

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencia e Ingenierías

**Comparación de Estrategias de Control Clásicas vs Técnicas
Avanzadas en la Estación FESTO MPS-PA**

**JUAN MARTÍN SOTELO MEDINA
FERNANDO ANDRÉ ORTIZ JÁCOME**

INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero en Electrónica

Quito, 26 de enero de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Comparación de Control Clásicas vs Técnicas Avanzadas en la Estación
FESTO MPS-PA**

**JUAN MARTÍN SOTELO MEDINA
FERNANDO ANDRÉ ORTIZ JÁCOME**

Nombre del profesor, Título académico

Oscar Camacho, PhD

Quito, 26 de enero de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Juan Martín Sotelo Medina

Código: 00205072

Cédula de identidad: 1718573262

Lugar y fecha: Quito, 26 de enero de 2023

Nombres y apellidos: Fernando André Ortiz Jácome

Código: 00206402

Cédula de identidad: 1750268227

Lugar y fecha: Quito, 26 de enero de 2026

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

Este trabajo realiza la comparación de técnicas de control clásicas vs avanzadas aplicadas en la estación FESTO MPS-PA, por medio del uso de tres variables del sistema de la estación de trabajo, las variables de nivel, flujo y temperatura. A partir del método de curva de reacción se sintonizarán diferentes controladores los cuales serán implementados físicamente a la estación de trabajo para comparar su rendimiento, para ello, se tomarán resultados a nivel de simulación y de implementación física.

Para estos controladores se dio uso a dos técnicas de control automático, la teoría clásica de controlador proporcional, integral y derivativo (PID), y, se introdujo la técnica avanzada de control por modelo interno (IMC), obteniendo controladores mediante un modelo que representa al proceso real. Es importante aclarar que, en la teoría clásica, para las diferentes variables dependiendo en su velocidad de acción u otros factores, se dio uso a la variación de la técnica de sintonización únicamente a proporcional e integral (PI).

El presente trabajo compara diferentes estrategias de control, basado en los resultados de cada una de las técnicas en su aplicación física a la maquina por medio del PLC SIEMENS S7-300. Los resultados que se obtendrán se presentarán de forma gráfica por medio de una interfaz de tipo SCADA.

Palabras clave: Control Clásico, Control Avanzado, PID, PI, IMC, Flujo, Nivel, Temperatura, PLC, SCADA.

ABSTRACT

This work makes the comparison of classical vs. advanced control techniques applied in the FESTO MPS-PA station, using three variables of the machine system, the variables of level, flow and temperature. From the reaction curve method, six different controllers will be tuned, which will be physically implemented in the workstation to compare their performance, for this, results will be taken at the simulation and physical implementation level.

For these controllers, two automatic control techniques were used, the classical proportional, integral and derivative (PID) controller theory, and the advanced internal model control (IMC) technique, obtaining controllers through a model that represents the real process. It is important to clarify that, in the classical theory, for the different variables depending on their speed of action or other factors, the variation of the tuning technique was used only to proportional and integral (PI).

This paper compares different control strategies, based on the results of each of the techniques in its physical application to the machine through the SIEMENS S7-300 PLC. The results that will be obtained will be presented graphically through a SCADA type interface.

Key words: Classic Control, Advanced Control, PID, PI, IMC, Flow, Level, Temperature, PLC, SCADA.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
INTRODUCCIÓN	12
Control Automático.....	12
Controladores	13
Controladores PID	13
Sintonización por método de Dahlin.....	15
Controlador por Modelo Interno IMC	15
Sintonización de Controladores a partir del Método de Curva de Reacción	17
SIEMENS SIMATIC S7-300.....	18
MPS-PA FESTO Compact Workstation	19
Variable de Proceso de Nivel	20
Variable de Proceso de Flujo.....	21
Variable de Proceso de Temperatura	22
DESARROLLO DEL TEMA	23
Sintonización de Controladores por Método de Curva de Reacción.....	24
Variable de Proceso de Nivel	24
Variable de Proceso de Flujo.....	25
Variable de Proceso de Temperatura	27
Sintonización de Controladores PID Utilizando Técnicas Clásicas.....	29
Variable de Proceso de Nivel	29
Variable de Proceso de Flujo.....	29
Variable de Proceso de Temperatura	30
Sintonización de Controladores por Método Avanzado IMC.....	31

Variable de Proceso de Nivel	31
Variable de Proceso de Flujo	32
Variable de Proceso de Temperatura	33
Resultados de Simulación	33
Variable de Proceso de Nivel	34
Variable de Proceso de Flujo	36
Variable de Proceso de Temperatura	38
Resultados de la Implementación Física	39
Implementación Física Variable de Nivel.....	39
Implementación Física Variable de Flujo	42
Implementación Física Variable de Temperatura.....	44
CONCLUSIONES.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetro de sintonización por método de Dahlin	15
Tabla 2: Valores de desempeño y tiempo de asentamiento - Nivel.....	35
Tabla 3: Valores de desempeño y tiempo de asentamiento - Flujo	37
Tabla 4: Valores de desempeño y tiempo de asentamiento - Temperatura.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Bloques General para un Lazo de Control por Realimentación	14
Figura 2: Estructura de Control basada en Modelo Interno.....	16
Figura 3: Estación FESTO MPS-PA.....	19
Figura 4: Diagrama P&ID del sistema de control de nivel a circuito cerrado.....	20
Figura 5: Diagrama P&ID del sistema de control de flujo a circuito cerrado.....	21
Figura 6: Diagrama P&ID del sistema de control de temperatura a circuito cerrado	22
Figura 7: Diagrama P&ID de la estación de trabajo FESTO.....	23
Figura 8: Curva de Reacción de Nivel – FESTO MPS-PA	24
Figura 9: Validación de respuesta del proceso y modelo FOPDT	25
Figura 10: Curva de Reacción de Flujo – FESTO MPS-PA.....	26
Figura 11: Validación de respuesta del proceso y modelo FOPDT	27
Figura 13: Validación de respuesta del proceso y modelo FOPDT	28
Figura 14: Diagrama de Bloques Controlador PI – Nivel.....	29
Figura 15: Diagrama de Bloques Controlador PI – Flujo	30
Figura 16: Diagrama de Bloques Controlador PI – Temperatura.....	31
Figura 17: Diagrama de Bloques Controlador IMC – Nivel	32
Figura 18: Diagrama de Bloques Controlador IMC – Flujo	32
Figura 19: Diagrama de Bloques Controlador IMC – Temperatura	33
Figura 20: Comparación de Controladores PI vs IMC – Nivel	34
Figura 21: Acción de Controladores PI vs IMC – Nivel.....	34
Figura 22: Comparación de Controladores PI vs IMC – Flujo.....	36
Figura 23: Acción de Controladores PI vs IMC – Flujo	37
Figura 24: Comparación de Controladores PID vs IMC – Temperatura	38
Figura 25: Acción de Controladores PID vs IMC – Temperatura.....	38
Figura 26: Variable de Proceso y Set Point – Controlador PI variable de Nivel.....	40
Figura 27: Acción de la bomba P101 para el controlador PI	40
Figura 28: Variable de Proceso y Set Point – Controlador IMC variable de Nivel.....	41
Figura 29: Acción de la bomba P101 para el controlador IMC	41
Figura 30: Variable de Proceso y Set Point – Controlador PI variable de Flujo.....	42

Figura 31: Acción de la válvula V106 para el controlador PI	42
Figura 32: Variable de Proceso y Set Point – Controlador IMC variable de Flujo	43
Figura 33: Acción de la válvula V106 para el controlador IMC	43
Figura 34: Variable de Proceso y Set Point – Controlador PI variable de Temperatura....	44

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo inicia con una introducción en la que se detallan todos los fundamentos que se dieron uso para el estudio del problema del proyecto y su aplicación física. Se comienza con una pequeña explicación sobre el control automático y las bases teóricas de los controladores en conjunto con el método que se utilizó para obtenerlos, seguido a esto, se especifica cada uno de los conceptos necesarios para lograr el desarrollo del proyecto como las diferentes teorías de control aplicadas y diferenciadas por antigüedad, finalmente, las herramientas físicas de aplicación como el PLC SIEMENS S7-300, y la estación de trabajo MPS-PA de FESTO.

En la sección de desarrollo se describen los métodos utilizados para la obtención de cada uno de los controladores y sus resultados simulados e implementados con una extracción numérica de datos de error y desempeño para lograr una correcta comparación de rendimiento en cada uno de ellos.

Finalmente, el apartado de conclusiones detalla el uso de la estación de trabajo FESTO y las dificultades que presento la misma, seguido a esto, se describe el análisis de los resultados obtenidos en simulación y en implementación física concluyendo en los controladores de mejor rendimiento para cada variable de proceso.

Control Automático

Los procesos industriales son cada día más complejos y difíciles de controlar, un complejo industrial de procesos como los que se encuentran en las plantas químicas o los procesos petroquímicos comprende varias Unidades de Proceso (UP) semiautónomas que producen ciertos bienes que pueden ser insumos para otras unidades o productos finales del complejo industrial. La producción se puede realizar en forma de lotes o de forma continua con múltiples puntos operativos, y algunos insumos pueden ser discontinuos (Chacón, E., Szigeti, F., & Camacho, O.

1996), por lo cual, el uso de control automático es cada día más necesario dado que su objetivo es mantener en determinado valor de operación a las variables del proceso, tales como: temperatura, flujo, presión y compuestos. (Smith & Corripio, 2005), garantizando la estabilidad de los sistemas en el tiempo, para esto, los especialistas utilizan conceptos como el de la retroalimentación del sistema para realizar esquemas de control funcionales. En un sistema con realimentación tenemos una referencia y la respuesta del sistema, con estas dos señales podemos calcular el error entre lo obtenido y el valor deseado (Ogata, 2003).

Con el pasar de los años se han creado nuevas técnicas y teorías de control como el control difuso, el control predictivo (Liptak, 2018) o a su vez el estudiado en este trabajo, el control por modelo interno, que hoy en día permiten estabilizar una variable con mejores resultados, pero, siendo unas más complejas que otras y diferenciados por su aplicación a diferentes variables y sistemas (Samad y Col., 2020)

Controladores

Un controlador es un elemento designado a tomar la decisión final sobre el tipo de acción requerida en el elemento final de control, el cual, cuenta con dos funciones esenciales:

- Realiza la comparación entre la variable medida y el punto de operación del sistema, para así, determinar un valor de error entre ellas.
- Reducir el error por medio del envío de señales al elemento final de control, esta acción permite también, mantener la señal de salida lo más cercana a la referencia del sistema.

Controladores PID

Cuando se habla de control automático de un proceso, tenga este, una o varias variables, se sabe que este requiere de un sistema que ajuste automáticamente dichas variables para mantenerlas

dentro de los límites establecidos por necesidad. Comúnmente, para controlar este tipo de procesos se da uso a los controladores en lazo cerrado, o realimentados; para esto, se mide la variable a controlar, y , con la misma se realimenta al controlador comparándola con el valor esperado, con lo cual, se determinará la corrección necesaria aplicada al sistema.

Según Camacho, Rosales, y Rivas (2020) existen algunas estrategias que utilizan una acción proporcional de ese error (P), otras emplean una acción integral con intención de mejorar la respuesta en estado estacionario (I) y, otras usan una acción derivativa que pretende mejorar el régimen transitorio de las respuestas de los sistemas (D), por lo cual, este tipo de controladores recibe el nombre de controladores tipo PID.

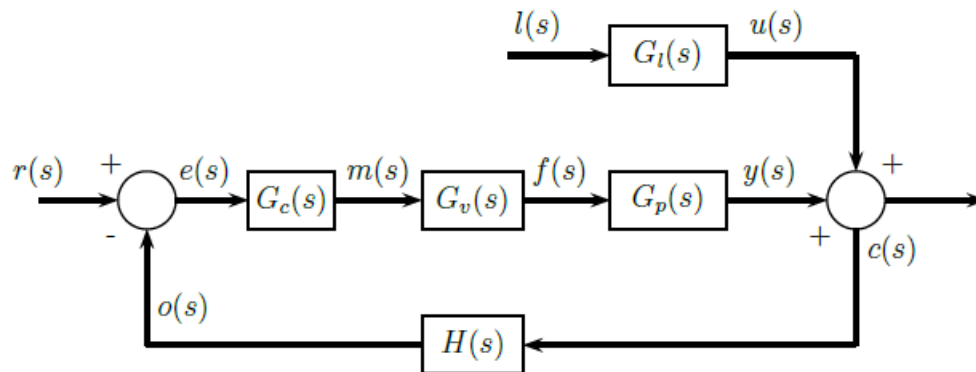


Figura 1: Diagrama de Bloques General para un Lazo de Control por Realimentación

Donde:

$r(s)$ corresponde a la función de transferencia deseada o “referencia”, $c(s)$ es la salida del proceso más la perturbación, $l(s)$ corresponde a la función de transferencia de la perturbación, $e(s)$ es la función de transferencia del error, $G_c(s)$ es la función de transferencia del controlador, $G_v(s)$ corresponde a la función de transferencia del actuador, $G_p(s)$ corresponde a la función de

transferencia del proceso, $G_l(s)$ corresponde a la función de transferencia de la perturbación, y, $H(s)$ corresponde a la función de transferencia del transmisor.

Sintonización por método de Dahlin

Tabla 1: Parámetro de sintonización por método de Dahlin

Parámetros de Sintonización usando el método de Dahlin		
Controlador	Parámetro de Ajuste	Ecuación
Proporcional + Integral + Derivativo, PID	K_p	$\frac{1}{2K} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)$
	τ_i	τ
	τ_d	$\frac{t_0}{2}$

(Camacho, Rosales, & Rivas, Control de Procesos, 2020, p.109)

Controlador por Modelo Interno IMC

El control por modelo interno se resume en obtener un modelo que representa al proceso real y a partir de este, desarrollar el controlador. El controlador IMC elimina todos los elementos en el modelo de proceso $G_m(s)$ que conducen a un controlador irrealizable al tomar el inverso de solo el factor invertible para dar:

$$G_c(s) = [G_m^-(s)]^{-1} \quad (1)$$

Esta ecuación de diseño asegura que el controlador sea realizable y que el sistema sea internamente estable. (Marlin, 1995)

El controlador por modelo interno se divide en dos componentes, la componente invertible $G_m(s)^-$, y la componente no invertible $G_m(s)^+$, como se presenta en la figura de estructura del controlador.

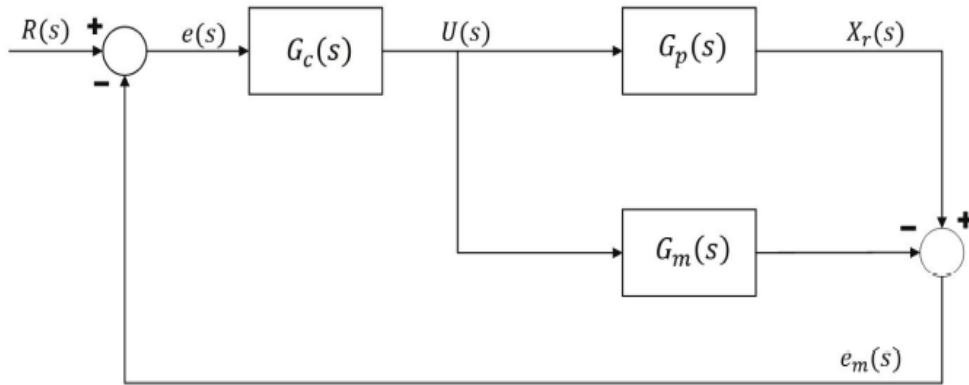


Figura 2: Estructura de Control basada en Modelo Interno

Donde $R(s)$ es la referencia, $G_p(s)$ es la función de transferencia del proceso, $G_c(s)$ es la función de transferencia del controlador, $G_m(s)$ es la función de transferencia del modelo del proceso, $e_m(s)$ es el error de modelado, $X(s)$ es la salida del proceso, y $X_m(s)$ es la salida del modelo, con lo que, se obtiene la siguiente ecuación para el controlador IMC:

$$\frac{X(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)(X(s)-X_m(s))} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)e_m(s)} \quad (2)$$

Diseño del controlador:

Camacho, Rosales y Rivas (2020) explican que el método de diseño de un controlador IMC se resume en dos pasos fundamentales:

- Se debe establecer la referencia y a partir de ello diseñar el controlador para un correcto seguimiento de esta, contando con rechazo a perturbaciones o a la incertidumbre del modelo.
- Cuando se diseña un controlador IMC se espera un desempeño robusto, el cual pueda entregar una ejecución estable al trabajar con altas frecuencias, ruidos de la medida o

acciones de control bruscas, todas estas atribuciones se logran juntando el controlador con un filtro tal que:

$$G_c(s) = G_f(s)(G_m(s)^-)^{-1} = \left[\frac{1}{\mathcal{T}_f s + 1} \right]^n (G_m(s)^-)^{-1} \quad (3)$$

Esta ecuación, da uso al exponente n el cual es seleccionado lo suficientemente grande como el producto $G_f(s)(G_m(s)^-)^{-1}$, \mathcal{T}_f es un parámetro de sintonización del filtro que se ajusta de tal manera de conseguir el desempeño requerido, de esta manera el filtro tiene un parámetro de ajuste para mayor robustez y estabilidad. (Camacho, Rosales y Rivas, 2020)

Sintonización de Controladores a partir del Método de Curva de Reacción

Existen dos procedimientos dentro del método de curva de reacción, los del proceso a lazo abierto, en el cual, el controlador puede o no estar instalado y si lo está operará en modo manual durante la prueba, y, los métodos del tipo de lazo cerrado, en donde el controlador se encuentra operando en automático. (Alfaro, 2001)

En este trabajo se realizó el procedimiento a lazo abierto, método que se describe en Camacho, Rosales & Rivas, Control de Procesos, 2020, p.106. De esta forma, se creó una prueba al sistema que consiste en la prueba de escalón, considerando una curva de reacción como respuesta. Los parámetros obtenidos son K , τ , t_0 , por medio de un sistema de primer orden mas un valor de tiempo muerto, First Order Plus Dead Time (FOPDT), por sus siglas en ingles.

A continuación, se explican los pasos a seguir para lograr un correcto uso de este método:

1. Se debe ajustar el controlador en modo manual, y esperar a que se estabilice el proceso.
2. Generar la prueba de escalón en la señal de salida del controlador en un valor entre 10% y 15%.

3. Tomar los datos de la curva de respuesta del proceso.

La función de transferencia de primer orden que expresa el proceso es:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (4)$$

Para la obtención de los valores de τ y t_0 , se utilizó el método de los dos puntos, el cual, Camacho, Rosales, y Rivas (2020), lo definen en obtener dos puntos de los datos extraídos de la curva de reacción del proceso. El primer punto está determinado en el tiempo que demora el proceso en alcanzar el 28.3% del cambio total en la salida, lo que se conoce como t_1 , y, el tiempo que demora el proceso en alcanzar el 63.2% del cambio total en la salida, lo que se denomina t_2 . (K) es la ganancia del proceso, (τ) es la constante de tiempo, y (t_0) es el tiempo muerto. Estos valores se determinan por las ecuaciones siguientes:

$$K = \frac{\Delta S}{\Delta E} \quad (5)$$

$$\tau = 1,5 (t_2 - t_1) \quad (6)$$

$$t_0 = t_2 - \tau \quad (7)$$

SIEMENS SIMATIC S7-300

El controlador lógico programable S7-300 de la empresa SIEMENS cuenta con un diseño modular. Los módulos con los que se configura pueden ser centrales en las proximidades del CPU o distribuidos sin que sea necesario realizar ajustes ni parametrizaciones especiales, en los sistemas SIMATIC S7, la periferia descentralizada es una parte integral del sistema. (Berger, 2012)

MPS-PA FESTO Compact Workstation

La estación de trabajo FESTO, es un sistema de aprendizaje técnico que simula un ambiente industrial a pequeña escala para realizar trabajos de automatización y control de procesos por medio de las variables físicas de nivel, flujo, presión y temperatura. (Soria, 2020)

Dotada con sensores para la correcta medición de todas las variables antes especificadas, y, con tecnología en motores tipo bomba, válvulas automáticas y de presión, la estación FESTO es la herramienta precisa para el proyecto de comparación de teorías de control en el que se ambienta una línea industrial en la que los diferentes tipos de controladores son aplicados a los diferentes objetos finales de control según su variable de manejo.



Figura 3: Estación FESTO MPS-PA

A continuación, se muestran los diagramas P&ID que describen el funcionamiento de las variables de forma independiente.

Variable de Proceso de Nivel

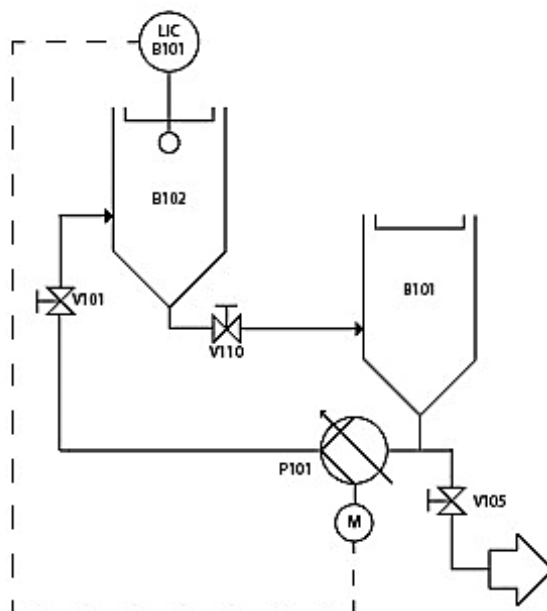


Figura 4: Diagrama P&ID del sistema de control de nivel a circuito cerrado

La bomba P101 entrega un fluido desde un tanque de almacenamiento B101 a un tanque de reserva B102 a través de un sistema de tuberías. El nivel del fluido dentro del tanque B102 se controla con un sensor ultrasónico analógico B101 en el punto de medición 'LIC B101' y se lee como valor real. El transformador cambia la señal de corriente analógica en una señal de voltaje estándar de 0 a 10 voltios.

Variable de Proceso de Flujo

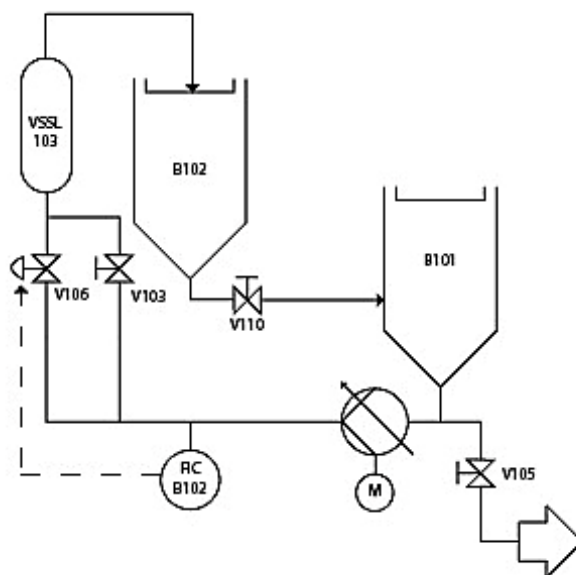


Figura 5: Diagrama P&ID del sistema de control de flujo a circuito cerrado

Una señal de onda cuadrada constante del sensor de caudal está conectada a una entrada binaria en el terminal de E/S XMA1 (I0). El nivel de la señal depende de la tensión de alimentación aplicada entre 8 y 24 V. La señal de pulso es procesada con un PLC con entradas de contador integradas y la señal de frecuencia también está conectada al transformador de medida A2. El transformador cambia la señal de frecuencia a una señal de voltaje estándar de 0 a 10 voltios.

Variable de Proceso de Temperatura

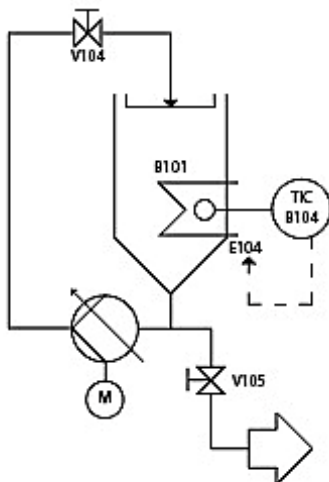


Figura 6: Diagrama P&ID del sistema de control de temperatura a circuito cerrado

El período de encendido/apagado del elemento calefactor E104, que es la variable manipulada, determina la salida de calor del intercambiador de calor. Para controlar el sistema se puede utilizar un elemento de dos puntos. La resistencia del sensor de temperatura está conectada al transformador de medición A3. El transformador cambia la resistencia a una señal de voltaje estándar de 0 a 10 V. El calentamiento se controla mediante un relé interno. Con una salida digital (O1 en XMA1).

DESARROLLO DEL TEMA

El proyecto se basó en el trabajo sobre un modelo de planta a escala de un ambiente industrial, la estación de trabajo de FESTO, utilizando tres de sus cuatro variables, las de nivel, flujo y temperatura, pero, no se implementará como un sistema multivariable, sino, como un sistema de una entrada y una salida (SISO), tomando en cuenta la descripción de funcionamiento estipulada en la sección final de la introducción.

A continuación, se presenta el diagrama P&ID de la estación de trabajo MPS-PA de FESTO; a partir de este modelo, se procedió al diseño de seis controladores divididos en dos para cada una de las variables de proceso, siendo estos uno de teoría clásica (PID o adyacentes) y el otro de teoría avanzada (Modelo Interno IMC).

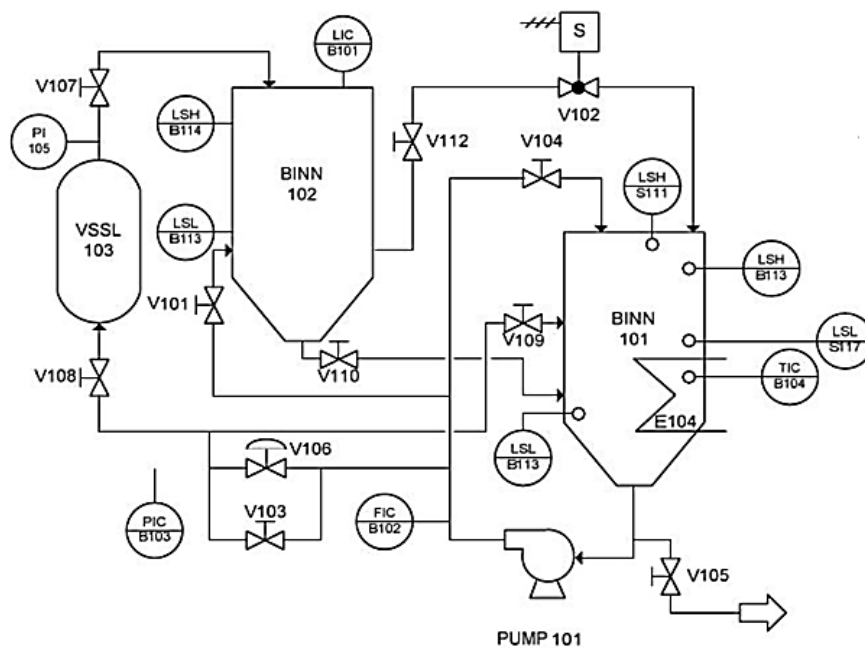


Figura 7: Diagrama P&ID de la estación de trabajo FESTO

Sintonización de Controladores por Método de Curva de Reacción

Variable de Proceso de Nivel

Utilizando el Programa FluidLab V.5 se obtuvo la curva de reacción para la variable de nivel, de aquí, siguiendo los pasos estipulados en la sección de sintonización se procede a calcular los tiempos y el valor de ganancia.

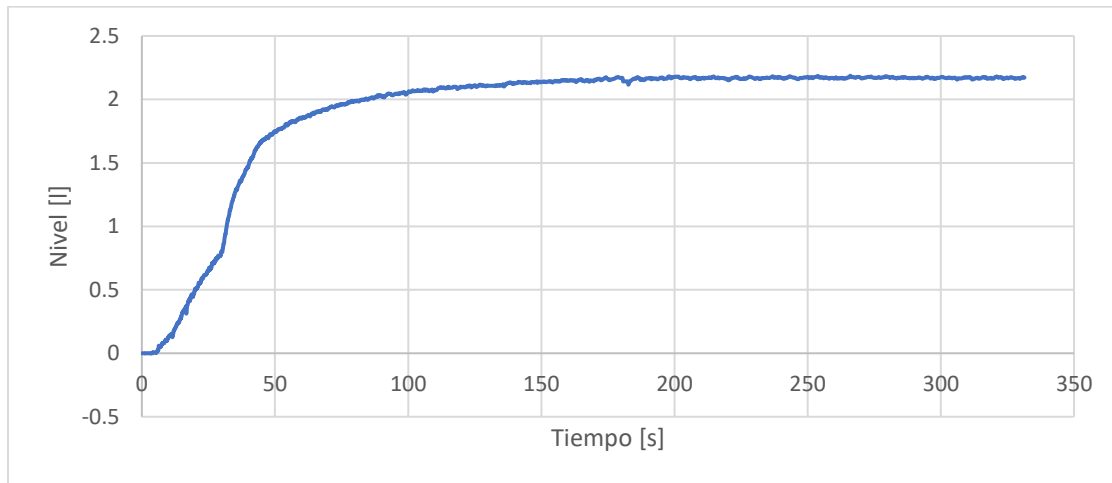


Figura 8: Curva de Reacción de Nivel – FESTO MPS-PA

Cálculo del modelo FOPDT utilizando las ecuaciones [5], [6] y [7].

$$K = 0.216$$

$$\tau = 20.194 \text{ [s]}$$

$$t_0 = 13.279 \text{ [s]}$$

Utilizando la ecuación [4], podemos expresar el modelo FOPDT como:

$$G(s) = \frac{0.216 e^{-13.279}}{20.194 s + 1}$$

Comprobación del funcionamiento del modelo FOPDT vs el proceso real. Se puede apreciar en la gráfica siguiente que el modelo pasa por los dos puntos (28.3%) y (63.2%) para luego seguir al proceso en su estabilización.

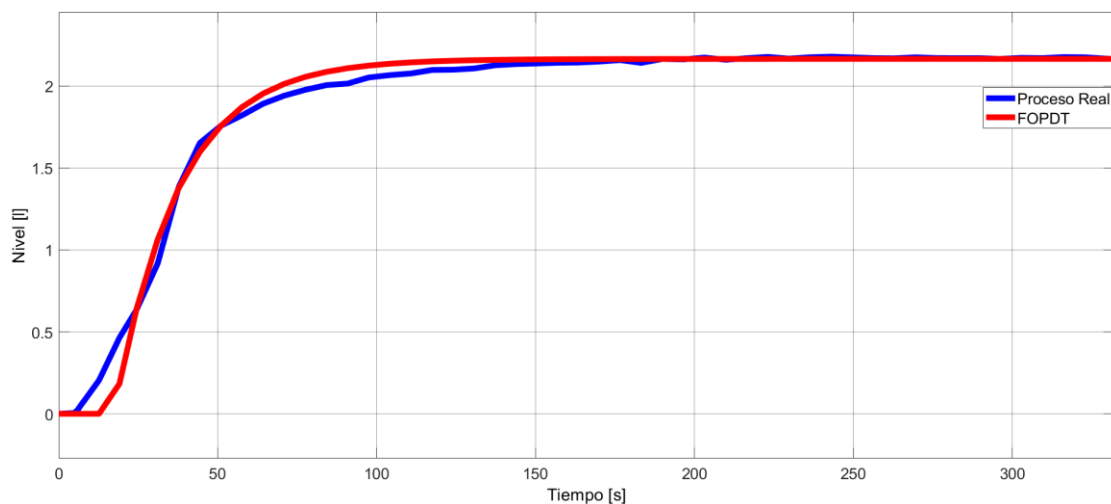


Figura 9: Validación de respuesta del proceso y modelo FOPDT

Variable de Proceso de Flujo

De la misma forma que para la variable de nivel, por medio del programa FluidLab V.5 se obtuvo la curva de reacción de la variable de flujo, la cual se presenta en la figura 10 con sus datos graficados en Excel. De aquí, siguiendo los pasos estipulados en la sección de sintonización se procede a calcular los tiempos y el valor de ganancia.



Figura 10: Curva de Reacción de Flujo – FESTO MPS-PA

Cálculo del modelo FOPDT utilizando las ecuaciones [5], [6] y [7].

$$K = 0.293$$

$$\tau = 1.6 [s]$$

$$t_0 = 0.39 [s]$$

Utilizando la ecuación [4], se puede expresar el modelo FOPDT como:

$$G(s) = \frac{0.293 e^{-0.39}}{1.6 s + 1}$$

Comprobación del funcionamiento del modelo FOPDT en su seguimiento al proceso real. Se tomaron las tablas de valores extraídas del software FluidLab V5.0, y se generó una variable para graficar en Simulink y comparar ambos procesos, en la figura 11 se presentan los resultados exitosos del modelo.

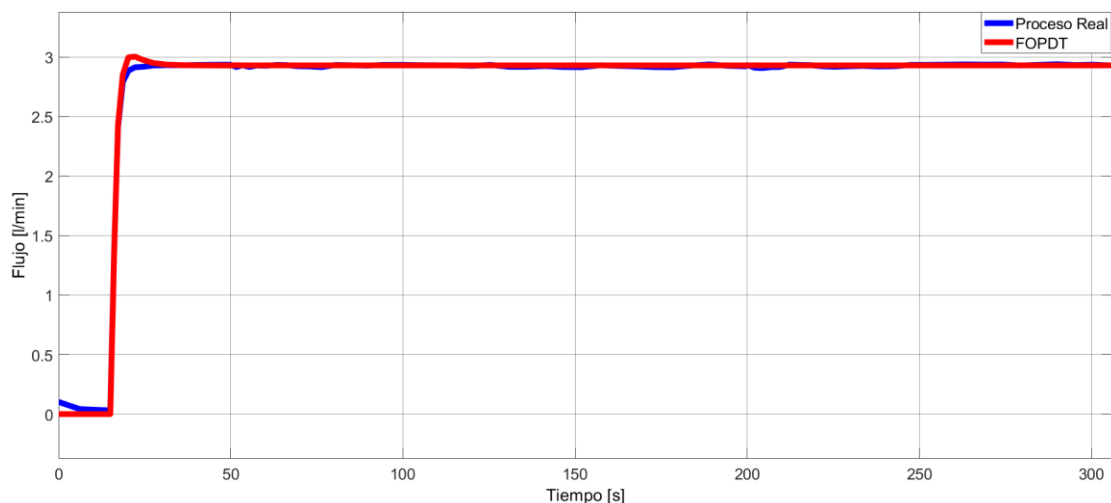


Figura 11: Validación de respuesta del proceso y modelo FOPDT

Variable de Proceso de Temperatura

Finalmente, para la variable de temperatura, por medio del software FluidLab V.5 se obtuvo la curva de reacción de esta, en donde es preciso aclarar que el calentador E104 de la estación FESTO trabaja con un software ON/OFF de seguridad que genera una saturación en una temperatura máxima programada y luego el encendido automático del calentador una vez más hasta conseguir una nueva saturación, a esto se deben los picos finales en la curva del proceso presentada en la figura 12. Finalmente, se procede a calcular los tiempos y el valor de ganancia.

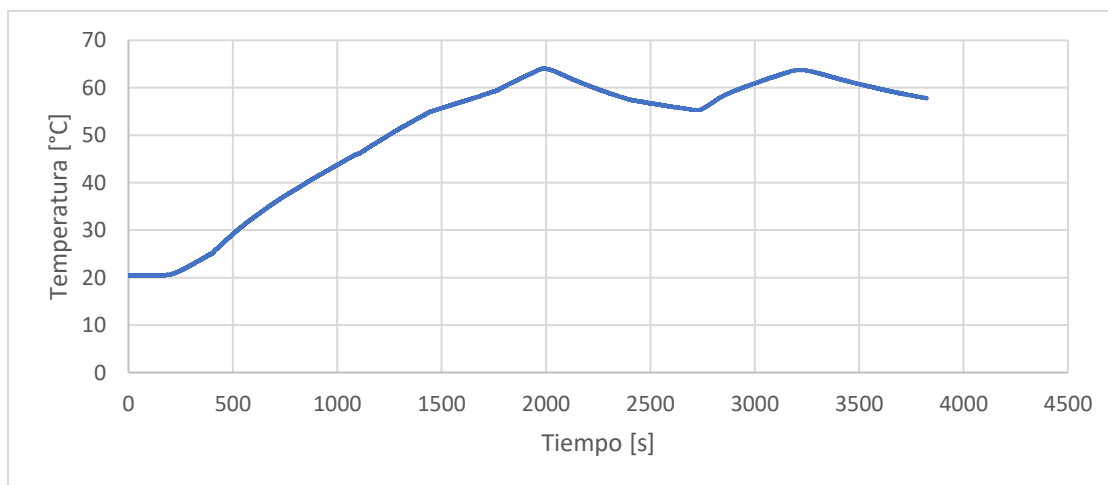


Figura 12: Curva de Reacción de Temperatura – FESTO MPS-PA

Cálculo del modelo FOPDT utilizando las ecuaciones [5], [6] y [7].

$$K = 3.983$$

$$\tau = 755.862 [s]$$

$$t_0 = 316.539 [s]$$

Utilizando la ecuación [4], podemos expresar el modelo FOPDT como:

$$G(s) = \frac{3.983 e^{-316.539}}{755.862 s + 1}$$

Comprobación del funcionamiento del modelo FOPDT. Podemos ver que el modelo cumple con el método de los dos puntos al seguir a la curva del proceso real en su parte inicial y en el valor de 28.3% y 63.2%. Tomando en cuenta lo antes explicado acerca de la saturación del dispositivo por seguridad, el proceso no mantiene una curva constante por lo que se tomaron los cuatro valores de los picos y valles de la gráfica para promediarlos y a partir de ahí conseguir los valores de tiempos y ganancia.

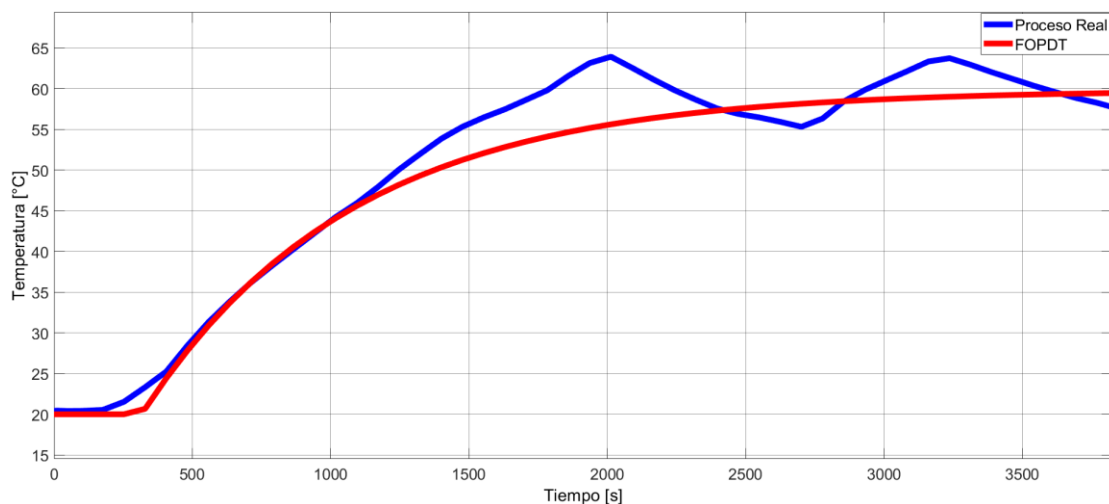


Figura 13: Validación de respuesta del proceso y modelo FOPDT

Sintonización de Controladores PID Utilizando Técnicas Clásicas

En esta sección, se calcularán y sintonizarán los controladores PID o sus variantes PI para cada una de las variables de proceso, una vez obtenidos los valores de ganancia (K) y tiempos t_1 y t_2 del método de curva de reacción se puede dar paso al cálculo con mayor facilidad, es importante especificar que se utilizarán las ecuaciones de la tabla número 1 de sintonización por método de Dahlin presentada en la sección de introducción para la sintonización.

Variable de Proceso de Nivel

Cálculo de variables PI, utilizando las ecuaciones de la tabla número 1 de sintonización por método de Dahlin, y presentación del modelo de controlador a implementar:

$$Kp = 3.511$$

$$\tau_i = 0.0495$$

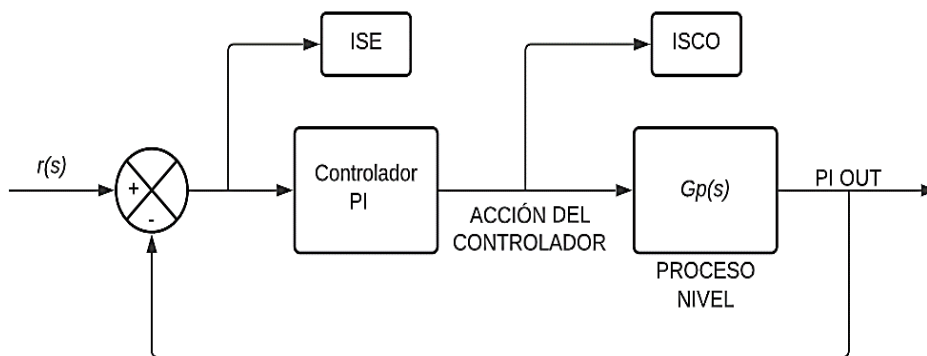


Figura 14: Diagrama de Bloques Controlador PI – Nivel

Variable de Proceso de Flujo

Se utiliza el modelo PI dado que el flujo es una variable caracterizada por niveles importantes de ruido en su señal, al utilizar un término derivativo de incrementa estos niveles de ruido y su

amplitud harían que se reduzca la vida útil del objeto final de control. Utilizando las ecuaciones de la tabla 1 de sintonización por método de Dahlin obtenemos los valores de ganancia y tiempos

$$Kp = 1$$

$$\tau_i = 0.556$$

Distribución en bloques del modelo de controlador PI para la variable de flujo:

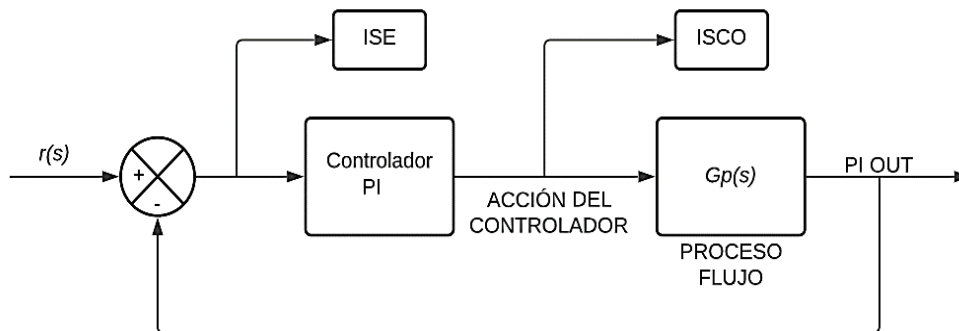


Figura 15: Diagrama de Bloques Controlador PI – Flujo

Variable de Proceso de Temperatura

La temperatura es una variable de acción lenta, para que el calentador logre llegar a la referencia deseada, toma una acción en varios minutos a diferencia de las dos variables anteriores que se estabilizan en segundos, con el uso de las ecuaciones de la tabla 1 se obtienen los siguientes valores de ganancia y tiempos y se presenta el modelo del controlador PI en diagrama de bloques:

$$Kp = 0.3$$

$$\tau_i = 0.00132$$

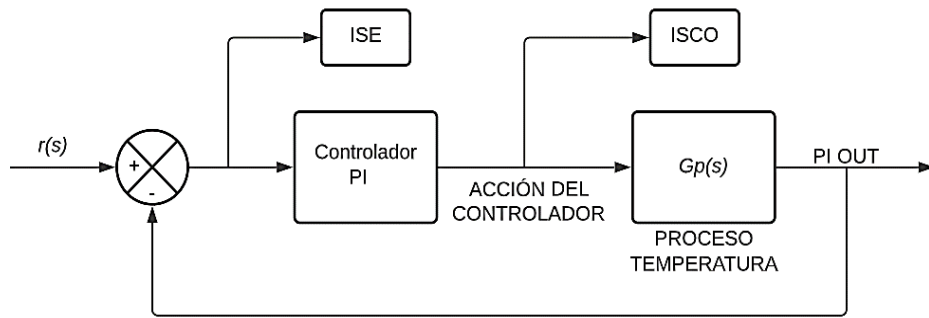


Figura 16: Diagrama de Bloques Controlador PI – Temperatura

Sintonización de Controladores por Método Avanzado IMC

Como se explicó en la sección de controladores por modelo interno, lo que se busca en esta técnica es obtener el modelo simplificado del proceso para el cálculo del controlador. A continuación, se presentan los cálculos de las componentes invertibles y no invertibles para cada una de las variables de proceso, finalmente, se presentarán los modelos en bloques en el software Simulink de las funciones de transferencia del proceso, el controlador y del modelo del proceso que conforman los controladores IMC.

Variable de Proceso de Nivel

Utilizando la ecuación [3] se calculó la componente invertible y no invertible, y el valor del filtro para el controlador por modelo interno:

$$G_c(s) = \frac{20.194 s + 1}{0.216 \mathcal{T}_f s + 0.216}$$

$$\mathcal{T}_f = 8$$

A continuación, se presenta el diagrama de bloques del controlador IMC para su simulación y análisis de desempeño:

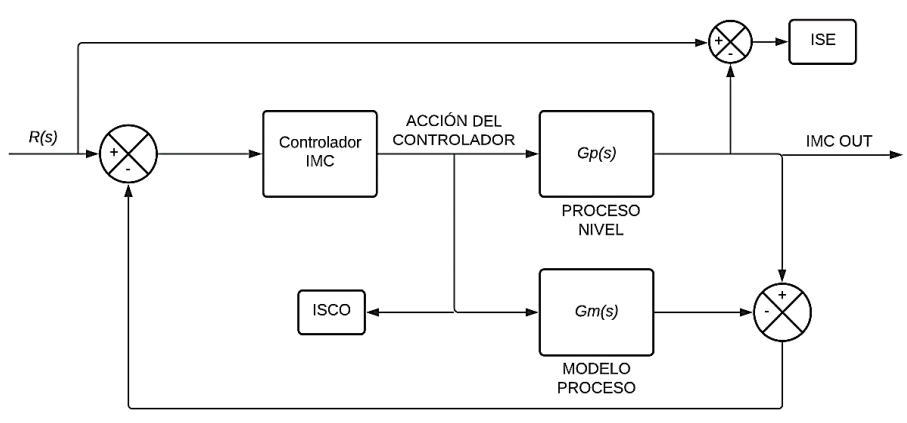


Figura 17: Diagrama de Bloques Controlador IMC – Nivel

Variable de Proceso de Flujo

Cálculo de la componente invertible y no invertible y el valor del filtro para el controlador por modelo interno en la variable de flujo, así también, se presenta el modelo en bloques del controlador por modelo interno, el proceso y el modelo del proceso para lograr un análisis gráfico y numérico de su desempeño:

$$G_c(s) = \frac{1.6 s + 1}{0.293 T_f s + 0.293} ; T_f = 7$$

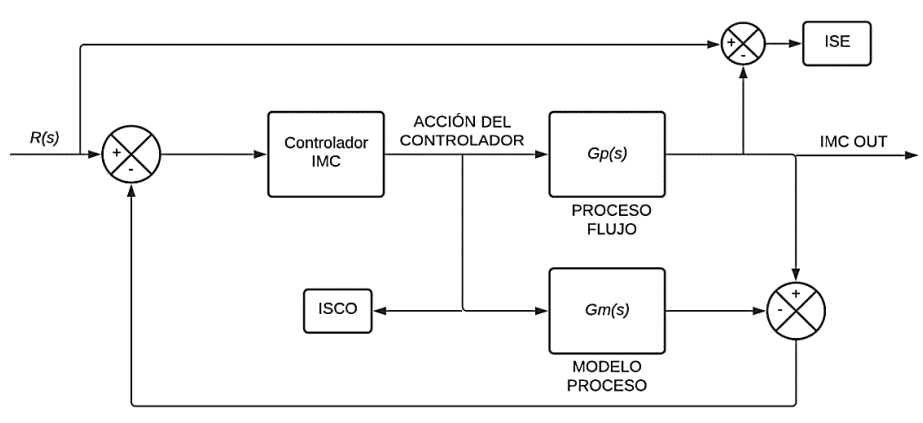


Figura 18: Diagrama de Bloques Controlador IMC – Flujo

Variable de Proceso de Temperatura

La variable de temperatura presenta valores de tiempo más altos, por lo que, la acción del objeto final de control es lenta, de igual forma, se logró calcular un controlador de tipo modelo interno y se presenta con su diagrama de bloques que resumen su funcionamiento.

$$G_c(s) = \frac{755.862 s + 1}{3.983 T_f s + 3.983}$$

$$T_f = 260$$

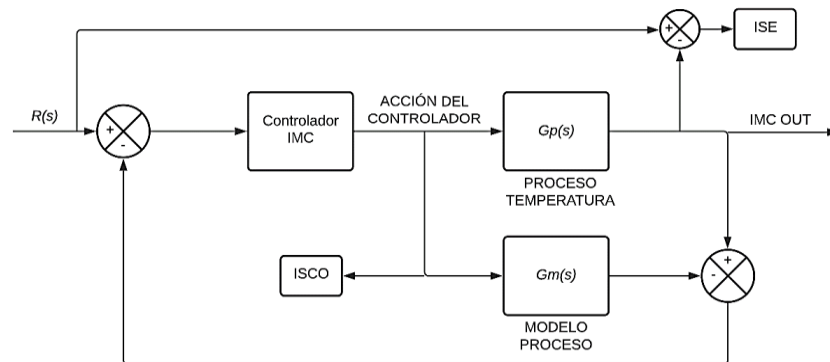


Figura 19: Diagrama de Bloques Controlador IMC – Temperatura

Resultados de Simulación

Como parte del análisis del funcionamiento de cada uno de los controladores, se instauró una comparación gráfica en los diagramas de bloques en el software de Matlab Simulink. De aquí, se rescataron tres gráficas divididas entre las tres variables de proceso que el proyecto analiza, en la que cada una presenta la comparativa de los dos controladores de teoría clásica y técnica avanzada y su respuesta a una entrada paso.

De la misma forma, se presentan tres gráficas en la misma división por variables que presentan la comparativa de curvas de acción de los controladores PID e IMC.

Finalmente, se genera una tabla comparativa de los dos tipos de valores de desempeño y del tiempo de asentamiento para cada una de las curvas de los controladores, las cuales, ayudarán al análisis de resultados y a la comparación de mejor rendimiento entre teorías de control automático.

Variable de Proceso de Nivel

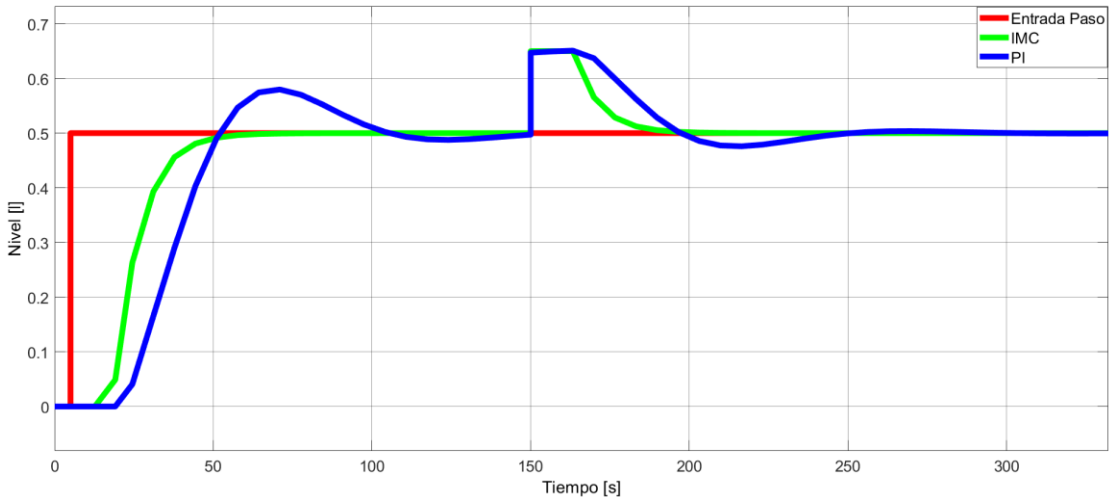


Figura 20: Comparación de Controladores PI vs IMC – Nivel

Acción de los controladores:

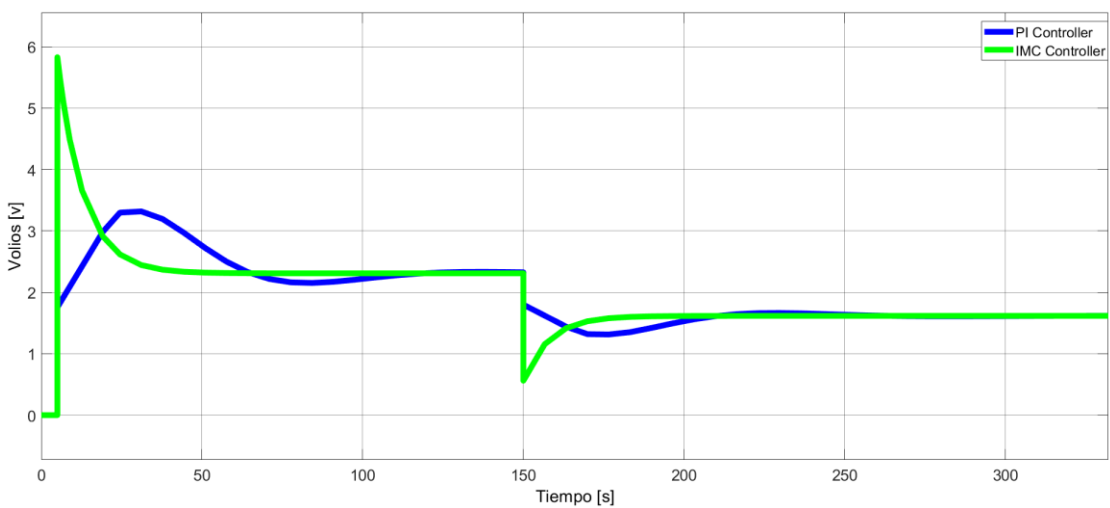


Figura 21: Acción de Controladores PI vs IMC – Nivel

Tabla 2: Valores de desempeño y tiempo de asentamiento - Nivel

Variable de NIVEL	PI	IMC
ISE	7.323	4.74
ISCO	1370	1405
Tiempo de Asentamiento	195 [s]	75 [s]

La integral del cuadrado del error (ISE) por sus siglas en inglés, es un valor de desempeño que se usa con el objetivo de disminuir el error inicial, las ganancias obtenidas para el controlador usando el criterio ISE son altas y las salidas o respuestas pueden ser oscilatorias, con un amortiguamiento elevado. (Camacho, Rosales y Rivas, 2020), por otro lado, el esfuerzo de control se mide con la métrica ISCO. Este parámetro integra el cuadrado de la salida del controlador en el tiempo, penalizando más las acciones de control grandes que las pequeñas, ya que, el cuadrado de un error grande será más significativo. (Morales y Col., 2021). Finalmente, el tiempo de asentamiento se refiere al tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final. (Ogata, 2003)

En lo que respecta al análisis, podemos ver la figura 20 que presenta la gráfica de respuestas de los controladores PI e IMC para la variable de nivel en respuesta a una entrada paso, podemos ver con facilidad que el controlador IMC mantiene menores oscilaciones y al momento de introducir una perturbación este consigue un tiempo de estabilización mucho menor llegando a ser aproximadamente la mitad del tiempo de estabilización del controlador PI, asimismo, como se puede comprobar en la tabla número 2 el tiempo de asentamiento también es menor para el controlador IMC, como resultado de este análisis, podemos comprobar en la figura 21 que la acción del controlador IMC es mucho más brusca, creando sobre picos para lograr los bajos tiempos de estabilización, mientras que el controlador PI mantiene una curva casi lineal en su acción de control.

En lo que respecta a la comparación de valores de desempeño, vemos que, en el valor de desempeño ISE, el controlador PI al tener oscilaciones altas y un amortiguamiento elevado, entrega un valor más alto, por lo que, el controlador IMC sería más óptimo. Por otro lado, los valores ISCO son más altos para el controlador IMC, lo que se traduce en que obtendremos una acción más brusca a la salida del control, pero por sobre esto, sigue siendo óptimo el segundo controlador de técnica avanzada.

Variable de Proceso de Flujo

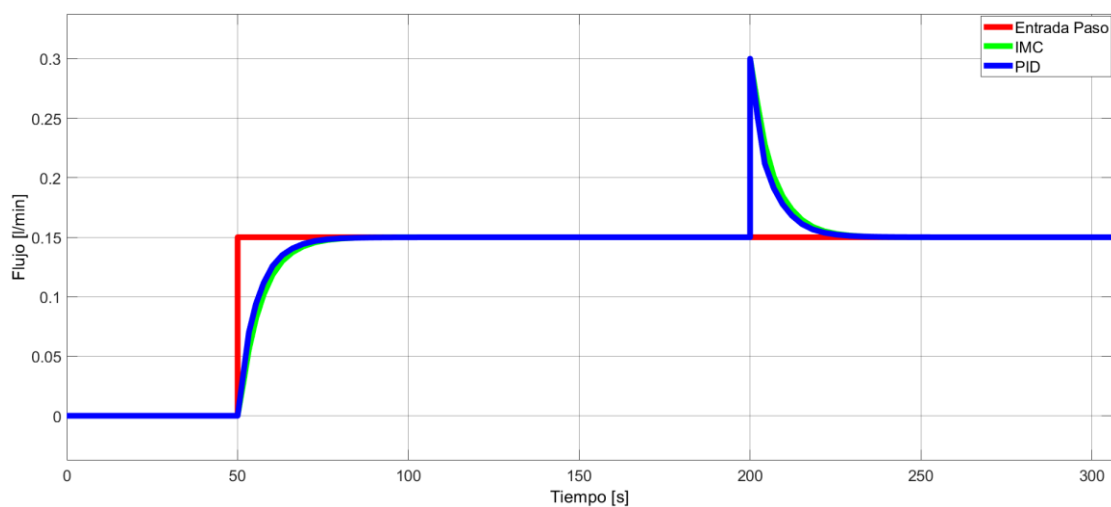


Figura 22: Comparación de Controladores PI vs IMC – Flujo

Acción de los controladores:

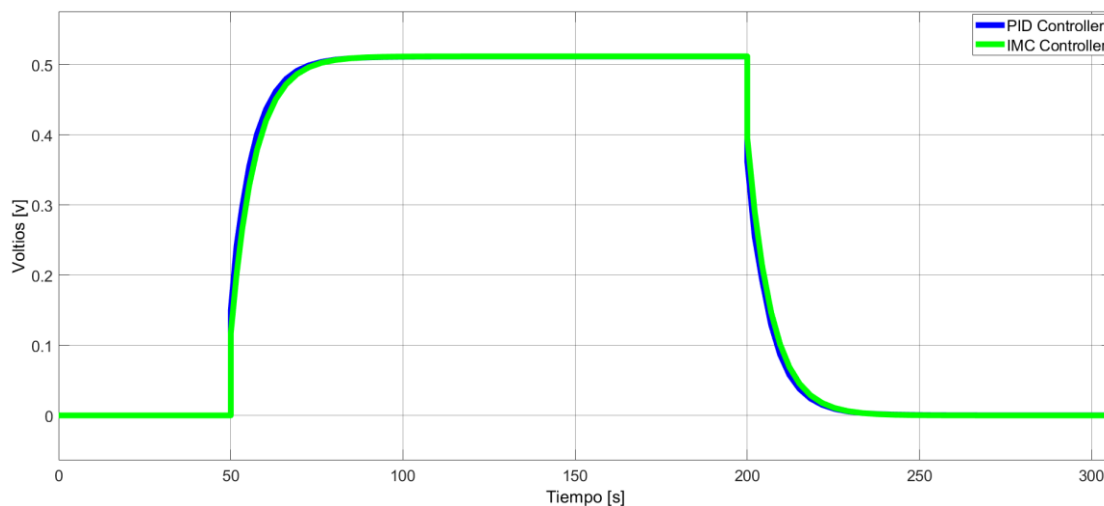


Figura 23: Acción de Controladores PI vs IMC – Flujo

Tabla 3: Valores de desempeño y tiempo de asentamiento - Flujo

Variable de Flujo	PI	IMC
ISE	0.14	0.17
ISCO	37.74	37.57
Tiempo de Asentamiento	45 [s]	45 [s]

Analizando la figura 22 de las curvas de respuesta de los controladores PI e IMC para la variable de flujo podemos ver que, a diferencia de la variable anterior, ambos controladores son rápidos sin generar oscilaciones fuertes y con tiempos de asentamiento cortos e iguales en valor. En lo que se refiere a los valores de desempeño, ambos controladores entregan respuestas similares lo que puede deberse a la velocidad de acción que genera esta variable de proceso, y su corto tiempo de asentamiento, por esto, podemos decir que ambos son óptimos y se espera al análisis de aplicación física para definir el de mejor desempeño.

Variable de Proceso de Temperatura

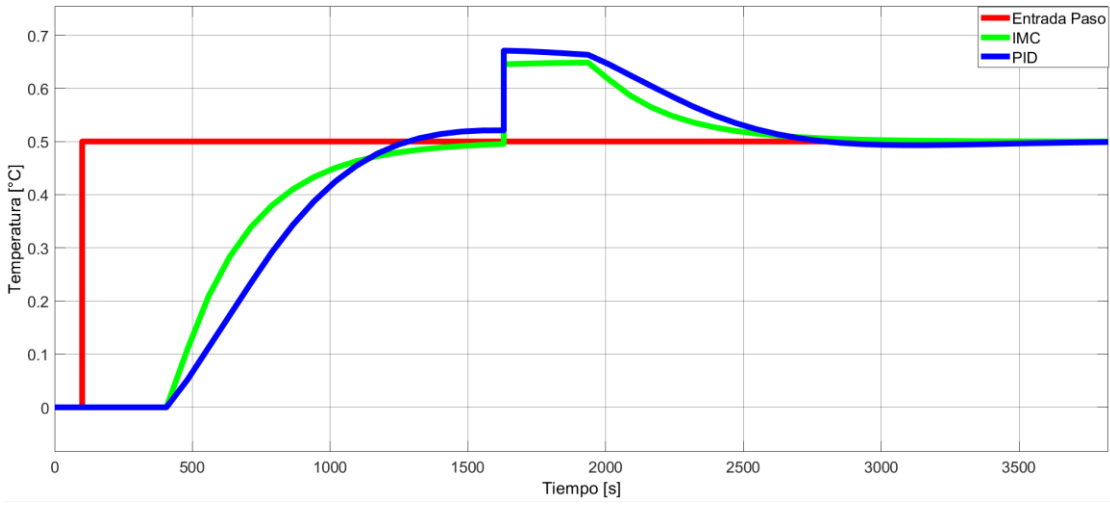


Figura 24: Comparación de Controladores PID vs IMC – Temperatura

Acción de los controladores:

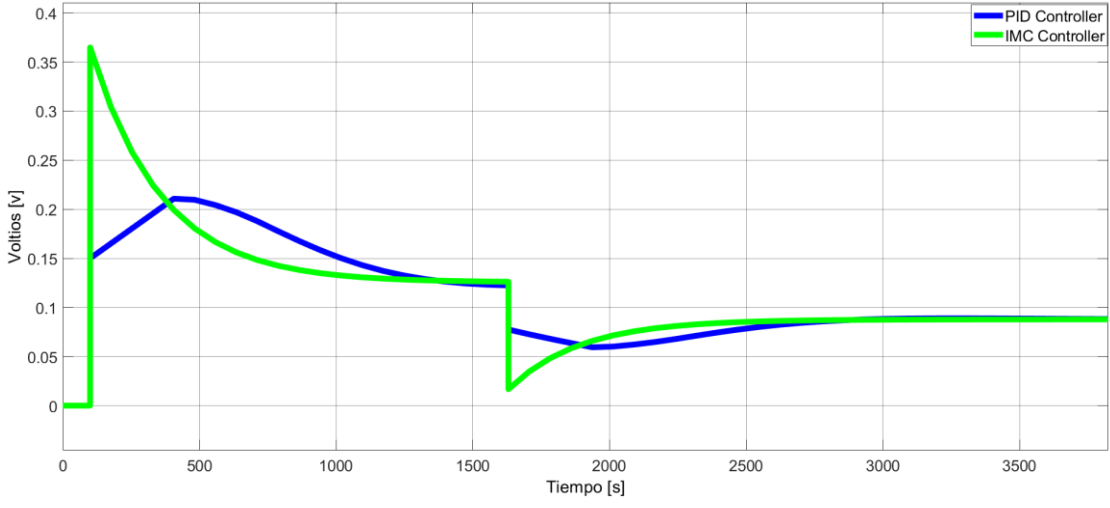


Figura 25: Acción de Controladores PID vs IMC – Temperatura

Tabla 4: Valores de desempeño y tiempo de asentamiento - Temperatura

Variable de Temperatura	PI	IMC
ISE	147.7	121.9
ISCO	56.06	61.47

Tiempo de Asentamiento	2100 [s]	1700 [s]
------------------------	----------	----------

Para la variable de proceso de temperatura vemos un accionar de los controladores parecido en sus curvas, sin sobre picos, pero se puede destacar la lentitud del proceso y sumado a esto, el PI se muestra con un valor de tiempo de asentamiento mayor que el controlador IMC, esto se comprueba con los datos de la tabla número 4.

En lo que respecta a los valores de desempeño, se comprueba que el controlador por método de modelo interno es óptimo teniendo un valor de ISE menor al PI, sin embargo, esta rápida acción de controlador resulta en un índice ISCO mayor y con una acción de control más brusca para conseguir resultados de estabilización más rápidos, lo que se puede comprobar en la figura 25, igualmente, al obtener estos resultados en la parte teórica, se espera que al momento de la implementación física el controlador IMC funcione de mejor manera para esta variable.

Resultados de la Implementación Física

Se utilizaron dos estrategias para la implementación física de los controladores a la estación de trabajo FESTO y la recuperación de sus curvas de proceso de forma gráfica. Para la primera corriente de controladores clásicos PI, se utilizó el software FluidLab para introducir los controladores y recuperar los datos, los cuales se llevaron a Excel para ser graficados. Por otro lado, los controladores de tipo IMC fueron generados en Simulink, en el software Step7 se generó un programa de transferencia de datos que fue cargado al PLC SIEMENS ST-300, la comunicación entre el Simulink y el PLC en tiempo real se dio por medio de un servidor OPC.

Implementación Física Variable de Nivel

Se presentan los resultados obtenidos de la implementación física del controlador PI para la variable de nivel:

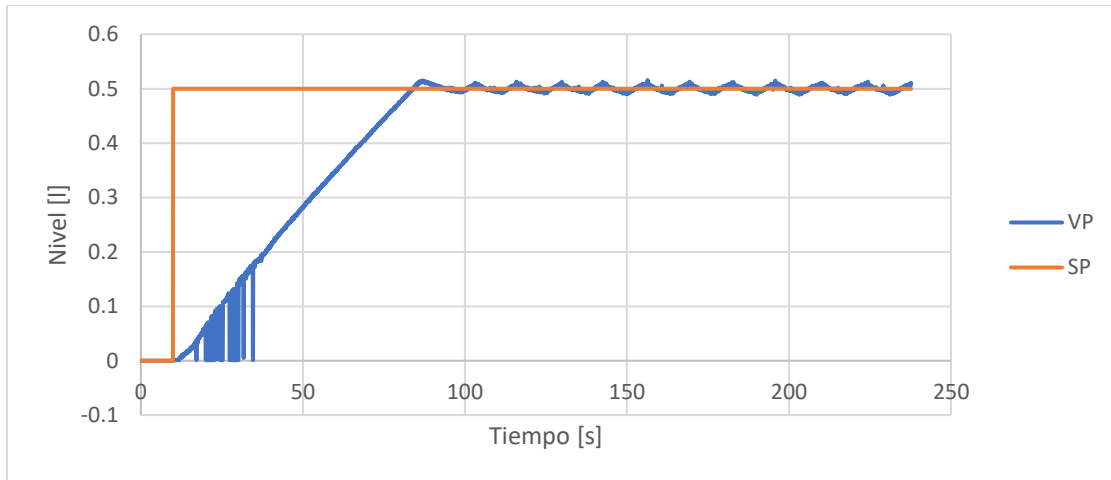


Figura 26: Variable de Proceso y Set Point – Controlador PI variable de Nivel



Figura 27: Acción de la bomba P101 para el controlador PI

Se presentan los resultados de la implementación física del controlador IMC para la variable de nivel:

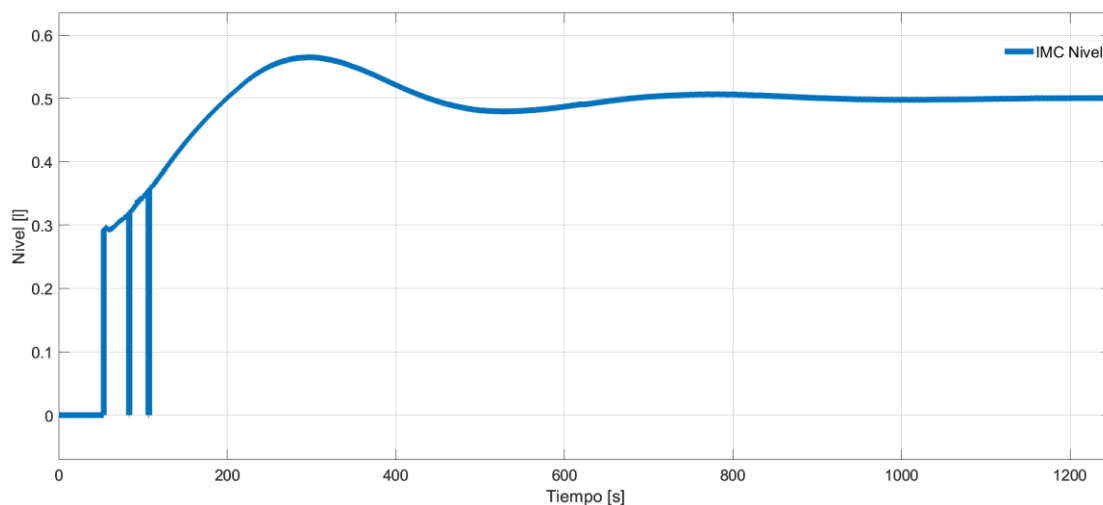


Figura 28: Variable de Proceso y Set Point – Controlador IMC variable de Nivel

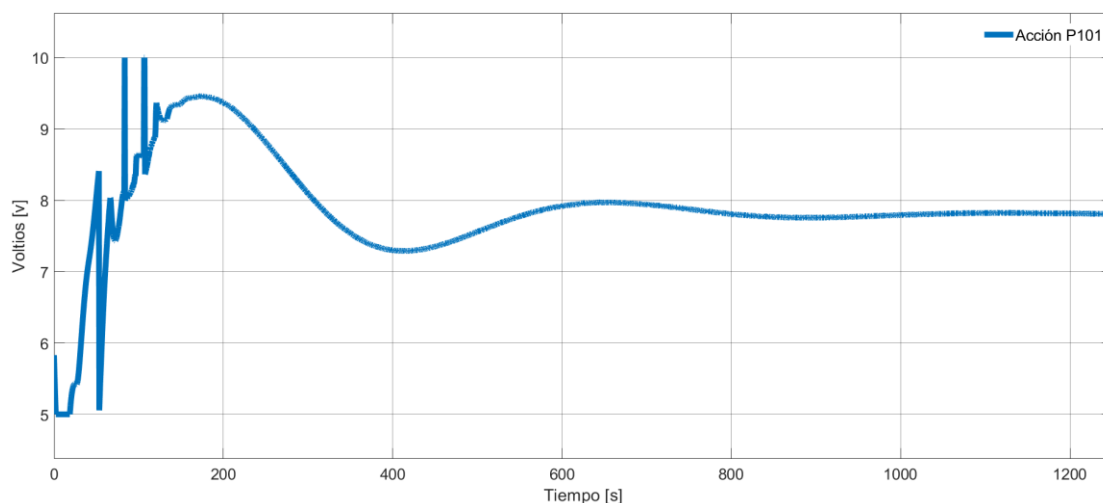


Figura 29: Acción de la bomba P101 para el controlador IMC

Una vez obtenidos los resultados implementados podemos ver la figura 26 y 28 que presentan las curvas de los controladores PI e IMC, de aquí se puede destacar la rapidez de acción del controlador PI en comparación con la del IMC, podemos ver que el tiempo de asentamiento para el controlador PI se da alrededor de los 100 segundos mientras que el IMC alcanza la estabilización alrededor de los 800 segundos. En lo que se refiere a la acción de control vemos que el IMC trabaja más lento, pero esfuerza menos al objeto final de control ya que no crea sobre picos ni oscilaciones altas. Finalmente, podemos decir que la comparación puede llegar a ser un poco injusta, ya que,

los métodos de aplicación de los controladores a la máquina no fueron los mismos, por lo que, el IMC puede tardar más por la comunicación entre el PLC, la estación, y el software Simulink.

Implementación Física Variable de Flujo

Se presentan los resultados obtenidos de la implementación física del controlador PI para la variable de flujo:

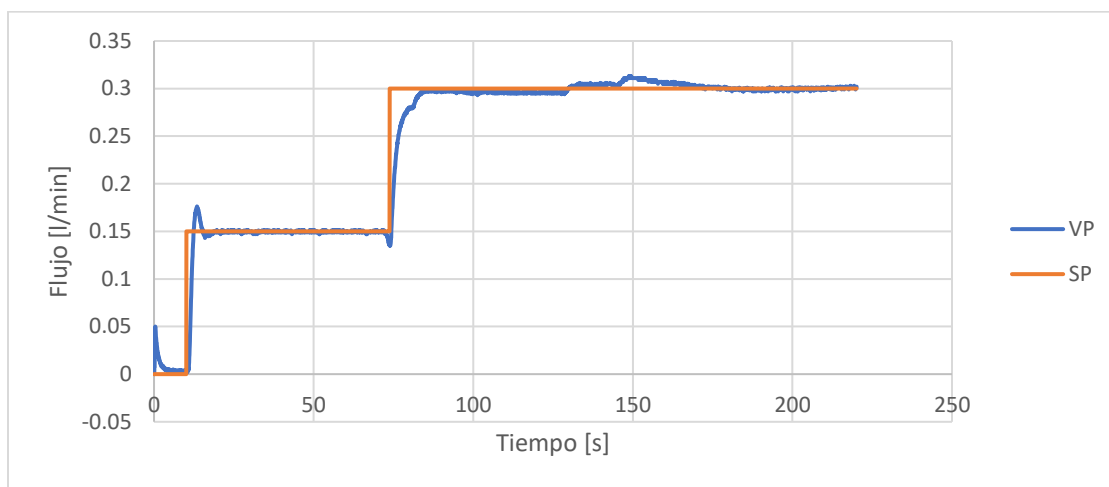


Figura 30: Variable de Proceso y Set Point – Controlador PI variable de Flujo



Figura 31: Acción de la válvula V106 para el controlador PI

Se presentan los resultados de la implementación física del controlador IMC para la variable de flujo:

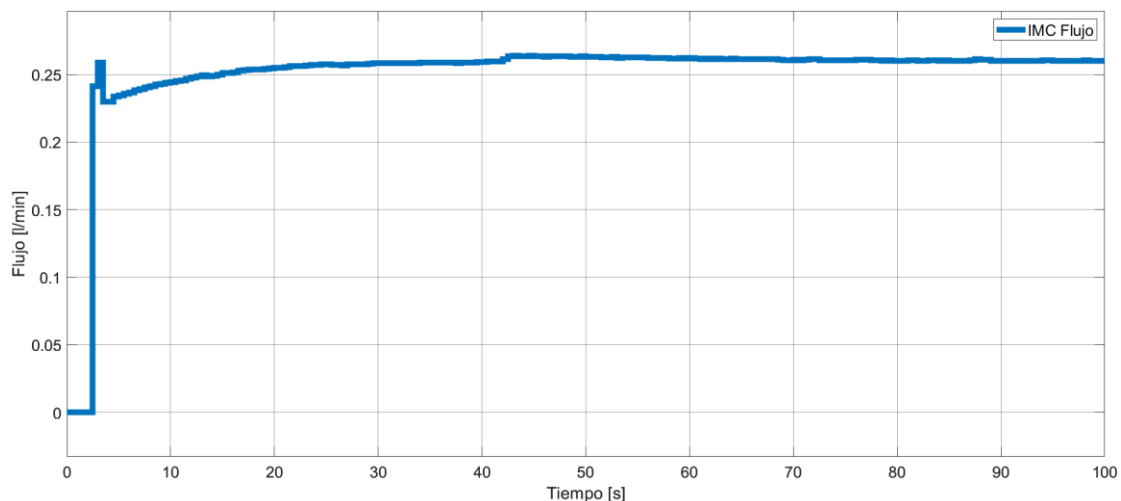


Figura 32: Variable de Proceso y Set Point – Controlador IMC variable de Flujo

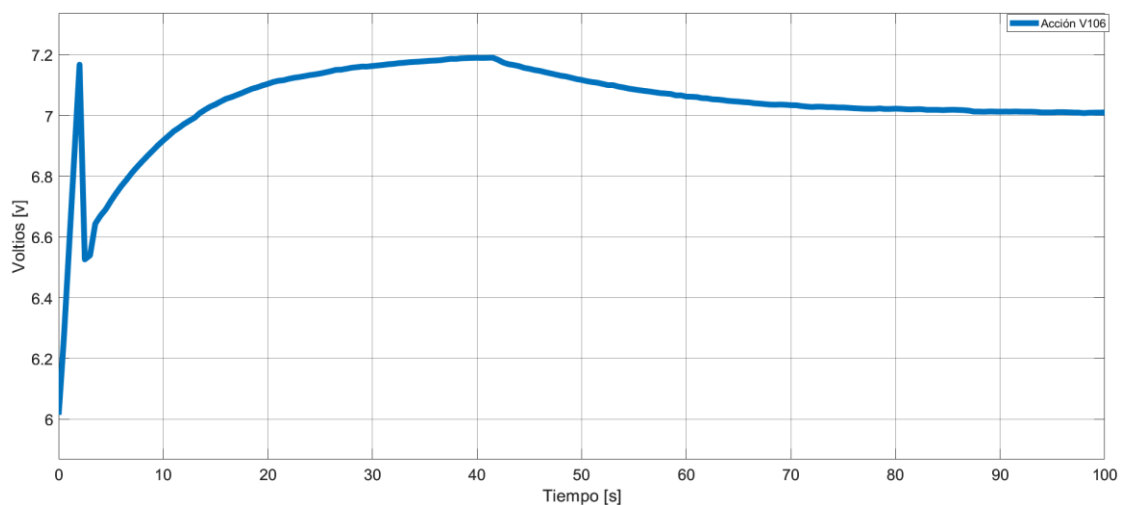


Figura 33: Acción de la válvula V106 para el controlador IMC

En la variable de flujo al igual que en la variable de nivel vemos una acción mucho más lenta para el controlador IMC que para el controlador PI, lo que puede deberse una vez más al método de aplicación. Sin embargo, se puede atribuir al PI como mejor controlador por el hecho de lograr estabilizar en menos de 10 segundos y también lograr llegar a un segundo set point del doble de valor al primer en un valor igual de 10 segundos de acción, mientras que el IMC logro únicamente un set point de valor bajo, y su tiempo de asentamiento es de aproximadamente 45 segundos, finalmente, en lo que se refiere a las acciones de control, el PI genera una acción de

control con una respuesta rápida siguiendo al proceso y facilitando la estabilización, mientras que para el IMC la acción del controlador es lenta y en el inicio de la prueba pierde lectura del sensor de nivel por lo que apaga y prende la válvula demorando aún más el tiempo de asentamiento.

Implementación Física Variable de Temperatura

Se presentan los resultados obtenidos de la implementación física del controlador PI para la variable de temperatura:

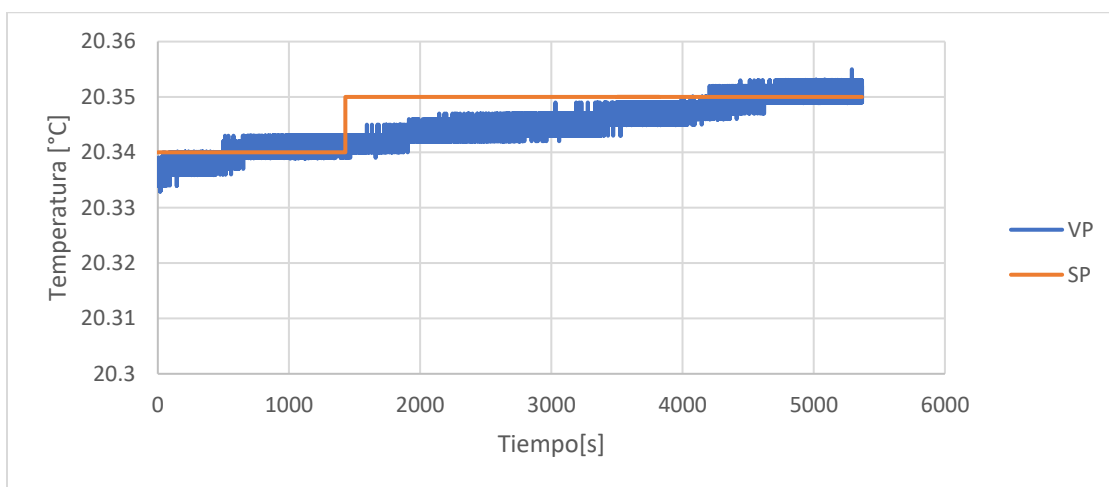


Figura 34: Variable de Proceso y Set Point – Controlador PI variable de Temperatura

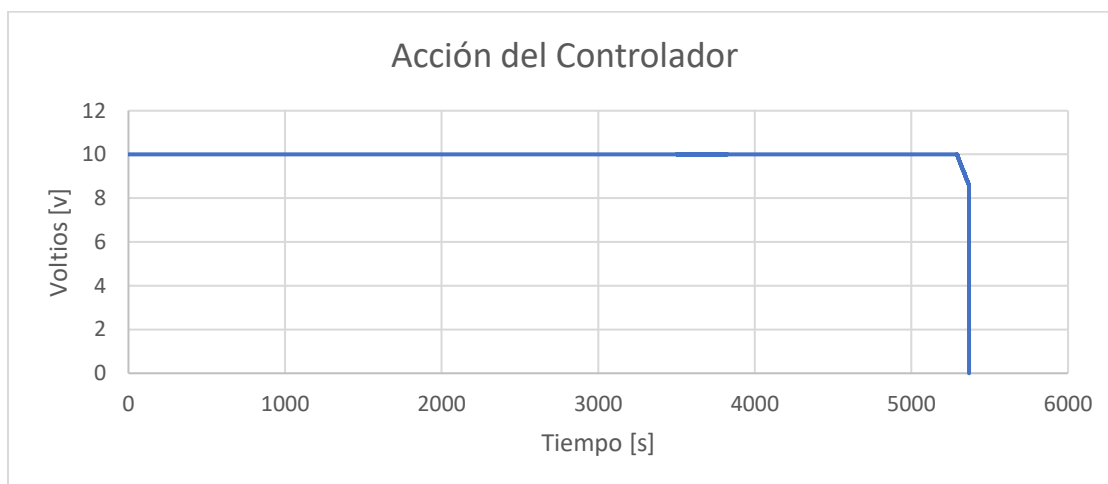


Figura 35: Acción del calentador E104 para el controlador PI

Para la variable de temperatura, podemos ver que el proceso es muy lento, a pesar de que los valores de referencia pedidos son muy pequeños, la temperatura inicial del líquido fue de 20°C y se le pidió al sistema llegar a un valor de 20.34°C y este demoro alrededor de 500 segundos en lograr estabilizar en ese valor. Una vez estabilizado se le pidió al sistema otro valor de referencia pequeño de 20.35°C y este demoro aproximadamente 4000 segundos más en asentarse, lo que lo hace extremadamente lento a comparación de las anteriores dos variables. Tomando en cuenta la figura 35 de la acción del calentador vemos que nunca deja de estar trabajando a su máximo desempeño ya que el proceso es muy lento y al pedir dos valores de referencia nunca pudo apagarse, con lo que se recuerda que este objeto final de control trabaja en ON/OFF mas no en control continuo.

El control para la variable de temperatura se basa en un procedimiento ON - OFF del calentador del tanque, este procedimiento consta en configurar la duración de una señal PWM en el actuador en forma de una entrada digital; es decir, reciben una señal de activación de parte del controlador y este se enciende el tiempo que dura la señal. En el PLC S7-300 no se configuró tal procedimiento con el controlador IMC debido a que el sistema desarrollado fue para un control con señal de salida analógica. Dentro del programa FluidLab proporcionado por el proveedor de FESTO existe esta configuración del sistema para un controlador PID.

CONCLUSIONES

Se estudio la estación de trabajo FESTO MPS-PA, de este proceso aprendimos que los procesos industriales cuentan con ciertas variables de importancia que son indispensables para conseguir el propósito final de la industria, por esto, se generan controladores que facilitan y mejoran los tiempos de producción.

Una vez superadas las dificultades del sistema, se procedió a recuperar las gráficas de proceso de las variables de la estación FESTO y se llegó al diseño de esquemas de control PID e IMC para aplicar físicamente a la estación, de esta etapa, entendimos que existen varios factores a considerar cuando se realiza una implementación física en una máquina de tipo industrial, ya que, se deben tomar en cuenta la inversión de unidades de trabajo de las variables de proceso, los protocolos de comunicación entre la estación de trabajo, el computador y el PLC, y los implementos de uso intermediario entre las componentes, como los cables conversores, cables de comunicación MPI, ethernet, entre otros, estos factores incrementan la dificultad de la aplicación de los controladores, pero prepara a los estudiantes a un mundo real y físico fuera de los softwares de simulación a nivel estudiantil.

Como tercera conclusión se toma en cuenta la comparación de los desempeños de los controladores diferenciados por su técnica de sintonización. De aquí se concluye que después de analizar las gráficas de simulación y las tablas de valores de desempeño, los controladores de tipo PI, a pesar de su antigüedad, entregan un mejor desempeño para las tres variables de proceso, por el hecho de ser más rápidos, no tener sobre picos en su curva de acción en su implementación física, y por mantener índices de desempeño no tan distantes a los valores de los IMC para el control de la máquina.

Sin embargo, en la implementación física podemos concluir que un controlador PID tiene un mejor desempeño tanto para el estado transitorio del sistema que llega rápidamente hacia el Set Point propuesto; como para el control en estado estable y su reacción contra perturbaciones. Por otro lado, el controlador IMC tiene una acción mucho más amigable con el actuador de nivel, dicha acción causa que, al contrario del PID, el sistema sea mucho más lento y por tanto no tan efectivo para procesos en el que se necesita inmediatez y de igual manera contra perturbaciones. Finalmente, queda demostrado que realizar un buen estudio y análisis teórico previo una implementación física es efectiva pero no perfecta, ya que se consideran perturbaciones y circunstancias del sistema únicas de los equipos y sus calibraciones que afectan considerablemente el desenvolvimiento del control de una máquina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, V. M. (2001). Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo cerrado. *Ingeniería*, 11(1-2), 27-41.
- Liptak, B. G. (2018). *Instrument engineers' handbook, volume two: Process control and optimization*. CRC press.
- Berger, H. (2012). *Automating with STEP 7 in STL and SCL: SIMATIC S7-300/400 programmable controllers*. John Wiley & Sons.
- Camacho, O., Rosales, A., & Rivas, F. (2020). *Control de Procesos*. Quito. Escuela Politécnica Nacional.
- Chacón, E., Szigeti, F., & Camacho, O. (1996). Integral automation of industrial complexes based on hybrid systems. *ISA transactions*, 35(4), 305-319.
- Marlin, T.E. (1995). *Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*. McGraw-Hill College.
- Morales, L., Herrera, M., Camacho, O., Leica, P., & Aguilar, J. (2021). LAMDA control approaches applied to trajectory tracking for mobile robots. *IEEE Access*, 9, 37179-37195.
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.
- Samad, T., Bauer, M., Bortoff, S., Di Cairano, S., Fagiano, L., Odgaard, P. F., ... & Sosseh, R. (2020). Industry engagement with control research: Perspective and messages. *Annual Reviews in Control*, 49, 1-14.
- Smith, C. A. and Corripio, A. B. (2005). *Principles and Practices of Automatic Process Control*. Wiley.

Soria Moncayo, M. S. (2020). Diseño e implementación de técnicas de control avanzado, PI no lineal, control por modos deslizantes y control por métodos numéricos basados en álgebra lineal aplicados a la estación reactor FESTO del Laboratorio de Control de Procesos Industriales (Bachelor's thesis, Quito, 2020.).