



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

PROPUESTA TECNOLÓGICA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE UN CONTROL PREDICTIVO Y PID
APLICADO A UN PROCESO DIDÁCTICO DE CAUDAL**

Propuesta Tecnológica presentada previo a la obtención del Título de Ingeniero en
Electromecánica

Autor:

Guambo Cain Wilson Geovanny

Tutores:

Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas M.Sc.

Ing. Luigi Orlando Freire Martínez M.Sc.

Latacunga – Ecuador

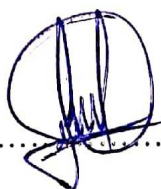
2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Wilson Geovanny Guambo Cain, declaro ser autor de la presente Propuesta Tecnológica: **“ESTUDIO COMPARATIVO DE UN CONTROL PREDICTIVO Y PID APLICADO A UN PROCESO DIDÁCTICO DE CAUDAL”**, siendo el Ing. Byron Paul Corrales Bastidas M.Sc y el Ing. Luigi Orlando Freire Martínez M.Sc, tutores 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 obtenidos en la presente propuesta tecnológica, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, marzo 2021



Wilson Geovanny Guambo Cain

C.C. 060458972-1

AVAL DEL LOS TUTORES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutores del Trabajo Tecnológico sobre el título:

“ESTUDIO COMPARATIVO DE UN CONTROL PREDICTIVO Y PID APLICADO A UN PROCESO DIDÁCTICO DE CAUDAL” de Wilson Geovanny Guambo Cain, estudiante de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, consideramos 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 2021



Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas M.Sc.
C.C. 050234776-8



Ing. Luigi Orlando Freire Martínez M.Sc.
C.C. 050252958-9

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe Tecnológico 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, el postulante: Wilson Geovanny Guambo Cain, con el Título de Proyecto de Titulación: “**ESTUDIO COMPARATIVO DE UN CONTROL PREDICTIVO Y PID APLICADO A UN PROCESO DIDÁCTICO DE CAUDAL**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

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

Latacunga, marzo del 2021

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)

Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc.
C.C.050259517-6

Lector 2

Ing. Edwin Homero Moreano Martínez M.Sc.
C.C. 0502607500

Lector 3

PhD. Enrique Torres Tamayo
C.C.1757121940

AGRADECIMIENTO

Gracias a todos aquellos que depositaron su confianza en mi para alcanzar esta meta y nunca dejaron de creer, en especial a mis padres y a mis hermanos por su paciencia y apoyo incondicional en los momentos difíciles de este largo camino. Como no agradecer a Dios y a la Virgen de Guadalupe por cuidarme y traerme hasta aquí, con la bendición de poder compartir este logro con toda mi familia.

Un sincero agradecimiento al Ing. Luigi Freire y al Ing. Paul Corrales por su desinteresada labor en la formación de profesionales, inculcando ante todo liderazgo y valores humanos para afrontar la vida con decisión y carácter.

Así mismo extender un agradecimiento a mis amigos por su apoyo incondicional en cada proyecto emprendido.

Wilson

DEDICATORIA

A mis padres les dedico este trabajo, cada alegría y triunfo de mi vida por su sacrificada labor día a día para bríndame la oportunidad de alcanzar mis sueños y por enseñarme el valor del trabajo.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL LOS TUTORES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xv
1. INFORMACIÓN BÁSICA	16
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	17
2.1. Título de la propuesta tecnológica.....	17
2.2. Tipo de propuesta alcance.....	17
2.3. Área del conocimiento.....	17
2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica.....	18
2.5. Objeto de estudio y campo de acción	19
2.5.1. Objeto de estudio.....	19
2.5.2. Campo de acción	19
2.6. Situación problemática y problema.....	19
2.6.1. Situación problemática:	19
2.6.2. Problema	20
2.7. Hipótesis o formulación de preguntas directrices	20
2.8. Objetivos.....	20
2.8.1. Objetivo general	20
2.8.2. Objetivos específicos	20
2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos.....	21
3. MARCO TEÓRICO.....	23
3.1 Antecedentes	23
3.2 Sistemas de control.....	25
3.3 Representación de Modelos matemáticos	26

3.3.1	Función de transferencia	27
3.3.2	Función de transferencia de sistemas de primer orden autorregulados.....	28
3.3.3	Espacio de Estados	29
3.4	Métodos de Control	31
3.4.1	Control ON-OFF	32
3.4.2	Control proporcional P.....	32
3.4.3	Control integral I	33
3.4.4	Control derivativo D	34
3.4.5	Control PID	34
3.4.6	Contexto histórico del Control Predictivo.....	35
3.4.7	Control predictivo basado en modelo	37
3.5	Comunicación OPC (Ole for Process Control)	43
3.6	Parámetros de desempeño de controladores	44
4.	METODOLOGÍA	46
4.1	Declaración de variables.....	46
4.1.1	Operacionalización de las variables.....	46
4.1.2	Procedimientos, métodos y materiales.....	47
4.2	Descripción de la Estación de Caudal	47
4.2.1	Señales de proceso.....	48
4.3	Adquisición de datos y obtención del modelo matemático.....	49
4.3.1	Rango de funcionamiento y configuración de la planta.....	49
4.3.2	Adquisición de datos.....	51
4.3.3	Sistema de adquisición de datos	52
4.3.4	Preprocesamiento de datos	53
4.3.5	Estimación de modelos	54
4.3.6	Validación de modelos.....	56
4.4	Desarrollo de controladores	57
4.4.1	Estructura de comunicación	57
4.4.2	Configuración de entradas y salidas analógicas en PLC.....	58
4.4.3	Configuración OPC en KepServerEX	59
4.4.4	OPC en Simulink.....	60
4.4.5	Desarrollo de Control Predictivo.....	61
4.4.6	Desarrollo de Control PID	63

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
5.1 Simulación de controladores	64
5.1.1 Simulación del control MPC	64
5.1.2 Simulación del control PID	66
5.1.3 Análisis comparativo entre MPC y PID simulados	67
5.2 Implementación de controladores	68
5.2.1 Implementación del control MPC.....	69
5.2.2 Implementación del control PID	69
5.2.3 Análisis Comparativo entre control MPC y PID implementados	70
5.2.4 Resumen de análisis comparativo.....	74
6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS	75
6.1. Presupuesto	75
6.2. Análisis de impactos.....	76
6.2.1 Impacto práctico	76
6.2.2 Impacto tecnológico.....	77
6.2.3 Impacto epistemológico	77
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
7.1 Conclusiones	77
7.2 Recomendaciones.....	78
8. REFERENCIAS	79
ANEXOS	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1 Esquema general de un sistema.....	25
Figura 3. 2 Esquema general de un sistema de control	26
Figura 3. 3 Ejemplo de proceso Autorregulado con tiempo muerto	28
Figura 3. 4 Representación de variables en espacio de estados	30
Figura 3. 5 Representación matricial de las variables en espacio de estados	31
Figura 3. 6 Curvas de comportamiento de un Control ON-OFF	32
Figura 3. 7 Curva de comportamiento de una acción derivativa con error Offset	33
Figura 3. 8 Expectativas y Posibilidades.....	36
Figura 3. 9 Operación de un MPC	38
Figura 3. 10 Estructura de control de un MPC	39
Figura 3. 11 Horizonte de control y predicción	40
Figura 3. 12 Estructura de comunicación utilizando un OPC server	44
Figura 3. 13 Respuesta típica al escalón unitario de un sistema de control.....	45
Figura 4. 1 Diagrama P&ID de la estación de caudal	47
Figura 4. 2 Etapas para la identificación de sistemas.....	49
Figura 4. 3 Línea de tendencia y ecuación Caudal vs Voltaje del Variador.....	50
Figura 4. 4 Línea de tendencia y ecuación Voltaje del Sensor vs Caudal.....	51
Figura 4. 5 Componentes de un sistema de adquisición de datos	52
Figura 4. 6 HMI para la adquisición de datos.....	52
Figura 4. 7 Bloques de programación para la adquisición de datos	53
Figura 4. 8 Datos originales de la CV y PV adquiridos de la planta.....	54
Figura 4. 9 Datos filtrados de CV y PV	54
Figura 4. 10 Ventana para estimación de modelos SystemIdentification de Matlab	55
Figura 4. 11 (a) Función de transferencia (b) Modelo FOTD.....	55
Figura 4. 12 Modelo en espacio de estados estimado de la planta.....	56
Figura 4. 13 Validación para el Modelo de proceso con Función de Transferencia y Espacio de estados .	56
Figura 4. 14 Estructura de comunicación entre la planta real y el software de diseño	57
Figura 4. 15 Normalización y Escalamiento de la señal de entrada analógica del PLC	58
Figura 4. 16 Normalización y Escalamiento de la señal de salida analógica del PLC.....	59
Figura 4. 17 Configuración de acceso PUT/GET	59

Figura 4. 18 Ventana de configuración del KepServerEx	60
Figura 4. 19 OPC Toolbox	60
Figura 4. 20 Estructura para diseño y simulación de un MPC	61
Figura 4. 21 MPC Designer	61
Figura 4. 22 (a) Sintonía MPC con parámetros predeterminados (b) Sintonía MPC con parámetros reales	62
Figura 4. 23 Estructura para la implementación de un MPC por conexión OPC	62
Figura 4. 24 Estructura de diseño y simulación de un controlador PID	63
Figura 4. 25 Estructura para la implementación de un controlador PID utilizando comunicación OPC	63
Figura 5. 1 Respuesta de controlador MPC con parámetros predeterminados	64
Figura 5. 2 Sintonía de control MPC para una respuesta sobreamortiguada	65
Figura 5. 3 Curvas de respuesta de un MPC simulado.....	66
Figura 5. 4 PID con sintonía Agresiva: $K= 0.99344327$, $T_i= 1.40269$, $T_p = 0.31963435$	66
Figura 5. 5 PID con sintonía Robusta: $K= 0.58352265$, $T_i= 1.40269$, $T_p = 0.31963435$	67
Figura 5. 6 (a) Respuesta de PV con control MPC (b) Respuesta de PV con control PID.....	67
Figura 5. 7 (a) Respuesta al sobrepaso con control MPC (b) Respuesta al sobrepaso con control PID	68
Figura 5. 8 Resultado de un control MPC implementado	69
Figura 5. 9 Resultado de un control PID implementado	70
Figura 5. 10 Respuesta al sobrepaso entre un control MPC y PID implementados	70
Figura 5. 11 Análisis de tiempo de retardo entre un control MPC y PID	71
Figura 5. 12 Análisis de tiempos de asentamiento para un control MPC y PID.....	71
Figura 5. 13 Análisis de tiempo de levantamiento entre un control MPC y PID.....	72
Figura 5. 14 Análisis de estabilidad de los controladores MPC y PID a 75LPM.....	72
Figura 5. 15 Análisis de estabilidad de los controladores MPC y PID a 45LPM.....	73
Figura 5. 16 Respuesta ante perturbaciones de un control MPC y PID	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Actividades y Tareas para cada objetivo específico	21
Tabla 3. 1 Características PID	35
Tabla 4. 1 Variable Independiente	46
Tabla 4. 2 Variable Independiente	46
Tabla 4. 3 Procedimientos, métodos y materiales	47
Tabla 4. 4 Rangos y características de operación de la planta	50
Tabla 5. 1 Parámetros de sintonía MPC	65
Tabla 5. 2 Resumen de análisis comparativo entre un control MPC y un control PID simulados	68
Tabla 5. 3 Resumen de análisis comparativo entre un control MPC y PID implementados	74
Tabla 6. 1 Presupuesto Global del Proyecto	75
Tabla 6. 2 Presupuesto de materiales y suministros	75
Tabla 6. 3 Presupuesto de equipos de uso directo	76
Tabla 6. 4 Presupuesto para Gastos Indirectos y de Servicios Profesionales	76

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

TÍTULO: “ESTUDIO COMPARATIVO DE UN CONTROL PREDICTIVO Y PID APLICADO A UN PROCESO DIDÁCTICO DE CAUDAL”

Autor: Wilson Geovanny Guambo Cain

RESUMEN

La comparación entre un control Predictivo y un PID utilizando un proceso de caudal, constituye un escenario propicio para el análisis de sistemas de control, para llevar a cabo tal comparación es necesario crear las condiciones técnicas para su implementación, ya que ninguno de los elementos de control utilizados en este proyecto (PLC S7-1200, NI myDAQ) cuenta con librerías que permitan su implementación sobre su memoria física, es por esto que se utiliza una plataforma de comunicación OPC, logrando establecer exitosamente una comunicación entre la planta y el software que soporta ambos controladores en tiempo real.

Creadas las condiciones para su implementación cada controlador es diseñado en el software Simulink, de esta etapa, el proceso que demanda mayor esfuerzo es encontrar el punto de sintonía adecuado que brinde relativa rapidez y estabilidad al sistema. Por lo cual es necesario simular el comportamiento de cada uno de los controladores para posteriormente ser implementados, realizando ajustes finos en sus valores de sintonía.

El resultado de la implementación da un control muy estable en el manejo de caudal tanto para el control PID como para el control Predictivo, asentando sus principales diferencias en una respuesta transitoria mucho más rápida para el control PID y con un mejor manejo de la variable en estado estacionario por parte del control Predictivo, pero en general el desempeño para ambos controladores incluso en el rechazo a perturbaciones es muy parejo, esto tomando en cuenta se está evaluando y comparando su desempeño en el manejo de un sistema (SISO), lo cual inclinaría la balanza hacia el control PID por ser más sencillo de implementar, sin embargo este objetivo de esta investigación es constituir una base para futuros trabajos donde se pueda evaluar desempeños en procesos multivariados.

Palabras clave: Control, PID, Predictivo, Variable.

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

THEME: “COMPARATIVE STUDY OF A PREDICTIVE AND PID CONTROL APPLIED TO A DIDACTIC FLOW PROCESS”

Author: Wilson Geovanny Guambo Cain

ABSTRACT

The comparison between a Predictive control and a PID using a flow process, constitutes a favorable scenario for the analysis of control systems, to carry out such a comparison it is necessary to create the technical conditions for its implementation since none of the control elements used In this project (PLC S7-1200, NI myDAQ) it has libraries that allow its implementation on its physical memory, hence, an OPC communication platform was used, successfully establishing communication between the plant and the software that supports both real-time drivers. Once the conditions for its implementation have been created, each controller is designed in the Simulink software. From this stage, the process that requires the greatest effort is to find the appropriate tuning point that provides relative speed and stability to the system. Therefore, it is necessary to simulate the behavior of each of the controllers to later be implemented, making fine adjustments to their tuning values. The result of the implementation gives a very stable control in the flow management both for the PID control and for the Predictive control, settling its main differences in a much faster transient response for the PID control and with a better management of the variable in steady state by the Predictive control, but in general the performance for both controllers even in the rejection of disturbances is very even, this taking into account is evaluating and comparing their performance in the management of a system (SISO), which would incline the balance towards PID control because it is easier to implement, however this research objective is to constitute a basis for future work where performance in multivariable processes can be evaluated.

Keywords: Control, PID, Predictive, Variable.



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por el señor Egresado de la Carrera de **INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS: GUAMBO CAIN WILSON GEOVANNY**, cuyo título versa **“ESTUDIO COMPARATIVO DE UN CONTROL PREDICTIVO Y PID APLICADO A UN PROCESO DIDÁCTICO DE CAUDAL”**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, marzo del 2021

Atentamente,

Mg. Nelson Guagchinga
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 0503246415



1. INFORMACIÓN BÁSICA

Propuesto por:

Wilson Geovanny Guambo Cain

Tema aprobado:

Estudio comparativo de un control Predictivo y PID aplicado a un proceso didáctico de caudal.

Carrera:

Ingeniería Electromecánica.

Director del Proyecto de Titulación:

Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas M.Sc.

Equipo de trabajo:

Tutor 1

Nombres: Byron Paúl

Apellidos: Corrales Bastidas

Cédula de Identidad: 050234776-8

Email: byron.corrales@utc.edu.ec

Tutor 2

Nombres: Luigi Orlando

Apellidos: Freire Martínez

Cédula de Identidad: 050252958-9

Email: luigi.freire@utc.edu.ec

Ponente

Nombres: Wilson Geovanny

Apellidos: Guambo Cain

Cédula de Identidad: 060458972-1

Email: wilson.guambo9721@utc.edu.ec

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.

Tiempo de duración del proyecto:

6 Meses

Fecha de entrega:

Marzo del 2021

Línea de investigación:

Procesos industriales

Sub líneas de investigación:

Automatización, control y protección de sistemas electromecánicos.

Tipo de propuesta tecnológica:

El tipo de propuesta tecnológica responde al diseño e implementación de un sistema de control Predictivo y control PID sobre una estación de caudal, en búsqueda de mantener a la variable de proceso en los puntos de consigna establecidos, así como determinar causales para la implementación de uno u otro controlador.

2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

2.1. Título de la propuesta tecnológica

Estudio comparativo de un control Predictivo y PID aplicado a un proceso didáctico de caudal.

2.2. Tipo de propuesta alcance

h) **Integrador:** El proyecto contempla varias áreas de ingeniería y carreras afines, así como conocimientos en control y automatización de procesos, debido a que requiere poner en práctica habilidades en electrónica, programación, control industrial, entre otros; todas ellas enfocadas hacia la implementación de un control Predictivo y un control PID para el manejo de caudal.

2.3. Área del conocimiento

Tomando 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

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

2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica

El presente proyecto se establece principalmente en la promoción de nuevas tecnologías de control, acorde a las exigencias actuales en los procesos de producción, para lo cual se plantea un estudio comparativo entre un control PID (clásico) y un control Predictivo (moderno) aplicados a un proceso de didáctico de caudal.

La primera parte del estudio consiste en la obtención del modelo matemático del proceso, representado en función de transferencia y espacio de estados, para posteriormente utilizar este modelo y diseñar un controlador Predictivo mediante el uso de programas de cómputo numérico y simulación de procesos. La segunda parte de la propuesta consiste en la aplicación de esta estrategia de control en la estación de caudal mediante el uso de una plataforma de comunicación OPC, y una vez implementado el controlador se procede a la ejecución de pruebas para determinar los rangos de operación y sintonía más idóneos para el control de la planta.

Finalmente, para establecer conclusiones sobre el controlador Predictivo este es comparado con un controlador PID desarrollado e implementado bajo las mismas condiciones de funcionamiento, obteniendo así parámetros de desempeño de cada una de las estrategias de control en el manejo de procesos de caudal.

2.5. Objeto de estudio y campo de acción

2.5.1. Objeto de estudio

Sistemas de Control Predictivo y Control PID

2.5.2. Campo de acción

Los sistemas de Control Predictivo y PID se encuentran en el campo de las Ciencias Tecnológicas para realizar el control de variables de distinto orden, donde su principal área de desarrollo es la Automatización e Ingeniería de Control.

2.6. Situación problémica y problema

2.6.1. Situación problémica:

El uso del controlador PID en el manejo de variables de proceso se puede considerar en base a numerosos estudios el controlador más utilizado por la industria por su fácil implementación y buenos resultados, así mismo su uso se ha extendido a sistemas que van más allá de sus capacidades, con adaptaciones como el control en cascada que posibilitan su funcionamiento pero que sin embargo disminuyen su eficiencia y calidad de los procesos, este hecho ha motivado a que la industria fije su mirada en dar solución a problemas que superan las capacidades de un control PID.

Surgiendo como una alternativa el uso del control Predictivo, que es una técnica moderna por su auge en las últimas décadas, la cual posee la capacidad de realizar controles en procesos multivariados, de dinámica compleja, entre otros, con la característica de predecir el comportamiento de la variable y anticipar su acción de control, además de utilizar una función de costo que minimiza los errores en el manejo de las variables, sin embargo, su difusión y aplicación en la industria aún es muy escasa ya que solo un 5% de los controles implementados en procesos industriales responden a controladores de tendencia moderna, es decir que el control Predictivo forma parte de ese minúsculo grupo [1].

Esto genera la necesidad de realizar un estudio comparativo entre ambas técnicas de control a fin de establecer criterios de desempeño y causales para la aplicación de una u otra estrategia de control.

2.6.2. Problema

El bajo uso en la industria de controladores modernos como el control Predictivo se debe a la falta de un estudio comparativo de su desempeño respecto a la de controladores clásicos como el control PID.

2.7. Hipótesis o formulación de preguntas directrices

El desarrollo de un estudio comparativo del desempeño entre un control Predictivo y control PID permitirá obtener criterios de selección para su implementación en procesos SISO como el manejo de la variable caudal.

2.8. Objetivos

2.8.1. Objetivo general

Realizar un estudio comparativo entre un control Predictivo y un control PID mediante su aplicación a un proceso de caudal, para la evaluación de los parámetros de desempeño más relevantes en ambos casos.

2.8.2. Objetivos específicos

- Investigar acerca de la estrategia de control y principios de funcionamiento utilizados por el control Predictivo y control PID.
- Obtener el modelo matemático en función de transferencia y espacio de estados de la estación de caudal del laboratorio de Automatización y Control.
- Implementar algoritmos de control Predictivo y PID en la estación de caudal del laboratorio de Automatización y Control.
- Validar los resultados obtenidos en el control de la variable caudal.

2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos

Tabla 2. 1 Actividades y Tareas para cada objetivo específico

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDAD	RESULTADOS	MEDIO DE VERIFICACIÓN
Investigar acerca de la estrategia de control y principios de funcionamiento utilizados por el control Predictivo y control PID.	1. Recopilación bibliográfica de información sobre el Control Predictivo y PID	Teoría del funcionamiento del control Predictivo y control PID	Artículos Científicos, Tesis, Libros.
	2. Revisión documental de las principales aplicaciones del control Predictivo y PID , sus requerimientos físicos y computacionales para su implementación	Requerimientos mínimos para la implementación de un control Predictivo y PID en una planta de caudal	Artículos Científicos, Tesis, Libros.
Obtener el modelo matemático en función de transferencia y espacio de estados de la estación de caudal del laboratorio de automatización y control.	1. Identificación y verificación de rangos de funcionamiento de los elementos de control, actuadores, sensores y demás equipos instalados en la estación de caudal.	Conocimiento del funcionamiento y operación de la planta en condiciones óptimas y seguras.	Informe final
	2. Adquisición de datos de la estación de caudal en lazo abierto.	Base de datos y estimaciones.	Función de transferencia y espacio de estados
Implementar algoritmos de control Predictivo y PID en la estación de caudal del	1. Diseño un controlador Predictivo y PID utilizando el entorno de simulación de Matlab	Estructura de implementación de un Predictivo y PID	Simulaciones, algoritmo de control.

laboratorio de automatización y control.	2. Implementación del modelo de control Predictivo y PID en la estación de caudal utilizando conexión OPC	Control de caudal	Informe final
Validar de los resultados obtenidos en el control de la variable caudal	1. Evaluación de la respuesta de los controladores PID y Predictivo en el manejo de la variable caudal frente a cambios de parámetros de funcionamiento y perturbaciones externas.	Valores de sintonía óptimos para el funcionamiento y control de la variable	Informe final
	2. Evaluación de tiempos de elevación, asentamiento, oscilaciones, sobre impulsos y respuesta a perturbaciones.	Determinación del controlador con el mejor desempeño en el manejo de la variable caudal.	Informe final

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

Desde sus inicios en los años setenta el Control Predictivo (MPC) ha tenido una evolución constante, aunque en los primeros años sus avances fueron lentos debido a la limitada capacidad de procesamiento que tenían los quipos en aquel entonces y no es hasta el surgimiento de nueva tecnología en el desarrollo de computadores con mayor capacidad de procesamiento que este controlador presenta una evolución más prominente.

Existen diversas investigaciones desarrolladas en torno a la comparación entre los controladores Predictivos y PID para mejorar la eficiencia de procesos, es así que investigaciones como la de Emil Hernández, Jorge Díaz y Omar Pinzón en su artículo titulado “Estudio del comportamiento de un Control MPC comparado con un Control PID en una Planta de Temperatura”, demuestran que el control Predictivo presenta un mejor comportamiento dinámico con un sobreimpulso menor al del control PID consiguiendo que la variable de proceso permanezca por mayor tiempo en el rango de operación requerido, traduciendo esto a una mayor eficiencia y un potencial beneficio económico [2].

Por otra parte Egner Aceros, Edgar Camargo y Osmer Parabavire, en su trabajo “Comparación Cualitativa del Desempeño de la Aplicación del MPC y el PID para el Control de Nivel de Pozos”, tras la implementación de ambos controladores y realizando pruebas de control a diferentes parámetros de sintonía obtienen un desempeño similar para ambos controladores lo cual a criterio de sus autores demuestra la razón por la cual el PID aún sigue siendo el método de control más implementado, debido a su simplicidad y estabilidad [3].

Otro estudio comparativo es el realizado por Verónica López y Alex Paredes en su trabajo de titulación: “Diseño e implementación de un algoritmo 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 extensión Latacunga” utilizando para su implementación el dispositivo NI myRIO obteniendo una respuesta marcadamente superior en favor del control Predictivo reduciendo sobreimpulsos y mejorando el tiempo de estabilización de la variable, así mismo denota la importancia de un adecuado proceso de estimación del modelo matemático de la planta a controlar [4].

Finalmente es importante citar los resultados obtenidos por Edwin Hopera y Diego Mejia en su artículo “Implementación de un control predictivo basado en modelo aplicado a un sistema de Control de Caudal de Agua Didáctico” en el cual realiza el control de caudal manipulando la señal de un variador de frecuencia demostrando experimentalmente que con equipos de control e instrumentación convencionales es posible realizar la implementación de un control predictivo convirtiéndose este en una de las mejores alternativas existentes para reemplazar la regulación de variables físicas que no operen satisfactoriamente con controladores PID [1].

3.2 Definiciones

Planta. Una planta es un equipo, un juego de piezas de una máquina funcionando conjuntamente, con el objetivo de llevar a cabo una operación específica. También se puede llamar planta a cualquier objeto físico que deba controlarse [5].

Proceso. Operación forzada o natural, caracterizado por una serie de cambios graduales, progresivamente continuos, que se ocurren mediante una serie de acciones controladas a una frecuencia relativamente constante y que tienden a la consecución de un objetivo o resultado final [5].

Sistema. Un sistema es un conjunto de elementos, interrelacionados entre sí, los cuales se caracterizan por poseer unos parámetros inherentes que los definen, y por mostrar unas condiciones físicas asociadas, susceptibles de evolucionar con el tiempo [6].

Variables Las variables representan las magnitudes que determinan el estado de un componente, bloque o sistema. Su valor, normalmente cambiante con el tiempo, puede ser expresado por una función temporal [6].

Variable de Proceso (PV). Es la cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente es la salida del sistema y cambia con el progreso del proceso. En otras palabras, son aquellas variables sobre las que se aplican los valores de consigna.

Variable de control (CV). Es la cantidad o condición modificada por el controlador a fin de afectar la variable de proceso. Estas afectan el curso del proceso y pueden ser medidas y cambiadas a voluntad.

Perturbaciones. Es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida del sistema. Estas afectan directamente el curso del proceso, pero no pueden ser cambiadas a

voluntad, son generalmente desconocidas y no se pueden medir, pero sus efectos sobre las variables medidas permiten detectar su presencia [5].

3.2 Sistemas de control

Un sistema se define como un conjunto de elementos interconectados entre sí que actúan como un ente que recibe acciones de control externas, también conocidas como variables de entrada y la respuesta a estas acciones externas son las variables de salida o variables de proceso. La Figura 3.1 representa de un modo conceptual el funcionamiento de un sistema.

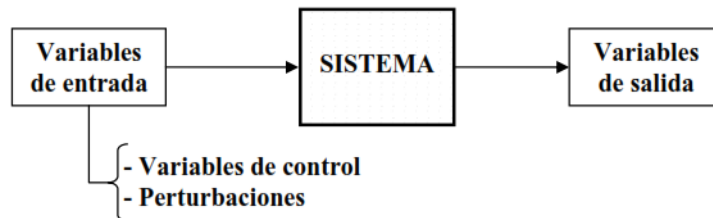


Figura 3. 1 Esquema general de un sistema

Fuente: [7]

Dentro de los sistemas se encuentra el concepto de sistema de control, el cual se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que se corrija o limite la desviación del valor medido, respecto al valor de referencia [7].

Idealmente un sistema de control debe ser capaz de lograr su objetivo cumpliendo con los siguientes requerimientos:

- Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
- Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido.
Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.
- Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador [7].

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- **Sensores:** Su función es medir y dar a conocer los valores que adopta la variable;
- **Controlador:** Haciendo uso de los valores medidos por los sensores y comparándolos con la consigna predeterminedada, calcula el valor que debe asignarse a la variable de control basados en algoritmos o estrategias de control.
- **Actuador:** Es el elemento encargado de ejecutar la acción de control calculada por el controlador

La Figura 3.2 representa la interacción de los elementos y variables que conforman un sistema de control.

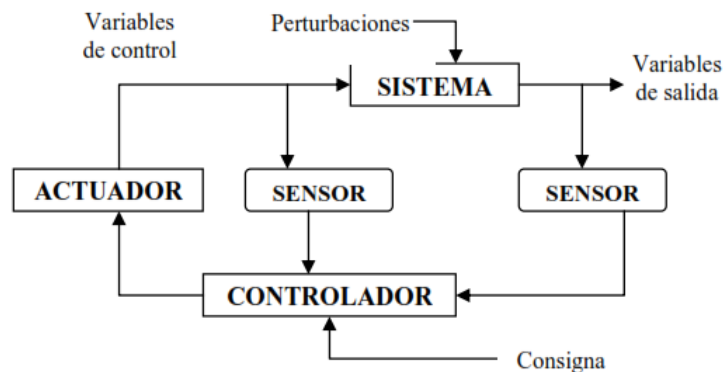


Figura 3. 2 Esquema general de un sistema de control

Fuente: [7]

3.3 Representación de Modelos matemáticos

Obtener un modelo matemático de un componente físico, es uno de los problemas más importantes en ingeniería de control. Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un juego de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con exactitud, o al menos, razonablemente bien, por lo cual un modelo matemático no debe ser ni muy complicado ni excesivamente simple [5].

La teoría de control clásica utiliza extensamente el concepto de función de transferencia (o transmitancia), su análisis y diseño se realiza en el dominio de s (Laplace) y/o en el dominio de la frecuencia, mientras que la teoría de control moderna denominada así por el auge que ha tenido en

los últimos años está basada en el concepto del espacio de estado, utiliza extensamente el análisis vectorial-matricial, su análisis y diseño se realizan en el dominio del tiempo [5].

A continuación se describen las dos formas de expresar los modelos matemáticos de una planta requeridos en este estudio:

3.3.1 Función de transferencia

La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo se define como el cociente entre las expresiones matemáticas de las variables de salida $y(t)$ y de la entrada $u(t)$ en función del tiempo, en otras palabras, es la representación de cómo un cambio o estímulo en la entrada del sistema se transforma en un efecto en la salida; se representa por el símbolo $G(p)$ o $G(s)$ [5] [8].

De manera general las ecuaciones diferenciales que representan a un sistema se describe en la Ecuación 3.1:

$$(a_n p^n + a_{(n-1)} p^{(n-1)} + \dots + a_0)y = (b_m p^m + b_{(m-1)} p^{(m-1)} + \dots + b_0)u \quad (3.1)$$

Dónde: a_i y b_i = coeficientes constantes
 r = entrada o fuerza impulsora
 y = salida

$$p = \frac{d}{dt}$$

Y de aquí:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{b_m p^m + b_{(m-1)} p^{(m-1)} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{(n-1)} p^{(n-1)} + \dots + a_0} = G \quad (3.2)$$

Para obtener la función de transferencia se aplica la transformada de Laplace a los dos miembros de la Ecuación 3.2 y considerando valores iniciales nulos en la función resulta:

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{(m-1)} s^{(m-1)} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{(n-1)} s^{(n-1)} + \dots + a_0} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (3.3)$$

expresión equivalente a la Ecuación 3.2 sin más que cambiar el operador diferencial p en el dominio del tiempo por la variable compleja s en el dominio de las s . Cuando los términos del numerador y

del denominador son igualados a cero, es decir $y(t) = 0$ y $u(t) = 0$, se puede obtener sus raíces $s_1, s_2, s_3 \dots s_n$. Donde las raíces de $Y(s)$ se denominan Ceros y las raíces de $U(s)$ se denominan Polos.

Una condición de realizabilidad física de las funciones de transferencia es que el coeficiente n debe ser mayor o igual que el coeficiente m : $n \geq m$, una situación que difiera de esta condición provocara que la señal de entrada se fraccione en varios términos que para un sistema real le sería imposible diferenciar la señal de entrada original de los demás términos generados, además de que en la salida se produciría un pico infinito.

3.3.2 Función de transferencia de sistemas de primer orden autorregulados

- Procesos autorregulados

Son aquellos en los cuales un cambio en las variables de entrada conduce a un nuevo estado estacionario en forma automática, además tiene la tarea de mantener la salida en el valor deseado a pesar de las perturbaciones presentes. Por ejemplo, los sistemas de primer orden

- Sistemas de primer orden más tiempo muerto

Muchas veces en los procesos industriales se introducen tiempos muertos; particularmente en la industria química suelen asociarse al transporte de fluidos por cañerías. Por ejemplo, en el siguiente esquema, si se produce un cambio en la concentración de entrada C_{in} puede demorar un cierto tiempo θ en que dicho cambio llegue a la entrada del tanque [5].

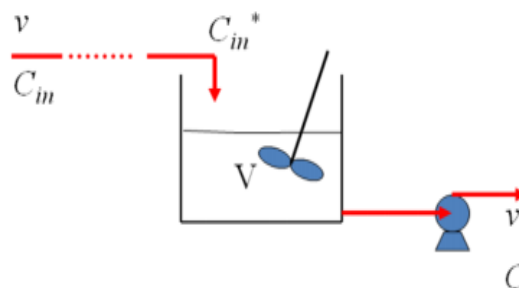


Figura 3. 3 Ejemplo de proceso Autorregulado con tiempo muerto

Fuente: [5]

La forma general en función de transferencia de estos procesos es:

$$g(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\theta L} \quad (3.4)$$

El proceso matemático para su obtención se encuentra sustentado en [5].

A continuación, se presentan algunas generalidades relacionadas con la función de transferencia.

- La función de transferencia es una propiedad de un sistema, independiente de la magnitud y naturaleza de la entrada o función de excitación.
- La función de transferencia incluye las unidades necesarias para relacionar la entrada con la salida; sin embargo, no proporciona información acerca de la estructura física del sistema. (Las funciones de transferencia de muchos sistemas físicamente diferentes pueden ser idénticas) [8].

Una de las desventajas del uso de este modelo matemático es que se basa en el enfoque entrada-salida, esto significa que una función de transferencia es como una caja negra a la que se le aplica una señal (la entrada) y solo se ve el efecto que se produce en la salida, es decir no se sabe que es lo que ocurre en el interior de la caja negra. Lo cual representa una desventaja ya que para diseñar un sistema de control solo se podrá utilizar información suministrada por una sola señal: la salida. Esto establece un límite en el desempeño que se puede conseguir, otra desventaja básica del método clásico es su limitada aplicabilidad: se pueden aplicar solo a sistemas lineales, invariantes con el tiempo o a sistemas que se puedan aproximar como tales [9] [10].

3.3.3 Espacio de Estados

El método de espacios de estado es una técnica que permite utilizar la información suministrada por todas las variables internas de un sistema, además de la salida, es posible diseñar sistemas de control que tienen mejores desempeños.

Para comprender de mejor manera lo que es un espacio de estado es conveniente definir los siguientes términos:

- **Estado**- se define estado de un sistema como la mínima cantidad de información necesaria en un instante para que, conociendo la entrada a partir de ese instante, se pueda determinar cualquier variable del sistema en cualquier instante posterior [11].

- **Variables de estado**- las variables de estado de un sistema dinámico son el conjunto mínimo de variables que determinan el estado del sistema en cualquier instante.
- **Vector de estado**- un vector cuyos elementos son las variables de estado
- **Espacio de estado**- es el espacio vectorial en el cual el vector de estado toma valores, teniendo por tanto la misma dimensión que el número de elementos de dicho vector [11].

Los conceptos anteriores se pueden entender de mejor manera con la ayuda de la Figura 3.4 donde se representa un sistema dinámico con varias entradas $u(t)$ y salidas $y(t)$, de la misma manera el sistema expresa las variables de estado $x(t)$, que posteriormente son representadas por un vector de n dimensión:

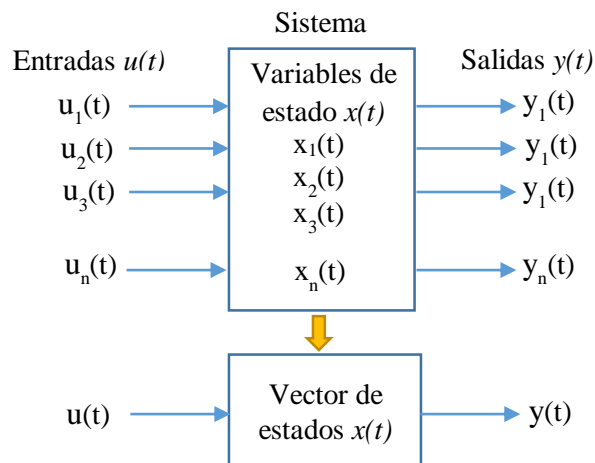


Figura 3. 4 Representación de variables en espacio de estados

De manera general un sistema está representado en el espacio de estados por las ecuaciones 3.5 y 3.6:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \text{ (Ecuación de estado)} \quad (3.5)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \text{ (Ecuación de salida)} \quad (3.6)$$

Donde:

x = vector de estado

\dot{x} = derivada del vector de estado con respecto al tiempo

y = vector de salida

u = vector de entrada o de control

A = matriz del sistema

B = matriz de la entrada

C = matriz de la salida

D = matriz de la prealimentación (en la mayoría de los sistemas es nula) [10].

Las matrices de las ecuaciones 3.5 y 3.6 se representan de manera ampliada en la figura 3.5:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A x(t) + B u(t) \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(t) \\ b_2(t) \\ \vdots \\ b_n(t) \end{bmatrix} u(t) \\ \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & \cdots & c_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Figura 3. 5 Representación matricial de las variables en espacio de estados

Las ventajas que ofrece el método de estados son abordadas por distintas ramas del control, denominadas respectivamente: control multivariable, control no-lineal, control adaptativo, control por asignación de polos, control óptimo y esencialmente el controlador objeto de este estudio como lo es el control predictivo. Aunque cada una de estas ramas del control automático utiliza técnicas que le son propias, todas ellas confluyen en la necesidad de un modelo del comportamiento de sistemas dinámicos que incluya la evolución de sus variables internas, que pueda aplicarse a sistemas multivariables y que pueda ser no-lineal y /o de parámetros no constantes [11].

3.4 Métodos de Control

Los procesos reales en general requieren de estrategias o métodos de control los cuales se encargan de calcular las acciones de control con el objetivo de alcanzar, restablecer o mantener los parámetros prefijados para obtener un funcionamiento deseado; es decir, hacer que la medida se mantenga en un valor lo más próximo posible al punto de consigna. La señal correctora, o salida

del controlador, es establecida por éste en función de la señal de error, llamada también desviación [6].

A continuación, se describen los aspectos más relevantes de cada una de las estrategias de control planteadas en el presente trabajo además de otros controles asociados a estos:

3.4.1 Control ON-OFF

En este sistema de control el actuador tiene sólo dos posiciones fijas, que en muchos casos son, simplemente conectando (on) y desconectando (off), dando origen a un comportamiento oscilatorio, que puede aumentar dependiendo de la dinámica del proceso y de la variable.

En la mayoría de procesos la energía que se transfiere a las variables suele tardar un tiempo en transmitirse o en su efecto dejar de hacerlo, como consecuencia de este hecho la variable oscila por encima o por debajo de la referencia. Este inconveniente se puede resolver con la implementación de una zona de tolerancia alrededor de la referencia, con lo cual mientras la variable se encuentre dentro de la zona de tolerancia, el controlador no emitirá ninguna señal de control, evitando así que el actuador se active y desactive constantemente [5] [12].

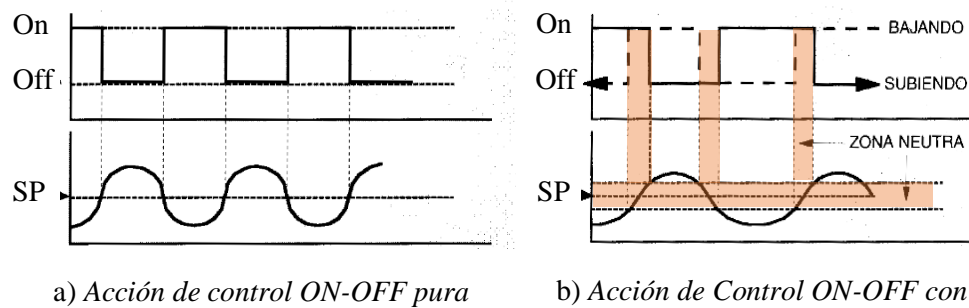


Figura 3. 6 Curvas de comportamiento de un Control ON-OFF

Fuente: [12]

3.4.2 Control proporcional P

Después del control on-off la acción de control proporcional es el tipo de controlador más simple, este método hace uso de la denominada ganancia que es la relación que existe entre la variación de la señal de salida y el error que la produce, es decir, es la variación en la señal de entrada. El

controlador proporcional es esencialmente un amplificador con ganancia ajustable. Tienen la ventaja de que solo cuentan con un parámetro de ajuste, K [5].

Si bien la acción de este controlador es más amortiguada y lleva a la variable a un estado estacionario en lugar de dar saltos de un extremo a otro, adolece de una gran desventaja, opera con una desviación, o “error de estado estacionario” en la variable que se controla.

A este error se le conoce como offset (Figura 3.7) que consiste en la estabilización de la variable en un lugar no coincidente con el punto de consigna, después de presentarse una perturbación en el sistema. De aquí que el control proporcional solo puede aplicarse si las condiciones de servicio no varían y son estables o si la presencia del “offset” en la variable es perfectamente admisible [5].

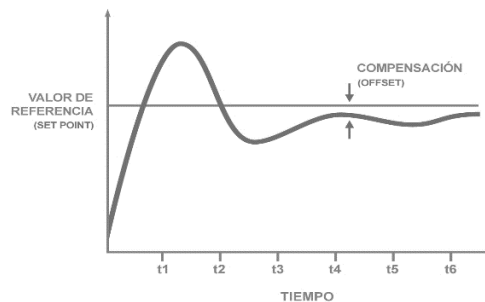


Figura 3. 7 Curva de comportamiento de una acción derivativa con error Offset

Fuente: [5]

3.4.3 Control integral I

La función principal de la acción integral es asegurarse de que la salida del proceso coincide con el punto de consigna en estado estacionario. El principal objetivo en este tipo de control, es que mientras haya señal de error persistirá una acción correctora [13].

La acción correctora, responde tanto a la magnitud como a la duración y signo de la desviación. De este modo, para cualquier perturbación o cambio de carga, la acción correctora persiste hasta haber producido la corrección necesaria y precisa para restablecer en el proceso las condiciones de equilibrio, anulando totalmente la desviación [6].

El control integral tiene el inconveniente de que su acción es poco energética en los instantes que siguen a la aparición brusca de una desviación, ya que su efecto es paulatino. Nótese el contraste con el control proporcional, en el que la desviación es permanente, pero, sin embargo, presenta una respuesta energética e instantánea desde el primer momento en que surge un cambio en la desviación,

es decir que el inconveniente de la acción integral es que si bien corrige el error en estado estacionario también incrementa el tiempo de estabilización de la variable de proceso [6].

3.4.4 Control derivativo D

En el caso del control derivativo la derivada se relaciona con la velocidad de cambio de la variable, lo cual indica que esta acción de control responde a la rapidez de cambio del error, lo que produce una corrección importante antes de que el error sea elevado. Para que el control derivativo llegue a ser de utilidad debe actuar junto con otro tipo de acción de control, ya que, aislado, el control derivativo no responde a errores de estado estable [14].

3.4.5 Control PID

El controlador PID es con mucho el algoritmo de control más común. La mayoría de los lazos de realimentación se controlan mediante este algoritmo u otro con pequeñas variaciones.

Una de las condiciones para que un controlador sea aceptable es que la respuesta sea rápida, es por esto que se agrega una acción derivativa la cual dota al controlador de una capacidad anticipativa utilizando una predicción de la salida basada en una extrapolación lineal. La ecuación general para un controlador PID es la representada por la ecuación 3.7 [5]:

$$y(t) = y_0 + K_c \left(\underbrace{e(t)}_P + \frac{1}{T_i} \underbrace{\int_0^t e(t) dt}_I + T_d \underbrace{\frac{de(t)}{dt}}_D \right) \quad (3.7)$$

y = Salida del controlador

c = Punto de consigna

m = Señal de medida

e = c – m = Señal de error o desviación

K_c = Ganancia

T_i = Tiempo integral

T_d = Tiempo derivativo

y₀ = Salida inicial del controlador para un t = 0

La acción de control es así una suma de tres términos que representan el pasado por la acción integral del error (el término-I), el presente (el término-P) y el futuro por una extrapolación lineal del error (el término-D). Los parámetros del controlador se llaman: ganancia proporcional K , tiempo integral T_i , y tiempo derivativo T_d .

Se ha comprobado empíricamente que el controlador PID es capaz de resolver un amplio espectro de problemas de control. Hay controladores más complejos difieren del controlador PID porque utilizan métodos más sofisticados para la predicción [5].

En general las acciones del control PID se resumen de la siguiente manera: la acción proporcional (K_c) reduce el tiempo de subida, pero no elimina nunca el error en régimen permanente. La acción integral (K_i) elimina el error en régimen permanente, pero empeora la respuesta transitoria. La acción derivativa (K_d) incrementa la estabilidad del sistema, reduce el sobreimpulso y mejora la respuesta transitoria. En la tabla 3.1 se resumen los efectos de cada controlador K_c , K_d y K_i sobre un sistema en lazo cerrado

Tabla 3. 1 Características PID

RESPUESTA EN LAZO CERRADO	TIEMPO DE SUBIDA	SOBREIMPULSO	TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO	ERROR R-P
K_c	Disminuye	Aumenta	Poca variación	Disminuye
K_i	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Poca variación	Disminuye	Disminuye	Poca variación

Fuente: [5]

Tenga en cuenta que estas relaciones puede que no sean demasiado precisas porque los efectos de las ganancias K_c , K_i y K_d dependen los unos de los otros. De hecho, al variar el valor de una de estas variables puede que se modifiquen los efectos producidos por las otras dos. Por esta razón, a la hora de determinar los valores de K_c , K_i y K_d sólo deberá usar esta tabla como una referencia [5].

3.4.6 Contexto histórico del Control Predictivo

La técnica denominada “Control Predictivo” surgió en los años setenta, donde se aplicaron con éxito a industrias químicas y petroleras, su expansión y aplicación hacia otros procesos en los años posteriores se dio bajo la premisa de que si se busca que la tecnología pueda seguir avanzando y se

puedan conseguir resultados más y más ambiciosos, es necesario que las técnicas de control automático también avancen.

Es por esto que se presenta entonces la idea de mejorar y optimizar los procesos industriales, con la finalidad de mantener la industria competitiva y rentable. Esto implica la búsqueda constante de una solución a problemas como: procesos con múltiples variables, retardos, dinámica compleja, etc.

Esta búsqueda origina técnicas como: control difuso, control predictivo, redes neuronales, algoritmos genéticos, etc. Las mismas que permiten una mejor eficiencia y un alto grado de flexibilidad en los procesos. La principal diferencia entre ellos radica en la complejidad matemática, siendo cada vez más importante incluir las incertidumbres en el diseño [15].

En 1998 la Society of Instrumentation and Control Engineering publica un estudio acerca de las “Necesidades futuras de la teoría del control en las industrias” dicho estudio se realizó con base en la tecnología de control en la industria japonesa, de acuerdo con este informe los principales problemas que se presentan en el sector industrial tienen que ver con el retardo o tiempos muertos, las perturbaciones y la interacción de las variables [15].

En la Figura 3.8 se representa la relación entre las posibilidades técnicas y expectativas que cada una genera en las industrias para el control de sus procesos. O dicho de otra manera la facilidad de implementación frente al efecto o resultado que se espera con dicha implementación

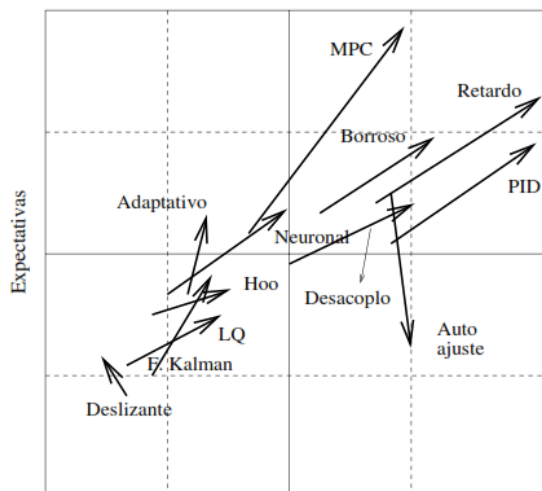


Figura 3. 8 Expectativas y Posibilidades

Fuente: [15]

Los resultados del artículo de la Society of Instrumentation and Control Engineering presentan con una flecha la tendencia a futuro de los diferentes controles. Según esto, el PID avanzado, compensación de retardo, borroso, desacoplo y MPC serán técnicas ampliamente usadas con grandes expectativas. El control neuronal despierta grandes expectativas, pero tiene ciertas dificultades de implementación, mientras que el Auto-ajuste se implementa con facilidad, pero pierde expectativas. Las técnicas como LQR, filtro de Kalman, Hoo y Adaptativo se mantienen “sin demasiadas expectativas y no fácilmente implementables” [15].

3.4.7 Control predictivo basado en modelo

El control predictivo (MPC – Model Predictive Control) no es una estrategia de control específica, sino que se trata más bien de un campo muy amplio de métodos de control desarrollados en torno a ciertas ideas comunes. Su estrategia de control basada en procesos numéricos requiere una intensa actividad de cómputo, no obstante, con la potencia de los computadores actuales esta no es realmente una dificultad infranqueable y es lo que ha impulsado su aplicabilidad en diversos procesos industriales en los últimos años, es por esta razón que se lo ha denominado un control moderno pese a que su origen data de inicios de los años 70 [15] [16].

Las ideas que aparecen en mayor o menor medida en toda la familia de controladores predictivos son básicamente:

- Uso explícito de un modelo para predecir la salida del proceso en futuros instantes de tiempo (horizonte).
- Calculo de las señales de control minimizando una cierta función objetivo.
- Estrategia deslizante, de forma que en cada instante el horizonte se va desplazando hacia el futuro, lo que implica aplicar la primera señal de control en cada instante y desechar el resto, repitiendo el cálculo en cada instante de muestreo [15].

El término predictivo se debe a que es una técnica que permite controlar un sistema anticipándose a su respuesta, es decir, ejecutar la acción en tiempo actual tomando en cuenta lo que hará el sistema en el futuro. La inclusión de restricciones físicas en el diseño del controlador es un aspecto destacable del control Predictivo obteniendo así mejoras respecto a las técnicas clásicas de control.

- Estrategia de control

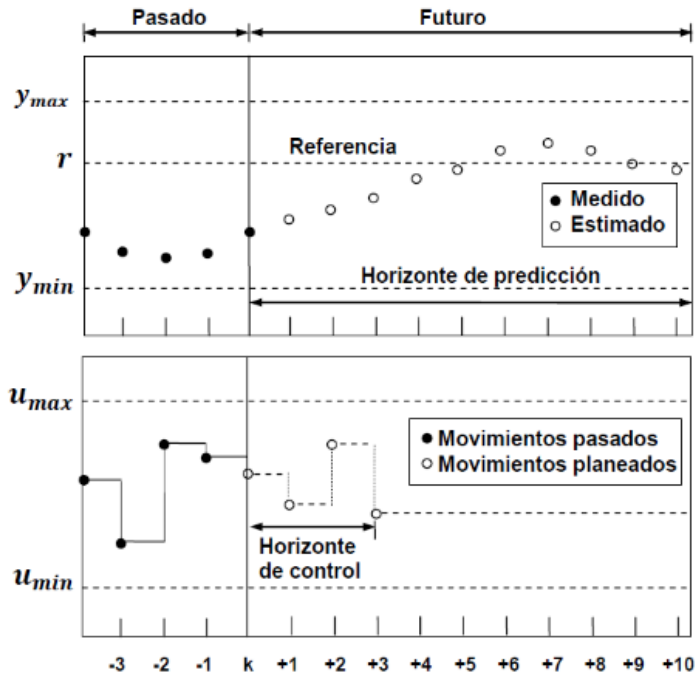


Figura 3. 9 Operación de un MPC

Fuente: [1]

En la Figura 3.9, se muestra el principio de operación de un control MPC, en el cual para el cálculo del próximo movimiento (acción de control (u)), el controlador opera en dos fases: estimación y optimización.

Estimación- En la fase de estimación, el controlador utiliza todos los cambios previos, los valores actuales de las variables conocidas y el modelo de la planta para predecir el desempeño de la variable de salida [1].

Optimización- En la fase de optimización, los valores de la señal de referencia, las perturbaciones medibles y las restricciones, se especifican para un Horizonte de Predicción o instantes de muestreo posteriores, y con esta información el controlador calcula varios movimientos futuros de la variable manipulada sobre un Horizonte de Control, los cuales corresponden a la solución de un problema de optimización con restricciones.

Terminado este proceso, el controlador aplica la señal de control restringida (u_k) a la planta, la cual opera con esta entrada hasta el próximo intervalo de control, donde el controlador toma nuevas mediciones para repetir los procesos de estimación y optimización [1].

Para llevar a cabo esta estrategia, se usa una estructura como la mostrada en la Figura 3.10, donde se presenta un bloque que contiene el modelo de la planta y un bloque optimizador donde se incluyen las restricciones y una función de costo, ambos bloques forman el controlador predictivo. En el caso de un controlador predictivo con modelo en espacio de estados además hay un bloque para la estimación de estados [17].

La referencia externa se introduce en el controlador y se restan de las salidas futuras predichas por el modelo. Esa diferencia llamada error se introduce en el optimizador que calcula una entrada óptima (u) y se introduce en el proceso. El proceso actualiza las lecturas de salidas pasadas y presentes (y) estos nuevos valores son introducidos en el controlador que mediante el modelo repite el cálculo de las salidas futuras para un nuevo periodo de muestreo. En el caso de un modelo en espacio de estados, los valores pasados de las entradas y los valores pasados y presentes de las salidas son utilizados por el estimador para el cálculo de los estados y salidas futuras del modelo [17].

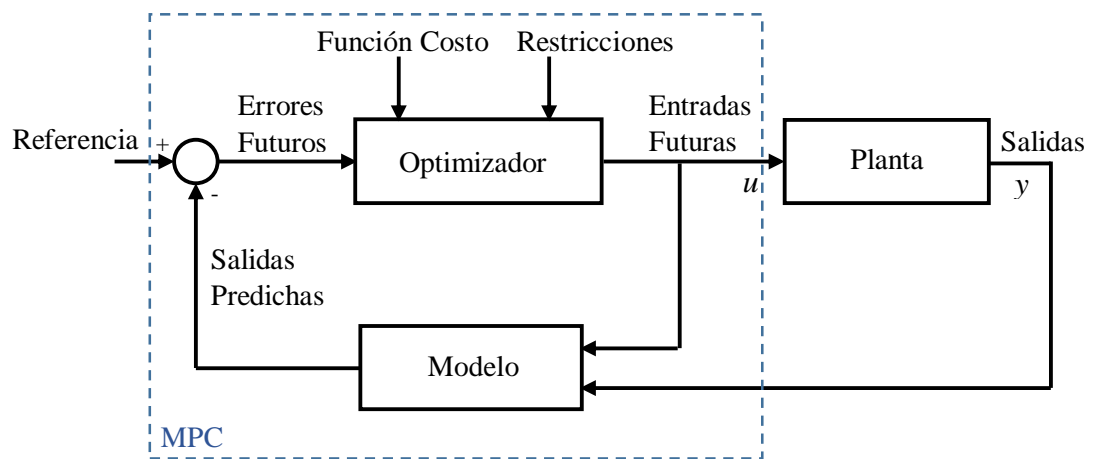


Figura 3. 10 Estructura de control de un MPC

Fuente: [17]

Como se puede apreciar, el modelo de proceso juega un papel decisivo en el controlador. Este debe ser lo suficientemente elaborado para capturar de la mejor manera posible la dinámica del proceso y, así, predecir de forma precisa la evolución del sistema; pero al mismo tiempo, debe ser lo suficientemente simple de implementar y entender, con el fin de reducir la carga computacional asociada al proceso de predicción [18].

- **Horizonte de Predicción (H_p) y Horizonte de control (H_c)**

Una adecuada sintonización de un controlador predictivo depende mucho de la comprensión y aplicación que relacionan estos dos términos, es por ello que resulta de vital importancia conocer su definición que, aunque resultan ser muy sencillos son fundamentales.

- Horizonte de Predicción: Es el intervalo de tiempo futuro que se considera en la optimización para la señal de control.
- Horizonte de Control: Número de movimientos calculados para cada variable manipulada, donde el horizonte de control es menor al horizonte de predicción [19].

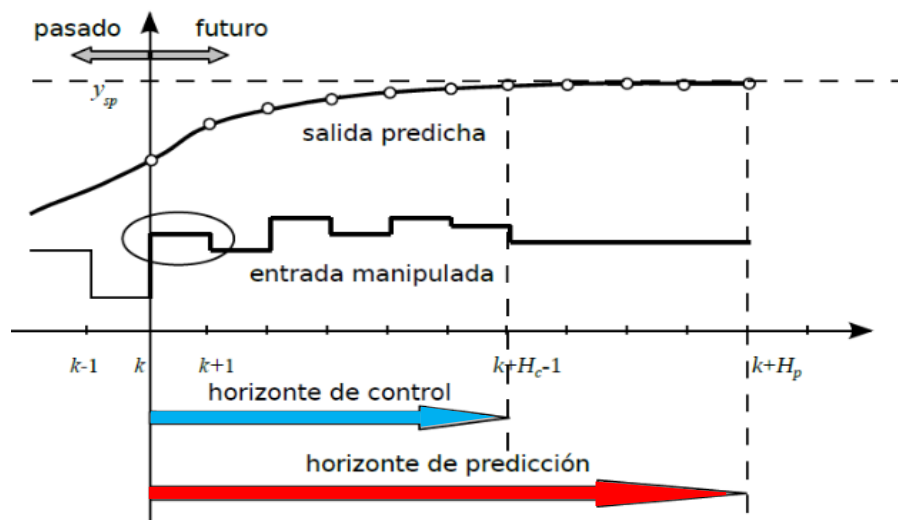


Figura 3. 11 Horizonte de control y predicción

Fuente: [1]

Es necesario tomar en cuenta:

- El horizonte de control es menor que el horizonte de predicción.
- Si el horizonte de predicción es corto se reduce la longitud de tiempo en la que el controlador MPC puede predecir la señal de salida de la planta. Un horizonte de predicción muy pequeño causa que el controlador MPC opere algo parecido al controlador con realimentación tradicional.
- Un horizonte de predicción grande incrementa la capacidad de predecir al controlador MPC y observar una restricción potencial y evitarlo. Un horizonte de predicción muy grande

decrementa el rendimiento del controlador MPC por el aumento de cálculos extras que realiza el algoritmo de control.

- Un horizonte de control grande produce cambios más agresivos en la acción de control. Esos cambios agresivos pueden resultar en oscilaciones o en energía innecesaria [19].

3.4.7 Formulación del control predictivo

Los controladores predictivos tienen elementos comunes y se pueden elegir diversas opciones, y a diferentes casos dan distintos algoritmos, pero se establece un criterio de optimización definido por:

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

a) Modelo de predicción

El modelo de predicción hace referencia al modelo matemático que se utilizará para diseñar el MPC, en la academia tradicionalmente se ha utilizado el modelo en espacio de estados por su facilidad de manejo ante sistemas multivariables, el cual fue descrito con mayor amplitud en el apartado 3.3.3.

La representación en espacio de estados corresponde a las ecuaciones 3.5 y 3.6

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3.5)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (3.6)$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene el modelo de predicción al expresar la ecuación en función de un incremento en el tiempo con respecto al tiempo actual t :

$$x(k + j + 1|k) = Ax(k + j|k) + Bu(k + j|k) \quad (3.8)$$

$$y(k + j|k) = Cx(k + j|k) \quad (3.9)$$

Donde se obtiene el valor de y para el instante $k + j$ desde k [17].

b) Función objetivo

Conocida también como función de costo, esta función minimiza el error entre la salida predicha y el punto de ajuste o trayectoria de referencia tomando en cuenta los incrementos de la señal de control [19].

El control predictivo suele utilizar la función de costo representada en el Ecuación 3.10, la cual permite abordar un problema de optimización con una función cuadrática sujeta a restricciones lineales [17].

$$J = \min \sum_{j=H_1}^{H_2} \alpha(j) [\hat{y}(k+j) - r(k+j)]^2 + \sum_{j=0}^{H_c-1} \beta(j) [\Delta u(k+j)]^2 \quad (3.10)$$

Donde:

H_1 es el inicio del horizonte de predicción,

H_2 es el final del horizonte de predicción,

$\alpha(j)$ es el peso de los errores futuros

$\hat{y}(k+j)$ = predicciones de la variable controlada

$r(k+j)$ = trayectoria de referencia

$\beta(j)$ = es el peso de los incrementos futuros de la variable manipulable.

$\Delta u(k+j)$ = valores futuros de la variable manipulada

Los parámetros antes mencionados incluyendo el horizonte de control (H_c) son parámetros de la sintonización del controlador predictivo.

Restricciones: En la actualidad el MPC es la única metodología capaz de incorporar las restricciones de forma sistemática en la fase de diseño del controlador, siendo esta característica una de las razones de su gran éxito en la industria. Parece lógico que al disponer de un modelo dinámico del proceso se pueda conocer la evolución futura de su salida y por tanto se pueda saber si ésta va a violar o no las restricciones y actuar en consecuencia.

En la práctica, todos los procesos están sujetos a restricciones. Los actuadores tienen un campo limitado de acción, así como una determinada velocidad de cambio. Razones constructivas, de seguridad o medioambientales o bien los propios alcances de los sensores pueden causar límites en las variables de proceso, tales como niveles en depósitos, caudales en tuberías o temperaturas

y presiones máximas. Todo lo expuesto anteriormente hace necesaria la introducción de restricciones en la función a minimizar [15].

Normalmente se considerarán límites en la amplitud (Ecuación 3.11), velocidad de cambio (Ecuación 3.12) de la señal de control y límites en las salidas (Ecuación 3.13):

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max} \quad \forall t \quad (3.11)$$

$$du_{min} \leq u(t) - u(t - 1) \leq du_{max} \quad \forall t \quad (3.12)$$

$$y_{min} \leq y(t) \leq y_{max} \quad \forall t \quad (3.13)$$

c) Ley de control

La especificación de la señal de control durante el intervalo de tiempo operativo, recibe el nombre de ley de control. Matemáticamente, el problema básico de control es determinar la ley de control óptimo, sujeta a diversas restricciones de ingeniería y de economía, que minimice (o maximice, según el caso) un índice de comportamiento o desempeño determinado

Para obtener los valores de la señal de control $u(k + j|k)$ es necesario minimizar la función de costo J, pero antes se debe obtener las salidas predichas $\hat{y}(k + j|k)$ en función de los valores actuales y pasados, tanto de la entrada como de la salida, de igual forma las señales futuras de control, mediante el uso del modelo escogido y reemplazando en la función de costo, obteniendo una expresión que al minimizar da como resultado los valores buscados [20].

Esta estructura de la ley de control se plasma en el uso del concepto de horizonte de control (H_c), que considera que tras un cierto intervalo $H_c < H_2$ no hay variación en las señales de control propuestas, el control se encuentra en el punto de trabajo óptimo, es decir:

$$\Delta u(k + j - 1) = 0 \quad j > H_c \quad (3.14)$$

lo cual es equivalente a dar pesos infinitos a los cambios en el control a partir de un determinado instante [20].

3.5 Comunicación OPC (Ole for Process Control)

Es una tecnología de comunicación con una arquitectura de cliente y servidor. Una aplicación actúa de servidor proporcionando datos y otra actúa como cliente leyéndolos o manipulándolos.

OPC es, con mucha diferencia, la tecnología de comunicación industrial estándar. Ello permite el intercambio de información entre múltiples dispositivos y aplicaciones de control sin restricciones

o límites impuestos por los fabricantes. Un servidor OPC puede estar comunicándose continuamente con los PLCs de campo, RTUs, estaciones HMI u otras aplicaciones. Aunque el hardware y el software provengan de diferentes marcas comerciales, el cumplimiento del estándar OPC posibilita la comunicación continua en tiempo real [21].

Los softwares que tienen la capacidad de adquirir datos de los dispositivos de campo y servirlos en OPC son los llamados Servidores OPC o OPC Servers

La caja de herramientas OPC extiende las prestaciones de MATLAB y Simulink con herramientas para la interacción con servidores OPC. Este conjunto de funciones permite la lectura, escritura y el registro de datos OPC que provienen de dispositivos (Figura 3.12) que están comprendidos en el estándar de acceso de datos de la fundación OPC [21].



Figura 3. 12 Estructura de comunicación utilizando un OPC server

3.6 Parámetros de desempeño de controladores

El criterio de desempeño comúnmente utilizado para representar las características de un sistema de control, está constituido por la evaluación de los siguientes conceptos, cuando la forma de excitación en la entrada del sistema es un escalón:

- **Sobrepaso máximo (Mp):** es la cantidad en que la forma de la curva de salida sobrepasa el valor final de la salida, expresada en porcentaje.
- **Tiempo de retardo (Td):** es el tiempo requerido para que la respuesta del sistema alcance la mitad del valor final por primera vez.
- **Tiempo de asentamiento (Ts):** es el tiempo requerido para que las oscilaciones amortiguadas transitorias alcancen y permanezcan dentro del $\pm 2\%$ o del $\pm 5\%$ del valor final o valor en estado estable.

- **Tiempo de levantamiento (T_r):** es el tiempo requerido para que la respuesta del sistema pase del 10% al 90% del valor final. En otras palabras, para que vaya de 0.1 del valor final al 0.9 del valor final.
- **Tiempo pico (T_p ó $T_{m\acute{a}x}$):** es el tiempo requerido para que la respuesta del sistema alcance el pico del levantamiento máximo [8].

Todos los parámetros antes descritos se pueden entender de mejor manera con la ayuda de la Figura 3.13:

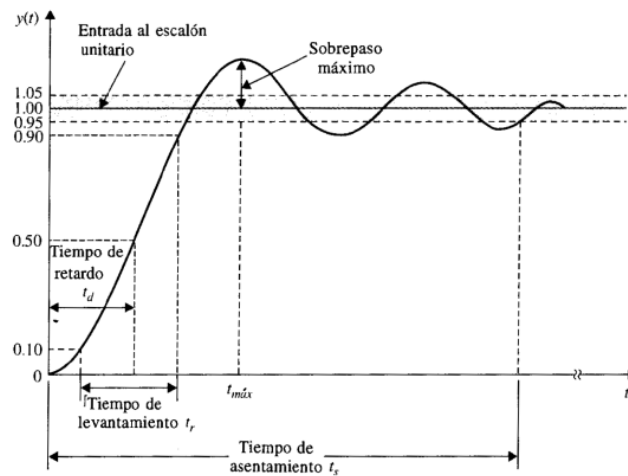


Figura 3. 13 Respuesta típica al escalón unitario de un sistema de control

Fuente: [8]

4. METODOLOGÍA

La implementación de una estrategia de control Predictivo y PID a un proceso de caudal, conlleva aspectos técnicos y teóricos los cuales son sustentados en primera instancia mediante la modalidad de investigación bibliográfica, en la cual se recopila información acerca de los principios que utiliza cada estrategia de control, así como antecedentes y trabajos relacionados al tema de estudio.

En cuanto a los métodos a utilizarse para la implementación de los controladores son de tipo deductivo y experimental, ya que en principio el método experimental permitirá manipular la variable de entrada para determinar su efecto en la variable de salida, obteniendo así el modelo matemático de la planta. Y en el caso del método deductivo su aplicación permite obtener resultados o efectos descocidos mediante la aplicación de principios conocidos, especialmente en el diseño y sintonía de cada uno de los controladores. Adicional a estos métodos, también se utilizará el método cuantitativo para evaluar el desempeño de cada uno de los controladores.

4.1 Declaración de variables

- **Variable Independiente**

Desempeño de cada controlador

- **Variable dependiente**

Criterios de selección

4.1.1 Operacionalización de las variables

Tabla 4. 1 Variable Independiente

Variable independiente	Unidad de medida	Instrumento de medición
Desempeño de cada controlador	- Segundos (s) - Porcentaje (%)	Análisis de tendencias

Tabla 4. 2 Variable Dependiente

Variable dependiente	Unidad de medida	Instrumento de medición
Criterios de selección	Adimensional	Análisis de tendencias

4.1.2 Métodos, técnicas e instrumentos

Tabla 4. 3 Métodos, Técnicas e Instrumentos

Método	Técnica	Instrumentos
Experimental	Observación Medición	Ficha de rangos de operación
Deductivo	Modelación y simulación	Función de transferencia y Parámetros de sintonía
Cuantitativo	Validación	Parámetros de desempeño

4.2 Descripción de la Estación de Caudal

La planta o proceso a controlar se encuentra diseñada 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.

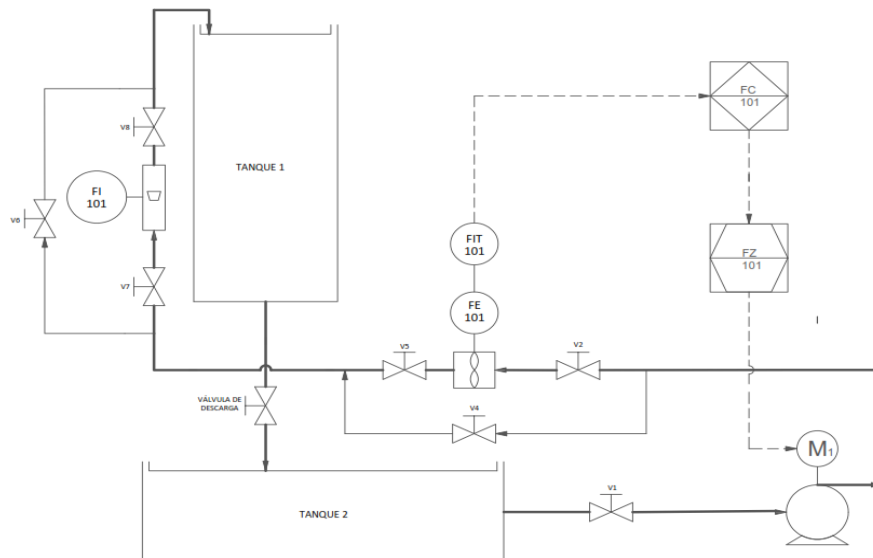


Figura 4. 1 Diagrama P&ID de la estación de caudal

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

Transmisor indicador de flujo (FIT-101): Transmisor de flujo 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 flujo (FI-101): Flujómetro 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 flujo 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 flujo (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 a fin de visualizar el comportamiento de las variables.

Elemento de control final de flujo (FZ-101): 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 flujo de salida de la bomba.

Para este caso en particular el elemento actuador será un variador de frecuencia esto debido a que su control es más efectivo en rangos del 20% al 100% del flujo nominal, coincidiendo con el rango de medición del sensor, el cual presenta errores e inestabilidad en la medición de caudales bajos, además el control por variador de frecuencia reduce los aumentos de presión durante el funcionamiento evitando las fugas, vibraciones y sobrecalentamientos del motor de la bomba [22].

4.2.1 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 (CM-V1);

Salida (Variable de Proceso): la señal proveniente del sensor de flujo 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 , obteniendo así una señal de voltaje en el rango de 1 a 5V.

4.3 Adquisición de datos y obtención del modelo matemático

La primera etapa sigue la lógica planteada en el diagrama de la Figura 4.2 cuyo objetivo es obtener un modelo matemático tanto en espacios de estado como en función de transferencia.

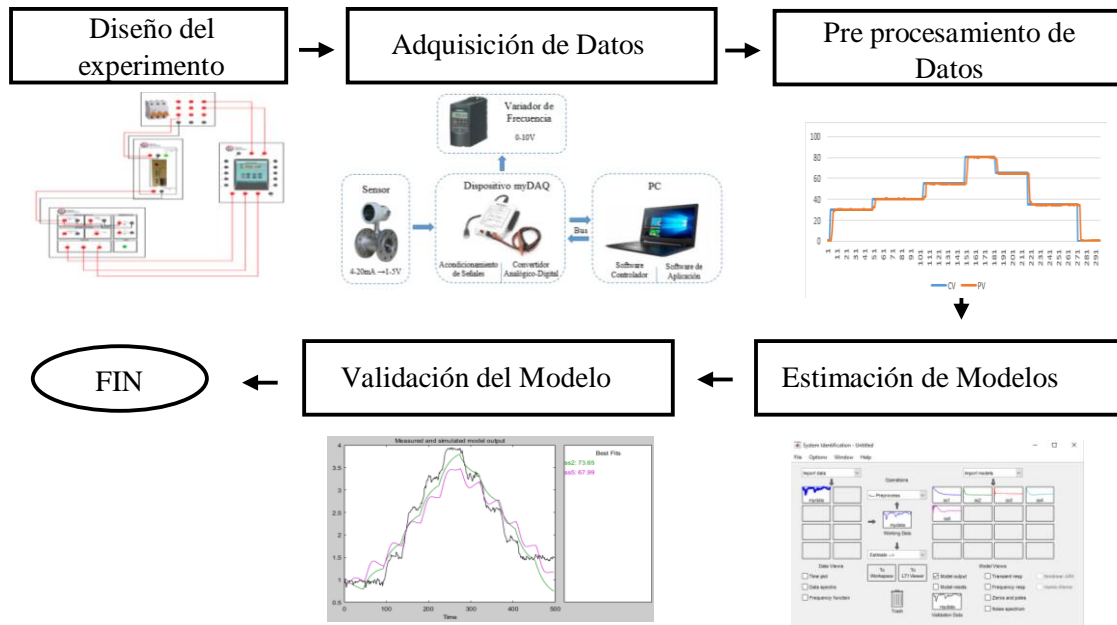


Figura 4. 2 Etapas para la identificación de sistemas

4.3.1 Rango de funcionamiento y configuración de la planta

Previo al proceso de adquisición de datos es necesario determinar los rangos de funcionamiento de la planta, así como también reajustar los parámetros de funcionamiento tanto del sensor de flujo como del variador de frecuencia.

Para establecer el rango de operación de la planta se proceder a dar valores de voltaje escalonados un rango de 0 a 10V hacia el variador de frecuencia y tomando lecturas de respuesta en el sensor de flujo, 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 80LPM. El registro completo de lecturas se encuentra en detallado en el Anexo I.

Tabla 4. 4 Rangos y características de operación de la planta

Voltios variador	Caudal LMP	Respuesta
0-2	0	No hay circulación de caudal
2.2 – 2.3	0	Circula un min. de caudal que no es detectado por el sensor
2.4 – 2.9	13.8 – 27.6	Zona inestable valores erróneos
3 – 6.2	28,04 – 80.22	Zona de operación óptima para las condiciones de la planta
6.5 - 10	83,6 – 116.04	Zona de saturación rápida para el tanque elevado de la planta

Una vez establecida la zona de operación de la planta se configura el sensor para obtener una señal de 20mA a un caudal de 80LPM, inicialmente este valor se encontraba configurado a 150LPM, también se configura el tiempo de muestreo del sensor, de 6 segundos a un mínimo de 2 segundos para obtener una respuesta más rápida.

Con la finalidad de obtener ecuaciones que permitan escalar valores de voltaje a unidades de caudal correspondientes a los nuevos valores de ajuste, se repite nuevamente el mismo proceso, es decir dar valores de voltaje al variador de frecuencia y registrar la medida del sensor (Anexo I).

Con estos nuevos valores se procede a determinar las ecuaciones correspondientes, como se observa en la Figura 4.3 y 4.4:

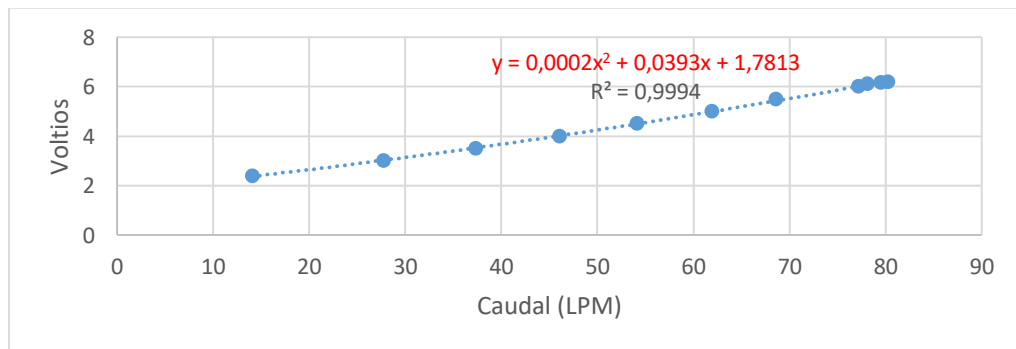


Figura 4. 3 Línea de tendencia y ecuación Caudal vs Voltaje del Variador

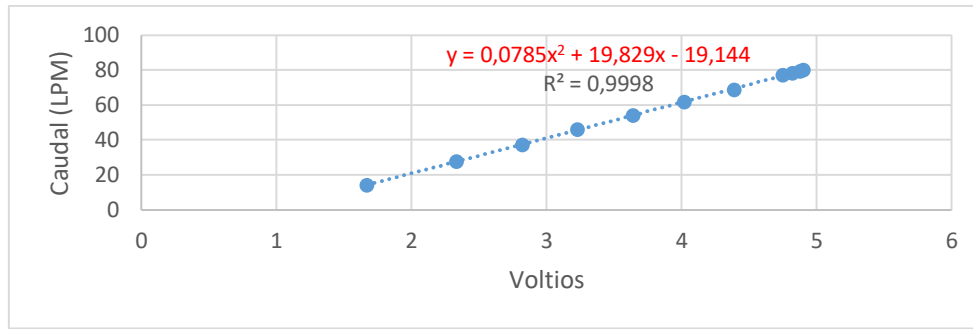


Figura 4. 4 Línea de tendencia y ecuación Voltaje del Sensor vs Caudal

4.3.2 Adquisición de datos

La adquisición de datos constituye una parte fundamental para el posterior proceso de modelado del sistema, de esta etapa depende en gran parte que los controladores a diseñar generen condiciones óptimas y estables de operación.

La adquisición de datos corresponde al registro de valores de una variable de entrada y a una variable de salida es decir un sistema (SISO), cuyas unidades serán escaladas a LPM con el uso de la ecuación 4.1 para escalar unidades en LPM a voltios en la entrada del variador y la ecuación 4.2 para escalar el voltaje de salida del sensor a unidades en LPM.

$$y = 0,0002x^2 + 0,0393x + 1,7813 \quad (\text{Entrada}) \quad (4.1)$$

$$y = 0,0785x^2 + 19,829x - 19,144 \quad (\text{Salida}) \quad (4.2)$$

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 4.5

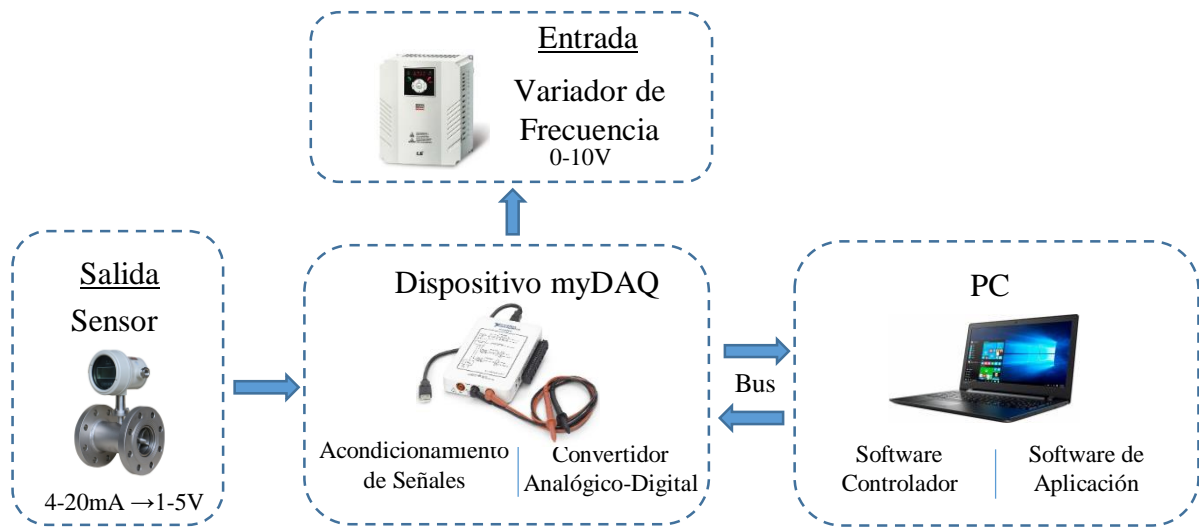


Figura 4. 5 Componentes de un sistema de adquisición de datos

4.3.3 Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos se la realiza mediante la tarjeta NI myDAQ (Anexo II) dentro de la cual se carga un VI (virtual instruments) con los bloques de programación, y su control se lo realiza desde el ordenador local para almacenar los datos.

La HMI para el control y registro de las variables se muestra en la Figura 4.6 donde las unidades de la variable de proceso (PV) y la variable de control (CV) se muestran tanto en litros por minuto (LPM) como en unidades de voltaje.

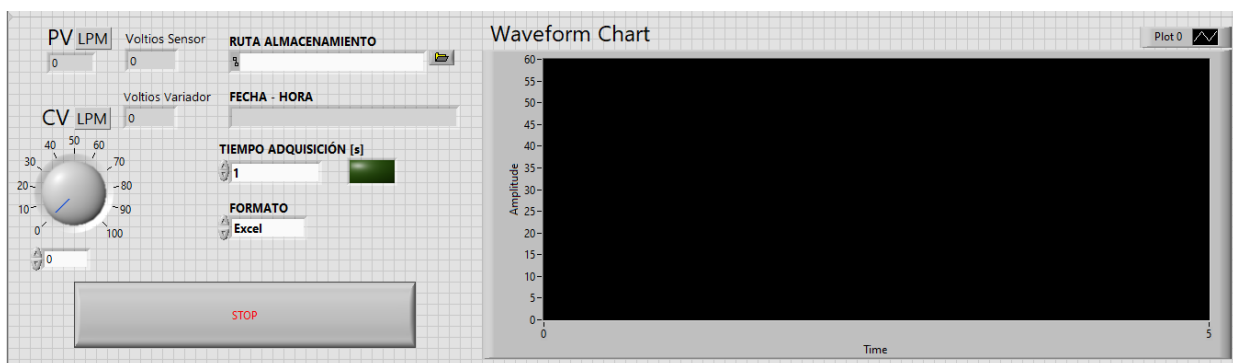


Figura 4. 6 HMI para la adquisición de datos

Los bloques de programación correspondientes a esta interfaz se muestran en la Figura 4.7, en la cual, la parte principal es la aplicación de las Ecuaciones 4.1 y 4.2 para escalar las señales a ser registradas en la base de datos (Anexo III); El resto de la programación corresponde a los elementos necesarios para la generación de una base de datos.

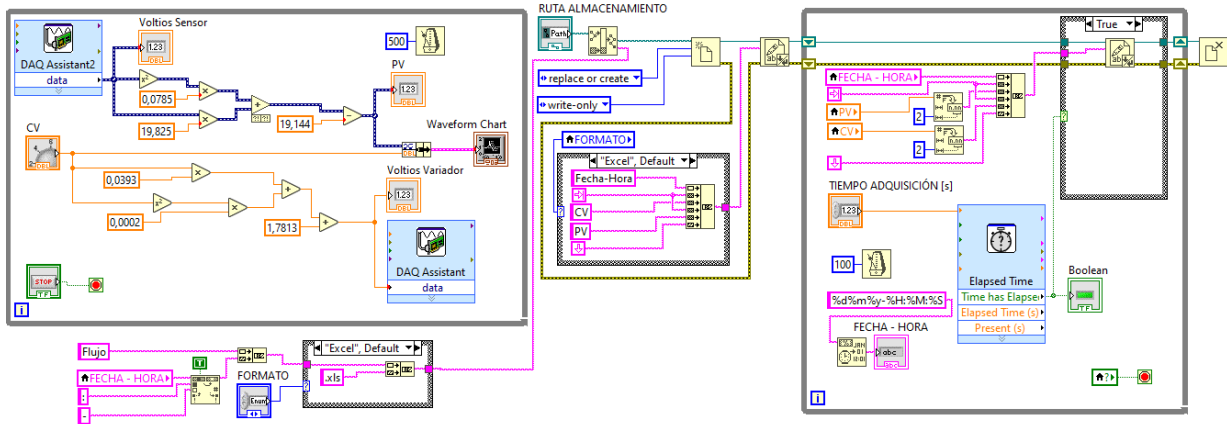


Figura 4. 7 Bloques de programación para la adquisición de datos

4.3.4 Preprocesamiento de datos

Las señales a partir de las mediciones de flujo son usualmente ruidosas debido al flujo turbulento, es por esto que se debe realizar una filtración o verificación de aquellos datos que son inadecuados para la identificación del sistema. Por lo tanto, se utiliza un filtro pasa-bajo de primer orden, específicamente la media móvil exponencial (EMA) cuya fórmula es:

$$S(t) = \begin{cases} Y(0) & t = 0 \\ \alpha Y(t) + (1 - \alpha)S(t - 1) & t > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Dónde:

- El coeficiente α es un factor de suavizado entre 0 y 1.
- $Y(t)$ es el valor de la señal a filtrar en un periodo de tiempo t .
- $S(t)$ es el valor de la EMA en cualquier periodo de tiempo t .
- $S(t - 1)$ es el valor de la EMA en el periodo de tiempo $t-1$ (pasado).

Originalmente la curva obtenida de los datos de entrada y salida es la representada por la Figura 4.8 donde se aprecia que la señal del proceso (PV) contiene un ruido considerable.

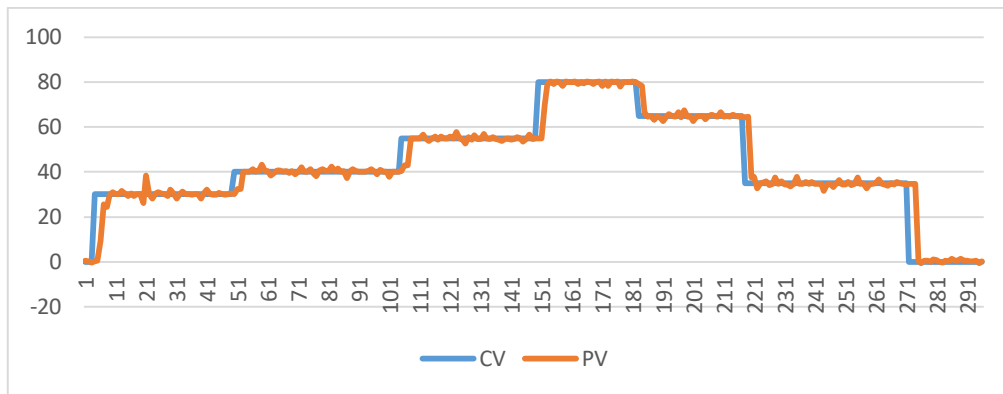


Figura 4. 8 Datos originales de la CV y PV adquiridos de la planta

Después de la aplicación de la media móvil exponencial se puede observar en la Figura 4.9 una señal más suave en la variable de proceso.

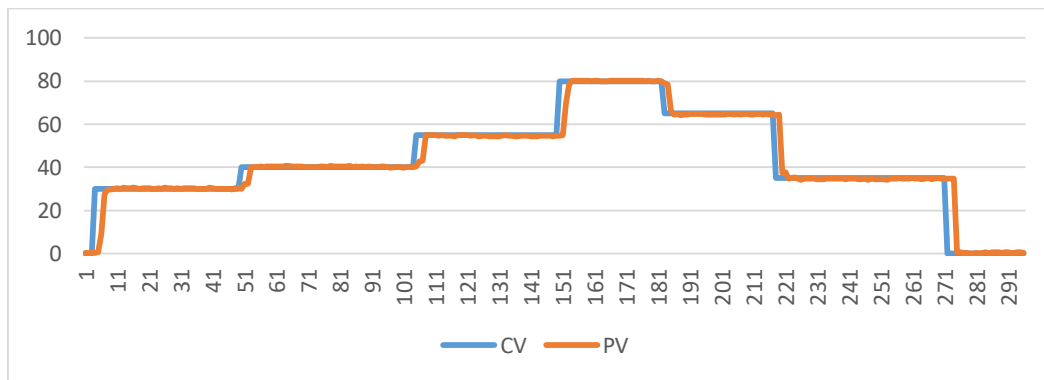


Figura 4. 9 Datos filtrados de CV y PV

Una vez obtenida una señal adecuada se prosigue con la identificación del sistema, tomando en cuenta que cualquier error en la adquisición de datos influirá en el modelo matemático del proceso.

4.3.5 Estimación de modelos

La identificación o estimación del modelo de la planta se realiza utilizando la herramienta “systemIdentification” de Matlab o también conocida como “ident”.

Una vez abierto el “systemIdentification”, la importación de los datos se la realiza en el dominio del tiempo, especificando la entrada, salida, tiempo de inicio y tiempo de muestreo como se observa en la parte derecha de la Figura 4.10. Esta es la última instancia donde se puede realizar algún cambio, corrección o filtración al bloque de datos ingresados, previo a la estimación del modelo.

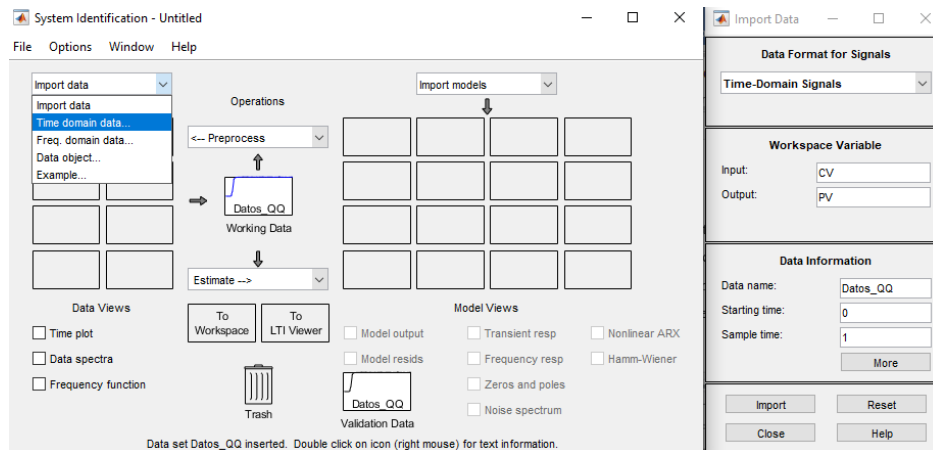


Figura 4. 10 Ventana para estimación de modelos SystemIdentification de Matlab

El modelo del sistema a obtener se representará de dos formas diferentes: Modelo de Proceso con función de transferencia y Modelo en espacio de estados

- **Modelo de proceso con función de transferencia**

La estimación de la función de transferencia es representada de dos formas, la expresión (a) de la Figura 4.11 corresponde a la forma común de representación, y la expresión (b) muestra la forma específica correspondiente a un modelo de primer orden con retardo (FOTD) el cual es utilizado en sistemas con respuesta al escalón como el aplicado en este trabajo; una de las utilidades de este modelo de representación es que facilita la sintonización por el método de Lambda (Anexo IV) del control PID debido a que nos entrega las constantes K_p , T_{p1} y T_d .

$$\begin{array}{l} \text{From input "u1" to output "y1":} \\ -0.1603 s + 0.4638 \\ \hline s + 0.4563 \end{array}$$

(a)

$$\begin{array}{l} \text{Process model with transfer function:} \\ K_p \\ G(s) = \frac{\quad}{1+T_{p1}s} * \exp(-T_d*s) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} K_p = 1.0066 \\ T_{p1} = 0.49269 \\ T_d = 1.82 \end{array}$$

(b)

Figura 4. 11 (a) Función de transferencia (b) Modelo FOTD

- **Modelo en espacio de estados**

Para el modelo en espacio de estados la estimación se lo realiza en tiempo continuo por arrojar un modelo más general y de ser el caso también permite cambiar el tiempo de muestreo, lo cual no es posible al estimar en primera instancia en tiempo discreto.

```

Continuous-time identified state-space model
dx/dt = A x(t) + B u(t) + K e(t)
y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)
A =
      x1      x2      x3      x4
x1 -7.722  -7.338  -8.134  -3.544
x2 18.77   20.14   23.01   9.47
x3 -15.53  -17.18  -18.92  -7.894
x4 0.8062  0.8461  0.9421  0.3355
B =
      u1
x1 0.1454
x2 -0.3722
x3 0.3108
x4 -0.01576
C =
      x1      x2      x3      x4
y1 96.97 -22.07  8.206 -1.721

```

Figura 4. 12 Modelo en espacio de estados estimado de la planta

4.3.6 Validación de modelos

Una forma de validar el modelo estimado es utilizando la herramienta “model output” dentro de la misma ventana del systemIdentification, en la cual, para cada modelo o forma de representación estimada se muestra el grado de coincidencia con el modelo real, debiendo tener un porcentaje por arriba del 75% para que se considere valido y puntualizando que entre más elevado sea el grado de coincidencia más preciso será el controlador a diseñar. En el caso de no llegar a un mínimo aceptable se deberá repetir el experimento de adquisición de datos con la aplicación de otro tipo de filtros o cambiando las condiciones de operación de la planta.

En la Figura 4.13 (a) se muestra el grado de coincidencia entre la salida real y la estimación del modelo, el cual asciende a un 92.57% en el caso del modelo de proceso con función de transferencia y para el caso del modelo en espacio de estados (Figura 4.13 (b)) el grado de coincidencia es del 92.62% con un modelo de grado cuatro.

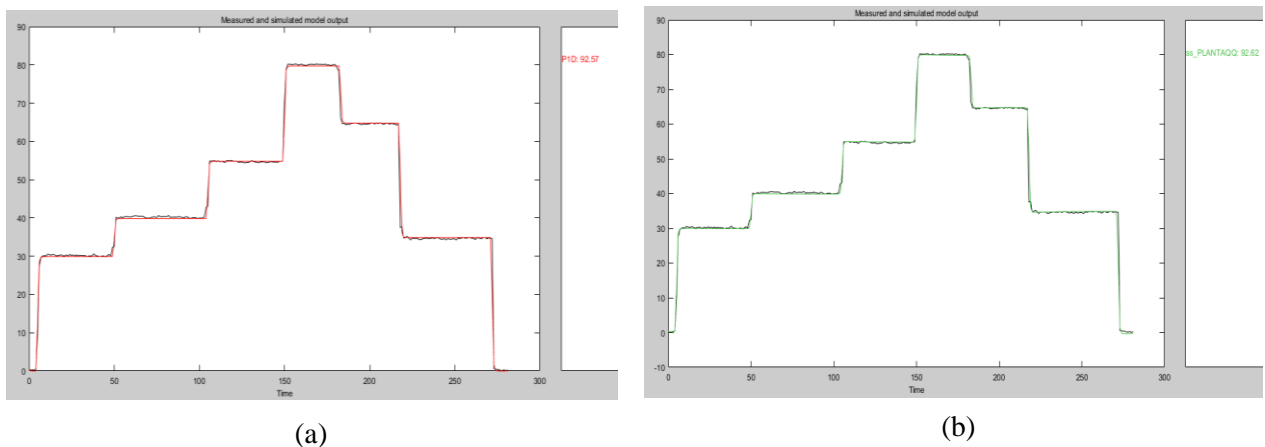


Figura 4. 13 Validación para el Modelo de proceso con Función de Transferencia y Espacio de estados

4.4 Desarrollo de controladores

El desarrollo de ambos controladores se basa en un sistema de simple entrada y salida (SISO) esto por las características constructivas de la estación de caudal y además porque el presente trabajo constituye un paso inicial hacia el desarrollo de posteriores trabajos en la implementación de controladores modernos. El control de un proceso de simple entrada y salida contribuye en este caso en particular a establecer criterios de valor en cuanto al desempeño de cada uno de los controladores. Si bien el control predictivo tiene la capacidad de manejar procesos multivariados (MIMO), no sería una comparación objetiva si se lo realiza contra un control PID el cual maneja procesos de variables simples.

Una condición necesaria y común para la implementación de ambos controladores es la estructura de comunicación con la planta real, por lo cual se describirá en primer lugar este proceso, para posteriormente describir el desarrollo de cada uno de los controladores.

4.4.1 Estructura de comunicación

La estructura utilizada para establecer comunicación entre el software de diseño de los controladores (Predictivo y PID) y la planta real, es la mostrada en la Figura 4.14, donde el PLC hace la función de una tarjeta de adquisición de datos, es decir recibir y enviar señales de la planta real hacia el ordenador y viceversa mediante conexión física por puerto Ethernet. La comunicación OPC actúa como pasarela para poder leer y escribir datos desde Simulink hasta el PLC y este a su vez con la planta real.

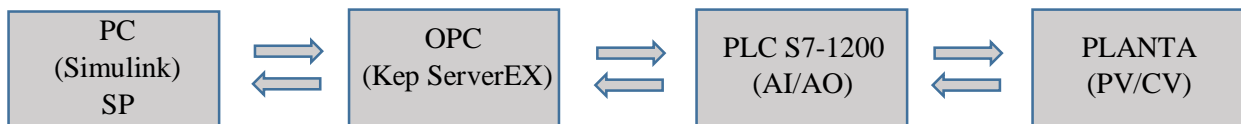


Figura 4. 14 Estructura de comunicación entre la planta real y el software de diseño

4.4.2 Configuración de entradas y salidas analógicas en PLC

El primer paso es establecer una comunicación entre el PLC y la planta real mediante la configuración de la entrada (IW66) y salida(QW80) analógica del mismo, para lo cual hay que normalizar y escalar la señales.

- **Entrada analógica IW66**

La entrada analógica del PLC recoge la señal proveniente de la salida de la planta, es decir el sensor de flujo con un rango de 1 a 5V por lo cual es necesario normalizar y escalar esta señal (Figura 4.15). La normalización “NORM_X” consiste en ajustar el valor adquirido a la resolución de la entrada analógica de 10 bits que corresponde a un rango de 0 a 27648, este valor se guarda en una marca MD100 y es enviada al bloque “SCALE_X” donde se escala a un rango de 0 a 10V que es el rango de operación de las entradas y salidas del PLC. Una vez escalado el resultado es guardado en la marca MD104; es importante que este valor se exprese en forma de punto flotante para facilitar su control con respecto al valor real de la planta.

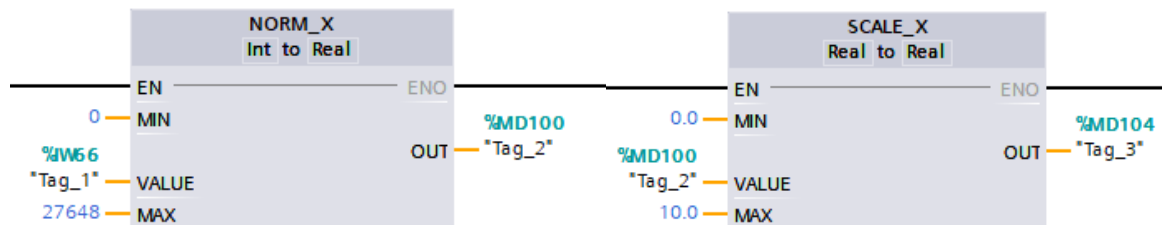


Figura 4. 15 Normalización y Escalamiento de la señal de entrada analógica del PLC

- **Salida analógica QW80**

La salida analógica del PLC es la encargada de enviar la señal de control hacia la entrada de la planta, es decir al variador de frecuencia con un rango de 0 a 10V; de la misma manera que con la entrada analógica se debe normalizar y escalar la señal (Figura 4.16). En este caso la señal es generada desde Simulink y su valor se escribe en la marca MD80; el resultado de esta normalización es guardado en la marca MD110, que es utilizada por el bloque “SCALE_X” para su escalamiento en un rango de 0 a 27648 y enviada por la salida analógica QW80.

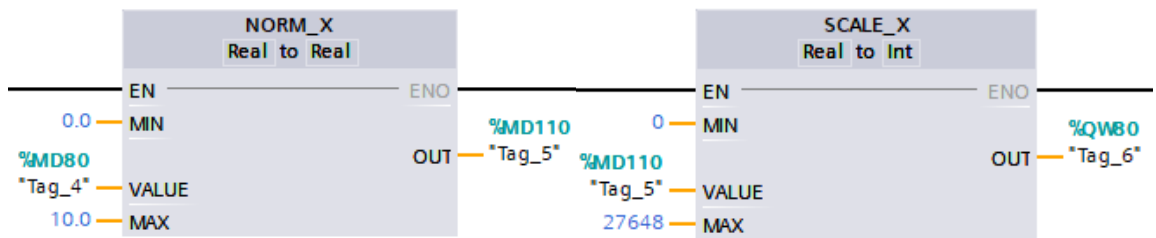


Figura 4. 16 Normalización y Escalamiento de la señal de salida analógica del PLC

Una vez creado los bloques de programación para la lectura y escritura en la entrada y salida analógica, el programa debe ser cargado a la memoria física del PLC añadiendo una configuración en los mecanismos de conexión del PLC, en la cual se debe habilitar el acceso vía comunicación PUT/GET; esta configuración permitirá posteriormente utilizar la pasarela de comunicación OPC.

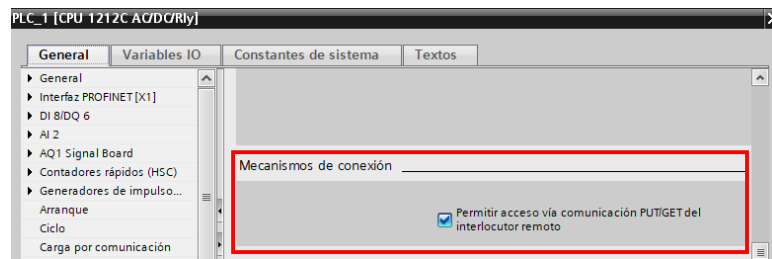


Figura 4. 17 Configuración de acceso PUT/GET

4.4.3 Configuración OPC en KepServerEX

La comunicación se la realiza por medio de un servidor OPC cuya configuración se detalla en el Anexo V. En la Figura 4.18 se muestra la ventana de trabajo del programa KepServerEX utilizado para establecer la comunicación OPC, donde se creará un canal de comunicación con el modelo del PLC(S7-1200), el puerto de comunicación ethernet, la dirección IP, y la dirección de las marcas MD104 y MD80 configuradas en el PLC.

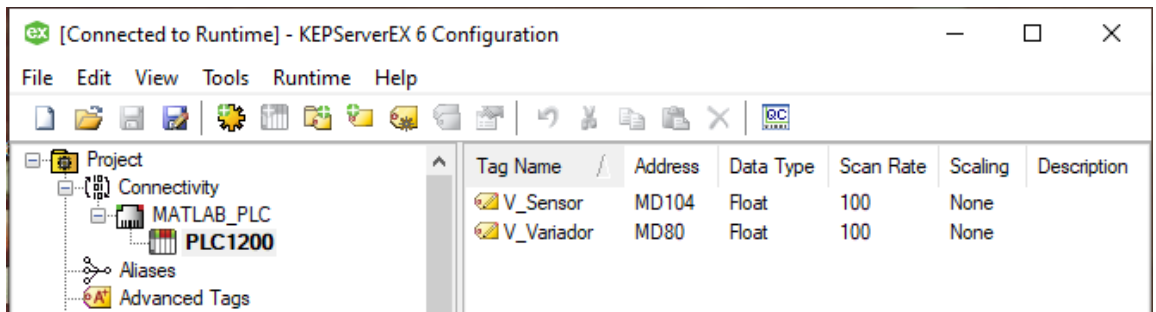


Figura 4. 18 Ventana de configuración del KepServerEx

4.4.4 OPC en Simulink

Dentro de Simulink se encuentra un toolbox exclusivo para configurar la comunicación con el servidor OPC (Figura 4.19), se hace uso del bloque “OPC Config” para establecer comunicación con el servidor, “OPC Read” para leer los datos provenientes del sensor de flujo y “OPC Write” para enviar valores hacia el variador de frecuencia. La configuración interna de cada bloque se detalla en el Anexo V.

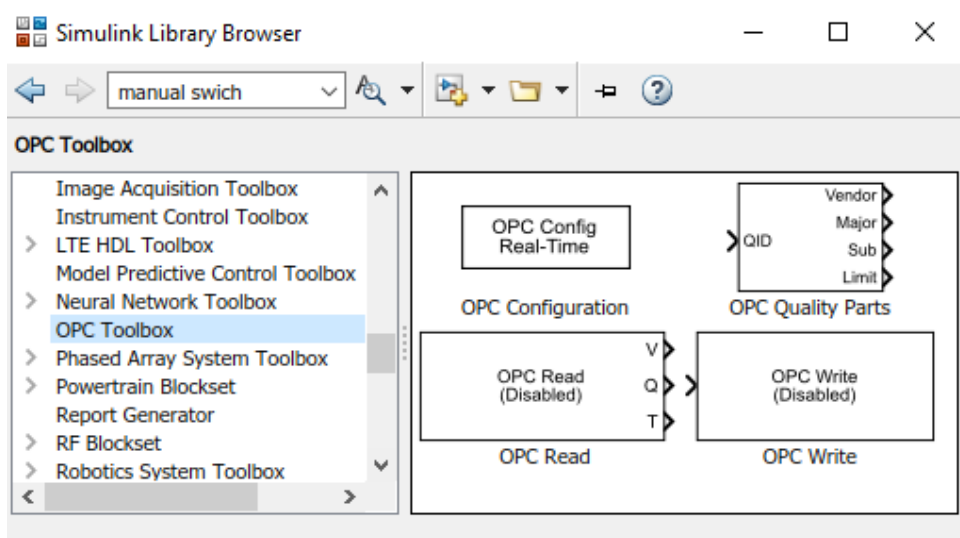


Figura 4. 19 OPC Toolbox

4.4.5 Desarrollo de Control Predictivo

Diseño y simulación de un MPC en Simulink

Antes de implementar el Control Predictivo en la planta real es necesario diseñar y simular el controlador, utilizando la estructura mostrada a continuación:

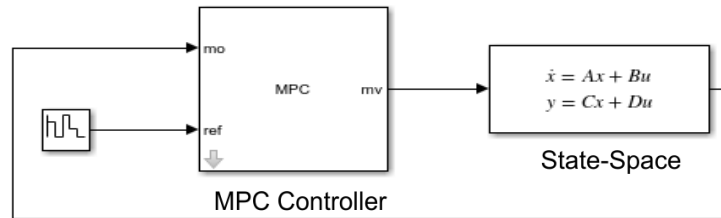


Figura 4. 20 Estructura para diseño y simulación de un MPC

En este punto se hace uso del modelo matemático en espacio de estados obtenido anteriormente, el cual es utilizando tanto por el bloque “State-Space” que representa a la planta, así como por el bloque “MPC Controller” para imponer el modelo de predicción.

Dentro de la ventana de diseño del “MPC Controller” se añade una nueva estructura MPC y se verifica que el número de variables corresponda a las de la planta real, finalmente se especifica el tiempo de muestreo que para este caso es de un segundo y se procede a “definir y linealizar” el modelo dando click en la opción que se encuentra en la parte inferior.

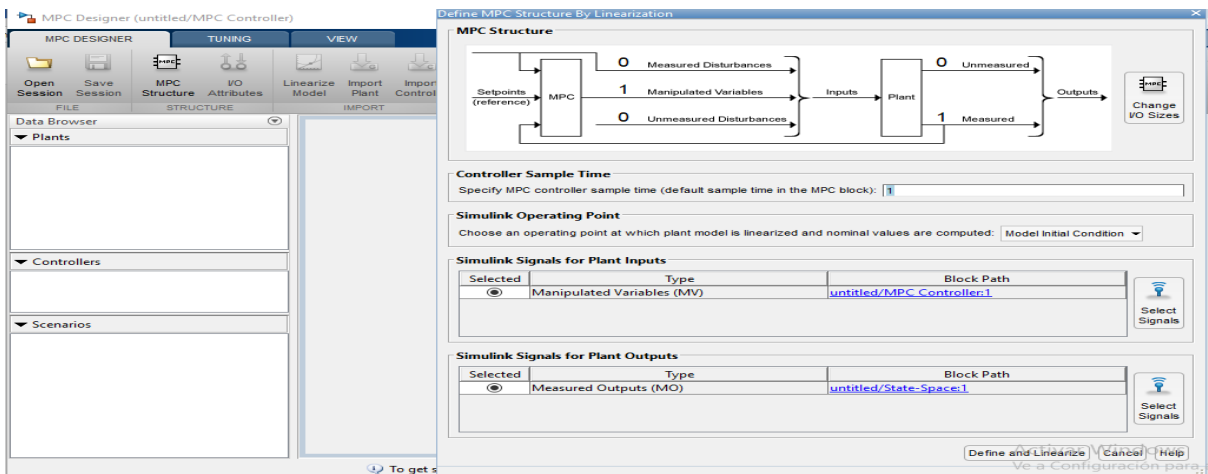


Figura 4. 21 MPC Designer

El resultado de esta acción da un modelo no controlado el cual responde únicamente al modelo de la planta (Figura 4.22 (a)), al que hay que imponerle el modelo de predicción haciendo uso de la opción “Import Plant” y sobre este modelo realizar los respectivos ajustes de sintonía (Figura 4.22 (b)). Los valores de sintonía y simulación son analizados en el capítulo 5 del presente trabajo.

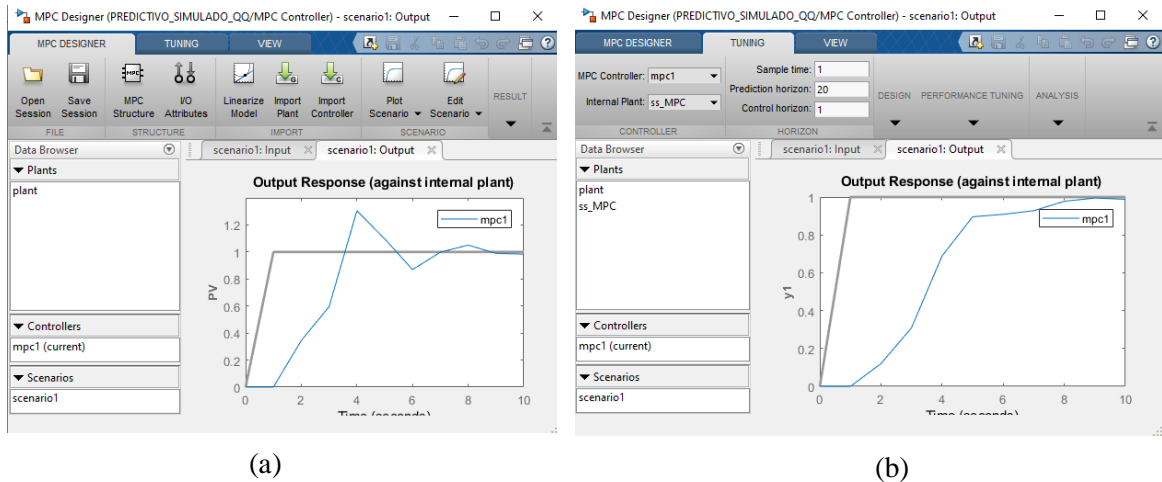


Figura 4. 22 (a) Sintonía MPC con parámetros predeterminados (b) Sintonía MPC con parámetros reales

Estructura para la implementación de un MPC

Una vez diseñado y simulado el comportamiento del controlador MPC su modelo de estimación es guardado para posteriormente cargarlo a un nuevo bloque “MPC Controller” con la estructura necesaria para ser implementado en una planta real como se muestra a continuación:

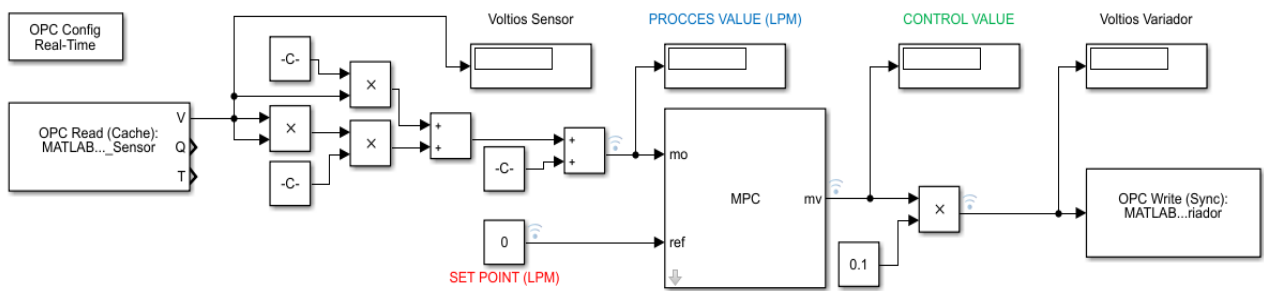


Figura 4. 23 Estructura para la implementación de un MPC por conexión OPC

Para la implementación existen dos cambios fundamentales, reemplazar el bloque de espacio de estados por la planta real, para tal efecto se utiliza el bloque de lectura y escritura OPC, obteniendo así comunicación entre la entrada y salida del sistema real. Y el segundo cambio es escalar la señal proveniente del sensor pasando de unidades de voltaje a unidades de caudal en LPM utilizando la

Ecuación 4.1 a fin de que su señal sea comparable con los valores de consigna ingresados en LPM. La señal de control que es emitida por el bloque MPC también es escalada ya que su valor se encuentra en porcentaje y el valor que debe enviarse al variador debe estar en una escala de 0 a 10V por lo cual se multiplica dicha señal por la constante 0,1 previo a su escritura en el “OPC Write”

4.4.6 Desarrollo de Control PID

Diseño y simulación de un PID en Simulink

Para el diseño y simulación del controlador PID se utiliza la estructura mostrada en la Figura 4.24 donde se ha ingresado los bloques que representan al modelo de la planta:

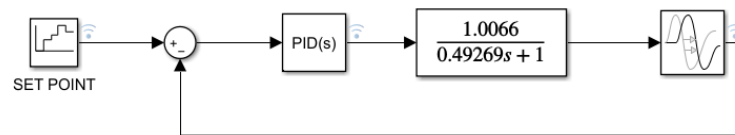


Figura 4. 24 Estructura de diseño y simulación de un controlador PID

La sintonización del PID para encontrar las constante Kp, Ti y Td se detalla en el Anexo IV.

Estructura para la implementación de un PID

La estructura para la implementación del controlador PID es similar a la utilizada por el controlador predictivo, donde se reemplaza el bloque del modelo matemático por los bloques OPC de lectura y escritura. Y de la misma forma las señales de entrada y salida son escaladas a sus respectivos rangos de operación en voltios, como se aprecia en la Figura 4. 25.

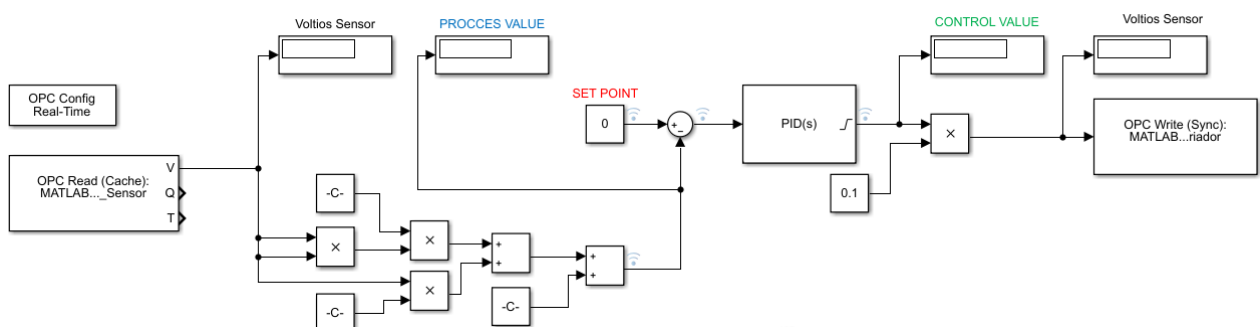


Figura 4. 25 Estructura para la implementación de un controlador PID utilizando comunicación OPC

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos en la simulación e implementación de los controladores PID y Predictivo para el control de un proceso de caudal, la evaluación del desempeño de los controladores implementados se hará en función de los parámetros característicos de una respuesta transitoria ante una señal de tipo escalón los cuales fueron descritos en el Capítulo 3.

5.1 Simulación de controladores

Las simulaciones se realizan con el objetivo de obtener información sobre el funcionamiento de la planta y a su vez validen que los modelos matemáticos obtenidos en el capítulo anterior, además de realizar ajustes en cada uno de los controladores con la finalidad de alcanzar un mayor grado de eficiencia del sistema al momento de la implementación.

5.1.1 Simulación del control MPC

La simulación del control Predictivo es realizada utilizando la estructura mostrada en la Figura 4.20. Inicialmente la respuesta del controlador bajo los parámetros predeterminados del programa da como resultado una respuesta subamortiguada en la variable de control y por ende en la variable de proceso (Figura 5.1)

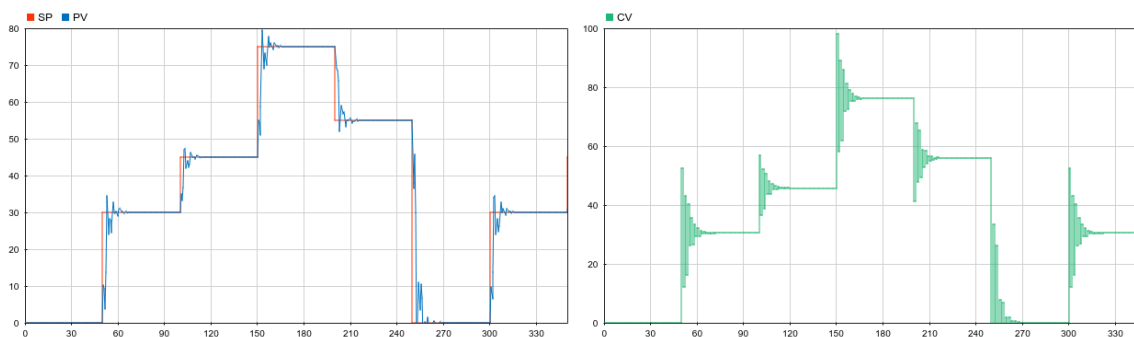


Figura 5. 1 Respuesta de controlador MPC con parámetros predeterminados

Con el objetivo de conseguir una respuesta más óptima se ajusta el controlador a las restricciones reales de la planta y se realizan varias pruebas en búsqueda del punto de ajuste adecuado entre en Horizonte de predicción (H_p), Horizonte de control (H_c) y la velocidad de cambio en la acción de control (D_u). Se varían los tres parámetros en los siguientes valores: $H_p = 10, 20, 30$; $H_c = 1, 5, 10$; $D_u = \pm 1.4, \pm 2, \pm 3$. Para cada punto de evaluación se varía un parámetro y los otros dos

permanecen fijos, dando como resultado el punto de ajuste más óptimo en los siguientes valores:

$H_p = 20$; $H_c = 1$; $D_u = \pm 1.4$.

Con estos parámetros se logra una respuesta sin sobre impulso, un valor superior en (D_u) hace que aparezcan picos por encima del set point, sin embargo, nótese que una aproximación más suave conlleva a que el tiempo de asentamiento se incremente. La Figura 5.2 muestra el punto de ajuste al variar el parámetro de velocidad de cambio en la acción de control.

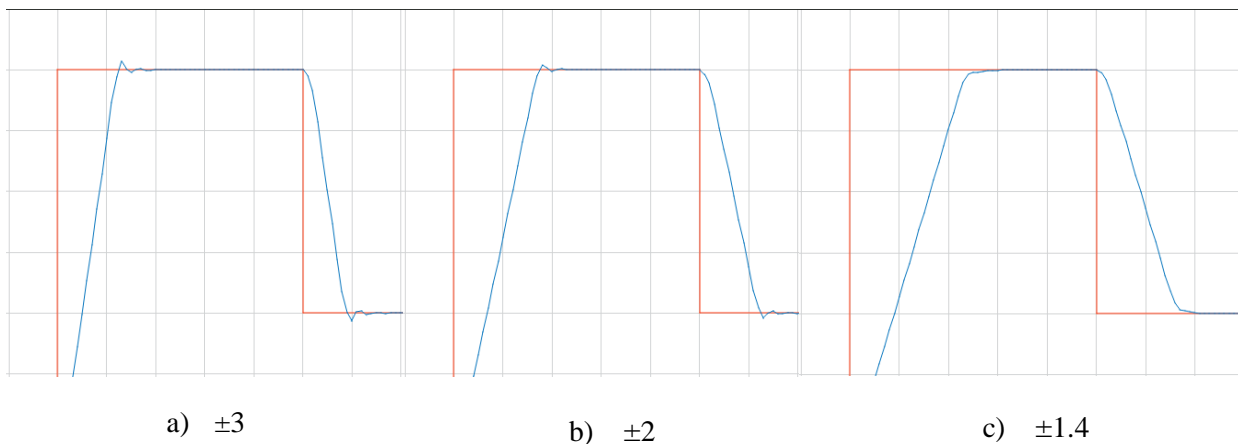


Figura 5. 2 Sintonía de control MPC para una respuesta sobreamortiguada

Los parámetros de ajuste del MPC para la simulación son los registrados en la Tabla 5.1, dichos parámetros responden a los valores de operación de la planta real, como las restricciones en la entrada (variador de frecuencia) con un rango de 0 a 62% (0 - 6.2V) y las restricciones en la salida (Sensor de flujo) con un rango escalado a unidades de flujo de 0 a 80LPM.

Tabla 5. 1 Parámetros de sintonía MPC

Horizonte de Predicción	20s	Horizonte de Control		1s
Restricciones		Min	Max	
Entrada		0	62%	
Salida		0	80LMP	
Cambio en la señal de control		-1.4	1.4	
Pesos asociados a las señales de entrada y salida				
Entrada		5		
Salida		5		

En la Figura 5.3 se presenta los resultados correspondientes a la simulación de un control MPC utilizando los parámetros de la Tabla 5.1. mostrando un comportamiento muy estable sin sobreimpulsos ni oscilaciones.

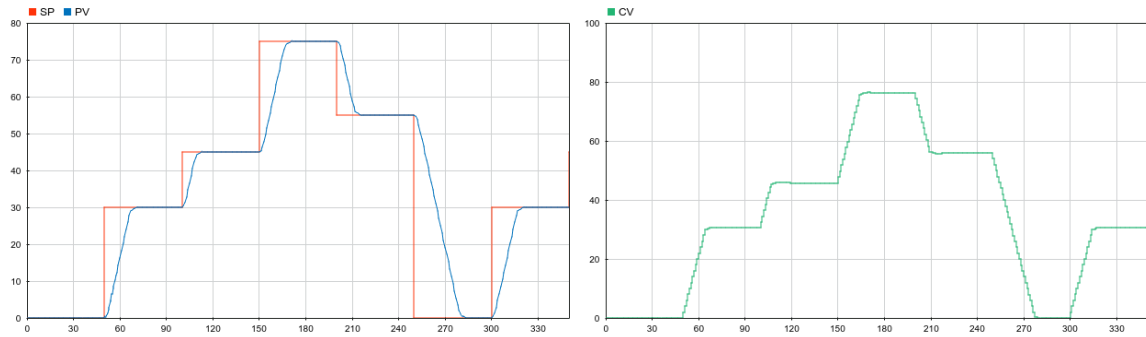


Figura 5. 3 Curvas de respuesta de un MPC simulado

5.1.2 Simulación del control PID

Al igual que con el MPC, el control PID también es simulado en el entorno de trabajo de Simulink, obteniendo como respuesta las curvas mostradas en la Figura 5.4 para un control con sintonía agresiva y la Figura 5.5 con una sintonía robusta. El método de sintonía es detallado en el Anexo VI.

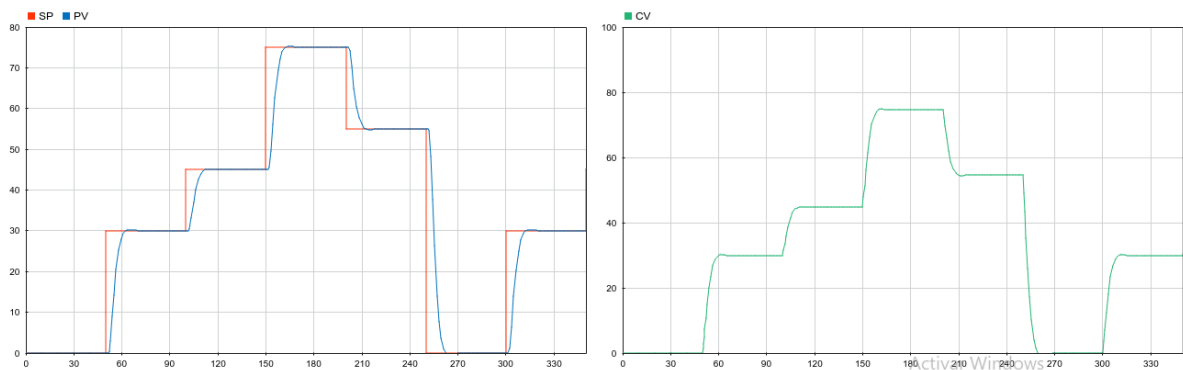


Figura 5. 4 PID con sintonía Agresiva: $K= 0.99344327$, $T_i= 1.40269$, $T_p = 0.31963435$

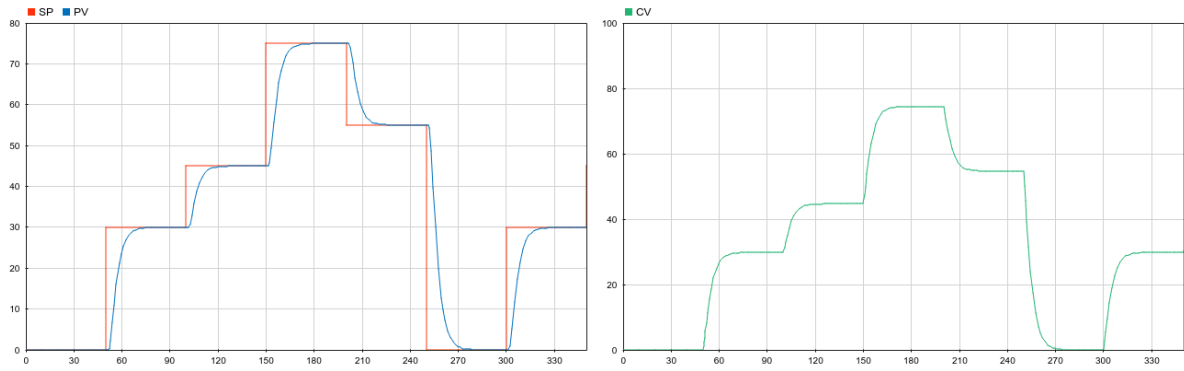


Figura 5. 5 PID con sintonía Robusta: $K= 0.58352265$, $T_i= 1.40269$, $T_p = 0.31963435$

En ambos casos se obtiene una buena respuesta al lograr estabilizar la variable sin sobre impulsos ni oscilaciones.

5.1.3 Análisis comparativo entre MPC y PID simulados

Para efectos de comparación el MPC será contrastado frente al PID con sintonía agresiva por presentar un desempeño adecuado y además porque su respuesta difiere más notoriamente con respecto al MPC.

- Tiempo de asentamiento

El tiempo de asentamiento para un escalón de 30 LPM es de aproximadamente 21 segundos para ambos controladores. En el caso del MPC (Figura 5.6 (a)) su aproximación es más suave por ende le toma más tiempo en alcanzar el punto de consigna, mientras que en el PID (Figura 5.6 (b)) al existir un minúsculo sobre impulsó este hace que el tiempo se asemeje al de MPC, de no existir este sobre impulso el tiempo que tarda en llegar a la consigna sería de 12 segundos.

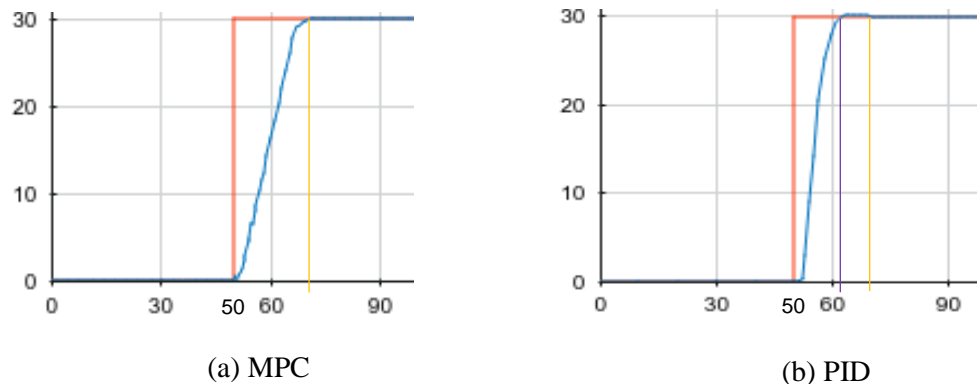


Figura 5. 6 (a) Respuesta de PV con control MPC (b) Respuesta de PV con control PID

- **Sobrepaso**

Tanto para el MPC como para el PID el sobre impulso es prácticamente nulo, si bien en el PID al realizar una ampliación de la gráfica se evidencia un pequeño sobre impulso, su efecto es casi nulo, por lo que se considera que en ambos casos la variable se acerca al punto de consigna sin excederlo.

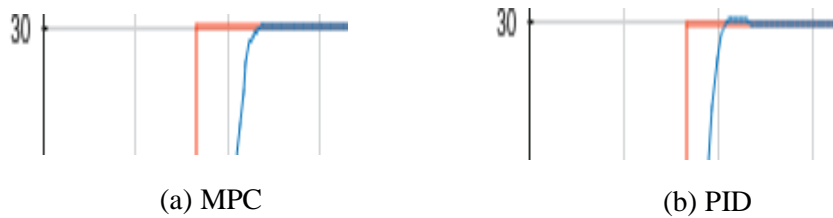


Figura 5. 7 (a) Respuesta al sobrepaso con control MPC (b) Respuesta al sobrepaso con control PID

- **Estabilidad y oscilaciones**

En la Figura 5.7 Se puede apreciar que una vez alcanzado el punto de consigna la variable de proceso goza de una excelente estabilidad sin oscilaciones ni variaciones en su punto de operación.

La tabla 5.2 Resume los aspectos antes evaluados en las respuestas obtenidas por parte de los controladores PID y Predictivo.

Tabla 5. 2 Resumen de análisis comparativo entre un control MPC y un control PID simulados

	MPC	PID
T. Asentamiento aprox. (s) de 0 a 30LPM	21	21
Sobrepaso(%)	0	0.01
Estabilidad de operación	Totalmente estable	Totalmente estable

5.2 Implementación de controladores

Las respuestas del MPC y PID implementados en la estación de caudal son evaluadas ante cambios de escalón en valores ascendentes de 30, 45 y 75 LPM y un escalón descendente hacia 55 LPM, punto en el cual se ingresa una perturbación externa con la ayuda de una válvula manual para evaluar su respuesta.

5.2.1 Implementación del control MPC

En la Figura 5.8 se muestra la respuesta obtenida en el control de la variable caudal aplicando una estrategia de control Predictivo, en la cual se aprecia tanto el comportamiento de la variable de proceso (color azul) como la variable de control (color verde). En lo que respecta a la variable de proceso se puede observar a simple vista dos picos elevados tanto al inicio como al final, eso se debe a las características de lectura del sensor de flujo el cual tiene una zona de inestabilidad de 0 a 25LPM aproximadamente, es por esto que hasta no superar este limite el sensor no entrega lecturas reales del caudal que fluye por el sistema, por tal motivo esta zona no se considerará a efectos de análisis posteriores. Este efecto característico de los equipos de la planta también se verá reflejado cuando se aplique el control PID.

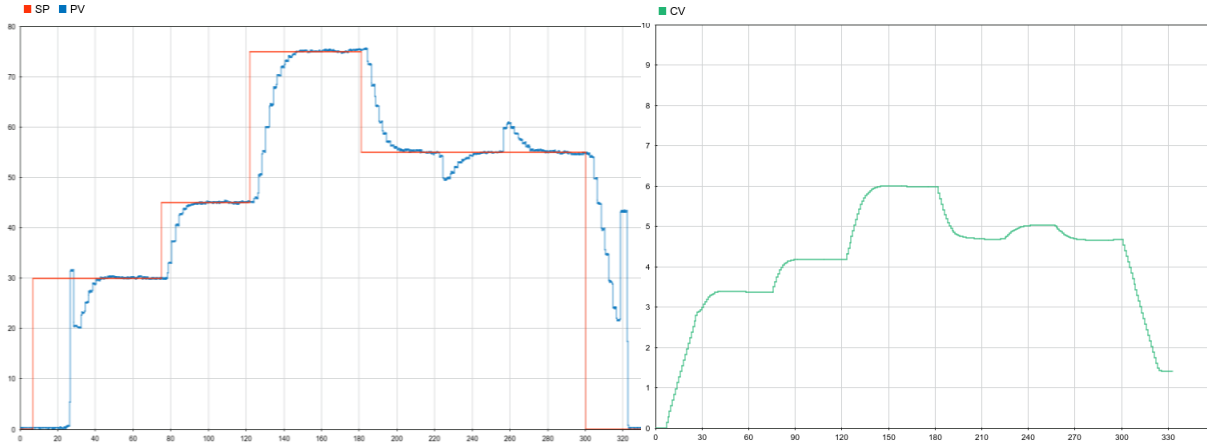


Figura 5. 8 Resultado de un control MPC implementado

5.2.2 Implementación del control PID

La Figura 5.9 muestra la respuesta del sistema en el manejo de la variable caudal ante la implementación de un control PID con una respuesta más agresiva que el MPC, pero sin llegar a mostrar sobreimpulsos.

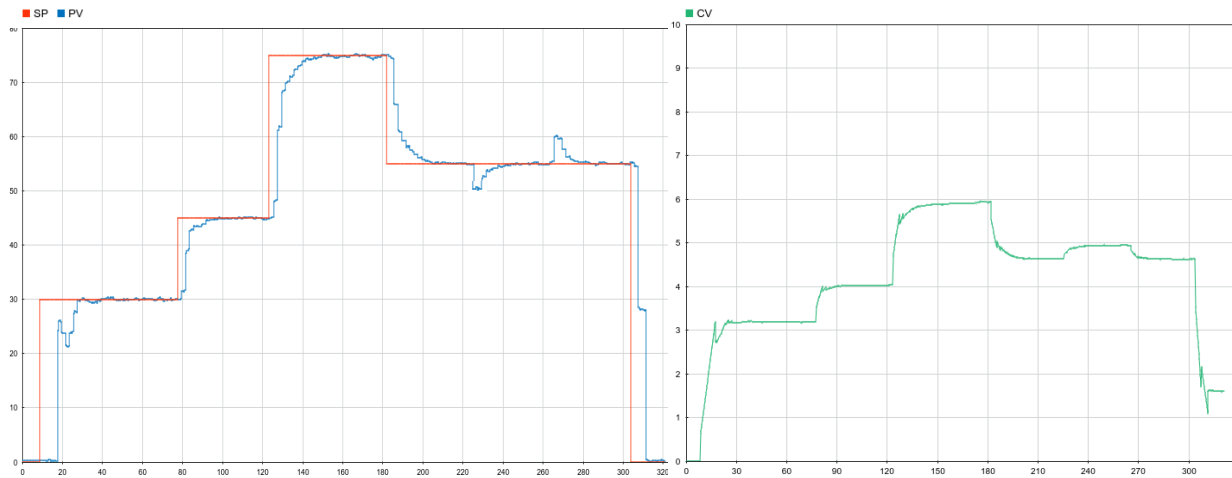


Figura 5. 9 Resultado de un control PID implementado

5.2.3 Análisis Comparativo entre control MPC y PID implementados

- Sobrepaso máximo (Mp) y Tiempo pico (Tp)

Al igual que en la simulación los sobrepasos o sobreimpulsos son prácticamente nulos, por ende, no existirán tiempos picos. Este hecho representa un indicador positivo para ambos controladores validando un adecuado proceso de sintonía.

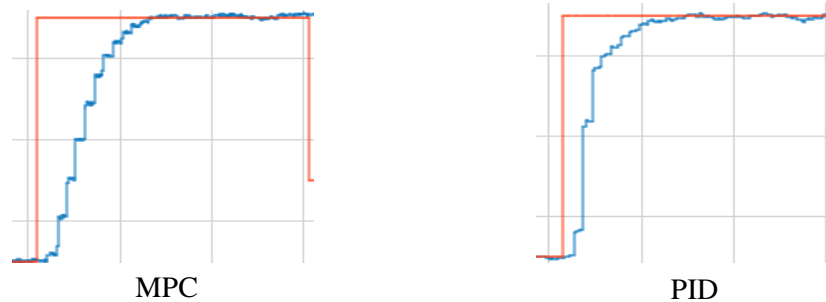


Figura 5. 10 Respuesta al sobrepaso entre un control MPC y PID implementados

- Tiempo de retardo (Td)

El tiempo requerido para que la variable alcance la mitad del valor final es de 8 segundos para el MPC y 4 segundos para el PID, reflejando una notoria diferencia en favor del PID en este parámetro.

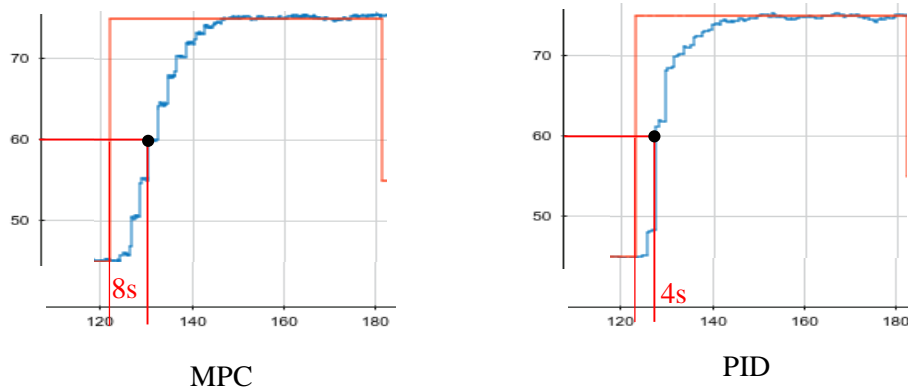


Figura 5. 11 Análisis de tiempo de retardo entre un control MPC y PID

- **Tiempo de asentamiento (T_s)**

Al comparar el tiempo que toma la variable de proceso en alcanzar el punto de referencia, en un escalón de 45 a 75LPM, la estrategia de control MPC tarda aproximadamente 26 segundos en alcanzar la consigna, es decir un segundo más rápido que el PID, el cual tarda 27 segundos aproximadamente.

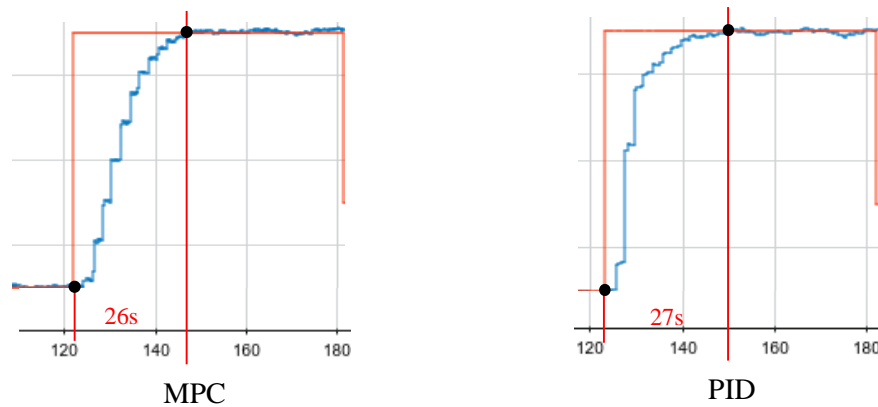


Figura 5. 12 Análisis de tiempos de asentamiento para un control MPC y PID

- **Tiempo de Levantamiento (T_r)**

El tiempo de levantamiento refleja claramente la sintonía agresiva con la que el PID manipula la acción de control y por ende su efecto en la variable de proceso, mientras que el MPC muestra un comportamiento más paulatino, lo que le representa un tiempo de levantamiento de 5 segundos más lento que el PID.

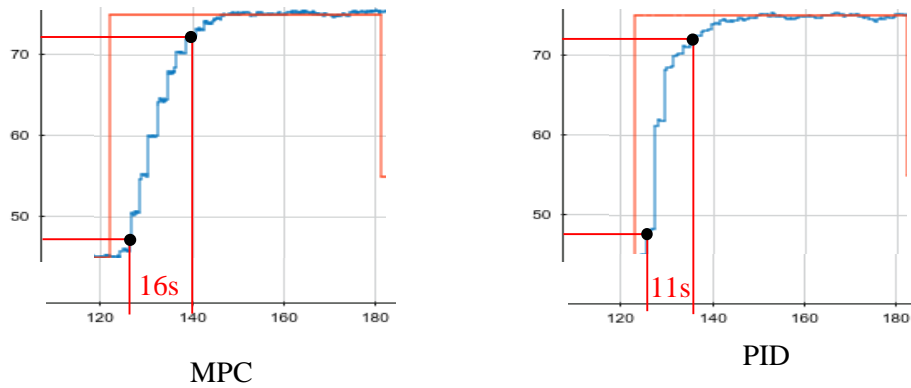


Figura 5. 13 Análisis de tiempo de levantamiento entre un control MPC y PID

- **Estabilidad y oscilaciones**

Con respecto al comportamiento de la variable en términos de estabilidad y oscilaciones es conveniente realizar este análisis tomando en cuenta la curva de la variable de control ya que en las gráficas de la variable de proceso se aprecia oscilaciones una vez que la variable ha alcanzado el estado estacionario, estas variaciones se deben principalmente a la naturaleza del sensor de flujo que al ser de tipo turbina sus medidas no suelen ser las más exactas, sin embargo al analizar la variable de control se nota de mejor manera la estabilidad del sistema.

• **Set point: 75LPM**

Cuando la variable alcanza este punto se notan diferencias sustanciales en cuanto a la estabilidad de la variable de proceso, donde el MPC brinda una mayor estabilidad con respecto al PID el cual muestra ciertas variaciones sin alejarse demasiado del punto de consigna.

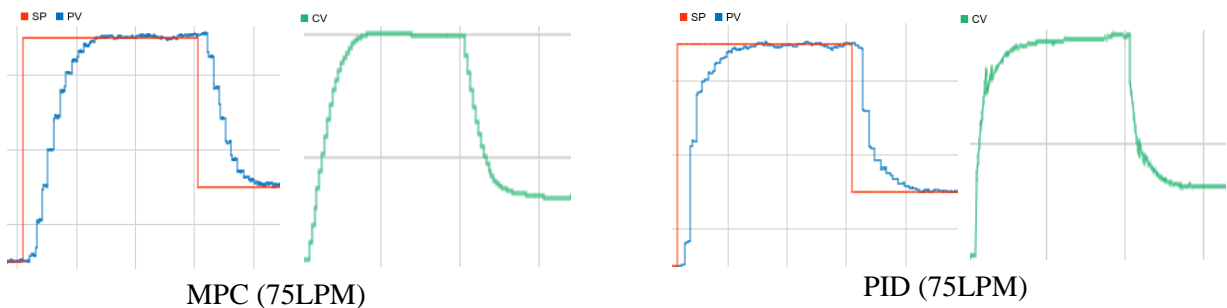


Figura 5. 14 Análisis de estabilidad de los controladores MPC y PID a 75LPM

- **Set point: 45LPM**

En un rango medio de operación a 45LPM una vez alcanzado el estado estacionario ambos controladores mantienen a la variable totalmente estable.



Figura 5. 15 Análisis de estabilidad de los controladores MPC y PID a 45LPM

- **Respuesta ante perturbaciones**

Otro parámetro para evaluar los controladores es su respuesta ante la aparición de perturbaciones, las cuales afectan a la variable de proceso, en este caso se aplicó una perturbación mediante la estrangulación de una válvula manual. La respuesta de ambos controladores ante este fenómeno se muestra en la figura 5.16

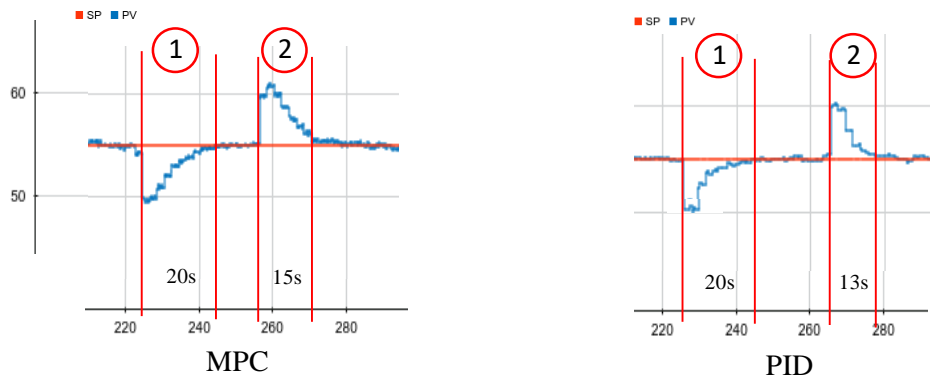


Figura 5. 16 Respuesta ante perturbaciones de un control MPC y PID

Analizando la primera zona donde aparece la perturbación producto del estrangulamiento de la válvula, se produce una reducción de caudal de 5 LPM por ende la respuesta del controlador es incrementar el flujo hasta retornar la variable al punto de consigna, que para este caso promedia un tiempo de 20 segundos para ambos controladores.

La zona número dos corresponde a la apertura de la válvula causando un sobreflujo de aproximadamente 5LPM para lo cual el control PID tiene una respuesta más rápida en

aproximadamente 2 segundos con respecto al MPC. En general ambos controladores tienen buena respuesta ante perturbaciones con tiempos bastante similares

5.2.4 Resumen de análisis comparativo

En la Tabla 5.3 se muestra un resumen de la comparativa de los parámetros de desempeño entre un control Predictivo y PID en el manejo de la variable caudal.

Tabla 5. 3 Resumen de análisis comparativo entre un control MPC y PID implementados

	Consigna LPM	MPC	PID
Sobrepaso máximo (%)	Todas	0	0
Tiempo de retardo (s)	30-45 45-75 75-55	5 8 6,5	3,5 4 5
Tiempo de asentamiento (s)	30-45 45-75 75-55	20 26 22	20 27 23
Tiempo de levantamiento (s)	30-45 45-75 75-55	10 16 12	9 11 10
Tiempo pico (s)	Todas	0	0
Estabilidad y oscilaciones	45 75 55	Totalmente estable Totalmente estable Totalmente estable	Totalmente estable Parcialmente inestable Totalmente estable
Tiempo promedio de respuesta a perturbaciones (s)	55±5	17,5	16,5

6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS

6.1. Presupuesto

El presupuesto del proyecto se estima en \$2794.31 dólares, tomando en consideración los costos asociados a la estación de caudal y sus elementos, cabe mencionar que los costos descritos pueden variar debido a las constantes fluctuaciones del mercado.

Tabla 6. 1 Presupuesto Global del Proyecto

Rubros	Total
Materiales y Suministros	\$3,00
Equipos para uso directo del proyecto	\$2461,31
Gastos Indirectos y Profesionales	\$300,00
Gastos Imprevistos	\$30,00
TOTAL	\$2794.31

En cuanto a los materiales y suministros se consideran solo gastos en materiales necesarios para la implementación de los controladores, ya que el proyecto plantea solo la implementación de modelos de sistemas de control en una estación de caudal, mas no la construcción de la estación, por lo tanto, los gastos en materiales son mínimos.

Tabla 6. 2 Presupuesto de materiales y suministros

Materiales y Suministros	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cable Flexible #12 AWG	5	\$0,18	\$0,90
Terminales de Conexión	10	\$0,05	\$0,50
Amarras	1	\$1	\$1,00
Teflon	1	\$0,40	\$0,40
TOTAL			\$3,00

Los valores correspondientes a la estación de flujo, fuente de alimentación, PLC y variador de frecuencia son referenciados de [23] a quienes se atribuye la construcción de la estación de caudal. Y adicional a estos elementos también se incluye el costo de la tarjeta NI myDAQ como parte fundamental para la adquisición de datos.

Tabla 6. 3 Presupuesto de equipos de uso directo

Equipos para uso directo del proyecto	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Tarjeta de Adquisición de datos NI MyDAQ	1	\$446,27	\$446,27
Estación de Caudal	1	\$1119,04	\$1119,04
PLC S7-1200	1	\$400,00	\$400,00
Variador de frecuencia iGa5	1	\$446,00	\$446,00
Fuente 24V	1	\$50,00	\$50,00
TOTAL			\$2461,31

Los gastos indirectos que se consideran en el proyecto son principalmente la movilización y alimentación que genera el traslado hacia la ciudad de Latacunga, que es donde se ejecuta el proyecto. El costo de mano de obra se considera en base a las horas de programación que conlleva diseñar este tipo de sistemas.

Tabla 6. 4 Presupuesto para Gastos Indirectos y de Servicios Profesionales

Gastos Indirectos y Profesionales	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Transporte y alimentación	-	-	\$100,00
Mano de Obra	-	-	\$200,00
TOTAL			\$300,00
Gastos Imprevistos 10%			\$30,00

6.2. Análisis de impactos

6.2.1 Impacto práctico

El estudio comparativo de dos técnicas de control mediante su implementación en un proceso real de caudal aporta significativamente en el fortalecimiento de habilidades como: manejo de señales analógicas, programación en PLC, manejo de tarjetas electrónicas, control caudal, sintonización de controladores, creación de canales de comunicación OPC, etc. Refiriéndose propiamente al aspecto comparativo este permite conocer y hacer uso de parámetros de desempeño para evaluar a cada uno de los controladores, lo cual brinda una visión más amplia de uso de controladores en el manejo de variables.

6.2.2 Impacto tecnológico

La implementación de un controlador predictivo mediante conexión OPC eventualmente permite superar la barrera limitante de la estación de caudal, la cual a criterio de sus constructores [23] solo fue diseñada para la implementación de controles ON OFF y PID, debido a las características de su principal elemento de control un PLC S7-1200 el cual no dispone de librerías para la implementación de controladores considerados modernos. De esta manera se estaría ampliando la funcionalidad y los beneficios de la estación de caudal.

Realizar una comparativa entre un control tradicional y un controlador de tendencia moderna permite además de evaluar su desempeño, tener una visión tecnológica hacia el futuro ya que el control predictivo no se considera como una estrategia de control independiente sino, que, por el contrario, integra toda una familia de métodos de control tales como, el control óptimo, el control de procesos con tiempos muertos, el control de procesos multivariables, etc.

6.2.3 Impacto epistemológico

Mediante la ejecución del presente proyecto se potencializan conocimientos en el área de sistemas de control especialmente en el manejo de la variable caudal, tanto en el área práctica como teórica, ya que se estudia dos controladores que han tenido gran impacto e interés en la comunidad científica, académica, industrial y tecnológica

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Al hablar de los principios teóricos referentes a las estrategias de control que cada uno de los controladores utilizan, se nota claramente que el controlador predictivo al ser una técnica de control más robusta, requiere de herramientas matemáticas avanzadas en su formulación, motivo por el cual su difusión e implementación ha sido más escasa en comparación con la estrategia de control PID, el cual no requiere de matemática avanzada por ende lo hace más atractivo ante los ojos del profesional encargado del área de control.
- Modelar un proceso real ha sido uno de los problemas más difíciles en el área del control sin embargo las herramientas computacionales de actualidad han facilitado en gran medida esta tarea, es así que con la ayuda del software MATLAB se obtiene una función de transferencia y así mismo un modelo en espacio de estados correspondiente al proceso real

de la estación de caudal No. 3 del Laboratorio de Automatización y control Industrial con una similitud promedio del 92% entre el modelo estimado y la respuesta del proceso real.

- La implementación de un controlador predictivo utilizando un PLC S7-1200 fue posible mediante el uso de un protocolo de comunicación OPC el cual brinda un tiempo de muestreo de 0,15s adecuando para realizar un control en tiempo real. Sin embargo, si se busca una implementación en el ámbito industrial es mejor contar con dispositivos capaces de ejecutar el control desde su memoria física sin ayuda de un ordenador.
- La implementación de un controlador predictivo y un controlador PID aplicados a un proceso de caudal da como resultado un adecuado manejo de la variable para ambos casos, marcando diferencias en una respuesta transitoria más rápida para el controlador PID (aproximadamente 2s) y un mejor desempeño en estado estacionario para el controlador Predictivo.
- Al comparar el desempeño de ambos controladores y tener como resultado un desempeño prácticamente igual, la lógica en este caso particular se inclinaría a favor del control PID por ser más sencillo de implementar y no requerir dispositivos de control avanzado, sin embargo, se debe tomar en cuenta que se está evaluando y comparando el desempeño de un controlador predictivo aplicado a un proceso SISO y cabe mencionar que una de las fortalezas de este controlador se da en el manejo de proceso MIMO.
- Al implementar un controlador Predictivo y comparar su desempeño con el de un controlador PID se ha establecido una base para futuras investigaciones que permitan alcanzar la implementación de controladores en sistemas multivariantes a fin de explorar aún más las potencialidades del control predictivo.

7.2 Recomendaciones

- Al implementar cualquier tipo de controlador sobre la estación de caudal No. 3 del Laboratorio de automatización y control es recomendable evitar realizar controles cercanos al límite superior e inferior del rango de operación de la planta, esto debido a que en el rango inferior el sensor de flujo entrega medidas estables a partir de valores superiores a 20 LPM y en el rango superior se tiene problemas con la capacidad de almacenamiento y desfogue del tanque principal.

- Con la finalidad de obtener mejores resultados en la implementación de controladores predictivos se recomienda hacer uso de dispositivos con la capacidad de ejecutar este tipo de controladores de forma autónoma como PLC de la serie 1500 en adelante o tarjetas embebidas como la NI myRIO 1900 los cuales cuentan con librerías exclusivas para su aplicación.
- Se recomienda utilizar un sensor de flujo de mejor precisión y velocidad de muestreo como los sensores ultrasónicos puesto que los que se encuentran instalados en las estaciones de caudal tienen velocidades de muestreo de un mínimo de dos segundos afectando la dinámica de los controladores.
- Se recomienda analizar aplicaciones de control predictivo para procesos multivariables en los cuales un PID no se puede aplicar
- En el proceso de estimación de modelos es recomendable que sus resultados tengan un porcentaje de similitud con el proceso real superior al 75%, de no conseguir este mínimo se debe repetir el experimento de adquisición reduciendo el tiempo de muestreo.

8. REFERENCIAS

- [1] E. Lopera y M. Diego, Implementación de un Control Predictivo Basado en Modelo Aplicado a un Sistema de Control de Caudal de Agua Didáctico, Antioquia: Instituto Tecnológico Metropolitano, 2010.
- [2] E. Hernández, J. Díaz y O. Pinzón, Estudio de comportamiento de un control MPC[Control Predictivo Basado en el Modelo] comparado con un control PID en una planta de Temperatura, Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2014.
- [3] E. Aceros, E. Camargo y O. Parabavire, Comparación Cualitativa del Desempeño de la Aplicación del MPC y el PID para el Control de Nivel de Pozos, Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2016.
- [4] V. Lopez y P. Alex, Diseño e implementación de un algoritmo 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: ESPE, 2015.
- [5] L. Moncada Albitres, Automatización y Control de Procesos, Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2005.
- [6] A. Roca Cusidó, Control Automático de Procesos Industriales, Diaz de Santos, 2014.

- [7] X. Alvarez Brotons, Control predictivo de canales de riego utilizando modelos de predicción de tipo Muskingum (primer orden) y de tipo Hayami (segundo orden), Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.
- [8] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A., 2010.
- [9] V. Hernández, R. Silva y R. Carrillo, Control Automático: Teoría de Diseño, Construcción de Prototipos, Modelado, Identificación y Pruebas Experimentales, México DF: Instituto Politécnico Nacional, 2013.
- [10] N. Nise, Sistemas de Control para Ingeniería, México: Compañía Editorial Continental , 2006.
- [11] S. Domínguez, P. Campoy, J. Sebastián y A. Jiménez, Control en el Espacio de Estados, Madrid: Pearson, 2006.
- [12] J. Acedo Sánchez, Control Avanzado de Procesos (Teoría y práctica), Madrid: Diaz de Santos, 2003.
- [13] K. J. Astrom y T. Haggglund, Control PID avanzado, Madrid: Pearson, 2009.
- [14] R. Hernández Gaviño, Introducción a los sistemas de control: Conceptos, Aplicaciones y Simulación con MATLAB, México: Pearson, 2010.
- [15] C. Bordóns Alba, Control Predictivo: Metodología, Tecnología y Nuevas Perspectivas, Sevilla: Escuela Superior de Ingenieros, 2000.
- [16] C. Lozoya, Modelo de control predictivo aplicado a sistemas de riego de precisión, Monterrey: Tecnológico de Monterrey, 2014.
- [17] J. C. Olidem Semino, DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO BASADO EN MODELO PARA PLATAFORMA INDUSTRIAL, Piura: Universidad de Piura, 2016.
- [18] D. F. Sendoya, ¿Qué es el Control Predictivo y Hacia dónde se proyecta?, Neiva: Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2012.
- [19] J. M. Ortiz Guevara, Diseño y Construcción de un Convertidor DC/DC Reductor Elevador con Control Predictivo Controlado por una Tarjeta FPGA, Quito: EPN, 2011.
- [20] P. Ramos, DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AVANZADO PARA EL BANCO DE PRESIÓN DEL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL., Loja: Universidad Nacional de Loja, 2015.
- [21] T. Logitek, «Qué es OPC y qué es un OPC Server. Kepware Kepsverex,» 8 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.kepsverexopc.com/que-es-opc-y-que-es-un-opc-server/>. [Último acceso: 6 Febrero 2021].
- [22] TECNOLOGIAVAO, «Tecnología para la Industria,» 31 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://tecnologiaparalaindustria.com/cual-es-el-mejor-metodo-de-control-de-flujo-de-bombas/>. [Último acceso: 02 Febrero 2021].
- [23] W. Quinatoa y O. Velasco, 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.

- [24] R. Canales Ruiz y R. Barrera Rivera, *Análisis de Sistemas Dinámicos y Control Automático*, México: LIMUSA, 1976.
- [25] W. Bolton, *Ingeniería de Control*, México: Alfaomega, 2006.
- [26] C. Carvajal y L. Proaño, *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE CAUDAL Y PUESTA EN SERVICIO DE UN TRANSMISOR MAGNÉTICO DE FLUJO, PARA EL MONITOREO Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LA VARIABLE CAUDAL, EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA ESPE*, Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas, 2015.
- [27] B. Romero y N. Vega, *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID Y CONTROL ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS CON LAS VARIABLES NIVEL Y CAUDAL EVALUADOS SOBRE UN MÓDULO DIDÁCTICO*, Guayaquil: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, 2016.
- [28] J. Alulema y N. Mora, *HARDWARE-IN-THE-LOOP PARA EL CONTROL DE LOS PROCESOS PRESIÓN, CAUDAL Y NIVEL, MEDIANTE EL SISTEMA EMBEBIDO MY RIO A REALIZARSE EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS*, Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas, 2018.
- [29] I. National, «National Instruments,» 10 Junio 2016. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf> . [Último acceso: 5 Enero 2020].
- [30] A. Machado y J. Romero, *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO PARA EL ANÁLISIS DE VARIABLES FÍSICAS Y GENERACIÓN DE REPORTES UTILIZANDO DIADEM*, Riobamba: ESPOCH, 2018.

Wilson Geovanny Guambo Cain

Proponente 1

Email: Wilson.guambo9721@utc.edu.ec

Telf.:0984879865

Byron Paul Corrales Bastidas

PROFESOR TUTOR 1

Email: byron.corrales@utc.edu.ec

Telf.: 0984185700

Luigi Orlando Freire Martínez

PROFESOR TUTOR 2

Email: luigi.freire@utc.edu.ec

Telf.:0984420301

ANEXOS

Anexo I. Rangos de operación de la estación de caudal

Tabla I. 1 Identificación de zonas de operación de la planta

Voltios variador	Voltios Sensor	Caudal LMP	Respuesta
0	0,99	0	No hay circulación de caudal
1	0,99	0	
2	0,99	0	
2,2	0,99	0	Circula un min. de caudal que no es detectado por el sensor
2,4	1,35	13,8	Zona inestable valores erróneos
2,5	1,45	15,84	
3	1,72	28,04	Zona de funcionamiento cómodo para las condiciones de la planta
3,5	1,96	37,04	
4	2,18	45,5	
4,5	2,4	53,8	
5	2,6	61,51	
5,5	2,8	69,05	
6	3,02	76,87	
6,2	4,9	80,22	
6,5	3,18	83,6	Zona de saturación rápida para el tanque elevado de la planta
7	3,4	91,38	
7,5	3,52	98,4	
8	3,76	105,7	
8,1	3,8	107,01	
8,5	3,91	111,03	
8,7	3,98	114,03	
9	4	115,5	
10	4,03	116,04	

Tabla I. 2 Escala ajustada a un máximo de operación en voltios a 80LPM

Voltios Variador	Voltios Sensor	Caudal LPM
1	0,96	0
2	0,96	0
2,1	0,96	0
2,2	0,96	0
2,3	1,6	14,86
2,4	1,67	14,03
3	2,33	27,7
3,5	2,82	37,3
4	3,23	46,01
4,5	3,64	54,11
5	4,02	61,88
5,5	4,39	68,58
6	4,75	77,15
6,1	4,82	78,1
6,15	4,88	79,52
6,2	4,9	80,22

Anexo II. Descripción de tarjeta NI myDAQ

Tarjeta NI myDAQ

La tarjeta NI myDAQ es dispositivo que tiene ocho instrumentos de laboratorio basados en computadora plug-and-play de uso común, su orientación está enfocada mas no limitada a la experimentación dentro de ámbito académico; ideal para adquirir señales, procesar datos y ejecutar controles sobre procesos sencillos. Cuenta con un puerto dotado de pines para entradas y salidas analógicas, entradas y salidas digitales, Jack para conexión de audio, fuente de alimentación, osciloscopio, generador de funciones y además cuenta con un multímetro digital. Su conexión a un ordenador es mediante un cable USB, mismo que dota de la alimentación de energía para su funcionamiento.



Figura II.1 NI myDAQ

Fuente: [29]

- Hardware

Tabla II.1 Descripción del Hardware de la tarjeta NI myDAQ

Entradas Analógicas (AI)	Salidas Analógicas (AO)	Entradas/Salidas digitales (DI/DO)	Contadores / Temporizadores	Multímetro Digital	Fuentes de Poder
--------------------------	-------------------------	------------------------------------	-----------------------------	--------------------	------------------

<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 canales diferenciales ▪ Tasa de muestreo: 200 kS/s ▪ Resolución: 16 bits o Rango: +/- 10V 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 canales referenciados (RSE) ▪ Tasa de muestreo: 200 kS/s ▪ Resolución: 16 bits o Rango: +/- 10V 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Número de líneas: 8 de entrada/salida ▪ Dirección: Cada línea individualmente programable ▪ Nivel lógico entrada: 5 V compatible LVTTTL ▪ Nivel lógico salida: 3.3 V compatible LVTTTL ▪ Máxima corriente de salida por línea: 4 mA 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 contador / temporizador ▪ Resolución: 32 bits ▪ Base de Reloj Interno: 100 MHz ▪ Máxima frecuencia de medición y generación: 1MHz ▪ Compatible con PWM y Codificadores de Cuadratura 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Voltaje AC, 20 Vrms ▪ Corriente AC, 1 Arms ▪ Voltaje DC, 60 VDC ▪ Corriente DC, 1 A ▪ resistencia, hasta 20 MΩ ▪ diodo, continuidad. o Nivel de aislamiento: 60 VDC / 20 Vrms 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ +15 V, 32 mA ▪ -15 V, 32 mA ▪ +5 V, 100 mA
--	--	---	--	---	--

Fuente: [29]

En la figura II.2 se muestra el terminal de conexiones de la myDAQ con la respectiva identificación para cada pin.

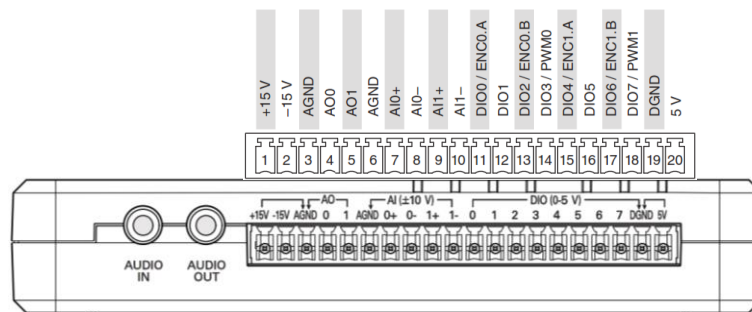


Figura II.2 Puerto de conexión de la tarjeta NI myDAQ

Fuente: [29]

Anexo III. Adquisición de datos

Tabla III. 1 Base de Datos Adquirida de la estación de caudal

Fecha-Hora	CV	PV	01/02/21-14:41:22	30	28,08	01/02/21-14:41:54	40	38,28
01/02/21-14:40:51	0	0,41	01/02/21-14:41:23	30	30,28	01/02/21-14:41:55	40	39,47
01/02/21-14:40:52	0	0,22	01/02/21-14:41:24	30	31,18	01/02/21-14:41:56	40	40,57
01/02/21-14:40:53	0	-0,31	01/02/21-14:41:25	30	30,18	01/02/21-14:41:57	40	40,57
01/02/21-14:40:54	30	0,22	01/02/21-14:41:26	30	30,18	01/02/21-14:41:58	40	39,98
01/02/21-14:40:55	30	0,51	01/02/21-14:41:27	30	29,88	01/02/21-14:41:59	40	40,47
01/02/21-14:40:56	30	9,22	01/02/21-14:41:28	30	30,08	01/02/21-14:42:00	40	39,47
01/02/21-14:40:57	30	25,51	01/02/21-14:41:29	30	30,08	01/02/21-14:42:01	40	40,47
01/02/21-14:40:58	30	24,34	01/02/21-14:41:30	30	28,08	01/02/21-14:42:03	40	39,08
01/02/21-14:40:58	30	29,59	01/02/21-14:41:31	30	30,67	01/02/21-14:42:04	40	39,98
01/02/21-14:40:59	30	31,08	01/02/21-14:41:32	30	32,18	01/02/21-14:42:05	40	41,98
01/02/21-14:41:00	30	30,18	01/02/21-14:41:33	30	30,08	01/02/21-14:42:06	40	39,98
01/02/21-14:41:01	30	30,08	01/02/21-14:41:34	30	29,98	01/02/21-14:42:07	40	40,18
01/02/21-14:41:02	30	31,57	01/02/21-14:41:35	30	29,88	01/02/21-14:42:08	40	41,28
01/02/21-14:41:03	30	30,38	01/02/21-14:41:36	30	30,58	01/02/21-14:42:09	40	39,28
01/02/21-14:41:05	30	29,28	01/02/21-14:41:37	30	30,08	01/02/21-14:42:10	40	38,08
01/02/21-14:41:06	30	30,47	01/02/21-14:41:38	30	29,78	01/02/21-14:42:11	40	40,67
01/02/21-14:41:07	30	29,38	01/02/21-14:41:39	30	30,18	01/02/21-14:42:12	40	41,37
01/02/21-14:41:08	30	30,08	01/02/21-14:41:40	30	30,47	01/02/21-14:42:13	40	40,28
01/02/21-14:41:09	30	30,18	01/02/21-14:41:41	40	30,08	01/02/21-14:42:14	40	40,47
01/02/21-14:41:10	30	26,28	01/02/21-14:41:42	40	32,35	01/02/21-14:42:15	40	42,37
01/02/21-14:41:11	30	38,38	01/02/21-14:41:43	40	32,45	01/02/21-14:42:16	40	40,37
01/02/21-14:41:12	30	30,08	01/02/21-14:41:44	40	40,18	01/02/21-14:42:17	40	41,67
01/02/21-14:41:13	30	28,08	01/02/21-14:41:46	40	39,98	01/02/21-14:42:18	40	40,08
01/02/21-14:41:14	30	30,38	01/02/21-14:41:47	40	39,98	01/02/21-14:42:19	40	40,28
01/02/21-14:41:15	30	31,08	01/02/21-14:41:48	40	41,37	01/02/21-14:42:20	40	37,18
01/02/21-14:41:16	30	30,47	01/02/21-14:41:49	40	39,98	01/02/21-14:42:22	40	40,28
01/02/21-14:41:17	30	30,18	01/02/21-14:41:50	40	40,37	01/02/21-14:42:23	40	41,18
01/02/21-14:41:18	30	29,38	01/02/21-14:41:51	40	43,37	01/02/21-14:42:24	40	40,47
01/02/21-14:41:19	30	32,08	01/02/21-14:41:52	40	40,37	01/02/21-14:42:25	40	40,18
01/02/21-14:41:20	30	30,38	01/02/21-14:41:53	40	40,28	01/02/21-14:42:26	40	40,18

01/02/21-14:42:27	40	39,98	01/02/21-14:43:03	55	55,6	01/02/21-14:43:39	80	80,05
01/02/21-14:42:28	40	40,37	01/02/21-14:43:04	55	54,4	01/02/21-14:43:40	80	80,25
01/02/21-14:42:29	40	41,28	01/02/21-14:43:05	55	56,4	01/02/21-14:43:41	80	79,05
01/02/21-14:42:30	40	39,98	01/02/21-14:43:06	55	54,5	01/02/21-14:43:42	80	79,95
01/02/21-14:42:31	40	38,88	01/02/21-14:43:07	55	54,5	01/02/21-14:43:43	80	79,35
01/02/21-14:42:32	40	41,08	01/02/21-14:43:08	55	56,8	01/02/21-14:43:44	80	80,15
01/02/21-14:42:33	40	40,08	01/02/21-14:43:09	55	55	01/02/21-14:43:45	80	80,05
01/02/21-14:42:34	40	40,08	01/02/21-14:43:10	55	54,7	01/02/21-14:43:46	80	79,25
01/02/21-14:42:35	40	37,88	01/02/21-14:43:11	55	55,6	01/02/21-14:43:47	80	80,05
01/02/21-14:42:36	40	39,98	01/02/21-14:43:12	55	54,5	01/02/21-14:43:48	80	80,15
01/02/21-14:42:37	40	39,98	01/02/21-14:43:13	55	54,4	01/02/21-14:43:49	80	78,25
01/02/21-14:42:38	40	39,98	01/02/21-14:43:14	55	53,7	01/02/21-14:43:50	80	80,15
01/02/21-14:42:39	55	40,37	01/02/21-14:43:15	55	54,6	01/02/21-14:43:51	80	78,15
01/02/21-14:42:41	55	42,86	01/02/21-14:43:17	55	54,8	01/02/21-14:43:52	80	80,15
01/02/21-14:42:42	55	43,05	01/02/21-14:43:18	55	54,4	01/02/21-14:43:53	80	80,05
01/02/21-14:42:43	55	54,9	01/02/21-14:43:19	55	54,5	01/02/21-14:43:54	80	80,25
01/02/21-14:42:44	55	54,9	01/02/21-14:43:20	55	55,5	01/02/21-14:43:55	80	77,95
01/02/21-14:42:45	55	54,9	01/02/21-14:43:21	55	54,8	01/02/21-14:43:57	80	80,05
01/02/21-14:42:46	55	55	01/02/21-14:43:22	55	53,6	01/02/21-14:43:58	80	79,85
01/02/21-14:42:47	55	56,7	01/02/21-14:43:23	55	54,6	01/02/21-14:43:59	80	79,95
01/02/21-14:42:48	55	55	01/02/21-14:43:24	55	56,6	01/02/21-14:44:00	80	80,15
01/02/21-14:42:49	55	53,7	01/02/21-14:43:25	55	54,5	01/02/21-14:44:01	80	79,95
01/02/21-14:42:50	55	54,8	01/02/21-14:43:26	55	54,8	01/02/21-14:44:02	65	79,14
01/02/21-14:42:51	55	55,7	01/02/21-14:43:27	80	54,8	01/02/21-14:44:03	65	78,34
01/02/21-14:42:52	55	54,4	01/02/21-14:43:28	80	54,9	01/02/21-14:44:04	65	66,29
01/02/21-14:42:53	55	55,9	01/02/21-14:43:29	80	69,8	01/02/21-14:44:05	65	64,59
01/02/21-14:42:54	55	55	01/02/21-14:43:30	80	78,84	01/02/21-14:44:06	65	64,79
01/02/21-14:42:55	55	54,9	01/02/21-14:43:31	80	80,25	01/02/21-14:44:07	65	63,29
01/02/21-14:42:56	55	55,7	01/02/21-14:43:32	80	79,15	01/02/21-14:44:08	65	64,59
01/02/21-14:42:57	55	54,8	01/02/21-14:43:33	80	80,15	01/02/21-14:44:09	65	64,39
01/02/21-14:42:58	55	57,9	01/02/21-14:43:34	80	80,05	01/02/21-14:44:10	65	62,69
01/02/21-14:42:59	55	54,8	01/02/21-14:43:35	80	78,25	01/02/21-14:44:11	65	64,69
01/02/21-14:43:01	55	54,5	01/02/21-14:43:36	80	80,25	01/02/21-14:44:12	65	65,79
01/02/21-14:43:02	55	52,6	01/02/21-14:43:37	80	79,95	01/02/21-14:44:13	65	64,79

01/02/21-14:44:14	65	64,69	01/02/21-14:44:50	35	34,63	01/02/21-14:45:26	35	34,73
01/02/21-14:44:16	65	66,59	01/02/21-14:44:51	35	35,73	01/02/21-14:45:27	35	34,33
01/02/21-14:44:17	65	64,39	01/02/21-14:44:52	35	34,33	01/02/21-14:45:28	35	33,73
01/02/21-14:44:18	65	67,49	01/02/21-14:44:53	35	34,33	01/02/21-14:45:29	35	34,92
01/02/21-14:44:19	65	64,59	01/02/21-14:44:54	35	33,53	01/02/21-14:45:30	35	34,53
01/02/21-14:44:20	65	64,49	01/02/21-14:44:55	35	34,63	01/02/21-14:45:31	35	35,63
01/02/21-14:44:21	65	62,59	01/02/21-14:44:56	35	37,73	01/02/21-14:45:32	35	34,92
01/02/21-14:44:22	65	64,59	01/02/21-14:44:57	35	34,63	01/02/21-14:45:33	35	34,83
01/02/21-14:44:23	65	64,79	01/02/21-14:44:58	35	34,63	01/02/21-14:45:34	35	34,53
01/02/21-14:44:24	65	64,79	01/02/21-14:44:59	35	35,63	01/02/21-14:45:35	0	34,83
01/02/21-14:44:25	65	63,49	01/02/21-14:45:00	35	34,83	01/02/21-14:45:36	0	34,63
01/02/21-14:44:26	65	64,89	01/02/21-14:45:01	35	35,53	01/02/21-14:45:37	0	34,63
01/02/21-14:44:27	65	65,59	01/02/21-14:45:02	35	34,83	01/02/21-14:45:38	0	0,61
01/02/21-14:44:28	65	64,89	01/02/21-14:45:03	35	34,83	01/02/21-14:45:39	0	-0,51
01/02/21-14:44:29	65	64,69	01/02/21-14:45:04	35	34,63	01/02/21-14:45:41	0	0,41
01/02/21-14:44:30	65	66,49	01/02/21-14:45:06	35	31,43	01/02/21-14:45:42	0	0,41
01/02/21-14:44:31	65	64,59	01/02/21-14:45:07	35	34,43	01/02/21-14:45:43	0	-0,12
01/02/21-14:44:32	65	64,79	01/02/21-14:45:08	35	34,63	01/02/21-14:45:44	0	1,12
01/02/21-14:44:33	65	64,69	01/02/21-14:45:09	35	33,23	01/02/21-14:45:45	0	0,91
01/02/21-14:44:34	65	65,49	01/02/21-14:45:10	35	34,63	01/02/21-14:45:46	0	0,02
01/02/21-14:44:35	65	64,79	01/02/21-14:45:11	35	36,43	01/02/21-14:45:47	0	-0,31
01/02/21-14:44:36	65	64,49	01/02/21-14:45:12	35	34,43	01/02/21-14:45:48	0	0,51
01/02/21-14:44:37	65	64,59	01/02/21-14:45:13	35	34,53	01/02/21-14:45:49	0	0,12
01/02/21-14:44:38	35	64,19	01/02/21-14:45:14	35	35,53	01/02/21-14:45:50	0	1,51
01/02/21-14:44:40	35	64,59	01/02/21-14:45:15	35	34,23	01/02/21-14:45:51	0	0,51
01/02/21-14:44:41	35	37,5	01/02/21-14:45:16	35	34,73	01/02/21-14:45:52	0	0,51
01/02/21-14:44:42	35	37,8	01/02/21-14:45:17	35	37,63	01/02/21-14:45:53	0	1,31
01/02/21-14:44:43	35	32,73	01/02/21-14:45:18	35	34,73	01/02/21-14:45:54	0	0,61
01/02/21-14:44:44	35	34,92	01/02/21-14:45:19	35	34,92	01/02/21-14:45:55	0	0,51
01/02/21-14:44:45	35	35,22	01/02/21-14:45:20	35	32,73	01/02/21-14:45:57	0	0,31
01/02/21-14:44:46	35	35,73	01/02/21-14:45:21	35	34,73	01/02/21-14:45:58	0	0,31
01/02/21-14:44:47	35	34,23	01/02/21-14:45:22	35	34,83	01/02/21-14:45:59	0	0,61
01/02/21-14:44:48	35	34,73	01/02/21-14:45:24	35	34,92	01/02/21-14:46:00	0	-0,7
01/02/21-14:44:49	35	37,63	01/02/21-14:45:25	35	36,63	01/02/21-14:46:01	0	0,22

Anexo IV. Sintonía del controlador PID

El método utilizado para la sintonía del control PID es el método de LAMBDA 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 estática

T es la constante de tiempo (también denominada retraso)

L es el retardo de tiempo

Ecuación equivalente a la obtenida en el apartado 4.4.1. con la siguiente expresión:

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

$$Kp = 1.0066$$

$$Tp1 = 0.49269$$

$$Td = 1.82$$

Los términos equivalentes de las dos ecuaciones se muestran a continuación:

Kp	=	Kp
T	=	Tp1
L	=	Td

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

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

- Constantes para un control PI

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

$$G(s) = \frac{1.0066}{1 + 0.49269(s)} e^{-1.82(s)}$$

$$\begin{aligned} Kp &= 1.0066 \\ T &= 0.49269 \\ L &= 1.82 \end{aligned}$$

Constantes de sintonía:

Agresivo	Robusto
Kp = 0.199847	Kp = 0.148407
Ti = 0.49269	Ti = 0.49269

- Constantes para un control PID

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



$$G(s) = \frac{1.0066}{1 + 0.49269(s)} e^{-1.82(s)}$$

$$\begin{aligned} Kp &= 1.0066 \\ T &= 0.49269 \\ L &= 1.82 \end{aligned}$$

Constantes de sintonía:

Agresivo	Robusto
Kp = 0.99344327	Kp = 0.58352265
Ti = 1.40269	Ti = 1.40269
Td = 0.31963435	Td = 0.31963435

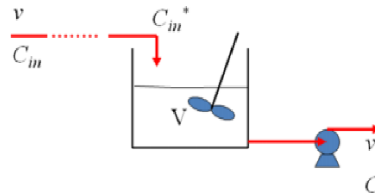
Anexo V. Guía para la adquisición de datos y estimación de modelos

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS 			
ANEXO IV HOJAS GUÍA DE ADQUISICIÓN DE DATOS			Pág. 1/8
ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:	
Wilson Guambo	Ing. Paúl Corrales	Ing. Paúl Corrales	
FECHA:	FECHA:	FECHA:	
CARRERA	CÓDIGO DE LA ASIGNATURA	NOMBRE DE LA ASIGNATURA	
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA	IELM	CONTROL INDUSTRIAL	
TEMA:	LABORATORIO	Nº:	DURACIÓN (HORAS)
ADQUISICIÓN DE DATOS PARA CONTROL DE FLUJO	ELECTROMECAÁNICA	1	1
OBJETIVO			
<p>Establecer conexión física entre el software LABVIEW y la planta de caudal mediante el uso de la tarjeta electrónica myDAQ para adquirir datos del comportamiento de las variables de la planta</p>			
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA			
<p>1. Representación de Modelos matemáticos</p> <p>Obtener un modelo matemático de un componente físico, es uno de los problemas más importantes en ingeniería de control. Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un juego de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con exactitud, o al menos, razonablemente bien y para ser útil, por lo cual un modelo matemático no debe ser ni muy complicado ni excesivamente simple [1].</p> <p>2. Función de transferencia</p> <p>La función de transferencia se define como es el cociente entre las expresiones matemáticas de las variables de salida $y(t)$ y de la entrada $u(t)$ en función del tiempo, en otras palabras, es la representación de cómo un cambio o estímulo en la entrada del sistema se transforma en un efecto en la salida; se representa por el símbolo $G(p)$ o $G(s)$ [1][2].</p> $G(s) = \frac{b_m s^m + b_{(m-1)} s^{(m-1)} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{(n-1)} s^{(n-1)} + \dots + a_0} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (1.1)$ <p>2.2 Función de transferencia de sistemas de primer orden autorregulados</p> <p>- Procesos autorregulados</p> <p>Son aquellos en los cuales un cambio en las variables de entrada conduce a un nuevo estado estacionario en forma automática, además tiene la tarea de mantener la salida en</p>			

el valor deseado a pesar de las perturbaciones presentes. Por ejemplo, los sistemas de primer orden

- Sistemas de primer orden más tiempo muerto

Muchas veces en los procesos industriales se introducen tiempos muertos; particularmente en la industria química suelen asociarse al transporte de fluidos por cañerías. Por ejemplo, en el siguiente esquema, si se produce un cambio en la concentración de entrada C_{in} puede demorar un cierto tiempo θ en que dicho cambio llegue a la entrada del tanque [1].



La forma general de estos procesos será:

$$g(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-\theta L}$$

3. Espacio de Estados

El método de espacios de estado es una técnica que permite utilizar la información suministrada por todas las variables internas de un sistema, además de la salida, es posible diseñar sistemas de control que tienen mejores desempeños [3].

De manera general un sistema está representado en el espacio de estados por las ecuaciones 1.2 y 1.3:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \text{ (Ecuación de estado)} \quad (1.2)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \text{ (Ecuación de salida)} \quad (1.3)$$

Donde:

x = vector de estado

\dot{x} = derivada del vector de estado con respecto al tiempo

y = vector de salida

u = vector de entrada o de control

A = matriz del sistema

B = matriz de la entrada

C = matriz de la salida

D = matriz de la prealimentación (en la mayoría de los sistemas es nula) [4]

2.2. EQUIPO, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS

- Estación de Caudal
- Variador de Frecuencia IG5A
- Fuente 24VDC
- Tarjeta NI myDAQ
- Cables de conexión
- Computador personal

2.3. MEDIDAS DE SEGURIDAD

- Verificar el aislamiento de cable de conectores Jack banana
- Suministrar el voltaje adecuado para cada equipo
- Verificar el aislamiento seguro de los puertos de cada uno de los módulos de los equipos
- Verificar continuidad de los puertos
- Identificar colores de puertos y cables de conexión

2.4. PROCEDIMIENTO PARA CREAR UN VI DE ADQUISICIÓN DE DATOS EN LABVIEW

1. En un computador personal abrir el software LABVIEW
2. Crear un nuevo proyecto
3. Dentro del proyecto crear un VI
4. Transcribir los bloques de programación mostrados en la figura 1.1 y 1.2 a un VI en el programa LABVIEW

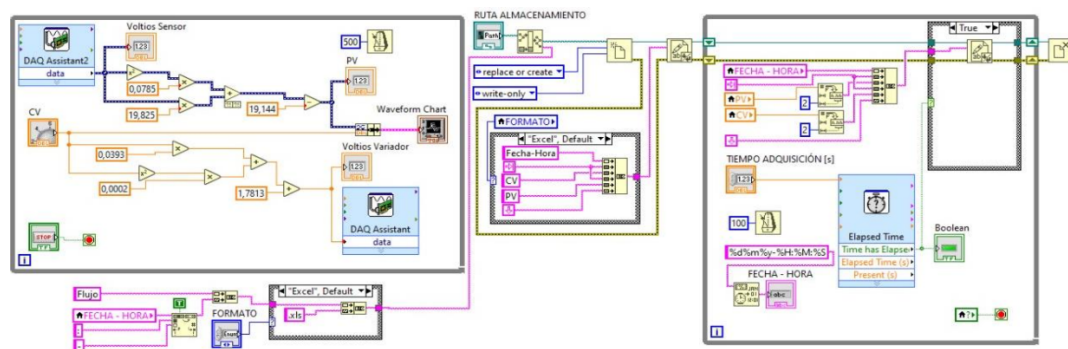


Figura 1.1. Bloques de programación para adquisición de datos

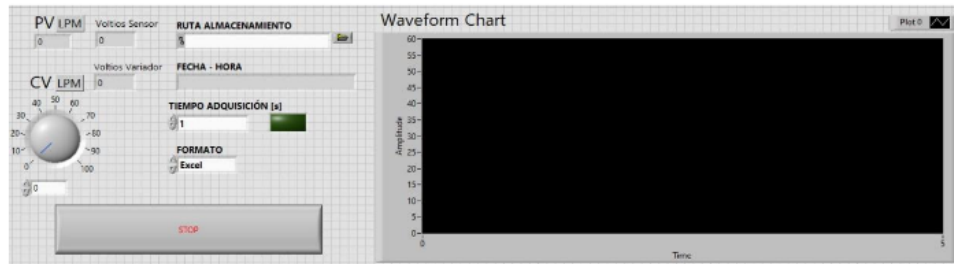


Figura 1.2. HMI para Adquisición de datos

Nota:

- Antes de conectar la tarjeta a la entrada y salida de la planta verifique que los valores a manejar por los puertos analógicos de la tarjeta se encuentren dentro del rango del funcionamiento con la finalidad de precautelar la integridad de los equipos
- Para poder establecer conexión con la tarjeta myDAQ es necesario instalar previamente el complemento myDAQ suite

4.5.PROCEDIMIENTO DE CONEXIÓN

1. Energizar la fuente del módulo de la mesa didáctica desde la toma principal trifásica
2. Realizas las conexiones de acuerdo al diagrama de la figura 1.3
3. Desde un computador personal abrir el software LABVIEW y establecer conexión con la tarjeta myDAQ
4. Una vez establecida la conexión realizar una comprobación previa de entrada y salida analógicas
5. Abrir el VI creado para la adquisición de datos y verificar que la ruta de almacenamiento corresponda a una dirección en el disco local C.
6. Ejecutar el correspondiente VI para la adquisición de datos
7. Dentro de HMI del programa de adquisición de datos ingresar valores arbitrarios en escalones ascendentes y descendentes en el control numérico de la variable de control (CV)
8. Verificar la creación de a base de datos correspondiente a la práctica realizada

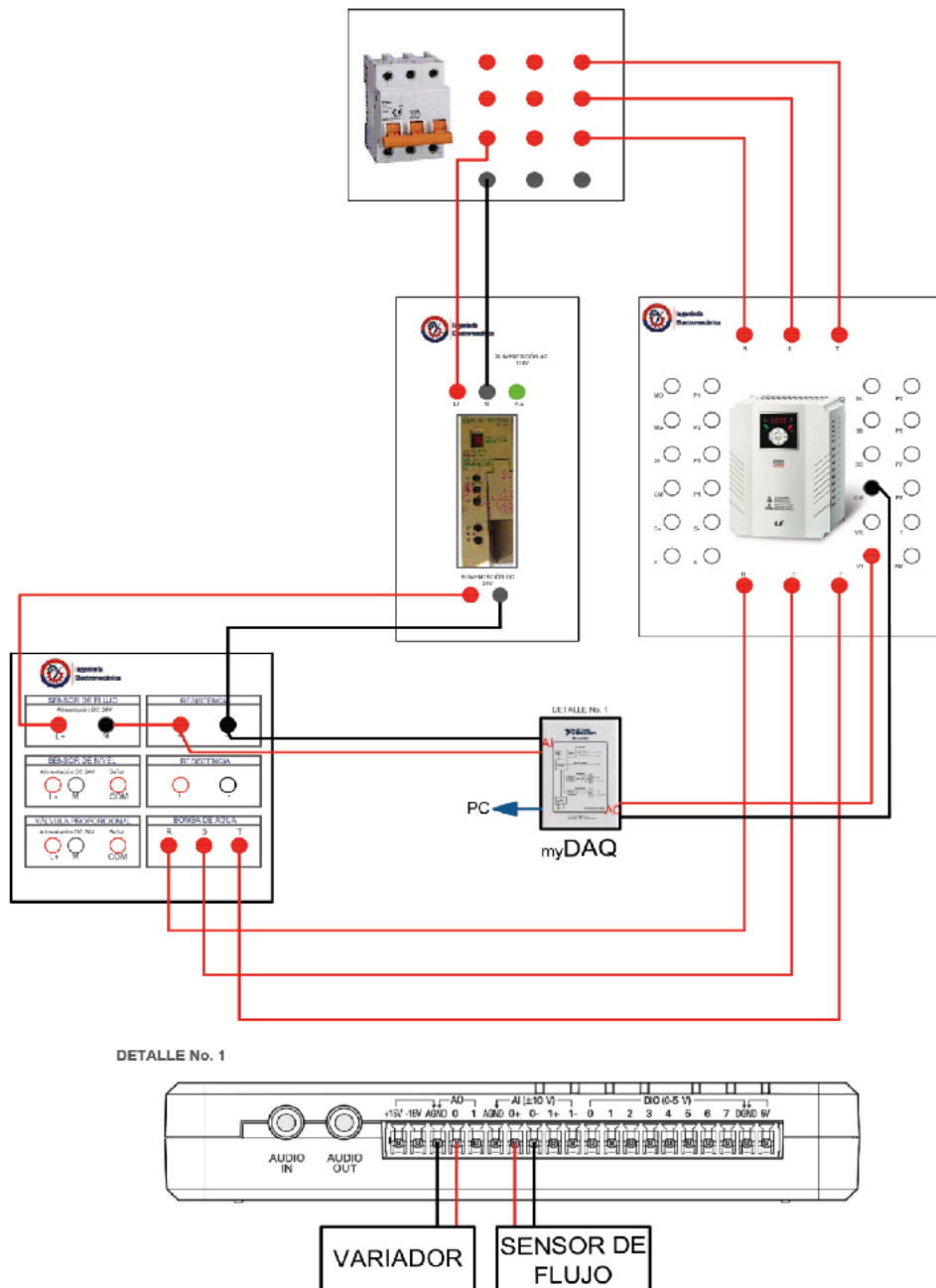


Figura 1.3. Diagrama de conexión para adquisición de datos de un proceso de caudal

4.6.PROCESO DE ESTIMACIÓN DE MÓDELO en MATLAB

1. Desde un computador personal abrir el software MATLAB
2. Crear dos variables (CV-PV) e importar los datos obtenidos del proceso anterior. (A)
3. En la ventana de comandos de MATLAB digitar el comando “systemIdentification” el cual permite abrir la herramienta para la identificación de modelos.
4. Una vez inicializado la ventana del sistema de identificación de MATLAB importamos la base de datos almacenada en las variables CV-PV. (B)
5. Para la importación de los datos se debe especificar el nombre de la variable de entrada y salida del sistema, el tiempo de muestreo y el tiempo de inicio.
6. El paso final consiste en la estimación de los modelos tanto en función de transferencia como en espacio de estados. (C - D)
7. La estimación debe realizarse tomando en cuenta el orden del sistema y el numero de variables del mismo. (E)

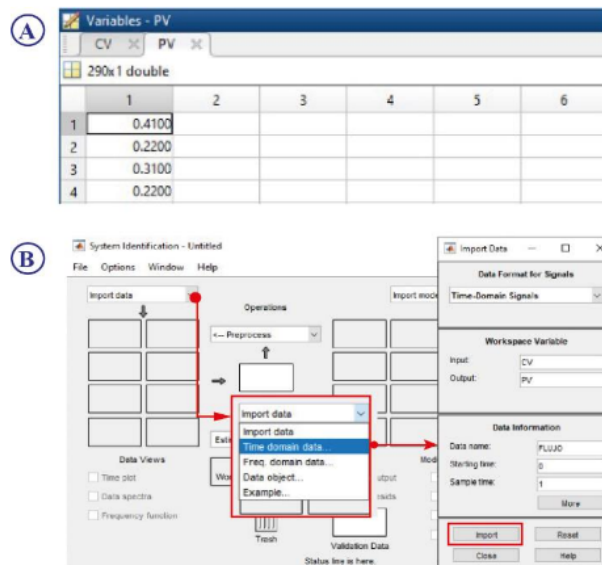


Figura 1.4. Proceso de estimación en MATLAB

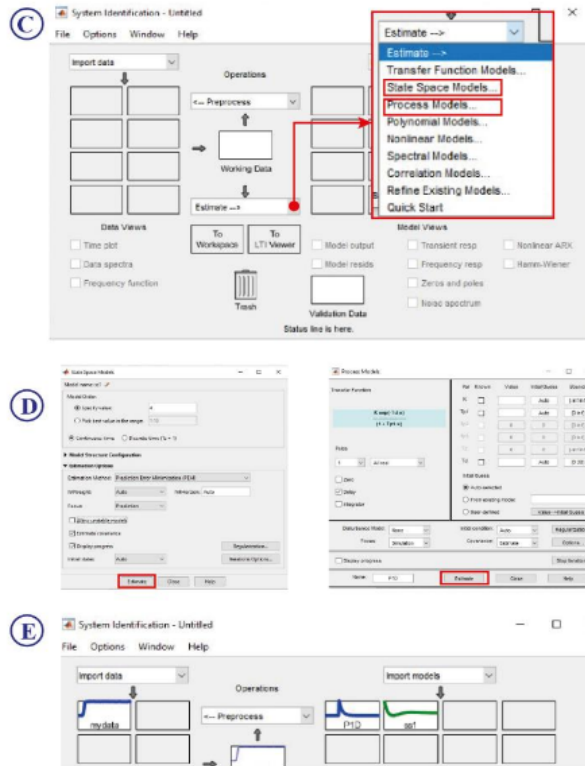


Figura 1.4. Proceso de estimación en MATLAB

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Process model with transfer function:

$$G(s) = \frac{K_p}{1+T_{p1}s} \cdot \exp(-T_d s)$$

Kp =
Tpl =
Td =

Continuous-time identified state-space model:

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

A	B	C

3.1. VALIDACIÓN DE MODELOS

PORCENTAJE DE COINCIDENCIA ENTRE PROCESO REAL Y MODELO MATEMÁTICO

%=

%=

5. CONCLUSIONES



6. RECOMENDACIONES

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Moncada Albitres, Automatización y Control de Procesos, Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2005
- [2] S. Domínguez, P. Campoy, J. Sebastián y A. Jiménez, Control en el Espacio de Estados, Madrid: Pearson, 2006
- [3] R. Hernández Gaviño, Introducción a los sistemas de control: Conceptos, Aplicaciones y Simulación con MATLAB, México: Pearson, 2010
- [4] K. J. Astrom y T. Haggund, Control PID avanzado, Madrid: Pearson, 2009

8. ANEXOS

Anexo VI. Guía para la implementación PID y un Predictivo mediante comunicación OPC

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS			
ANEXO V GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL MPC Y PID MEDIANTE CONEXIÓN OPC PARA CONTROL DE CAUDAL				Pág. 1/13	
ELABORADO POR:		REVISADO POR:		APROBADO POR:	
Wilson Guambo		Ing. Paúl Corrales		Ing. Paúl Corrales	
FECHA:		FECHA:		FECHA:	
CARRERA		CÓDIGO DE LA ASIGNATURA		NOMBRE DE LA ASIGNATURA	
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA		IELM		CONTROL INDUSTRIAL	
TEMA:		LABORATORIO	Nº:	DURACIÓN (HORAS)	
ADQUISIÓN DE DATOS PARA CONTROL DE FLUJO		ELECTROMECAÁNICA	1	1	
OBJETIVO					
Implementar un control predictivo y un control PID para control de caudal en la Estación Nº 3 del Laboratorio de Automatización y control, mediante conexión OPC para evaluar parámetros de desempeño de cada uno de los controladores					
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA					
<p>Introducción</p> <p>El controlador proporcional integral derivativo -PID- se ha convertido en la herramienta de regulación de variables de proceso más utilizada, y por ello se ha aplicado de forma indiscriminada sobre sistemas dinámicos lineales y no lineales, generando problemas de control en el sector industrial, produciéndose pérdida de eficiencia en la productividad y disminución de la calidad de los productos manufacturados. Dentro de las técnicas de control moderno que han surgido para responder en aplicaciones en las cuales el controlador PID no ha operado satisfactoriamente, está el control predictivo basado en modelo -MPC-. Este algoritmo de control se ha caracterizado por su gran capacidad de respuesta, sin embargo, su expansión en el sector industrial ha sido lenta, ya que ha sido comercializado para aplicaciones particulares [1].</p> <p>PID</p> <p>El controlador PID es con mucho el algoritmo de control más común. La mayoría de los lazos de realimentación se controlan mediante este algoritmo u otro con pequeñas variaciones.</p> <p>Una de las condiciones para que un controlador sea aceptable es que la respuesta sea rápida, es por esto que se agrega una acción derivativa la cual dota al controlador de una</p>					

**ANEXO V GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL MPC
Y PID MEDIANTE CONEXIÓN OPC PARA CONTROL DE
CAUDAL**

Pág. 2/13

capacidad anticipativa utilizando una predicción de la salida basada en una extrapolación lineal [2]. Esto se puede expresar matemáticamente como:

$$y(t) = y_0 + \underbrace{K_c(e(t))}_P + \underbrace{\frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt}_I + \underbrace{T_d \frac{de(t)}{dt}}_D \quad (1.1)$$

y = Salida del controlador

c = Punto de consigna

m = Señal de medida

e = c - m = Señal de error o desviación

K_c = Ganancia

T_i = Tiempo integral

T_d = Tiempo derivativo

y₀ = Salida inicial del controlador para un

t = 0

En general las acciones del control PID se resumen de la siguiente manera: la acción proporcional (*K_c*) reduce el tiempo de subida, pero no elimina nunca el error en régimen permanente. La acción integral (*K_i*) elimina el error en régimen permanente, pero empeora la respuesta transitoria. La acción derivativa (*K_d*) incrementa la estabilidad del sistema, reduce el sobreimpulso y mejora la respuesta transitoria [2].

Control predictivo

El control predictivo (MPC – Model Predictive Control) no es una estrategia de control específica, sino que se trata más bien de un campo muy amplio de métodos de control desarrollados en torno a ciertas ideas comunes. Su estrategia de control basada en procesos numéricos requiere una intensa actividad de cómputo, no obstante, con la potencia de los computadores actuales esta no es realmente una dificultad infranqueable y es lo que ha impulsado su aplicabilidad en diversos procesos industriales en los últimos años [3][4].

- Estrategia de control

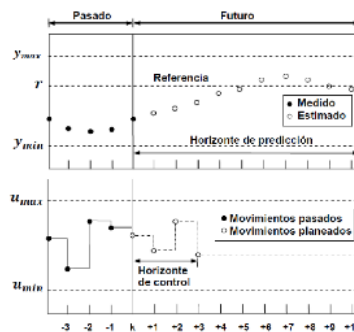


Figura V.1 Operación de un MPC

Fuente: [1]

En la Figura V.1, se muestra el principio de operación de un control MPC, en el cual para el cálculo del próximo movimiento (acción de control (u)), el controlador opera en dos fases: estimación y optimización.

Estimación- En la fase de estimación, el controlador utiliza todos los cambios previos, los valores actuales de las variables conocidas y el modelo de la planta para predecir el desempeño de la variable de salida [1].

Optimización- En la fase de optimización, los valores de la señal de referencia, las perturbaciones medibles y las restricciones, se especifican para un Horizonte de Predicción o instantes de muestreo posteriores, y con esta información el controlador calcula varios movimientos futuros de la variable manipulada sobre un Horizonte de Control, los cuales corresponden a la solución de un problema de optimización con restricciones.

Terminado este proceso, el controlador aplica la señal de control restringida (u_k) a la planta, la cual opera con esta entrada hasta el próximo Intervalo de Control, donde el controlador toma nuevas mediciones para repetir los procesos de estimación y optimización [1].

Horizonte de Predicción (H_p) y Horizonte de control (H_c)

- Horizonte de Predicción: Es el intervalo de tiempo futuro que se considera en la optimización para la señal de control.
- Horizonte de Control: Número de movimientos calculados para cada variable manipulada, donde el horizonte de control es menor al horizonte de predicción [5].

2.2. EQUIPO, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS

- Estación de Caudal
- Variador de Frecuencia IG5A
- Fuente 24VDC
- PLC S7-1200
- Módulo de entradas y salidas analógicas para PLC
- Cables de conexión
- Cable Ethernet
- Computador personal

2.3. MEDIDAS DE SEGURIDAD

- Verificar el aislamiento de cable de conectores Jack banana
- Suministrar el voltaje adecuado para cada equipo
- Verificar el aislamiento seguro de los puertos de cada uno de los módulos de los equipos
- Verificar continuidad de los puertos
- Identificar colores de puertos y cables de conexión

2.4. PROCEDIMIENTO PARA CONFIGURAR ENTRADAS Y SALIDAS ANALÓGICAS EN EL PLC S7-1200

1. En un computador personal abrir el software TIA Portal
2. Crear un nuevo proyecto
3. Elegir y configurar dispositivo
4. Crear los bloques de programación de acuerdo a las figuras 1.1 y 1.2 para normalizar y escalar tanto a la entrada (IW66) y la salida (QW80)
5. Cargar los bloques de programación hacia la memoria física del PLC habilitando la conexión PUT/GET en sus mecanismos de conexión, como se muestra en la figura 1.3

Nota: Póngase especial atención con las marcas MD80 la cual almacena el dato proveniente del software Simulink de MATLAB para su escritura en la salida analógica QW80 y la marca MD104 la cual leerá los valores provenientes de la entrada IW66.

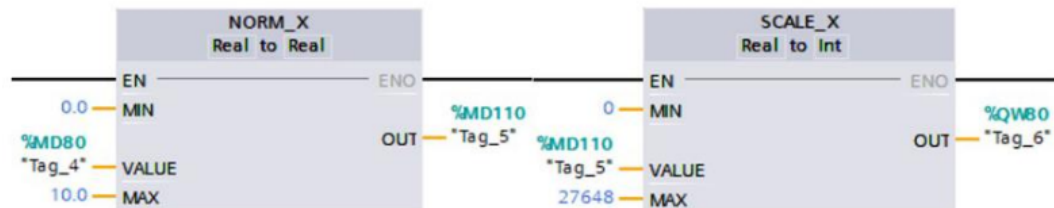


Figura 1.1. Normalización y Escalamiento de la señal de salida analógica del PLC

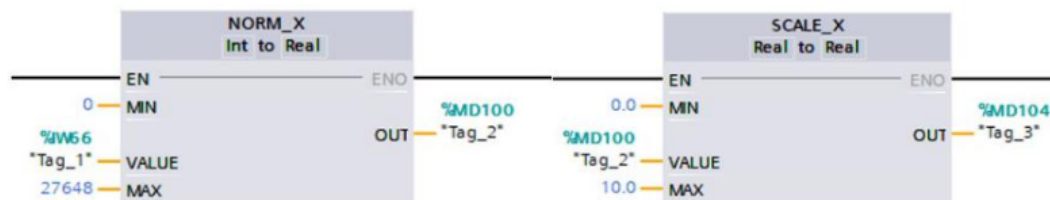


Figura 1.2. Normalización y Escalamiento de la señal de entrada analógica del PLC

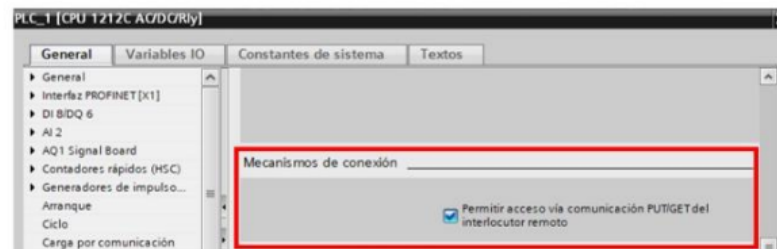


Figura 1.3. Configuración de acceso PUT/GET

5.5.PROCESO DE CONFIGURACIÓN OPC

Creación de canal de comunicación en KEPServerEx OPC

1. Descargar e instalar el software KEPServerEx (<https://www.kepware.com/en-us/products/kepserverex/>)
2. Crear un nuevo proyecto, una vez creado añadimos un canal de comunicación especificando en primer lugar el tipo de canal en este caso “Siemens TCP/IP Ethernet”, posteriormente se asigna un nombre al canal y se siguen los pasos mostrados en la figura 1.4. (A)
3. Dentro del canal creado se debe añadir un dispositivo con el cual se pretende establecer comunicación, en primer lugar se asigna un nombre y dentro del menú de dispositivos Siemens elegimos la serie “S7-1200”. Finalmente se especifica la dirección IP del dispositivo físico, por ejemplo: 192.168.0.8, como se observa en la figura 1.4. (B)

ANEXO V GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL MPC Y
PID MEDIANTE CONEXIÓN OPC

Pág.6/13

4. Finalmente se agregan “TAG`s” los cuales corresponden a las direcciones de las marcas de programación de la memoria física del PLC. MD104 para leer los datos provenientes del sensor de flujo y MD80 para escribir datos en el variador de frecuencia. Figura 1.4. (C)
Nota: El tipo de dato en el Tag de entrada y salida debe tener el formato “FLOAT” para una adecuada lectura en el programa Simulink de MATLAB.

Tomar en cuenta que si se dispone de la versión DEMO del KITServerEx se dispondrá de un tiempo limite de dos horas para su uso, transcurrido este tiempo se debe cerrar y abrir el programa.

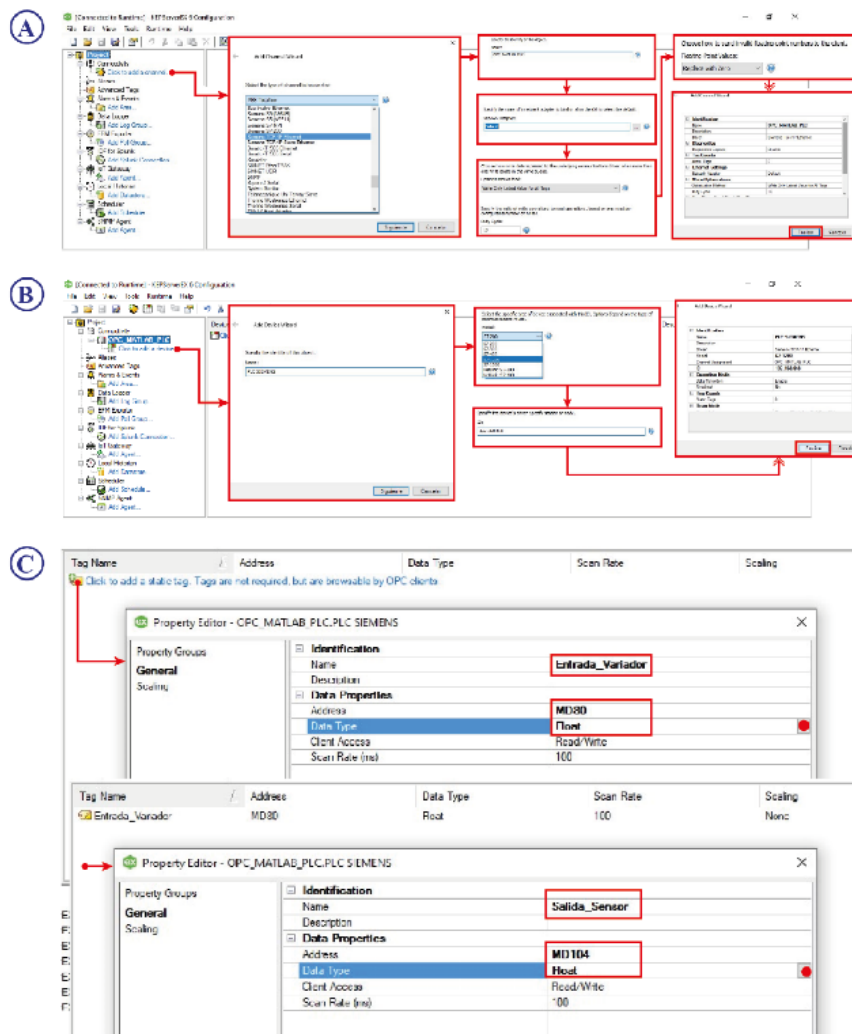


Figura 1.4. Diagrama de conexión para adquisición de datos de un proceso de caudal

ANEXO V GUÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL MPC Y PID MEDIANTE CONEXIÓN OPC

Pág.7/13

5.6.PROCESO DE CONFIGURACIÓN OPC EN SIMULINK

- Desde el entorno de programación de SIMULINK buscamos el “OPC Toolbox” en el cual encontraremos las herramientas necesarias para establecer la comunicación.

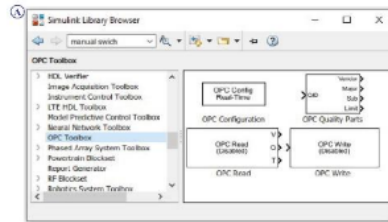


Figura 1.5. OPC Toolbox

- Colocar en el espacio de trabajo el bloque “OPC Config” el cual permite establecer una conexión en tiempo con el dispositivo físico la configuración se le realiza siguiendo los pasos mostrados.

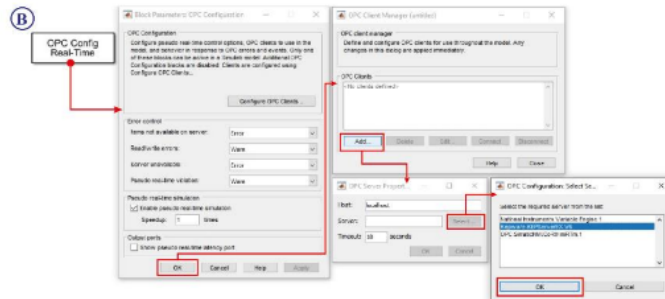


Figura 1.6. Configuración del Bloque “OPC Config”

- Para leer los datos provenientes del sensor se utiliza el bloque “OPC Read” y para la escritura de valores en el variador de frecuencia se utiliza el “OPC Write” su configuración se la realiza siguiendo los pasos mostrados.

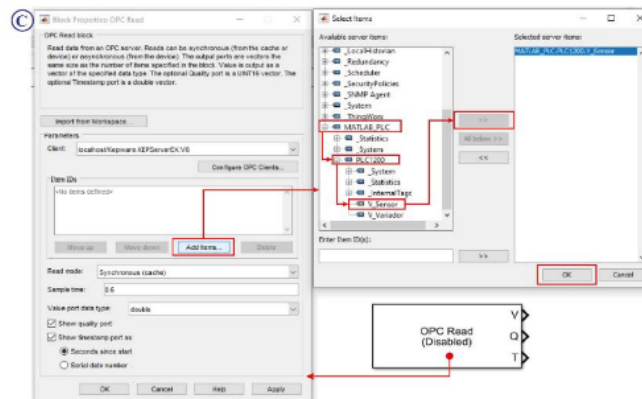


Figura 1.7. Configuración del bloque “OPC Read”

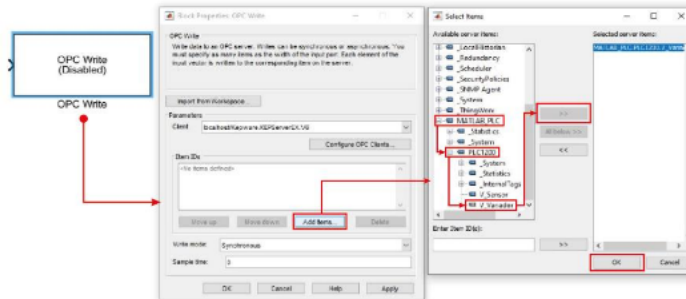


Figura 1.8. Configuración del bloque “OPC White”

4. Concluir esta configuración se ha finalizado el proceso para establecer una conexión OPC entre la planta física y el software Simulink en el cual se encuentran soportados los controladores a implementar.

5.7.PROCESO PARA DESARROLLO DE UN CONTROLADOR MPC

1. En el entorno de trabajo de Simulink crear una estructura como la figura 1.9.

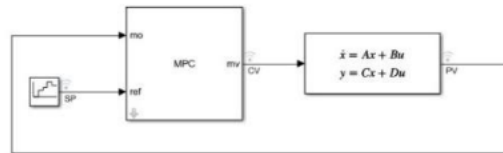


Figura 1.9. Estructura para la simulación de un controlador MPC

2. Dentro del bloque “State-Space” ingresar el modelo matemático de la planta en espacio de estados.
3. Dentro del bloque “MPC Controller” abrimos la ventana de diseño “Design” sin antes deshabilitar la opción “Measured disturbance” ya que para este proceso no se ha considerado perturbaciones medibles.

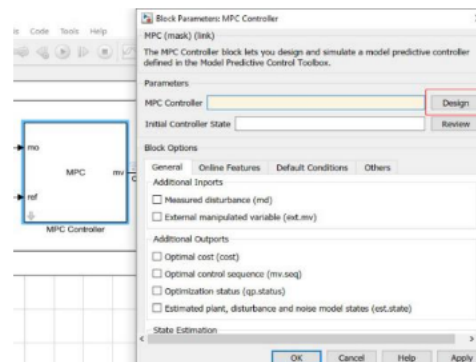


Figura 1.10. Configuración del bloque “MPC Controller”

4. En la ventana de diseño agregamos una nueva estructura MPC la cual reconoce automáticamente las entradas y salidas conectadas al bloque. Se debe especificar el tiempo de muestreo y finalmente hacer clic en la opción “Define and Linearize” obteniendo como resultado un escenario para modelar el comportamiento del MPC.

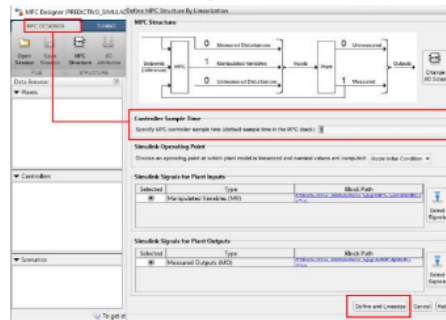


Figura 1.11. Configuración de la estructura MPC

5. En este punto se tiene un modelo de la Planta sin ningún tipo de control por lo cual es necesario imponerle un modelo de predicción, importando una planta desde la opción “Import Plant”. Este modelo importado puede ser el mismo modelo utilizado por el bloque “State Space” u otro modelo de grado diferente pero obtenido de la misma planta.

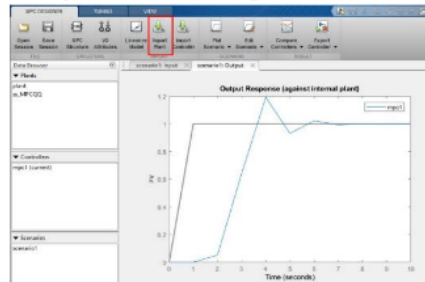


Figura 1.12. Modelo de

6. El siguiente paso corresponde al Tuning del control MPC para lo cual en primer lugar seleccionamos el modelo de planta a imponerse

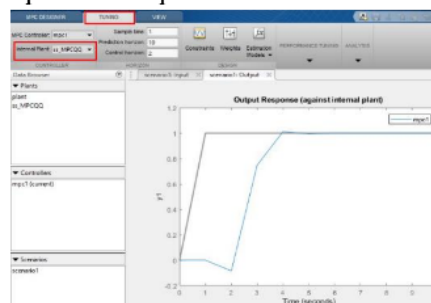


Figura 1.13.

10. Crear un nuevo archivo de programación en Simulink con la estructura mostrada en la figura XXX

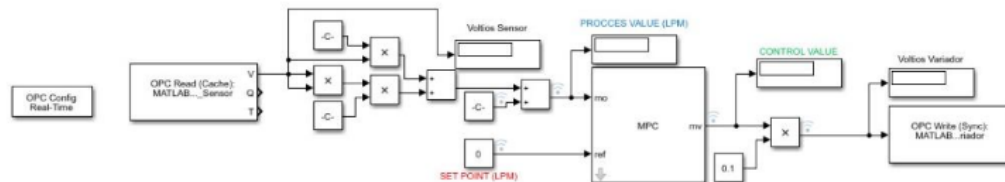


Figura 1.17.

11. Cargar al bloque MPC Controller la sesión de diseño creada en el paso 9 y proceder a ejecutar el programa especificando un tiempo infinito "inf" a fin de ejecutar un control en tiempo real.

Nota: La señal proveniente del sensor y leída por medio del bloque "OPC Read" debe ser escalada a unidades de caudal haciendo uso de la siguiente ecuación $y=0.0002x^2+0.0393x+1.7813$, así mismo se debe escalar la señal de control multiplicándola por 0.1 obteniendo como resultado un rango de trabajo de 0-10 correspondiente al valor de entrada del variador de frecuencia.

5.8.PROCESO PARA DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PID

1. En el caso del controlador PID se puede implementar sin la necesidad de ejecutar una simulación ya que su proceso de sintonía se lo realiza de forma manual utilizando el método de landa descrito en el anexo XXX de esta guía.
2. La implementación se la realiza utilizando la estructura mostrada en la figura XX

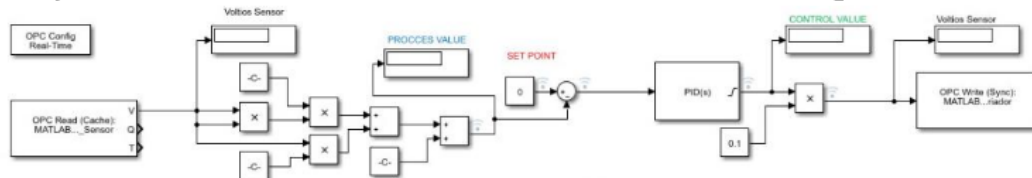


Figura 1.18.

3. De la misma manera y con el controlador predictivo las señales de entrada y salida deben ser escaladas bajo los mismos parámetros.
4. Los valores de sintonía para las constantes proporcional, integral y derivativa deben ser ingresadas en el bloque PID Controller para proceder a su implementación en el proceso real

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados deben ser evaluados de acuerdo a los parametros de desempeño descritos en la fundamentación teorica pudiendo tomar uno o varios escalones para su analisis

MPC	PID
Sobrepaso maximo (Mp): Tiempo de Retardo (Td): Tiempo de Asentamiento (Ts): Tiempo de levantamiento (Tr): Tiempo pico (Tp ó Tmáx):	Sobrepaso maximo (Mp): Tiempo de Retardo (Td): Tiempo de Asentamiento (Ts): Tiempo de levantamiento (Tr): Tiempo pico (Tp ó Tmáx):

6. CONCLUSIONES

7. RECOMENDACIONES

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Lopera y M. Diego, Implementación de un Control Predictivo Basado en Modelo Aplicado a un Sistema de Control de Caudal de Agua Didáctico, Antioquia: Instituto Tecnológico Metropolitano, 2010.
- [2] L. Moncada Albitres, Automatización y Control de Procesos, Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2005.
- [3] C. Bordóns Alba, Control Predictivo: Metodología, Tecnología y Nuevas Perspectivas, Sevilla: Escuela Superior de Ingenieros, 2000.
- [4] C. Lozoya, Modelo de control predictivo aplicado a sistemas de riego de precisión, Monterrey: Tecnológico de Monterrey, 2014.
- [5] J. M. Ortiz Guevara, Diseño y Construcción de un Convertidor DC/DC Reductor Elevador con Control Predictivo Controlado por una Tarjeta FPGA, Quito: EPN, 2011.

9. ANEXOS
Método Lambda para sintonía de un controlador PI y PID

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

Dónde: Kp es la ganancia estática

T es la constante de tiempo (también denominada retraso)

L es el retardo de tiempo

Ecuación equivalente con la siguiente expresión:

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

$$Kp =$$

$$Tp1 =$$

$$Td =$$

Los términos equivalentes de las dos ecuaciones se muestran a continuación:

Kp	=	Kp
T	=	$Tp1$
L	=	Td

Fórmulas para sintonía de un control PI y PID:

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

CONSTANTES DE SINTONÍA

RESULTADOS PARA UN CONTROL PI		RESULTADOS PARA UN CONTROL PID	
Agresivo	Robusto	Agresivo	Robusto
$Kp=$	$Kp=$	$Kp=$	$Kp=$
$Ti=$	$Ti=$	$Ti=$	$Ti=$
		$Td=$	$Td=$

Anexo VI. Diagrama de Ishikawa

