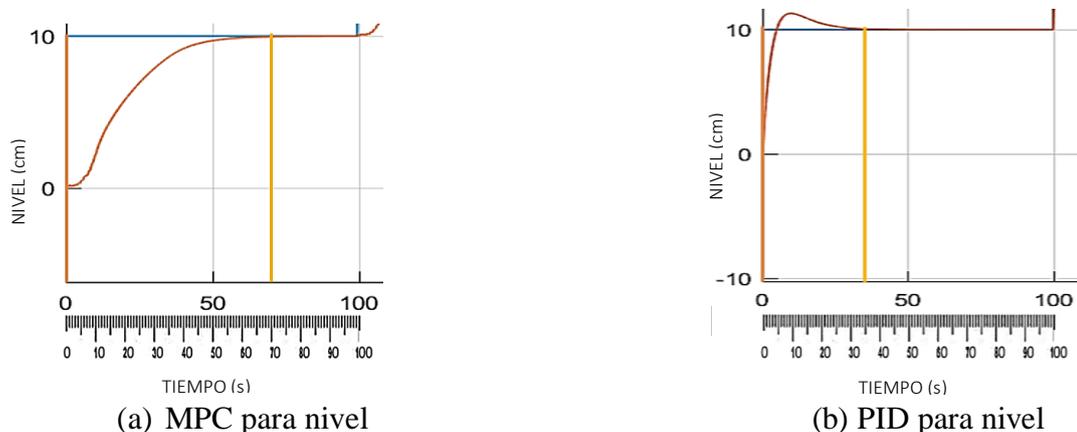


Figura 5.8. Respuesta PV con control MPC y respuesta PV con control PID.

Para las dos variables que utilizaron el control MPC se puede notar un tiempo de estabilización más lento debido a que la aproximación a la consigna es más suave, mientras que para el control de las variables mediante el uso del PID se presenta un pequeño sobre impulso que provoca aproximarse al punto de consigna de forma más rápida.

5.3.2. Sobre impulso

Para el control PID existe un mínimo sobre impulso que para la variable de caudal en términos de porcentaje es de 1.5%, y para la variable de nivel es de 1.2% si bien en el PID se puede evidenciar un pequeño sobre impulso, este no representa un efecto de perturbación en la señal; por lo que se considera que las variables alcanzan el punto de consigna y logran una estabilidad casi inmediata.

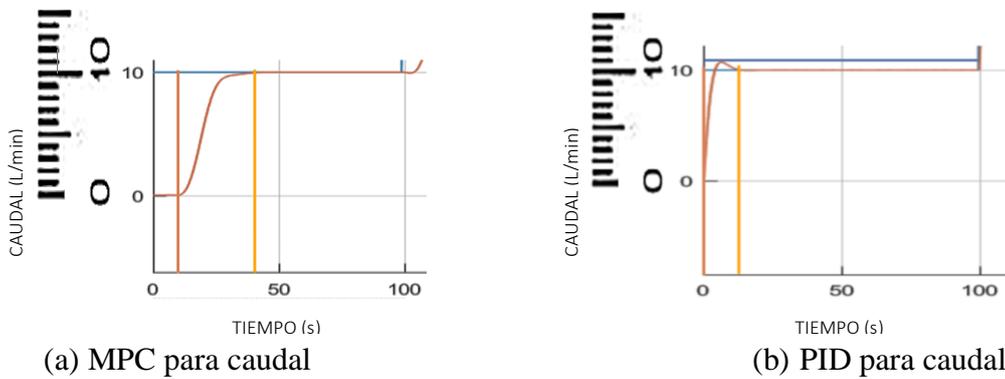


Figura 5.9. Respuesta al sobre impulso con control MPC y PID.

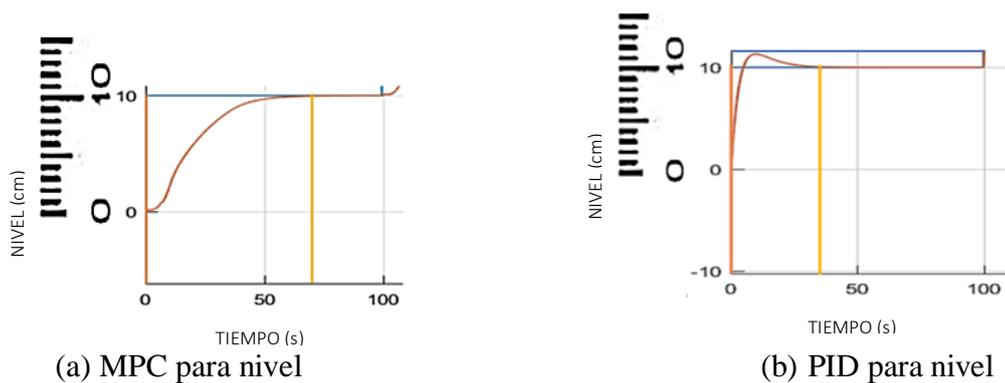


Figura 5.10. Respuesta al sobre impulso con control MPC y PID.

5.3.3. Estabilidad

La Figura 5.9 y la Figura 5.10 denotan que, para ambos controladores, y una vez alcanzados los puntos de consigna, cada variable, ya sea caudal o nivel logra estabilizarse sin presentar oscilaciones ni perturbaciones importantes.

Las tablas 5.6 y 5.7 resumen los aspectos anteriormente evaluados para las señales de respuesta de cada variable, tomando en cuenta el tipo de controlador; bien sea MPC o PID.

Tabla 5.7. Resumen comparativo entre los controles MPC y PID para la variable de caudal

Set point	10L/min	
Factor	MPC	PID
Tiempo de asentamiento (s)	30	12
Sobre impulso (%)	0	1.5
Estabilidad	Totalmente estable	Totalmente estable

Tabla 5.8. Resumen comparativo entre los controles MPC y PID para la variable de nivel

Set point	10cm	
Factor	MPC	PID
Tiempo de asentamiento (s)	70	35
Sobre impulso (%)	0	1.2
Estabilidad	Totalmente estable	Totalmente estable

5.4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES

Las respuestas del MPC y PID ya implementados en el módulo didáctico para cada variable son evaluadas ante entradas escalón teniendo como valores de prueba los siguientes puntos de consigna: 20, 30, 55 y 40. Estos valores se encuentran considerados tanto en unidades de L/min para caudal como en cm para nivel.

5.4.1. Implementación del control MPC

En la Figura 5.11 y la Figura 5.12 se pueden apreciar las respuestas obtenidas para el control de cada variable, en las cuales se aplica la estrategia de Control Predictivo. Para el proceso de caudal el comportamiento de la variable de proceso (color azul) muestra un pico elevado en su inicio debido a las características del sensor el cual tiene una lectura errónea en el rango de 0 a 28L/min aproximadamente. De esta manera hasta que la variable de proceso no supere el límite de la zona de inestabilidad el sensor no entregará lecturas reales del caudal que circula por el sistema.

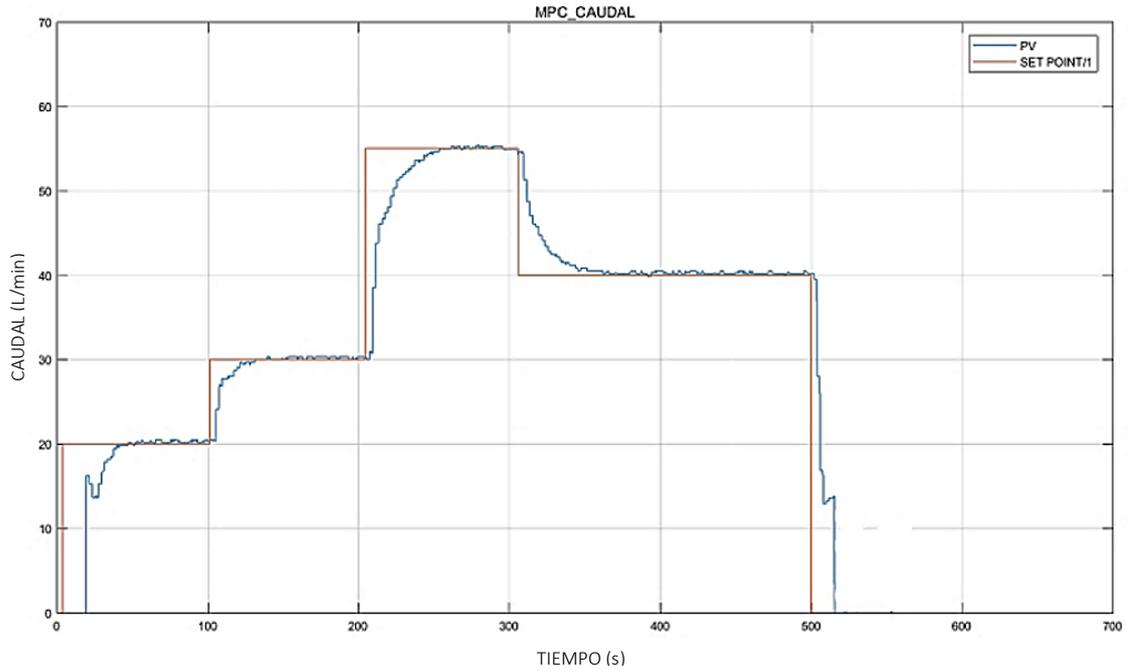


Figura 5.11. Respuesta del control MPC implementado al proceso de caudal

La Figura 5.12 muestra el comportamiento de la variable de proceso de nivel, así se puede observar unos picos mínimos y errores importantes en el punto de consigna de 55cm debido a que el sensor tiene una baja capacidad de lectura en puntos superiores a 40cm, por lo que se presenta errores que provocan desestabilizar el control, de todas maneras, estos errores al tener períodos muy cortos de alteración no afectan por completo la estabilidad del proceso.

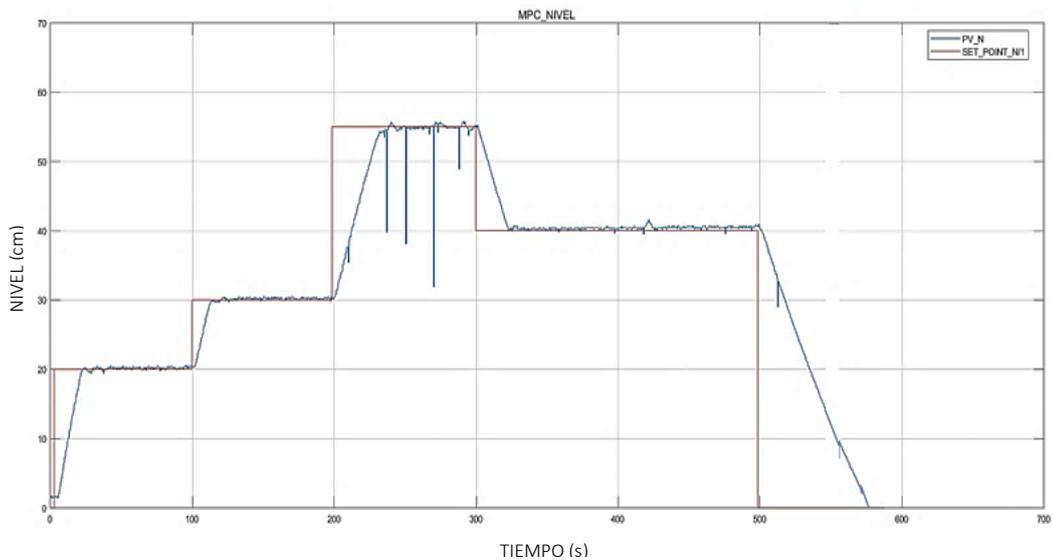


Figura 5.12. Respuesta del control MPC implementado al proceso de nivel

5.4.2. Implementación del control PID

La Figura 5.13 evidencia la respuesta del proceso de caudal a partir de la implementación de un control PID, y ante la entrada de una respuesta más agresiva que para el control MPC, aunque no lo suficiente como para llegar a presentar sobre impulsos.

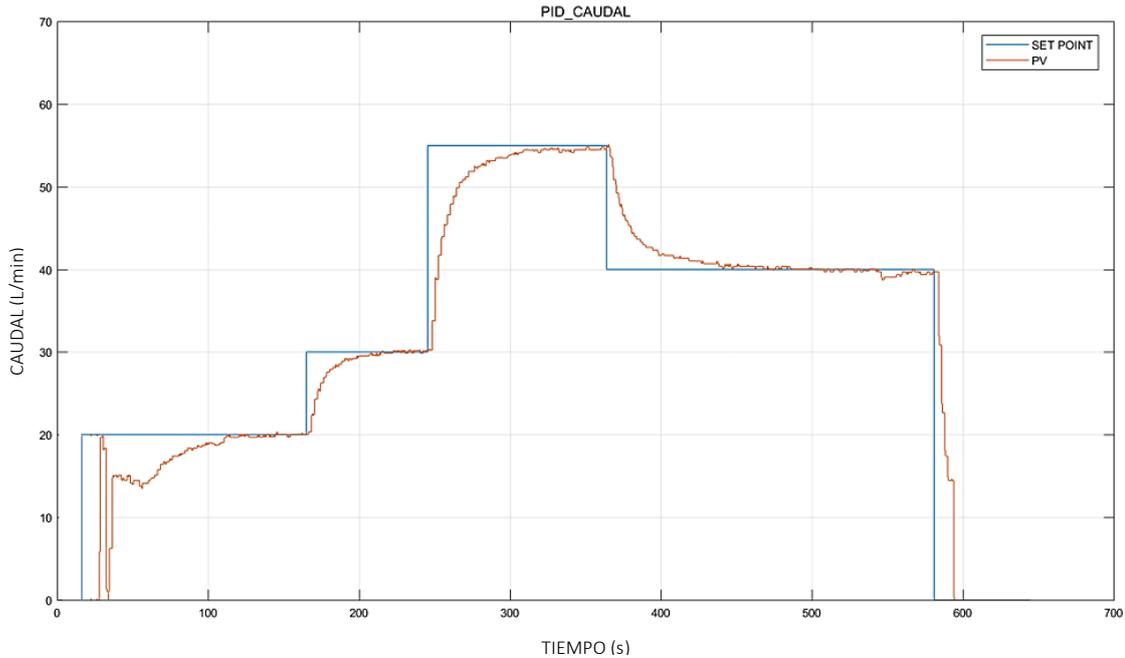


Figura 5.13. Respuesta del control PID implementado al proceso de caudal

La Figura 5.14 en cambio muestra la señal de respuesta para nivel obtenida a partir de una sintonización agresiva que da como resultado una variable de proceso más ruidosa que no depende únicamente del sensor, sino también del control utilizado, ya que este no es capaz de predecir con antelación disturbios generados dentro del tanque por el desembolso de agua al reservorio y por el constante envío de caudal, los cuales generan olas que afectan la estabilidad de este control.

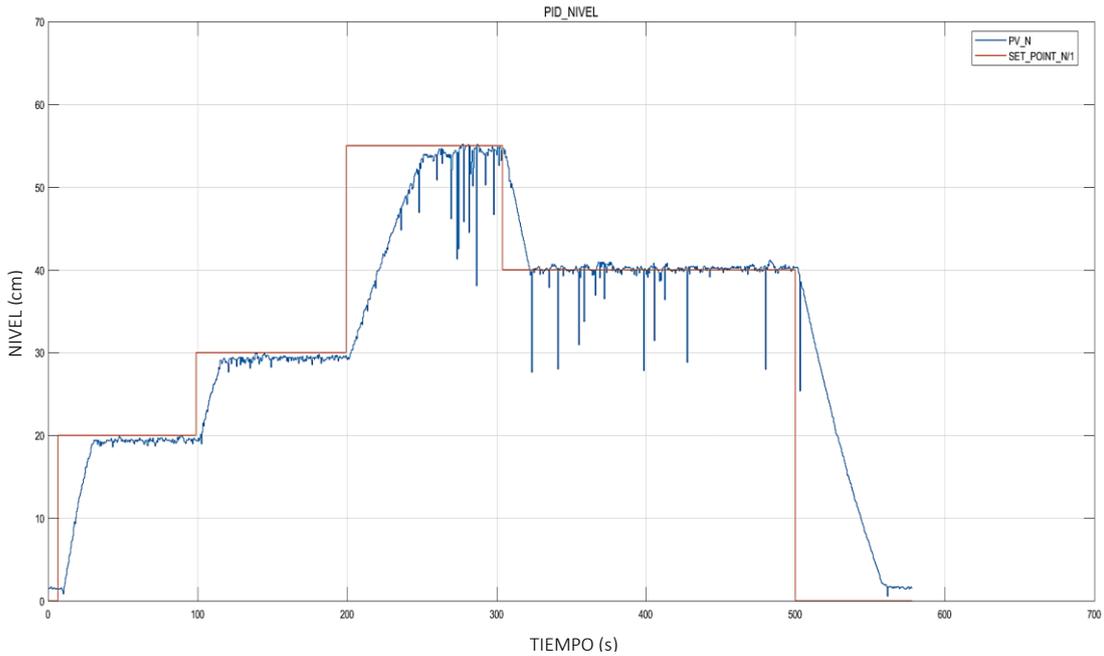


Figura 5.14. Respuesta del control PID implementado al proceso de nivel

5.4.3. Análisis comparativo entre el control MPC y PID implementados

- **Sobre Impulso**

Del mismo modo que en las simulaciones los sobre impulsos en los controladores ya implementados son prácticamente nulos. Este hecho se interpreta en un indicador positivo para validar la sintonización de ambos controladores.

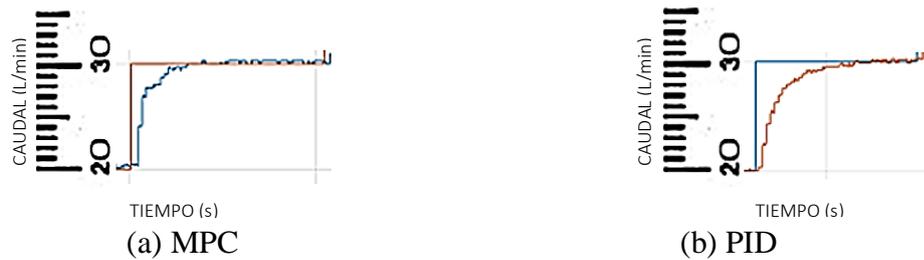


Figura 5.15. Respuesta al sobre impulso con control MPC y control PID para caudal



Figura 5.16. Respuesta al sobre impulso con control MPC y control PID para nivel

- **Tiempo de retardo (Td)**

El tiempo necesario para que la variable de caudal logre la mitad del valor final es de 15 segundos para el control MPC y de 18 segundos para el PID, reflejando una diferencia mínima de 2 segundos entre los controles.

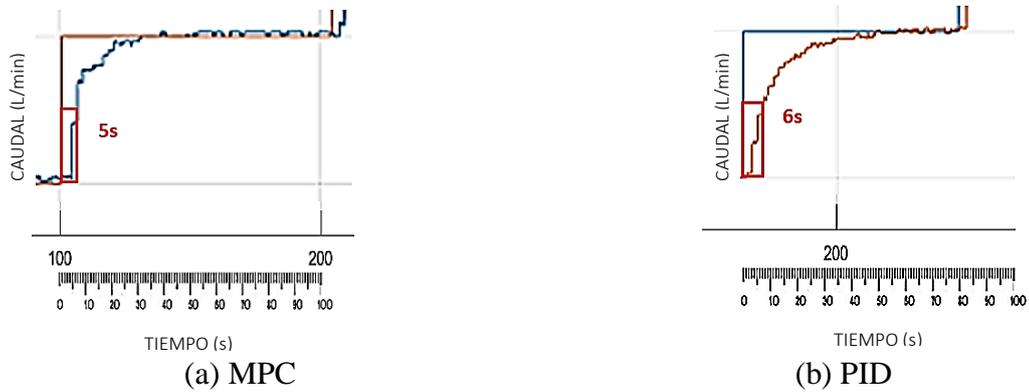


Figura 5.17. Tiempo de retardo entre el control MPC y PID para caudal

Para el proceso de nivel se puede apreciar un tiempo de 7 segundos en la aplicación del control MPC y un tiempo de 8 segundos para el control PID.

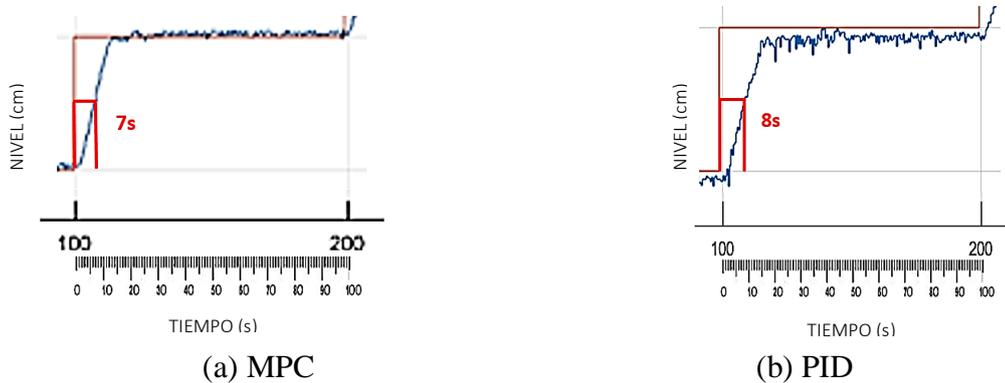


Figura 5.18. Tiempo de retardo entre el control MPC y PID para nivel.

Para el proceso de nivel se puede apreciar un tiempo de 7 segundos en la aplicación del control MPC y un tiempo de 8 segundos para el control PID.

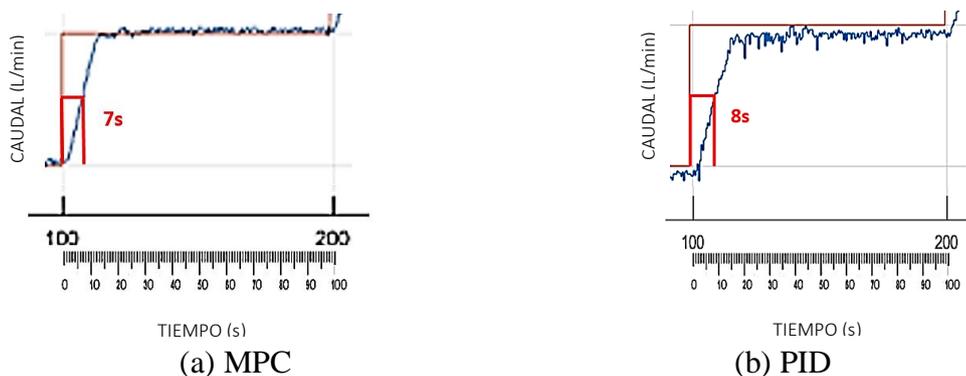


Figura 5.19. Tiempo de retardo en el control MPC y PID para caudal

- **Tiempo de asentamiento (T_s)**

En el análisis con respecto al tiempo que le toma a la variable de proceso alcanzar el punto de referencia para un escalón de 30L/min, el método de control MPC tarda aproximadamente 20 segundos y para el método de control mediante PID el tiempo es de 20 segundos. Luego para el proceso de nivel las gráficas muestran un tiempo para el caso del MPC de 20 segundos y para el PID un tiempo de 20 segundos.

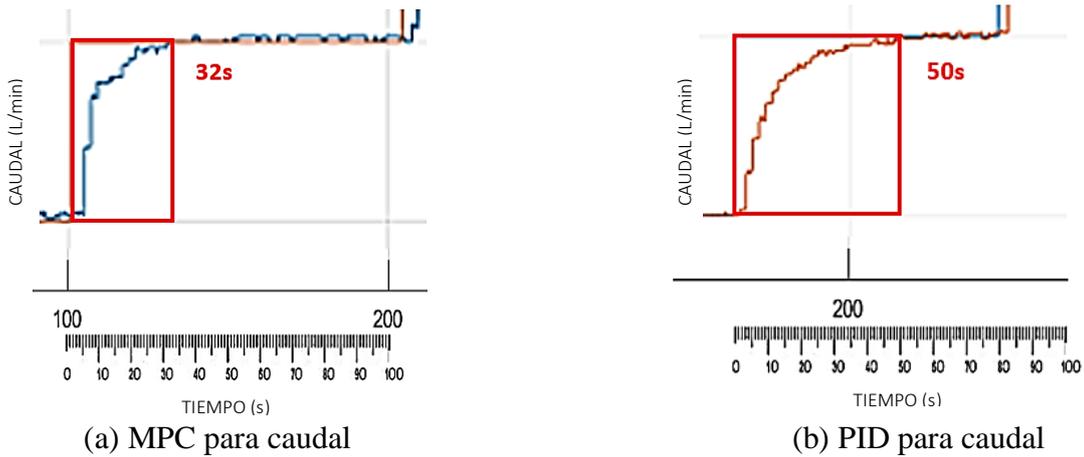


Figura 5.20. Tiempo de asentamiento en el control MPC y PID para caudal

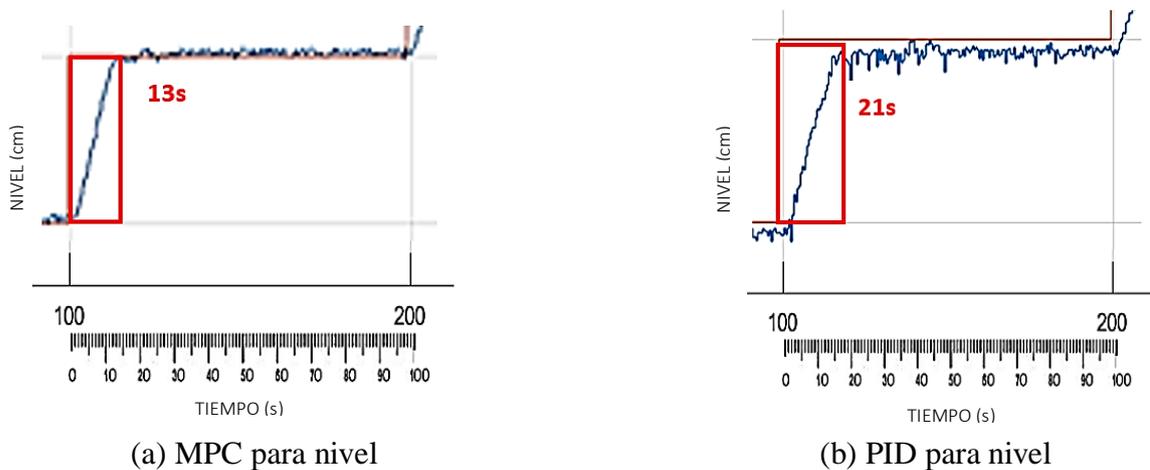


Figura 5.21. Tiempo de asentamiento en el control MPC y PID para nivel

- **Tiempo de levantamiento (T_r)**

En la comparación del tiempo de levantamiento se refleja notoriamente la sintonía que posee cada variable de proceso en su parte transitoria, que para el caso del caudal mediante el control MPC se presenta un tiempo de 20 segundos mientras que en el caso del PID el tiempo es de 20 segundos, a continuación también se presentan los tiempos de levantamiento para la variable de nivel, que para el control MPC es de 20 segundos y para el control PID es de 20 segundos,

reflejando así una diferencia en las señales transitorias para cada proceso, debido a que la variable de nivel muestra una función rampa.

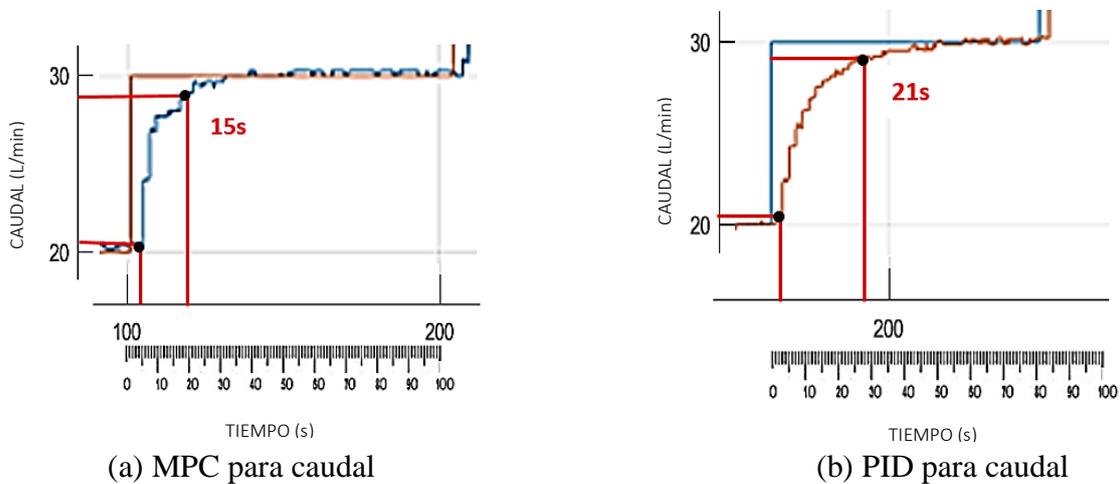


Figura 5.22. Tiempo de levantamiento en el control MPC y PID para caudal

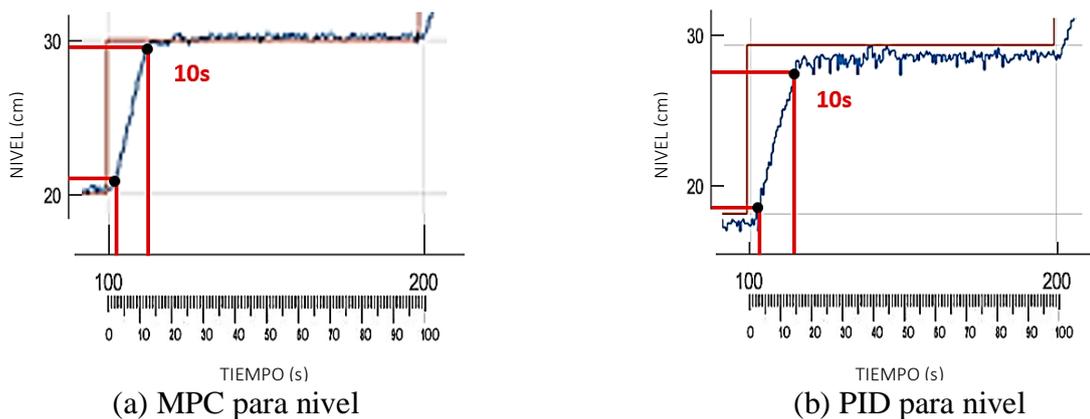


Figura 5.23. Tiempo de asentamiento en el control MPC y PID para nivel.

- **Estabilidad**

En cuanto al comportamiento de las variables en términos de estabilidad y oscilaciones es apropiado llevar a cabo este análisis teniendo en cuenta las curvas de las variables de proceso, ya que en estas se evidencia el estado estacionario y permanente de cada una. Con respecto a las perturbaciones que en el caso del nivel es más notorio, estas se presentan principalmente por dos factores que influyen directamente en la estabilidad del proceso: el primero es el sensor que no precisa lecturas claras en cualquier punto del proceso, y el segundo factor es el tipo de control utilizado ya que para el caso del PID este es incapaz de predecir perturbaciones no conocidas en el sistema.

- **Set point: 30L/min**

En este punto de operación medio, y una vez alcanzado el estado permanente la variable se mantiene estable para ambos controladores.



Figura 5.24. Comparación de los controladores MPC y PID a 30L/min

- **Set point: 30cm**

En el rango de operación de 30cm existe una diferencia en los controles ya que la metodología PID aplicada en este caso es de tipo robusta.

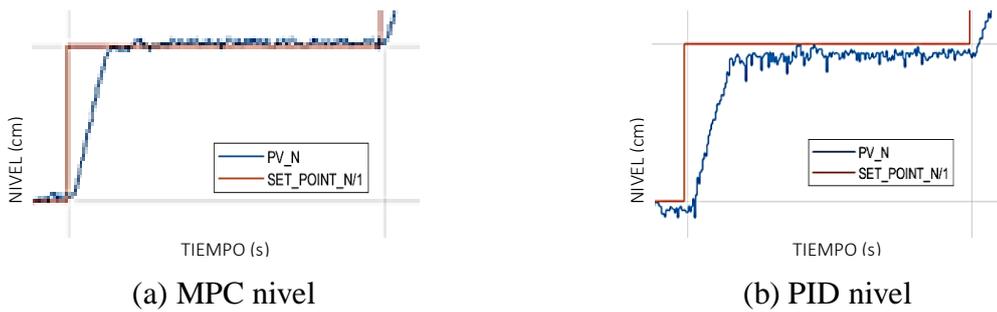


Figura 5.25. Comparación de los controladores MPC y PID a 30cm

- **Set point: 55L/min**

Para el rango de 55L/min no existe ninguna perturbación que altere la continuidad de la variable de caudal en estado estacionario y permanente para ambos controladores.

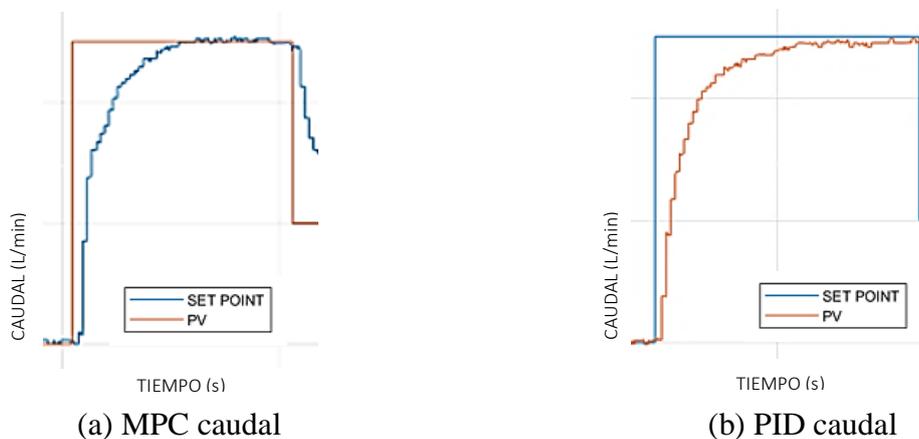


Figura 5.26. Comparación de los controladores MPC y PID a 55L/min

- **Set point: 55cm**

La variable de proceso en este instante de nivel y utilizando el control MPC se comporta de forma adecuada a pesar de los errores en las lecturas del sensor, esto debido a la capacidad del control para adecuarse a situaciones inestables, en cambio con el uso del controlador PID se puede evidenciar que este es incapaz de adecuarse mejor a situaciones adversas, lo que causa disturbios en esta variable.

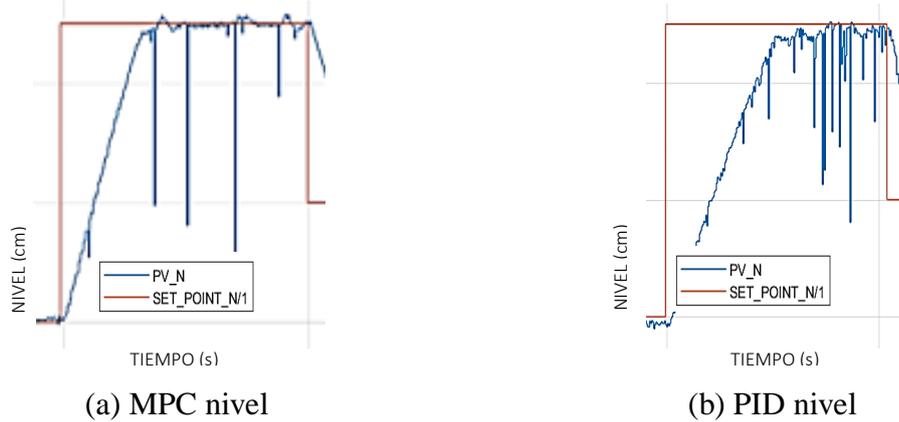


Figura 5.27. Comparación de los controladores MPC y PID a 55cm

5.4.4. Resumen del análisis comparativo

La tabla 5.9 y la tabla 5.10 exponen un resumen comparativo de los parámetros de desempeño antes analizados entre los controladores MPC y PID para la regulación de las variables de caudal y nivel.

Tabla 5.9. Resumen de parámetros evaluados para caudal

Variable evaluada		Caudal	
Parámetros evaluados	Set point (L/min)	MPC	PID
Sobre impulso (%)	20 – 30	0	0
	30 – 55	0	0
	55 – 40	1,57	0
Tiempo de retardo (s)	20 – 30	20	25
	30 – 55	5	6
	55 – 40	5	5
Tiempo de asentamiento (s)	20 – 30	35	110
	30 – 55	32	50
	55 – 40	50	62

Tiempo de levantamiento (s)	20 – 30	17	70
	30 – 55	15	21
	55 – 40	19	35
Estabilidad	20 – 30	Totalmente estable	Totalmente estable
	30 – 55	Totalmente estable	Totalmente estable
	55 – 40	Totalmente estable	Totalmente estable

Tabla 5.10. Resumen de parámetros evaluados para nivel.

Variable evaluada		Nivel	
Parámetros evaluados	Set point (L/min)	MPC	PID
Sobre impulso (%)	20 – 30	0	0
	30 – 55	0	0
	55 – 40	1,20	0
Tiempo de retardo (s)	20 – 30	10	20
	30 – 55	7	8
	55 – 40	20	25
Tiempo de asentamiento (s)	20 – 30	25	26
	30 – 55	13	21
	55 – 40	32	44
Tiempo de levantamiento (s)	20 – 30	13	14
	30 – 55	10	10
	55 – 40	17	22
Estabilidad	20 – 30	Totalmente estable	Totalmente estable
	30 – 55	Totalmente estable	Parcialmente estable
	55 – 40	Parcialmente estable	Parcialmente estable

6. PRESUPUESTO Y ANALISIS DE IMPACTO

6.1. PRESUPUESTO

En esta sección de la propuesta tecnológica se detalla el aspecto económico del desarrollo e implementación del módulo de Control Predictivo para la planta de caudal.

Tabla 6.1. Materiales y suministros

Materiales y suministros	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Terminales de conexión	12	0.05	0.60
Cable Flexible #10 AWG	30	0.5	15.00
Taype	1	0.50	0.50
Plugs Banana	25	0.10	2.50
TOTAL			\$ 18.60

Tabla 6.2. Equipos para uso directo del proyecto

Equipos para uso directo del proyecto	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Módulo didáctico	1	1119.04	1119.04
PLC S7-1200	1	400.00	400.00
Módulo de salidas analógicas	1	120.00	120.00
Variador de frecuencia iG5-A	1	446.00	446.00
Fuente de voltaje	1	75.00	75.00
Ordenador	1	900.00	900.00
TOTAL			\$ 3060.04

En la tabla anterior se muestran los valores de diferentes componentes como: el módulo didáctico, el variador de frecuencia y la fuente de voltaje que son propiedad del Laboratorio de Automatización y Control de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

El resto de equipos han sido obtenidos para la realización de la propuesta tecnológica.

Tabla 6.3. Gastos Indirectos y Profesionales

Gastos Indirectos y Profesionales	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Mano de obra	-	-	350.00
Transporte	-	-	10.00
Otros gastos	-	-	30.00
TOTAL			\$ 390.00

6.2. ANÁLISIS DE IMPACTO

6.2.1. Impacto práctico

El Control Predictivo busca solventar de manera efectiva problemas de control y automatización del proceso de nivel y caudal de una planta de caudal que tiene como característica un comportamiento dinámico de caudal complicado en un sistema desequilibrado. La implementación de un módulo de Control Predictivo permitirá el monitoreo y manipulación de dos variables de tipo industrial lo que facilitará al operario de la planta de caudal identificar la gestión de control mejor orientada al proceso debido a que las variables se encuentran monitoreadas en tiempo real.

6.2.2. Impacto tecnológico

La utilización de un controlador programable resulta el medio para suplir las necesidades de la planta y del operario, ya que este se apoya en un modelo matemático, para la configuración de la planta.

Basar el funcionamiento del sistema de control en un principio intuitivo y al tener en cuenta que los parámetros de diseño están encaminados al desempeño de la planta, el resultado en función al aprendizaje o entendimiento del operario con respecto al proceso ocurre en un período de tiempo corto incluso cuando se tenga pocos conocimientos en el área de control.

Al tener que controlar un proceso de comportamiento dinámico inestable, el control MPC muestra una mejor adaptabilidad que un control PID ya que es capaz de controlar el tiempo pico en un período mínimo, lo que lo hace más eficiente.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Una parte fundamental del controlador predictivo es el modelo matemático del proceso a controlar, por lo tanto, la estimación del mismo representa la parte central del procedimiento, ya que el grado de coincidencia entre el proceso real y el estimado influye de manera considerable en los resultados finales del controlador, pudiendo mejorarse notablemente o incluso perjudicar las respuestas de cada proceso frente a otros tipos de controles más simples.
- Aún cuando existen varios parámetros con los cuales se ajusta cada controlador predictivo de acuerdo a sus necesidades, los principales son: el horizonte de control, horizonte de predicción y el tiempo de muestreo; ya que con estos se es capaz de sintonizar cada modelo de proceso. De esta manera se sabe que al momento de disminuir el intervalo de control disminuye también el tiempo de establecimiento provocando una acción brusca que puede ocasionar oscilaciones en la variable de proceso.
- Las simulaciones resultan muy convenientes para entender el funcionamiento de cada control, de esta forma se torna más cómodo efectuar pruebas de cada proceso modelado y entender cada uno de los parámetros que componen los controladores antes de proceder a implementarlos en las plantas reales. De esta manera se comprobó que los resultados de los controles simulados con respecto a las respuestas reales de cada proceso son similares, y varían de acuerdo al grado de la coincidencia entre cada modelo real y estimado.
- El control predictivo representa una gran ayuda al momento de su implementación ya que permite añadir restricciones que son capaces de disminuir los costos de inversión en hardware sin embargo requiere un alto costo computacional.
- Teniendo en cuenta los parámetros evaluados a través de la comparación de los dos controladores se obtuvieron los siguientes resultados que denotan el funcionamiento óptimo del Control Predictivo. en cuanto a Sobre impulso tanto para el proceso de caudal como para nivel se presenta un mínimo sobre impulso de 1.57% y 1.20% respectivamente, mientras que para el control PID el sobre impulso no existe, sin embargo, en tiempos de retardo, asentamiento y levantamiento los tiempos conseguidos revelan una ventaja en el dominio de las variables por parte del Control Predictivo llegando a obtener una diferencia de tiempos que van desde 1s a 75s para el caso del caudal y una diferencia de 1s a 12s para el caso del nivel.

7.2. RECOMENDACIONES

- Dimensionar correctamente los límites de trabajo para cada proceso, así como los rangos de lectura de cada sensor, debido a que un funcionamiento del sistema o acción de control fuera de las restricciones establecidas en el MPC podría llevar a un mal comportamiento del mismo y provocar salidas inestables.
- La estimación del modelo matemático para cada proceso resulta una parte muy importante dentro del control MPC, por ende, se recomienda culminar esta etapa con los mejores resultados posibles, realizando las revisiones y correcciones necesarias antes de proceder con la siguiente fase de simulación e implementación.
- Las compilaciones necesarias para cada programa utilizado requieren de un tiempo prolongado, incluso si los cambios realizados son mínimos, por lo tanto, se pide realizar una estructura de programación sencilla y estable, que de ser posible no exija cambios notables a futuro, ya que los procedimientos que se crean requieren de una serie de pasos para la actualización constante de cada controlador.
- Al implementar cualquier tipo de controlador sobre el módulo didáctico del laboratorio de automatización y control es aconsejable evitar los límites superiores e inferiores de cada proceso, debido a que en el caso del caudal el sensor entrega señales estables a partir de valores superiores a 20L/min y en el límite superior la lectura varía a partir de 60L/min, de la misma manera el sensor de nivel por sus características y por interferencia de las perturbaciones que genera el llenado y desfogue de agua del tanque muestra un límite operación mínimo de 10cm, y un límite de operación máximo de 83cm.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. F. & B. C. Camacho, *Control predictivo: Pasado, presente y futuro*, vol. I, 2004, pp. 5-28.
- [2] S. KozákS, "De PID a MPC: desarrollo y aplicaciones de métodos de ingeniería de control," *Cybernetics & Informatics (K&I)*, 2016.
- [3] E. Lopera and D. Mejía, *Implementación de un Control Predictivo Basado en Modelo Aplicado a un Sistema de Control de Caudal de Agua Didáctico*, 2010, pp. 109-130.
- [4] w. zhang and m. yang, "Comparación de métodos de autoajuste de controladores PID basados en modelos y datos de circuito cerrado," *Conferencia de control china*, 2014.
- [5] X. Z. Y. J. y. E. G. L. Jiayu, "Análisis de un sistema de control automático basado en controladores lineales y controlador MPC," *Conferencia internacional sobre ingeniería, aplicaciones y fabricación industriales (ICIEAM)*, 2020.
- [6] D. d. I. d. s. y. automática, "Análisis de la respuesta temporal de sistemas LTI," [Online]. Available: http://mapir.isa.uma.es/varevalo/teaching/automatica/pdfs/Tema%2004%20-%20Respuesta%20Temporal%20con%20Routh%20v2_vicente.pdf.
- [7] M. A. Perez, A. P. Hidalgo and E. P. Berenguer, *INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE CONTROL*, San Juan, Argentina: Departamento de Electrónica, 2007.
- [8] C. V. Miranda, *Sistemas de control continuos y discretos*, Paraninfo, 2012.
- [9] S. A. Castaño Giraldo, "Control Automatico Educación," 2019. [Online]. Available: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/sistemas-dinamicos-de-primer-orden/>.
- [10] CARAKENIO73, "dademuchconnection," 7 Mayo 2020. [Online].
- [11] U. d. P. Vasco and E. H. Unibertsitatea, "eCampus," [Online]. Available: https://ocw.ehu.eus/file.php/83/cap6_html/capitulo-6.html#s643. [Accessed 20 Junio 2021].
- [12] I. E. Néstor, "Introducción a la instrumentaci," [Online]. Available: <https://es.scribd.com/doc/48240383/instrumentacion-sensores-transmisor-y-transductor>.

- [13] A. C. Smith, *Control automático de procesos*, Limusa, 1997.
- [14] K. Ogata, *Sistemas de control en tiempo discreto*, Editorial Prentice Hall.
- [15] T. Alvarez, "Señales y sistemas," 2019. [Online]. Available: https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2013/512/46642/1/Doc .
- [16] C. Prado, "Tecno Recursos," [Online]. Available: <https://www.picuino.com/es/control-pid.html>.
- [17] H. Mendiburu, "Control predictivo," [Online]. Available: <http://www.ilustrados.com/tema/9320/Introduccion-control-predictivo.html> .
- [18] "BSG Institute," 2020. [Online]. Available: <https://bsginstitute.com/bs-campus/white-paper/Control-Predictivo-Basado-en-Modelo-MPC-1190>.
- [19] V. C. Alvarado, *Puesta en marcha de herramienta de control DMC en una planta de laboratorio*, Sevilla, 2005.
- [20] E. L. y. M. Diego, "Implementación de un Control Predictivo Basado en Modelo Aplicado a un Sistema de Control de Caudal de Agua Didáctico," *Instituto Tecnológico Metropolitano*, 2010.
- [21] J. C. O. Semino, "DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO BASADO EN MODELO PARA PLATAFORMA INDUSTRIAL,," *Universidad de Piura*, 2016.
- [22] D. F. Sendoya, "¿Qué es el Control Predictivo y Hacia dónde se proyecta?," *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 2012.
- [23] M. F. Montaña Ortega and H. I. Reyes Sierra, *MODELAMIENTO Y CONTROL DIGITAL DE TEMPERATURA PARA HORNO ELECTRICO*, Bogotá, 2010.
- [24] xylem, "Goulds Water Technology," Septiembre 2021. [Online]. Available: <https://goulds.com/>. [Accessed 19 Febrero 2022].
- [25] V. G. López Caisaguano and A. D. Paredes Anchatipán, *Diseño e implementación de un algoritmo de control predictivo para una planta de flujo utilizando un controlador de*

automatización programable para el Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Latacunga, 2015.

- [26] M. Á. Abad Guzmán and C. M. Flores Paillacho, *Implementación de un control predictivo generalizado (GPC) de la variable caudal, en la plataforma de procesos continuos, utilizando un Pac*, Quito, 2018.
- [27] S. Sánchez, J. Gámes and V. Torres, "SlideShare," 2008. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/sergioluissanchezbarrios/modelo-de-control-predictivo>. [Accessed 29 Mayo 2021].
- [28] . D. . F. Sendoya, *¿Qué es el Control Predictivo y Hacia Dónde se Proyecta?*, vol. VII, 2013, pp. 53-59.
- [29] M. Pérez, A. Pérez and E. Pérez, "Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo," 2008. [Online]. Available: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/62385450/unidad1y220200316-24640-x231dv-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1642048480&Signature=FVkJZR~vhIrzS2yXl1-PxuML7zGoUwhAJ6YBhzuA5kTBrM3DF5FtfZqO1KjKa6NwNocRNVfafaW-Qaj5tiaOld6o4Q6koMh5TicbDFxZ5btqSEH7u5mSnwEjGlfVkr>.
- [30] . A. Sasir, "GSL Industrias," 2021. [Online]. Available: <https://www.industriasgsl.com/blog/post/que-es-un-sistema-de-control>.
- [31] oposinet, *Tema 65B - Sistemas de Control - Componentes - Variables*, 2020.
- [32] A. C. Smith, *Control automático de procesos*, Limusa, 1997.
- [33] TECNOLOGIAVAO, "Tecnología para la industria," 31 Julio 2009. [Online]. Available: <https://tecnologiaparalaindustria.com/cual-es-el-mejor-metodo-de-control-de-flujo-de-bombas/>. [Accessed 26 Mayo 2021].
- [34] W. A. Quinatoa Quinatoa and O. B. Velasco Panchi, *CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE CONTROL EN CASCADA DE NIVEL PARA EL LABORATORIO DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI*, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi , 2020.

9. ANEXOS

ANEXO I Configuración de variador de frecuencia LS iG5A

Las conexiones de operación del variador de frecuencia son las que se observan en la figura I.1

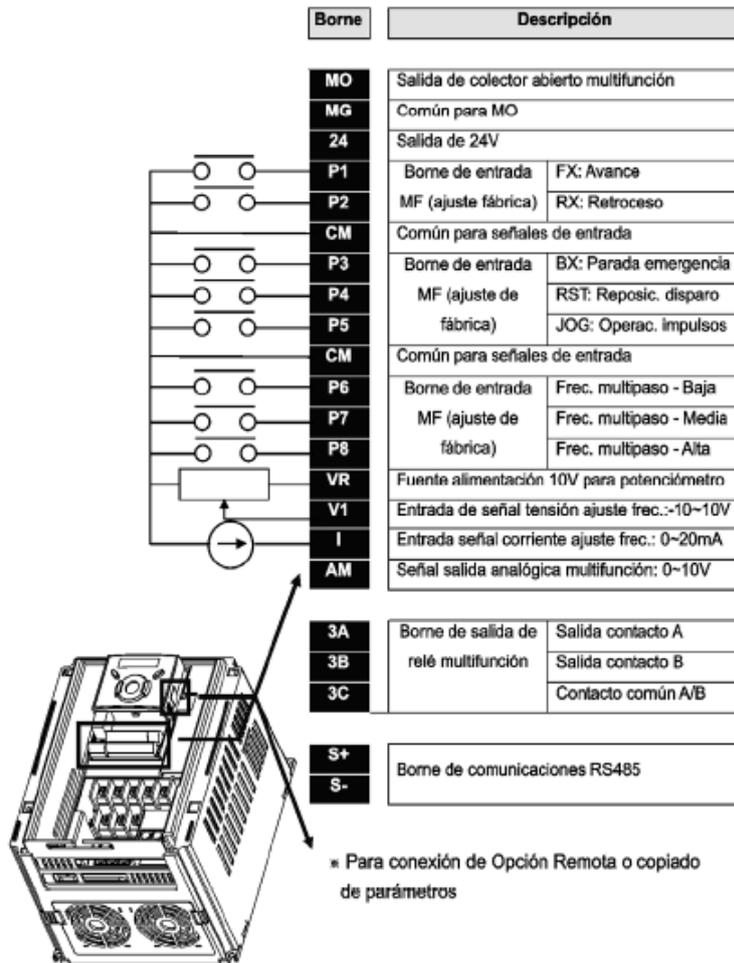


Figura I.1 Conexiones de variador de frecuencia

Tabla I.1. Parámetros de configuración del variador

Grupo	Código	Nombre del parámetro	Definición	Rango	Inicial
Grupo de accionamiento	0.00	[Comando de frecuencia]	-	0-400	0.00
	Frq	[Modo de frecuencia]	4	0-8	0
Grupo E/S	I11	[Constante temporal de filtro para la entrada I]	10	0-99	10
	I12	[Corriente mínima de entrada I]	-	0-20	4
	I13	[Frecuencia correspondiente a I12]	-	0-400	0.00
	I14	Corriente máxima de entrada I	-	0-20	20
	I15	Frecuencia correspondiente a I14	-	0-400	60.00



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE
COTOPAXI**
Octubre 2021 – Marzo 2022



ANEXO II	Rango de operación del proceso de caudal	
-----------------	---	--

Tabla II.1. Zonas de operación del proceso de caudal

Variador(V)	Sensor (V)	Q (L/min)	Descripción
0	1	0	No existe circulación de caudal
1	1	0	
2	1	0	
3	1	0	Circula un mínimo de caudal imperceptible por el sensor
4	1.69	17.22	
5	2.15	28.14	Zona de funcionamiento cómodo para el trabajo de la planta
6	2.49	38.53	
7	2.85	46.05	
8	3.11	53.02	
9	3.36	59.45	
10	3.54	63.64	

Tabla II.2. Zona de operación del proceso de nivel

Sensor (V)	Nivel (cm)	Descripción
5.02	83	La Lectura del sensor presenta errores mínimos
4.875	80	
4.627	75	
4.383	70	
4.138	65	
3.895	60	
3.649	55	
3.401	50	
3.157	45	Zona de funcionamiento cómodo para el trabajo de la planta
2.91	40	
2.659	35	
2.411	30	
2.165	25	
1.917	20	
1.666	15	
1.419	10	Zona de lectura errónea
1.176	5	
0.981	1	

ANEXO III	Descripción de SIMATIC PLC S7 1200	
------------------	---	--

El controlador S7-1200 ofrece la flexibilidad y potencia necesarias para controlar una gran variedad de dispositivos para las distintas necesidades de automatización. Gracias a su diseño compacto, configuración flexible y amplio juego de instrucciones, el S7-1200 es idóneo para controlar una gran variedad de aplicaciones. La CPU incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada y salida, PROFINET integrado, E/S de control de movimiento de alta velocidad y entradas analógicas incorporadas, todo ello en una carcasa compacta, conformando así un potente controlador. Una vez cargado el programa en la CPU, esta contiene la lógica necesaria para vigilar y controlar los dispositivos de la aplicación. La CPU vigila las entradas y cambia el estado de las salidas según la lógica del programa de usuario, que puede incluir lógica booleana, instrucciones de contaje y temporización, funciones matemáticas complejas, así como comunicación con otros dispositivos inteligentes.

Características:

- Tension de alimentación: 24VDC
- Consumo (valor nominal): 500mA, solo CPU
- Con memoria integrada: 100 kByte
- Número de entradas digitales: 14
- Número de salidas digitales: 10
- Número de entradas analógicas: 2
- Interfaz PROFINET (estándar abierto de Ethernet)
- Soporta servidores web
- Dimensiones: 110x100x75mm

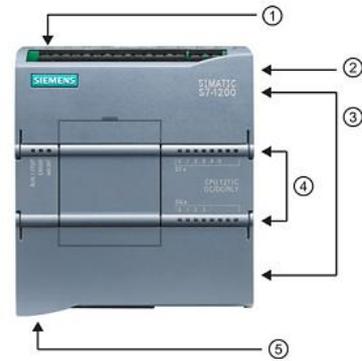


Figura III.1. Partes de PLC S7 -1200

- ① Conector de corriente
- ② Ranura para Memory Card (debajo de la tapa superior)
- ③ Conectores extraíbles para el cableado de usuario (detrás de las tapas)
- ④ LEDs de estado para las E/S integradas
- ⑤ Conector PROFINET (en el lado inferior de la CPU)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI Octubre 2021 – Marzo 2022</p>	
---	---	---

ANEXO IV	Adquisición de datos	
-----------------	-----------------------------	--

Tabla IV.1. Base de datos adquirida del proceso de caudal

PV	CV				
0.00	0	21.39	20	21.39	20
0.00	0	21.36	20	21.39	20
0.00	0	21.39	20	21.41	20
0.00	20	21.39	20	21.39	20
0.00	20	21.39	20	21.39	20
0.00	20	21.39	20	21.33	20
0.00	20	21.39	20	21.39	20
0.00	20	21.39	20	21.59	20
15.19	20	21.39	20	21.72	20
20.08	20	21.40	20	21.72	20
20.08	20	21.39	20	21.72	20
20.08	20	21.39	20	21.72	20
20.73	20	21.39	20	21.55	20
21.00	20	21.39	20	21.72	20
21.04	20	21.39	20	21.42	20
21.06	20	21.39	20	21.39	20
20.73	20	21.39	20	21.39	20
20.73	20	21.39	20	21.39	20
20.73	20	21.39	20	21.39	20
20.73	20	21.39	20	21.39	20
20.98	20	21.39	20	21.39	20
21.06	20	21.39	20	21.38	20
21.03	20	21.39	20	21.39	20
21.06	20	21.39	20	21.41	20
21.13	20	21.48	20	21.55	20
21.37	20	21.48	20	21.48	20
21.33	20	21.56	20	21.39	20
21.39	20	21.56	20	21.49	20
21.39	20	21.48	20	21.41	20
21.39	20	21.56	20	21.39	20
21.39	20	21.48	20	21.39	20
21.39	20	21.56	20	21.39	20
21.39	20	21.39	20	21.39	20
21.39	20	21.56	20	21.39	20
21.39	20	21.39	20	21.39	20
21.48	20	21.48	20	21.39	20
21.43	20	21.40	20	21.39	20
21.39	20	21.40	20	21.39	20
21.39	20	21.39	20	21.39	20
21.22	20	21.56	20	21.48	20
				21.39	20

Tabla IV.2. Base de datos adquirida del proceso de nivel.

PV	CV				
1.4428	60	22.7354	60	46.2681	60
1.4428	60	23.2899	60	46.6403	60
1.4428	60	23.8445	60	47.1438	60
1.4428	60	23.9905	60	47.6984	60
1.4428	60	25.0996	60	48.1800	60
1.3187	60	25.5812	60	48.8805	60
1.4428	60	26.0993	60	49.5080	60
2.3695	60	26.5663	60	49.9969	60
2.2892	60	27.1428	60	50.3617	60
3.4349	60	27.8433	60	50.9893	60
3.9456	60	28.2446	60	51.7409	60
4.5440	60	28.8940	60	52.1130	60
5.3759	60	29.6456	60	52.6822	60
5.6750	60	30.0761	60	53.2295	60
6.0107	60	30.7985	60	53.9227	60
6.9374	60	31.3239	60	54.2364	60
7.6598	60	31.8274	60	54.7545	60
8.3019	60	32.3236	60	55.3602	60
8.9076	60	32.9657	60	55.9439	60
9.6300	60	33.3160	60	56.3380	60
9.8124	60	33.9435	60	56.9801	60
10.7683	60	34.4689	60	57.3887	60
11.1843	60	35.0600	60	57.9725	60
11.6877	60	35.5635	60	58.5709	60
12.3956	60	35.7824	60	58.9722	60
12.9355	60	36.6726	60	59.7019	60
13.6433	60	37.4242	60	60.2127	60
14.1395	60	37.9934	60	60.7089	60
14.7671	60	38.5625	60	61.2124	60
15.3654	60	39.0441	60	61.9567	60
15.8835	60	39.3214	60	62.4601	60
16.3651	60	40.2773	60	62.7228	60
17.2553	60	40.6641	60	63.4452	60
17.1970	60	40.9486	60	63.7006	60
17.9850	60	41.7586	60	64.4230	60
18.6272	60	42.2913	60	65.1892	60
19.3350	60	42.7802	60	65.4446	60
19.8458	60	43.3785	60	65.9700	60
20.3712	60	43.9185	60	66.5392	60
21.1009	60	44.6482	60	67.1740	60
21.6116	60	44.8963	60	67.3929	60
22.2684	60	45.7647	60	68.1883	60

68.6845	60
69.1807	60
69.6623	60
70.2898	60
70.8079	60
71.4135	60
71.8003	60
72.3549	60
72.9167	60
73.6610	60
73.9091	60
74.4345	60
75.0620	60
76.0325	60
76.6528	60
77.3314	60
77.8057	60
78.1487	60
78.8346	60
79.2651	60
79.6518	60
80.3888	60
80.8704	60
81.5855	60
81.8847	60
82.3809	60

ANEXO V	Sintonía del controlador PID	
----------------	-------------------------------------	--

El método utilizado para la sintonía del control PID es el método de PI Haalma debido que permite validar el modelo de proceso de primer orden con retardo en el tiempo (FOTD) característico de los sistemas con respuesta al escalón.

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

Dónde:

Kp es la ganancia estética

T es la constante d tiempo (también denominada retraso)

L es el retardo de tiempo

Ecuación equivalente obtenida

$$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp1 * s} e^{-Td*s}$$

$$Kp = Kp$$

$$T = Tp1$$

$$L = Td$$

Como parte del proceso experimental se procede a calcular valores de sintonía para un control PIy PID haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

	PI		PID	
	Agresivo	Robusto	Agresivo	Robusto
K	$K = \frac{1}{Kp} \frac{T}{L + T}$	$K = \frac{1}{Kp} \frac{T}{L + 3T}$	$K = \frac{1}{Kp} \frac{Kp/2 + T}{L/2 + T}$	$K = \frac{1}{Kp} \frac{L/2 + T}{L/2 + 3T}$
Ti	$Ti = T$	$Ti = T$	$Ti = T + L/2$	$Ti = T + L/2$
Td	---	---	$Td = \frac{TL}{L + T}$	$Td = \frac{TL}{L + 2T}$

Constantes para un control PI

Haciendo uso del modelo FOTD y de las ecuaciones correspondientes se obtiene los siguientes valores

$$G(s) = \frac{Kp}{1+Tp1*s} e^{-Td*s}$$

Para Caudal

$$Kp = 1.0166$$

$$Tp1 = 3.4889$$

$$Td = 4.594$$

Para Nivel

$$Kp = 12.845$$

$$Tp1 = 1315$$

$$Td = 4.276$$

Constantes de sintonía:

Agresivo		Robusto	
Caudal	Nivel	Caudal	Nivel
Kp = 0.424591	Kp = 0.227873	Kp = 0.2131436	Kp = 0.025922
Ti = 3.4889	Ti = 1315	Ti = 3.4889	Ti = 1315

Constantes para un control PID

Haciendo uso del modelo FOTD y de las ecuaciones correspondientes se obtiene los siguientes valores:

$$G(s) = \frac{Kp}{1+Tp1*s} e^{-Td*s}$$

Constantes de sintonía:

Agresivo		Robusto	
Caudal	Nivel	Caudal	Nivel
Kp = 0.6863288	Kp = 0.984327	Kp = 0.3122366	Kp = 0.3326456
Ti = 5.7859	Ti = 1317.138	Ti = 5.7859	Ti = 1317.138
Td = 1.982952	Td = 4.262140	Td = 1.264347	Td = 4.248337



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE
COTOPAXI
Octubre 2021 – Marzo 2022



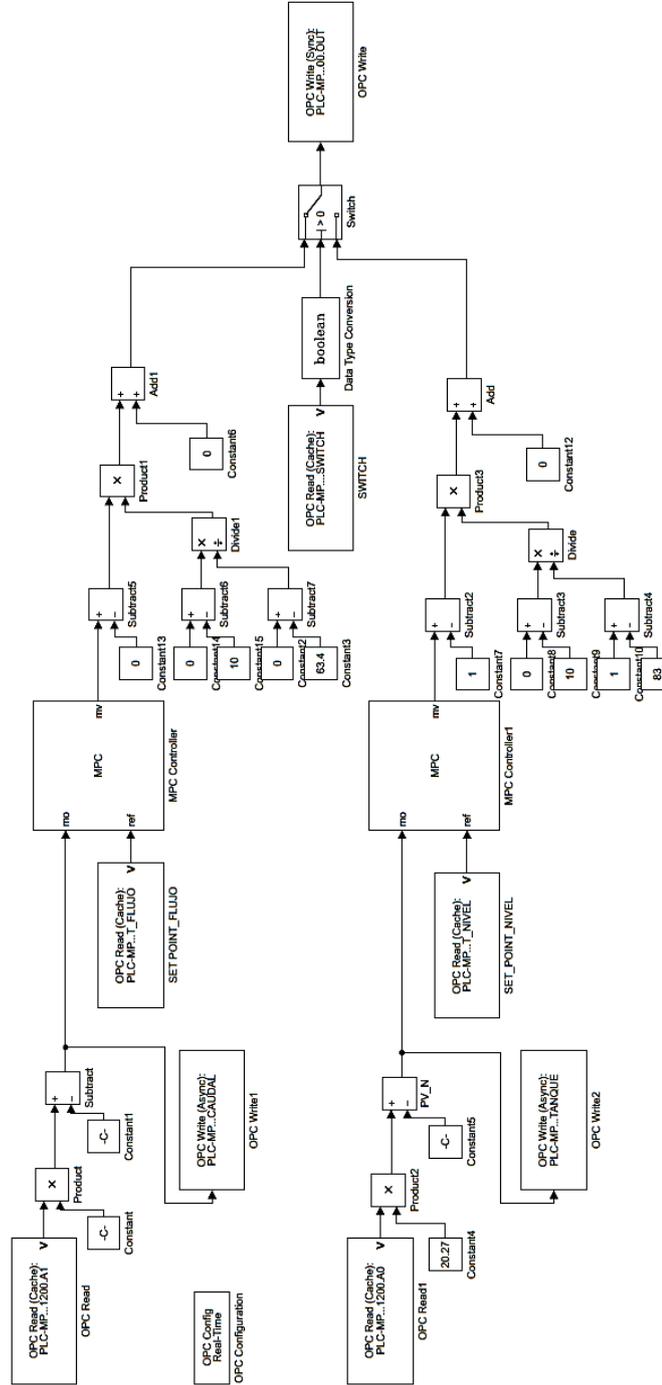


Figura VI.1. Programación en bloques del controlador MPC multivariable.

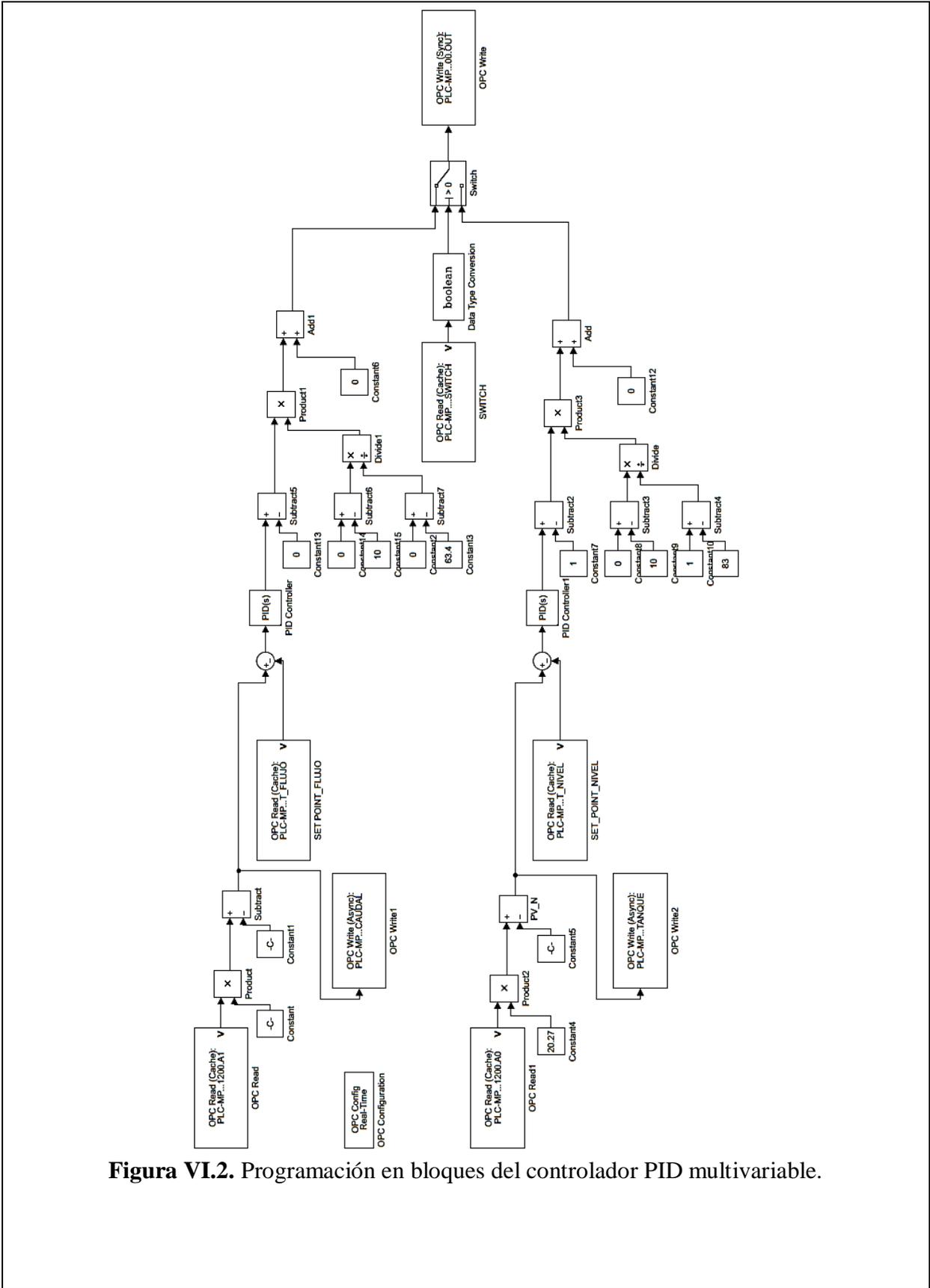


Figura VI.2. Programación en bloques del controlador PID multivariable.

Comunicación

Debido a que el PLC siemens S7-1200 no soporta la programación para el controlador Predictivo, se realiza una programación de entradas y salidas analógicas para el envío y recepción de señales en la planta que se está trabajando que se detalla a continuación.

Primero se realiza la programación en el TIA PORTAL V15 en la cual se verifican las entradas y salidas analógicas que posee el PLC para así crear una marca digital dentro del mismo.

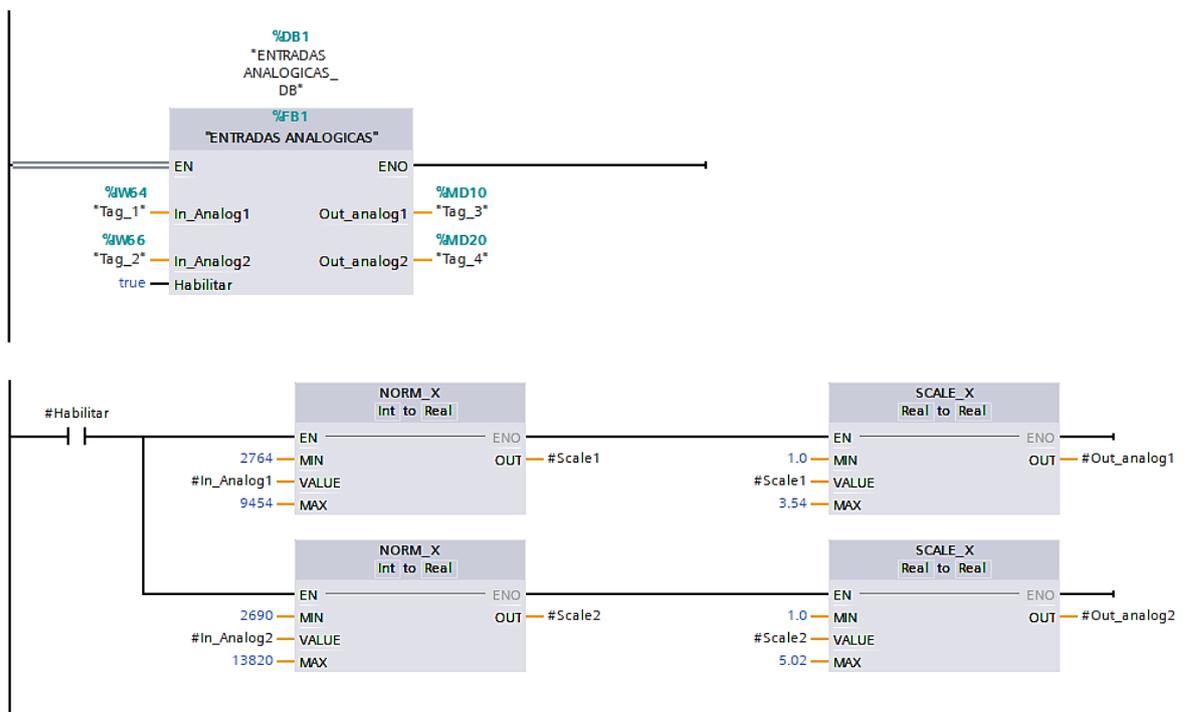


Figura VII.1. Entrada analógica en TIA PORTAL V15.

En la siguiente figura se visualiza la salida analógica proveniente del servidor OPC que se expresa en una salida real del PLC que anteriormente se ha visualizado la cual corresponde a la QW 80. En este punto el escalado de las variables PV que es de 1-5V y la variable CV que es de 0-10V se realiza en este punto para facilitar la comunicación entre los controladores establecidos.



Figura VII.2. Salidas analógicas en TIA PORTAL V15.

Una vez configurado el TIA PORTAL V15 se procede a configurar en KEPServerEX OPC, donde primero se crea una carpeta en proyecto dentro de conectividad, como se expresa en la siguiente figura:

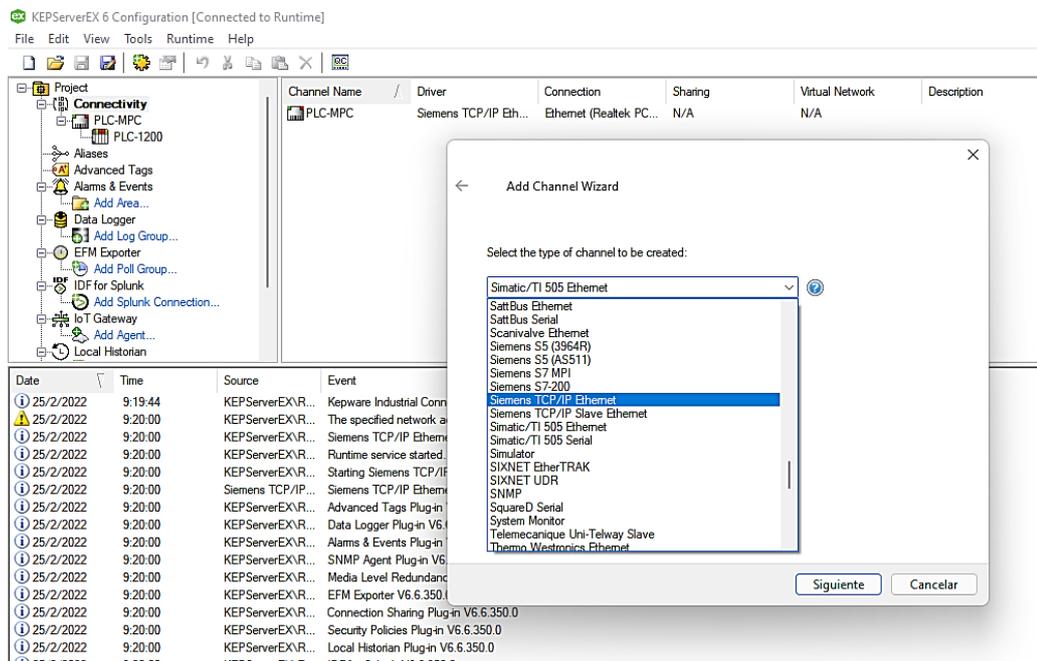


Figura VII.3. Selección de entrada RJ45 del PLC.

Cabe mencionar que para crear la carpeta de conectividad hay que seleccionar la comunicación proveniente del PLC en nuestro caso es el PLS S7-1200 con versión de software 3.0. Se realiza la creación de la carpeta “PLC-MPC” donde se escoge en primer lugar la dirección de comunicación, el modelo del PLC, el canal de asignación de datos y la dirección IP del mismo como se muestra en la siguiente figura.

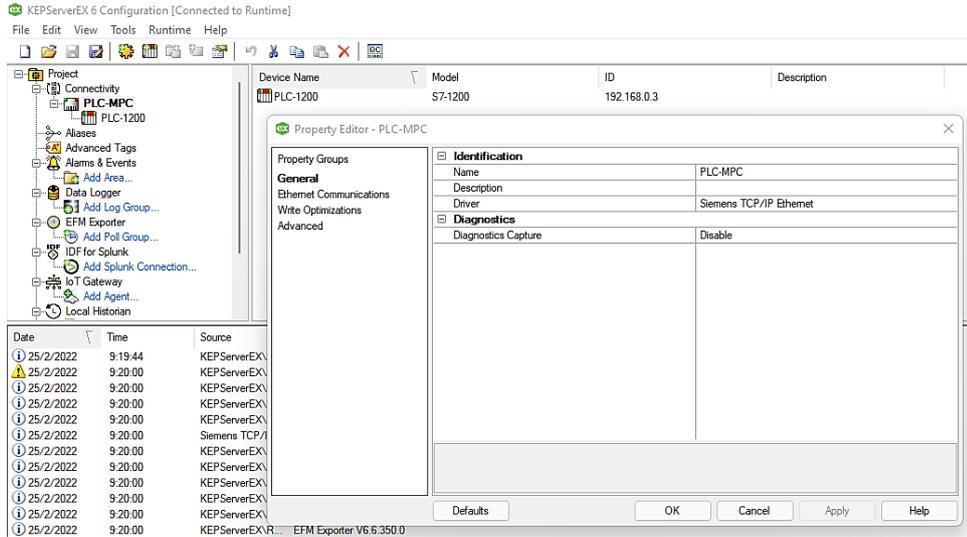


Figura VII.4. Configuración del canal de comunicación.

Una vez realiza la configuración se crea los “tags” dentro de la carpeta “PLC-MPC”, se coloca el nombre de nuestra preferencia y la marca o memoria que se programó previamente del PLC.

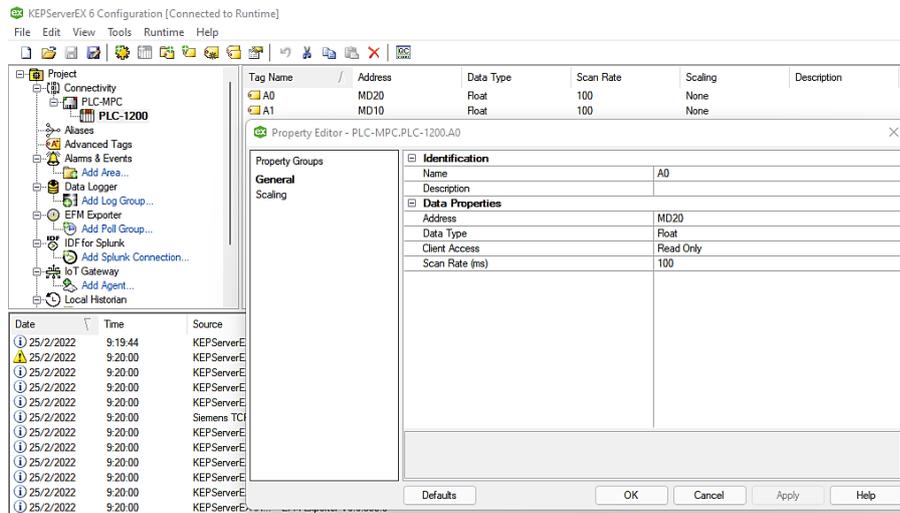


Figura VII.5. Creación de variables.

Una vez creadas las variables se procede a comprobar si están funcionando correctamente, que se reconozca las variables y no aparezcan como bloqueadas como se muestra en la siguiente figura.

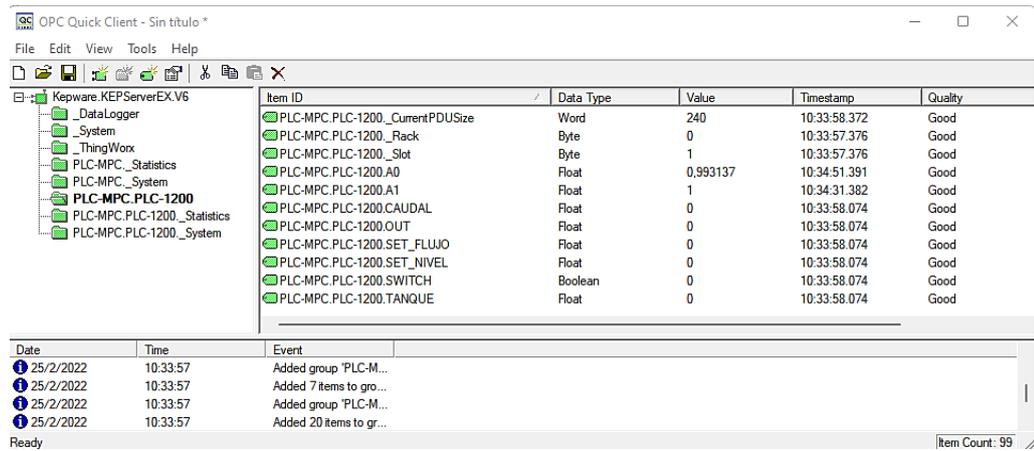


Figura VII.6. Funcionamiento correcto de las variables.

Continuamos con la configuración del OPC en Simulink abriendo un programa en Simulink, con su librería OPC y se escoge los bloques configuración, lectura y escritura como se muestra en la figura VII.7.

Se abre la configuración OPC, luego configuración OPC clientes y añadimos el servidor KEPServer mostrado en la figura VII.8.

Posteriormente se abre la configuración de lectura de la variable OPC en la cual se añade los ítems según la variable a necesitar como se muestra en la figura VII.9

Para la escritura se realiza la misma configuración, tomando en cuenta que para la lectura solo cambia la selección de las variables.

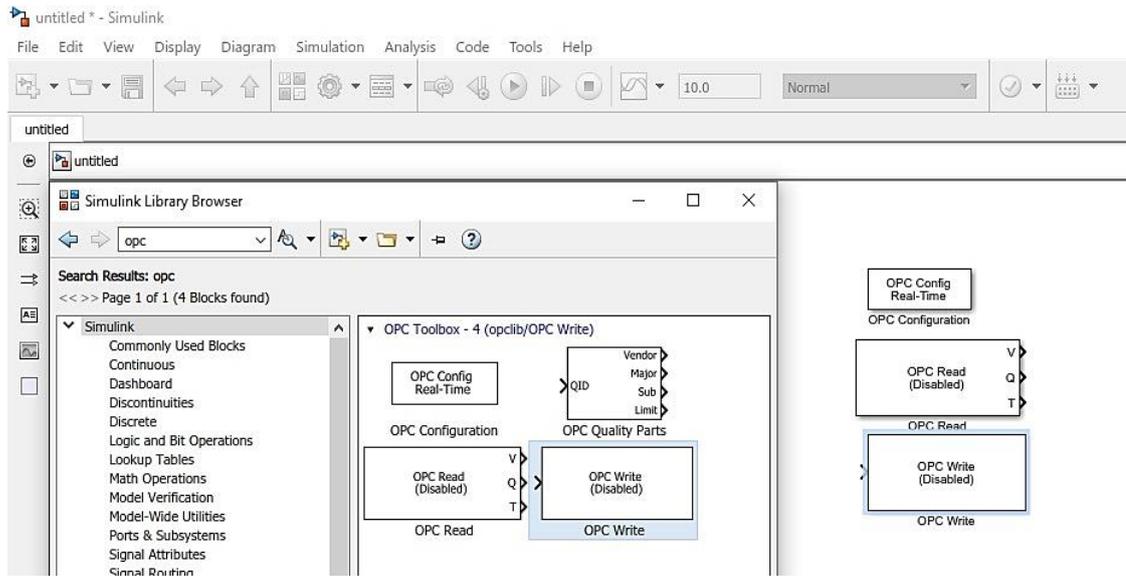


Figura VII.7. Selección de los bloques OPC en Simulink.

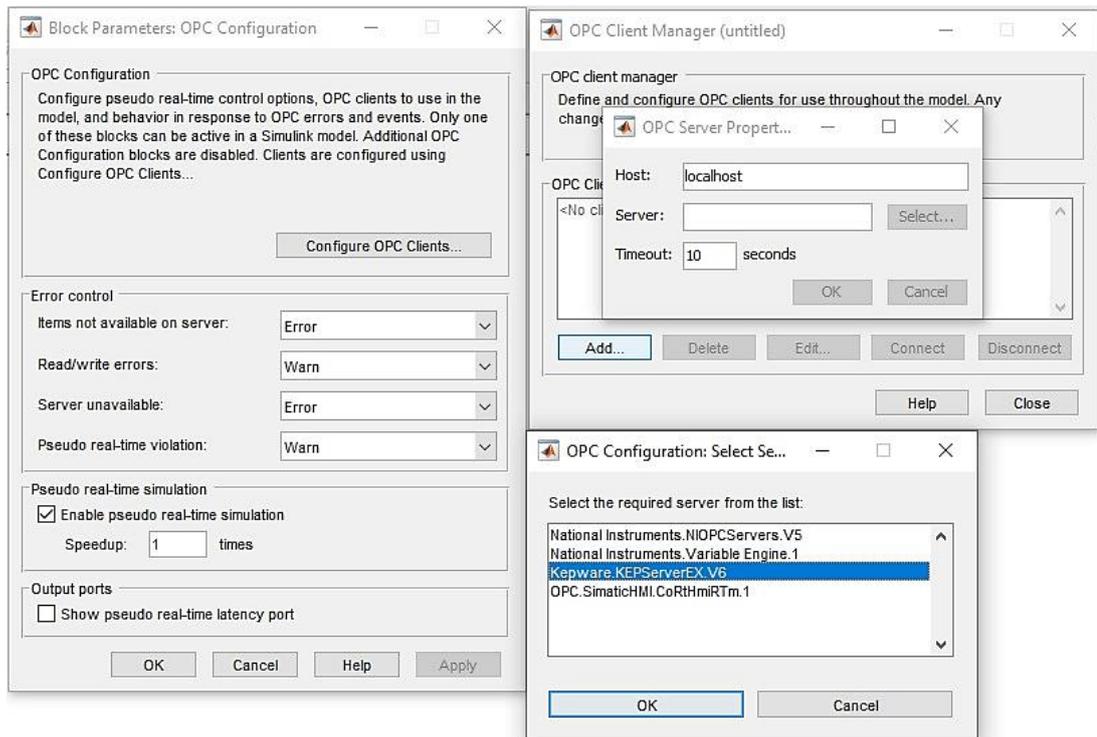


Figura VII.8. Configuración de cliente OPC.

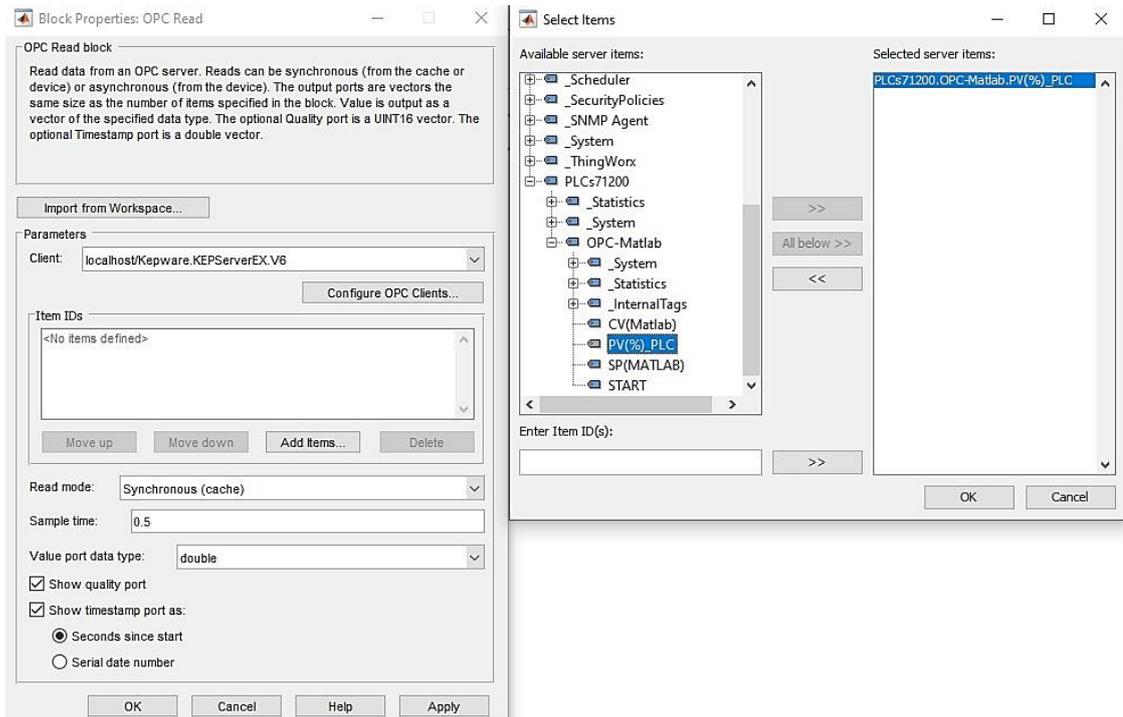


Figura VII.9. Selección de ítems en cliente OPC.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE
COTOPAXI**
Octubre 2021 – Marzo 2022

