



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

**TEMA: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROLADOR I-PD
VERSUS CONTROLADORES CLÁSICOS”**

Plan de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES:

Choto Reino Anthony Israel
Guanotasig Chiluisa Erick Omar

TUTOR:

Ing. Corrales Bastidas Byron Paúl

LATACUNGA-ECUADOR

2024



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Choto Reino Anthony Israel y Guanotasig Chiluisa Erick Omar, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROLADOR I-PD VERSUS CONTROLADORES CLÁSICOS”**, siendo el Ing. Corrales Bastidas Byron Paúl M.Sc. tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Choto Reino Anthony Israel

C.I. 1726302613

Guanotasig Chiluisa Erick Omar

C.I. 0504833369



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROLADOR I-PD VERSUS CONTROLADORES CLÁSICOS”, de los ponentes: Choto Reino Anthony Israel y Guanotasig Chiluisa Erick Omar, de la Carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Agosto 2024

Ing. Corrales Bastidas Byron Paúl

C.I. 0502347768



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Choto Reino Anthony Israel y Guanotasig Chiluisa Erick Omar, con el título de Proyecto de titulación: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROLADOR I-PD VERSUS CONTROLADORES CLÁSICOS”, 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, Agosto 2024

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)

Nombre: Ing. Mullo Pallo Mauricio Eduardo
CC: 0503755183

Lector 2

Nombre: Ing. León Segovia Marco Anibal
CC: 0502305402

Lector 3

Nombre: Ing. León Segovia Manuel Ángel
CC: 0502041353

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con gran amor, primeramente, a Dios, que es un pilar fundamental en mi vida, enseguida un agradecimiento con todo corazón a mis padres que nunca, desesperaron y siempre confiaron en mis habilidades como hijo y profesional, les agradezco de todo corazón por el apoyo durante todo este tiempo de estudio.

Además, a mis profesores que siempre me han iniciado e inculcado hacia la ingeniería Eléctrica, uno de ellos el Ingeniero Paúl como mi tutor de tesis, que con su paciencia me ha ayudado e inculcado su sabiduría.

Anthony

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, primeramente, a Dios quien es un pilar fundamental en mi vida, también quiero dar inmensamente gracias a mis padres quienes fueron mi pilar fundamental para lograr cada meta siempre siendo ellos quienes jamás dejaron de creer en mí, a mis hermanos quien con un apoyo incondicional siempre han sabido girarme, dar gracias a cada uno de las personas que enmarcaron en el transcurso de mi vida con sus palabras de aliento para forjarme como un ser humano y con conocimiento nuevos que ayudaran a nuevas personas.

Además, a mis profesores que siempre me han iniciado e inculcado hacia la ingeniería Eléctrica, uno de ellos el Ingeniero Paúl como mi tutor de tesis, que con su paciencia y perseverancia ha hecho de mi un buen profesional con valores éticos, morales inculcado su sabiduría.

Omar

DEDICATORIA

Dedico este trabajo especialmente a mis padres Francisco Choto y Angela Reino, que siempre confiaron que podría hacer llegar lejos, graduándome como un Ingeniero Eléctrico. Igualmente, a mis hermanos Stewen y Angie que siempre me motivaron para llegar a donde estoy, viéndome como un ejemplo a seguir de hermano mayor.

Quiero llegar lejos con la convicción de superar mis metas e ingresar a la Armada del Ecuador para aportar con mis conocimientos a esta noble institución.

Anthony

DEDICATORIA

Dedico este trabajo especialmente a mis padres Susana Chiluisa y Luis Guanotasig, son ellos quienes confiaron desde el primer sin dudarlos pusieron toda la confianza en mi cada momento e instante de sacrificio que se realizó durante estos 5 años hasta hoy donde finalizo un bonito sueño que ahora es realidad, graduándome como un Ingeniero Eléctrico.

El logro obtenido también va dedicado a mis hermanos Danilo, Edison, Rodrigo y Luis que con sus consejos y enseñanzas siempre me motivaron para llegar a donde estoy.

Dedico también a mi novia Katherin quien fue una de las personas que siempre estuvo ahí en mis altos y bajos momentos, la persona que nunca dudo en ayudarme a levantarme cada día dándome cariño, amor y comprensión.

Omar

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN.....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vii
1 INFORMACIÓN GENERAL.....	15
2 INTRODUCCIÓN	19
2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	19
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	20
2.3.1 OBJETO DE INVESTIGACIÓN.....	20
2.3.2 CAMPO DE ACCIÓN.....	20
2.4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	20
2.4.1 BENEFICIARIOS DIRECTOS	20
2.4.2 BENEFICIARIOS INDIRECTOS	20
2.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	21
2.6 HIPÓTESIS	21
2.7 OBJETIVOS.....	21
2.7.1 GENERAL	21
2.7.2 ESPECÍFICOS	21
2.8 SISTEMA DE TAREAS	22
3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	23
3.1 LOS CONTROLADORES Y SU HISTORIA	23
3.2 SISTEMAS DE CONTROL.....	23
3.3 TIPOS DE CONTROLADORES CLÁSICOS.....	24
3.3.1 CONTROLADOR DE LAZO ABIERTO	24
3.3.2 CONTROLADOR DE LAZO CERRADO.....	25
3.3.3 CONTROL ON/OFF.....	26
3.3.4 CONTROL PID	28
3.4 INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL.....	39
3.4.1 SENSORES DE TEMPERATURA.....	39
3.5 SOFTWARE	40
3.5.1 MATLAB - SIMULINK	40
3.6 DIAGRAMAS P&ID	41
4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.....	43
4.1 PROCESO FÍSICO DE LA PLANTA DE EMBEBIDO DE TEMPERATURA	43
4.1.1 REQUERIMIENTOS Y PROPUESTA FUNCIONAL DEL SISTEMA EMBEBIDO DE TEMPERATURA	43
4.2 OBTENCIÓN DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	45

4.3	PROCESOS SIMULADOS EN SOFTWARE.....	49
4.3.1	CONTROLADOR PID EN UN PROCESO SIMULADO	49
4.3.2	MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON CONTROL PID SIMULADO.....	52
4.3.3	VARIANTE I-PD EN UN PROCESO SIMULADO.....	55
4.3.4	MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON VARIANTE I-PD SIMULADA.....	56
4.3.5	CONTROLADOR PID VERSUS VARIANTE I-PD SIMULADOS.....	59
4.4	CONTROLADOR PID EN UN PROCESO REAL DE TEMPERATURA	61
4.4.1	MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON CONTROLADOR PID REAL	62
4.4.2	VARIANTE I-PD EN UN PROCESO REAL DE TEMPERATURA	65
4.4.3	MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON VARIANTE I-PD REAL	66
4.4.4	CONTROLADOR PID VERSUS VARIANTE I-PD REALES.....	69
4.5	PROCESO DIDÁCTICO DE CAUDAL	71
4.5.1	REQUERIMIENTOS Y PROPUESTA FUNCIONAL DEL SISTEMA EMBEBIDO DE TEMPERATURA.....	72
4.6	OBTENCIÓN DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	73
4.7	PROCESOS SIMULADOS EN SOFTWARE.....	75
4.7.1	CONTROLADOR PID EN UN PROCESO SIMULADO	75
4.7.2	MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON CONTROL PID SIMULADO.....	77
4.7.3	VARIANTE I-PD EN UN PROCESO SIMULADO.....	80
4.7.4	MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON VARIANTE I-PD SIMULADA.....	81
4.7.5	CONTROLADOR PID VERSUS VARIANTE I-PD SIMULADOS.....	84
5	.. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	86
5.1	IMPLEMENTACIÓN DE LA VARIANTE I-PD EN UN PROCESO INDUSTRIAL	86
5.2	COMPARATIVA DE SIMULACIONES EN SOFTWARE Y PROCESOS REALES	87
5.2.1	PROCESO SIMULADO DE TEMPERATURA.....	87
5.2.2	PROCESO REAL DE TEMPERATURA.....	89
5.2.3	PROCESO SIMULADO DE CAUDAL.....	90
5.3	CARACTERÍSTICAS Y DIFERENCIAS GENERALES DEL CONTROLADOR CLÁSICO PID Y SU VARIANTE I-PD	92
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
6.1	CONCLUSIONES.....	93
6.2	RECOMENDACIONES	94
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
8	ANEXOS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Diagrama esquemático de un control de lazo abierto	25
Figura 3.2 Diagrama esquemático de un control de lazo cerrado	26
Figura 3.3 Ejemplificación básica del control ON/OFF.....	27
Figura 3.4 Estructura interna del controlador PID	28
Figura 3.5 Esquema de variante I-PD	37
Figura 3.6 Sensores de contacto termopares [14].....	40
Figura 3.7 Sensor infrarrojo funciona sin contacto [14]	40
Figura 3.9 Diagrama P&ID de una estación de entrenamiento para el control del nivel de temperatura	42
Figura 4.1 Diagrama sobre partes constitutivas del sistema embebido.....	44
Figura 4.2 Circuito base del sistema embebido.....	45
Figura 4.3. Esquema de lazo abierto en simulink con la planta de embebido.....	46
Figura 4.4. SystemIdentification	47
Figura 4.5 Ajustes de SystemIdentification completo.....	47
Figura 4.6 Validación y respuesta de la estimación ante una entrada escalón	48
En la Figura 4.6 se puede determinar el tiempo muerto en un proceso de temperatura controlado por un PID, este es el retraso entre la aplicación de una acción de control (CV) y la respuesta observable en el sistema (PV). Este retraso puede afectar la estabilidad y el rendimiento del controlador, complicando la precisión y efectividad del ajuste de temperatura. Como punto final, el modelo obtenido es el siguiente:	48
Figura 4.7 Obtención de Ecuación de transferencia.....	48
Figura 4.8 Determinación del tiempo muerto en forma gráfica	49
Figura 4.9 Construcción del controlador PID simulado.....	50
Figura 4.10 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols en 100 segundos	52
Figura 4.11 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Lambda en 800 segundos.....	53
Figura 4.12 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Borresen y Grindal en 100 segundos.....	53
Figura 4.13 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Callender en 7000 segundos.	54
Figura 4.14 Control PID simulado, ajustado con todos los métodos de sintonización en 200 segundos	55
Figura 4.15 Construcción de la variante I-PD en el software.....	56
Figura 4.16 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols en 100 segundos	56
Figura 4.17 Proceso simulado del comportamiento del I-PD, ajustado con parámetros de Lambda en 5000 segundos	57

Figura 4.18 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Borresen y Grindal en 100 segundos	57
Figura 4.19 Proceso simulado del comportamiento del I-PD, ajustado con parámetros de Callender en 7000 segundos	58
Figura 4.20 Proceso simulado del comportamiento del I-PD, ajustado con todos los métodos de sintonización en 100 segundos	58
Figura 4.21 Comparación del PID vs I-PD en el método de Ziegler y Nichols	59
Figura 4.21 Comparación de PID vs I-PD en el método de Lambda	60
Figura 4.22 Comparación de PID vs I-PD en el método de Borresen y Grindal.....	60
Figura 4.23 Comparación de PID vs I-PD en el método de Callender.....	61
Figura 4.24 Controlador PID en un proceso real de temperatura.....	62
La Figura 4.24 representa el diseño del control PID ya en un ambiente de proceso real en el cual se evalúa la resultante PV en función del tiempo y de su setpoint.	62
Figura 4.25 Proceso real del PID, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols	62
Figura 4.26 Proceso real del PID, ajustado con parámetros de Lambda	63
Figura 4.27 Proceso real del PID, ajustado con parámetros de Borresen and Grindal.....	64
Figura 4.28 Proceso real del PID, ajustado con parámetros de Callender	64
Figura 4.29 Proceso real del PID, ajustado con todos los métodos de sintonización.....	65
Figura 4.30 Variante I-PD en un proceso real de temperatura	65
Figura 4.31 Proceso real del I-PD, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols	66
Figura 4.33 Proceso real del I-PD, ajustado con parámetros de Borresen and Grindal	67
Figura 4.34 Proceso real del I-PD, ajustado con parámetros de Callender	67
Figura 4.35 Proceso real del comportamiento del I-PD, ajustado con todos los parámetros de sintonización	68
Figura 4.36 Comparación de PID vs I-PD en un proceso real con el método de Ziegler y Nichols.	69
Figura 4.37 Comparación de PID vs I-PD en un proceso real con el método de Lambda.....	69
Figura 4.38 Comparación de PID vs I-PD en un proceso real con el método de Borresen y Grindal. .	70
Figura 4.39 Comparación de PID vs I-PD en un proceso real con el método de Callender	71
Figura 4.40 Diagrama P&ID de la estación de caudal	72
En la Figura 15 se puede determinar el tiempo muerto en un proceso de temperatura controlado por un PID, este es el retraso entre la aplicación de una acción de control (CV) y la respuesta observable en el sistema (PV). Este retraso puede afectar la estabilidad y el rendimiento del controlador, complicando la precisión y efectividad del ajuste de temperatura. Como punto final, el modelo obtenido es el siguiente:	74
Figura 4.41 Obtención de Ecuación de transferencia.....	74
Figura 4.42 Obtención de Ecuación de transferencia.....	74
Figura 4.43 Estructura para la implementación de un controlador PID	75

Figura 4.44 Construcción del controlador PID simulado.....	76
Figura 4.45 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols en 100 segundos	78
Figura 4.46. Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Lambda en 100 segundos.....	78
Figura 4.47 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Borresen y Grindal en 150 segundos.....	79
Figura 4.48 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Callender en 100 segundos	79
Figura 4.49 Control PID simulado, ajustado con todos los métodos de sintonización en 200 segundos	80
Figura 4.50 Construcción de la variante I-PD en el software.....	81
Figura 4.51 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols en 100 segundos	81
Figura 4.52. Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Lambda en 100 segundos	82
Figura 4.53 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Borresen y Grindal en 150 segundos.....	82
Figura 4.54 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Callender en 7000 segundos	83
Figura 4.55 Proceso simulado del comportamiento del I-PD, ajustado con todos los métodos de sintonización en 100 segundos.....	83
Figura 4.56 Comparación del PID vs I-PD en el método de Ziegler y Nichols	84
Figura 4.57 Comparación de PID vs I-PD en el método de Lambda.....	85
Figura 4.58. Comparación de PID vs I-PD en el método de Borresen y Grindal.....	85
Figura 4.59 Comparación de PID vs I-PD en el método de Callender.....	86
Figura 5.1 Diagrama de bloques final del controlador I-PD.	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Métodos de sintonización de un controlador PID	37
Tabla 4.1 Sintonización del Controlador PID	51
Tabla 4.2 Rangos y características de operación de la planta	73
Tabla 4.3 Sintonización del Controlador PID	77
Tabla 5.1 Resultados de sintonización del controlador PID simulado.....	88
Tabla 5.2 Resultados de sintonización del controlador I-PD simulado.....	88
Tabla 5.3 Resultados sintetizados en porcentajes del proceso simulado de temperatura.....	88
Tabla 5.4 Resultados de sintonización del controlador PID real de temperatura.....	89
Tabla 5.5 Resultados de sintonización del controlador I-PD real de temperatura	89
Tabla 5.6 Resultados sintetizados en porcentajes del proceso real de temperatura.	90
Tabla 5.7 Resultados de sintonización del controlador PID simulado.....	91
Tabla 5.8 Resultados de sintonización del controlador I-PD simulado.....	91
Tabla 5.9 Resultados sintetizados en porcentajes del proceso simulado de caudal.	91
Tabla 5.10 Características entre el controlador PID e I-PD	92

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Esquema de modelamiento de la planta de embebido de temperatura	97
Anexo 2. Estructura de comunicación entre la planta de caudal real y el software de diseño	97
Anexo 3 . Procedimiento para configurar el Arduino como tarjeta de adquisición de datos cable USB	98
Anexo 4. Manual de uso de Arduino con Simulink	99
Anexo 5 . Proceso de temperatura real del PID, con parámetros de Zieglers y Nichols en 3600 segundos, con setpoint de 30°, 40° y 50°	100
Anexo 6. Proceso de temperatura real del PID, con parámetros de Lambda en 3600 segundos, con setpoint de 30°, 40° y 50°	100
Anexo 7 . Proceso de temperatura real del PID, con parámetros de Borresen and Grindal en 3600 segundos, con setpoint de 30°, 40° y 50°	101
Anexo 8. Proceso de temperatura real del PID, con parámetros de Callender en 3600 segundos, con setpoint de 30°, 40° y 50°	101
Anexo 9. Proceso de temperatura real del PID, con todos los métodos de sintonización	102
Anexo 10. Proceso de temperatura real del I-PD, con parámetros de Zieglers and Nichols en 3600 segundos, con setpoint de 30°, 40° y 50°	102
Anexo 11. Proceso de temperatura real del I-PD, con parámetros de Lambda en 3600 segundos, con setpoint de 30°, 40° y 50°	103
Anexo 12. Proceso de temperatura real del I-PD, con parámetros de Borresen and Grindal en 3600 segundos, con setpoint de 30°, 40° y 50°	103
Anexo 13. Proceso de temperatura real del I-PD, con parámetros de Callender en 3600 segundos, con setpoint de 30°, 40° y 50°	104
Anexo 14. Proceso de temperatura real del I-PD, con todos los metodos de sintonización.....	104
Anexo 15. Resultados de sintonización del controlador PID real de temperatura.	105
Anexo 16. Resultados de sintonización del controlador I-PD real de temperatura.....	105
Anexo 17. Proceso de caudal simulado del I-PD, con parámetros de Zieglers y Nichols en 300 segundos, con setpoint de 30L,80L y 70L	106
Anexo 18. Proceso de caudal simulado del I-PD, con parámetros de Lambda en 300 segundos, con setpoint de 30L,80L y 70L	106
Anexo 19. Proceso de caudal simulado del I-PD, con parámetros de Borresen and Grindal en 300 segundos, con setpoint de 30L,80L y 70L	107
Anexo 20. Proceso de caudal simulado del I-PD, con parámetros de Callender en 300 segundos, con setpoint de 30L,80L y 70L	107
Anexo 21. Proceso de caudal simulado del I-PD, con todos los métodos de sintonización en 300 segundos, con setpoint de 30L,80L y 70L	108
Anexo 22. Resultados de sintonización del controlador I-PD real en proceso de caudal.	108

Anexo 23. Código de Python utilizado para realizar las gráficas mediante los valores obtenidos en el proceso de la planta de Embebido.....	109
--	-----

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

Título: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROLADOR I-PD VERSUS CONTROLADORES CLÁSICOS”

Autores:

Choto Reino Anthony Israel
Guanotasig Chiluisa Erick Omar

RESUMEN

Dentro de los procesos industriales, la automatización ha cobrado una importancia crucial, impulsada por la necesidad de optimizar la producción mediante el uso de tecnologías avanzadas. En este contexto, el controlador PID clásico ha sido ampliamente adoptado por su capacidad de mejorar la respuesta de los sistemas industriales. Sin embargo, a pesar de su popularidad y larga trayectoria en el mercado, el PID tradicional presenta ciertas desventajas, como la generación de sobreimpulsos y una agresividad en la respuesta que puede ser una problemática en algunos procesos. Esta investigación se centra en un análisis comparativo entre el controlador PID clásico y su variante I-PD, con un enfoque específico en el control de temperatura mediante una planta de embebido, además en un proceso de caudal, en donde la variante se distingue por su capacidad para manejar variaciones en los procesos de manera más eficaz, demostrando una mayor robustez frente a cambios bruscos y requerimientos de ajuste menos frecuentes. Mediante pruebas simuladas y reales con software especializado, se demuestra que la variante I-PD supera al PID en varios aspectos clave, ya que ofrece una operación más suave reduciendo inestabilidades y sobreimpulsos de la variable de proceso (PV), en un 11.53% para procesos de temperatura y un 22.22% en procesos de caudal, aunque su tiempo muerto aumenta a un 66.6% más que el del PID en ambos casos. A pesar de esto, los tiempos de estabilización en la mayoría de procesos, son semejantes entre ambos controladores.

Palabras clave: Controladores, Sintonización, Parámetros, Modelo Matemático, Procesos Industriales

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

Title: “COMPARATIVE ANALYSIS OF I-PD CONTROLLER VERSUS CLASSIC CONTROLLERS”

Authors:

Choto Reino Anthony Israel
Guanotasig Chiluisa Erick Omar

ABSTRACT

Within industrial processes, automation has gained crucial importance, driven by the need to optimize production through the use of advanced technologies. In this context, the classical PID controller has been widely adopted for its ability to enhance the response of industrial systems. However, despite its popularity and long-standing presence in the market, the traditional PID has certain disadvantages, such as generating overshoots and an aggressive response, which can be problematic in some processes. This research focuses on a comparative analysis between the classical PID controller and its I-PD variant, with a specific focus on temperature control through an embedded system, as well as in a flow process, where the variant stands out for its ability to handle process variations more effectively, demonstrating greater robustness against sudden changes and requiring less frequent adjustments. Through simulated and real tests using specialized software, it is shown that the I-PD variant outperforms the PID in several key aspects, offering smoother operation by reducing instabilities and overshoots of the process variable (PV) by 11.53% for temperature processes and 22.22% for flow processes, although its dead time increases by 66.6% compared to the PID in both cases. Despite this, the stabilization times in most processes are similar between both controllers.

Keywords: Controllers, Tuning, Parameters, Mathematical Model, Industrial Processes

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD

Choto Reino Anthony Israel

Guanotasig Chiluisa Erick Omar

AVAL DE TRADUCCIÓN- Profesional Externo

Ledesma Tiñe María José con cédula de identidad número: 0503966517 Licenciado en: Pedagogía del idioma inglés con número de registro de la SENESCYT: 1020-2024-2842105; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del proyecto de propuesta tecnológica con el título: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROLADOR I-PD VERSUS CONTROLADORES CLÁSICOS”** de: **Choto Reino Anthony Israel y Guanotasig Chiluisa Erick Omar**, egresados de la carrera de **Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, Agosto del 2024



.....
Lic. Ledesma Tiñe María José
CI: 0503966517

1 INFORMACIÓN GENERAL

Título: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONTROLADOR I-PD VERSUS CONTROLADORES CLÁSICOS

Fecha de inicio: Abril 2024

Fecha de finalización: Agosto 2024

Lugar de ejecución: Laboratorios de automatización - Universidad Técnica de Cotopaxi - Provincia Cotopaxi

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería en Electricidad.

Tutor de Titulación:

Msc.Ing. Corrales Bastidas Byron Paúl

Estudiante/s:

Choto Reino Anthony Israel

Guanotasig Chiluisa Erick Omar

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Tecnología de la información y las comunicaciones, robótica, automatización y optimización de sistemas.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Sublínea 1: Control y optimización en el uso de la energía del sector industrial, comercial y residencial

2 INTRODUCCIÓN

El control de procesos industriales es una disciplina esencial en la automatización moderna, donde la precisión y la estabilidad de los sistemas son fundamentales para garantizar la eficiencia operativa. Entre las herramientas más utilizadas en este campo, el controlador PID ha demostrado ser una solución confiable durante muchos años. Sin embargo, el PID no está exento de limitaciones, especialmente en escenarios donde se requieren tiempos de respuesta más rápidos y mayor estabilidad frente a perturbaciones.

El trabajo introduce una comparación detallada entre el controlador PID clásico y su variante I-PD, con un enfoque específico en el control de procesos de temperatura, además en un proceso de caudal. Estos procesos han sido seleccionados debido a su relevancia en la industria y a los desafíos que plantea para que el control sea eficiente. Mientras que el PID clásico puede mostrar respuestas lentas y transitorios prolongados, la variante I-PD se presenta como una alternativa diseñada para abordar estas deficiencias, prometiendo una mejora en la rapidez y la suavidad de la respuesta del sistema. Esto enfocado en pruebas de entornos simulados como en condiciones reales utilizando una planta de control de temperatura y otra de un proceso de caudal. Estas pruebas permiten evaluar el rendimiento de ambos controladores bajo diferentes condiciones operativas, analizando aspectos como la capacidad de estabilización, la respuesta a cambios bruscos y la eficiencia en el uso de recursos. Esta investigación establece una comparación objetiva basada en datos entre el PID y la variante I-PD, demostrando cómo esta última puede ofrecer mejoras en procesos de control.

2.1 Situación problemática

En industrias de alimentos, manufactura y producción en general, maximizar la eficiencia y adaptabilidad ante variaciones de demanda y condiciones operativas es crucial. Un controlador clásico ampliamente utilizado en la instrumentación industrial es el controlador PID, conocido por su eficiencia y eficacia. Sin embargo, su uso presenta varios desafíos significativos.

Uno de los problemas más comunes asociados con el controlador PID es su tendencia a la inestabilidad en condiciones cambiantes. Esto puede manifestarse en oscilaciones no deseadas y tiempos de respuesta lentos, especialmente cuando hay fluctuaciones rápidas en las condiciones operativas o en la demanda de productos. Estas inestabilidades pueden afectar

gravemente la calidad del proceso y la eficiencia operativa, llevando a tiempos de inactividad no planificados y a una producción menos óptima.

Otro desafío es la dificultad para adaptarse rápidamente a cambios imprevistos, lo que es especialmente problemático en economías dinámicas como la ecuatoriana, donde las demandas del mercado pueden variar considerablemente en poco tiempo. La incapacidad de responder eficazmente a estas variaciones puede resultar en una producción ineficiente.

Estos problemas resaltan la necesidad de mejorar el rendimiento de los controladores PID, lo que ha llevado al desarrollo de variantes enfocadas en optimizar el proceso y ofrecer soluciones más robustas y adaptativas a las demandas de las industrias modernas. En este contexto, se ha optado por la variante I-PD del controlador PID, que destaca por sus características de versatilidad y capacidad de adaptación.

2.2 Formulación del problema

El uso de controladores PID clásicos en procesos de nivel, temperatura y presión suele generar sobreimpulsos en su proceso de salida, donde la respuesta del sistema excede temporalmente el valor deseado. Esto causa ineficiencias operativas, afectando la calidad del producto y provocando inestabilidades que pueden llevar a tiempos de inactividad imprevistos.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto de investigación

Variante I-PD del controlador PID en procesos industriales.

2.3.2 Campo de acción

Control de procesos en laboratorios de automatización de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

2.4.1 Beneficiarios directos

Usuarios de los laboratorios de automatización.

2.4.2 Beneficiarios indirectos

Comunidad científica

2.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto busca mejorar la eficiencia y precisión en los sistemas de control industrial, donde los controladores PID, aunque comúnmente utilizados, presentan limitaciones como sobreimpulsos significativos y errores en la respuesta del sistema. Para abordar estos problemas, se investiga la variante I-PD del PID, diseñada específicamente para reducir el sobreimpulso y optimizar el rendimiento del sistema.

Además, se enfoca en comparar el controlador PID estándar con la variante I-PD en procesos de temperatura, una aplicación común en la industria. Al evaluar el rendimiento del I-PD, se busca determinar si ofrece mejoras significativas en la suavidad del sobreimpulso y en la precisión del control, utilizando simulaciones y pruebas en sistemas reales. Los datos obtenidos permitirán destacar las ventajas del I-PD y proporcionarán una comprensión más profunda de su aplicación en la automatización industrial.

2.6 HIPÓTESIS

El uso de la variante I-PD hará que el sobreimpulso de las respuestas en procesos de temperatura y caudal al momento de estabilizarse sea menor, comparándolo con el controlador PID clásico.

2.7 OBJETIVOS

2.7.1 General

Implementar la variante I-PD en un proceso industrial de temperatura y caudal, mediante el uso de recursos computacionales, para determinar sus características en comparación con un control PID.

2.7.2 Específicos

- Investigar principios básicos, estructura y parámetros internos de la variante I-PD.
- Aplicar metodologías de sintonización en la variante I-PD, para una correcta estabilización.
- Validar el funcionamiento del I-PD en comparación con el controlador clásico PID aplicándolos a procesos de temperatura y caudal.

2.8 SISTEMA DE TAREAS

Objetivos Específicos	Actividad (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar principios básicos, estructura y parámetros internos de la variante I-PD.	<ul style="list-style-type: none"> -Indagar sobre los controladores clásicos. -Buscar información detallada de la variante I-PD. - Extraer información relevante. 	<ul style="list-style-type: none"> -Conceptos básicos y esquemas. -Funcionamientos, características y formulación matemática. - Denotar toda la información principal de ambos controladores. 	<ul style="list-style-type: none"> Investigación bibliográfica: Libros Tesis Artículos científicos Revistas tecnológicas
Aplicar metodologías de sintonización en la variante I-PD, para una correcta estabilización.	<ul style="list-style-type: none"> -Explorar las metodologías de sintonización. -Conocer la ecuación de los modelados de sintonización. -mejoramiento de la estabilidad en sistemas industriales. 	<ul style="list-style-type: none"> -Comportamiento de cada uno de los modelados en los procesos. -Verificar que los diferentes métodos de sintonización para controladores clásicos son útiles para la variante I-PD. -realizar un reajuste en los parámetros obtenidos con los métodos de sintonización. 	<ul style="list-style-type: none"> Software MATLAB - Simulink. Artículos científicos Informes Técnicos
Validar el funcionamiento del I-PD en comparación con el controlador clásico PID aplicándolos a procesos de temperatura.	<ul style="list-style-type: none"> -Pruebas de funcionamiento del controlador clásico PID e I-PD. -Análisis comparativo de resultados obtenidos por los tipos de controladores y su uso en la industria. - Comprobación de la diferencia de estabilización entre el I.-PD vs el PID. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comprobación de resultados por parte del software dentro del proceso. - Validar todos los resultados obtenidos de la variante I-PD. -Análisis de comprobación mediante los tiempos muertos y la mejora en los procesos por el I-PD. 	<ul style="list-style-type: none"> Arduino Uno Software MATLAB -Simulink Planta física de embebido de Temperatura.

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A continuación, se presenta información sobre los controladores PID y sus variantes, en donde se describe sus características, funciones y aplicaciones en la automatización industrial.

3.1 LOS CONTROLADORES Y SU HISTORIA

En la antigüedad, ya existían sistemas rudimentarios de control para procesos industriales, como las poleas y otros mecanismos diseñados para mejorar la eficiencia y la producción. Con la llegada de los sistemas de control distribuidos (DCS) en tiempos más modernos, fue posible automatizar procesos complejos sin depender constantemente de la intervención humana. El control distribuido trajo consigo avances significativos para la automatización industrial. Permitió la interconexión con otros dispositivos informáticos, la conexión en red de bastidores de control y la implementación de interbloqueos y bucles en cascada. Además, se introdujo el registro automático de eventos e incidencias, eliminando la necesidad de registros físicos [1].

El rápido avance tecnológico e informático en las últimas décadas ha transformado radicalmente los sistemas de control industrial. Al mirar hacia atrás en el siglo XX, se destaca algunos hitos importantes:

- En 1959, se desarrolló la primera máquina controlada por un ordenador mediante un sistema de cableado [1].
- En 1968, se introdujo sistemas de control de forma modular al momento de automatizar procesos en montajes [1].
- En 1987, se lanzó al mercado la primera computadora con disco duro integrado en su arquitectura [1].
- En 2010 marcó una integración hacia el industrialismo de procesos automáticos [1].

Se encuentra un tipo de controlador muy antiguo el cual es el PID (Proporcional-Integral-Derivativo) se utilizan ampliamente en la industria para regular variables en sistemas automatizados. Estos controladores, desarrollados en la década de 1940, ofrecen una solución efectiva para el control de procesos[1].

3.2 SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control consta de componentes interconectados que colaboran para realizar una tarea específica. Estos sistemas son comunes en la industria, ya que permiten alcanzar objetivos específicos. La ingeniería se encarga de administrar los sistemas de control para prevenir fallos.

Estos procedimientos modernos, basados en programación, utilizan computadoras o microcontroladores para proporcionar respuestas rápidas y precisas [2].

Los sistemas de control operan en dispositivos con el propósito de regular, guiar o dirigir el comportamiento de un sistema en un entorno definido. Se encuentran en diversos dispositivos, como los eléctricos, neumáticos, hidráulicos y mecánicos. Cada dispositivo sirve como base para que los sistemas de control ajusten el comportamiento del sistema y mantengan condiciones específicas, como temperatura, presión o velocidad. Además, estos sistemas pueden ser controlados manualmente o automáticamente [2].

Aunque utilizan diferentes dispositivos, siguen una lógica basada en al menos cinco elementos fundamentales:

- **Setpoint (SP):** Punto en el que una señal se configura de acuerdo con ciertos parámetros deseados. Es un punto de referencia para el valor de la señal de la variable [2].
- **Variable a controlar (CV):** Representa la magnitud que se busca regular, como la posición de un producto en contenedores industriales [2].
- **Proceso variable (PV):** se refiere a la magnitud que el sistema está tratando de controlar o regular, como la temperatura, la presión, el nivel de líquido o la velocidad [2].
- **Actuador:** Es el componente que ejecuta una acción, como una bomba mecánica o eléctrica [2].
- **Ecuación de transferencia:** se refiere a una representación matemática que describe la relación entre la entrada y la salida de un sistema o proceso. Esta ecuación se utiliza para modelar cómo las variables de entrada, como flujo, temperatura, o presión, afectan las variables de salida de la planta [2].

3.3 TIPOS DE CONTROLADORES CLÁSICOS

3.3.1 CONTROLADOR DE LAZO ABIERTO

El sistema de control en lazo abierto es aquel que ocupa un regulador o también llamado actuador de control para que así se pueda obtener una respuesta que se desea. Un sistema en lazo abierto no recibe retroalimentación. Los sistemas de control en lazo abierto son aquellos en los que la salida no afecta la acción de control. No utilizan mediciones de la salida del sistema para calcular la señal de control [3].

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama esquemático de un control en lazo abierto, de un proceso universal.

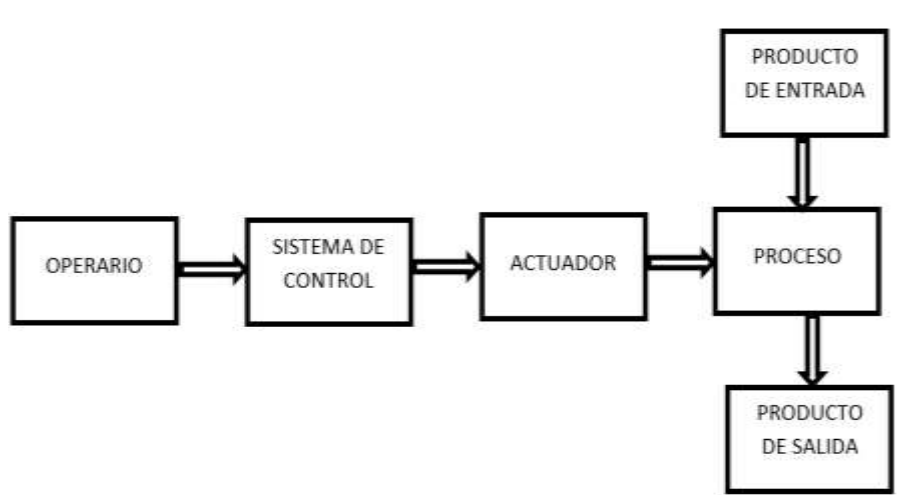


Figura 3.1 Diagrama esquemático de un control de lazo abierto

Las principales características de un sistema de control de lazo abierto son:

- No se realiza una comparación entre la salida del sistema y el valor deseado de la salida del sistema.
- Cada entrada de referencia tiene una condición de operación especificada.
- La calibración del controlador determina la precisión de la salida del sistema.
- Si hay perturbaciones, estos sistemas de control no funcionan correctamente.
- Los dispositivos con control secuencial, que no tienen control de variables y realizan una serie de operaciones de una manera específica, suelen usar control en lazo abierto. Es posible que esa secuencia de operaciones sea impuesta por eventos o por tiempo. Los PLC (controladores de lógica programable) se utilizan para programarlo.

3.3.2 CONTROLADOR DE LAZO CERRADO

Un sistema en lazo cerrado mide y compara la salida de esta señal con la salida deseada. Es importante aclarar que los sistemas de control de lazo cerrado también se conocen como sistemas de control retroalimentados. Los términos "control retroalimentado" y "control en lazo cerrado" generalmente se refieren a lo mismo. Utilizan mediciones de la salida del sistema para calcular la señal de control [4].

En la Figura 3.2 se muestra un diagrama esquemático de un control en lazo cerrado, de un proceso universal.

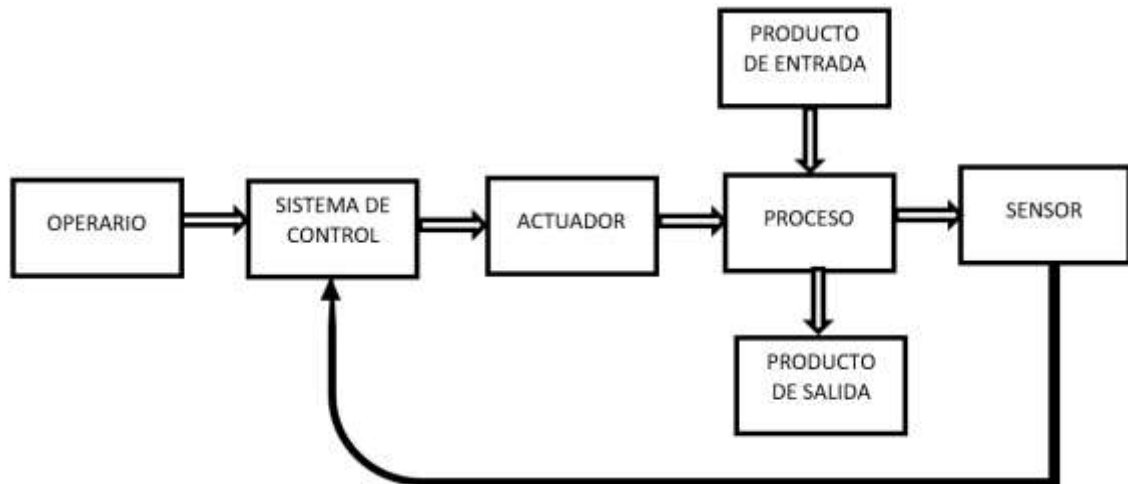


Figura 3.2 Diagrama esquemático de un control de lazo cerrado

Las principales características de un sistema de control de lazo cerrado son:

- Realimentación: La entrada obtiene información de la salida, lo que significa que es un lazo realimentado.
- Corrección de perturbaciones: Su configuración ayuda a corregir el efecto de las perturbaciones que se presentan.
- Complejidad y costo: Los sistemas de lazo cerrado son más complejos y costosos de implementar que los sistemas de lazo abierto.
- Precisión y exactitud: Son más precisos y exactos que los sistemas de lazo abierto.

3.3.3 CONTROL ON/OFF

El control más básico es el tipo ON/OFF, también conocido como “todo o nada”. En este enfoque, el algoritmo simplemente verifica si la variable de proceso está por encima o por debajo del punto de ajuste (setpoint). En términos prácticos, la señal de control cambia abruptamente entre los estados “encendido” o “apagado”, sin estados intermedios. Sin embargo, este tipo de control tiende a ser impreciso en la regulación de la variable del proceso [5].

Un ejemplo común es el control de temperatura mediante termostatos en aires acondicionados. El termostato activa el aire frío cuando la temperatura supera el punto de referencia y lo desactiva cuando la temperatura desciende. En aplicaciones prácticas, se considera establecer setpoints altos y bajos o una banda de control para evitar un desgaste prematuro de la válvula de control. Aunque este enfoque es adecuado para ciertos procesos industriales, no se utiliza en procesos químicos de alta precisión [5].

Sus principales ventajas son:

- Sencillez: el control ON/OFF es la forma más simple de regulación.
- Bajo costo de instalación: requiere menos componentes y configuración.
- Fácil instalación y mantenimiento: no necesita ajustes complicados.
- Amplia utilización en procesos de poca precisión: es adecuado para aplicaciones donde la precisión no es crítica.

Sus principales desventajas son:

- Mínima precisión: el control ON/OFF no logra una regulación precisa debido a las oscilaciones en la variable de proceso.
- Desgaste del elemento final de control: la apertura y cierre constantes pueden afectar la vida útil de válvulas, relés u otros dispositivos.
- Calidad del producto terminado: las fluctuaciones pueden afectar la calidad del producto en procesos industriales.

En la Figura 3.3, se muestra de forma gráfica y didáctica un proceso enfocado hacia un controlador ON/OFF en un sistema de temperatura industrial, el mismo que tiene un enfoque básico para el calentamiento de un líquido con diferentes pasos de temperatura, pero un solo valor especificado.

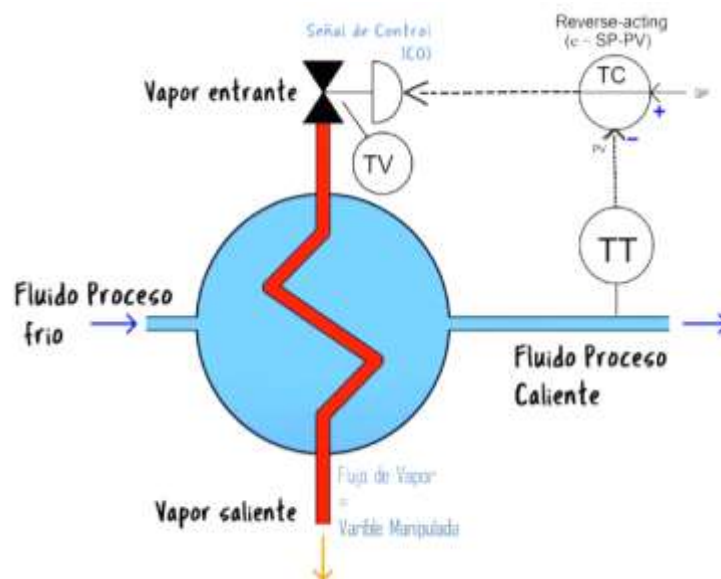


Figura 1.3 Ejemplificación básica del control ON/OFF [5]

3.3.4 CONTROL PID

Un control PID es un tipo de sistema de control que permite optimizar el tiempo de reacción y mejorar la precisión de respuesta. Es un sistema que se ajusta y predice automáticamente [6].

El control PID nos permite manejar diversas variables en un proceso general:

- El control PID modula la velocidad
- Controla la temperatura
- Modifica la presión
- Regula el flujo

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es ampliamente utilizado en la industria debido a su resistencia y eficacia. Aunque su estructura es simple, esta simplicidad también limita su aplicabilidad a sistemas estables, pero puede experimentar sobre impulsos y errores transitorios que generalmente pueden oscilar entre el 5% y el 20% del valor deseado antes de estabilizarse, aunque estos valores no son universales y pueden variar [6].

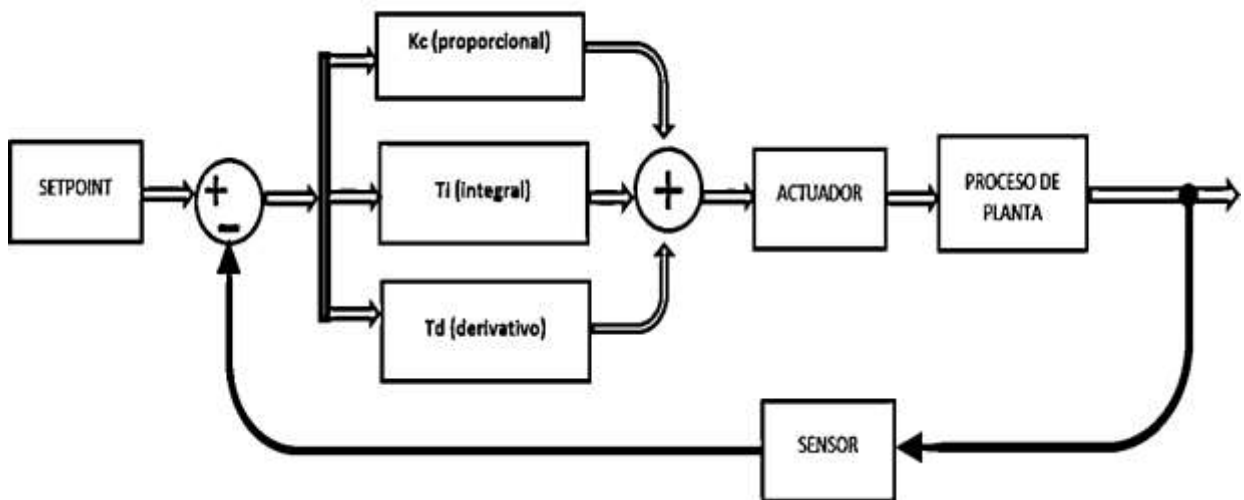


Figura 3.2 Estructura interna del controlador PID

Mediante la Figura 3.4 se observa la estructura interna de un controlador PID, el cual es muy utilizado para diversas aplicaciones de una industria, en este caso se observa para un proceso de temperatura.

3.3.4.1 PARTES INTERNAS DEL CONTROL PID

- **P: es la acción de control proporcional**

Es aquella que crea una salida del controlador la misma siendo proporcional a un error único. En este sistema, la magnitud de la señal de entrada tiene un impacto directo en la salida. Ya no se trata solo de un nivel predeterminado, sino de toda la gama de niveles de entrada. Algunos sistemas de iluminación automáticos utilizan un sistema P para determinar la intensidad con la que se deben encender las lámparas, dependiendo directamente de la luminosidad ambiental. La ganancia proporcional mide el valor actual y el punto de ajuste en términos porcentuales. Este tipo de controlador facilita la implementación del cambio [6].

No obstante, su valor no siempre es constante:

- En aplicaciones centrífugas, se sugiere un valor del 10%.
- En aplicaciones sumergibles, se aconseja un valor del 50%.
- Se basa en la diferencia entre el valor medido y el valor deseado (el error).
- La salida de un controlador es la misma del error.
- Es eficaz en sistemas con respuestas rápidas o pequeñas perturbaciones.

Esto contribuye a la reducción del error al disminuir la discrepancia entre el estado deseado y el estado alcanzado. En otras palabras, así se describe a través de su función de transferencia:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (1)$$

Donde

K_p es una ganancia proporcional que se puede ajustar.

$e(t)$ es un error proporcional al tiempo, resultado de la diferencia entre la señal de referencia (setpoint) y la variable de control (CV).

Un controlador proporcional tiene la capacidad de manejar cualquier sistema estable, sin embargo, su rendimiento es limitado y presenta un error en estado estacionario (conocido como off-set) [6].

Se tiene que **P** es la ganancia proporcional, determina la respuesta proporcional al error presente

del sistema. Se encarga de ajustar la salida del controlador en proporción directa al error [7].

- **I: es la acción de control integral**

Esta proporciona una salida del controlador que es proporcional al error acumulado a lo largo del tiempo, lo que significa que es un método de control más lento. La acción integral es el periodo de tiempo específico necesario para la corrección [6]. Dependiendo del tiempo, existen diferentes valores:

- Valor pequeño: el punto de ajuste o setpoint, es más rápido. Sin embargo, se deben tener precauciones ya que puede generar inestabilidad en el sistema. Algunos de los problemas principales incluyen oscilaciones, vibraciones del motor y vibraciones de la bomba.
- Valores más altos: el tiempo de respuesta es más lento, lo que puede resultar en un sobrepaso del punto de ajuste y oscilaciones en la frecuencia de salida.
- Considera la acumulación del error a lo largo del tiempo.
- La salida del controlador es proporcional a la integral del error, corrigiendo errores persistentes.
- Útil para eliminar errores en estado estacionario y alcanzar el punto de ajuste.

Si el error es mayor al deseado, se incrementa la constante integral K_i para minimizar el error y alcanzar la velocidad adecuada. No obstante, este incremento debe hacerse gradualmente para asegurar la estabilidad del sistema. Con su función de transferencia como la siguiente:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2)$$

Donde

K_i es la fuerza de acción del control integral.

$e(t)$ es un error proporcional al tiempo, resultado de la diferencia entre la señal de referencia (setpoint) y la variable de control (CV).

La señal de control, $u(t)$, posee un valor distinto de cero incluso cuando la señal de error, $e(t)$, es cero. Esto lleva a la conclusión de que, dada una referencia constante o perturbaciones, el error en estado estacionario es nulo [6]. Se tiene T_i el cuál es el inverso de la ganancia integral K_i donde representa el tiempo que el controlador tarda en acumular la misma acción que la acción proporcional para un error constante. En otras palabras, T_i es el tiempo necesario para

que la acción integral tenga un impacto significativo en la salida del controlador [7].

- **D: es la acción de control derivativo**

Es aquel que produce una salida que es proporcional a la derivada del error respecto al tiempo ayuda a proteger el comportamiento futuro del error y puede producir una acción correctiva rápida [6].

- Analiza la tasa de cambio del error.
- La salida del controlador es proporcional a la derivada del error, previniendo oscilaciones y estabilizando el sistema.
- Útil para respuestas rápidas ante cambios bruscos.

$$u(t) = K_d * \frac{e(t)}{dt} \quad (3)$$

Donde

K_d es la fuerza de acción del control derivativo.

$e(t)$ es un error proporcional al tiempo, resultado de la diferencia entre la señal de referencia (setpoint) y la variable de control (CV).

Se tiene T_d que es un parámetro que determina la respuesta derivativa al error. Representa el tiempo futuro en el que la derivada del error se multiplica para influir en la salida del controlador. Es decir, T_d anticipa el comportamiento futuro del error y ajusta la salida del controlador en consecuencia [7].

- **PI: acción de control proporcional-integral.**

Se define a través de una combinación de las acciones proporcional e integral, lo que permite un control más preciso y rápido en comparación con los controladores P o I por separado [6].

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4)$$

En donde T_i es el tiempo integral, este mismo ajusta la acción integral. A la cual tenemos esta ecuación de transferencia.

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (5)$$

En un sistema de control proporcional, la acción de control solo se activa cuando existe un error. En el caso de la acción integral, incluso un pequeño error positivo resultará en un aumento en la acción de control, mientras que un error negativo disminuirá la señal de control. Este principio básico implica que el error en estado estacionario siempre será cero. En la industria, muchos controladores utilizan exclusivamente la acción proporcional-integral (PI). Se ha demostrado que el control PI es apropiado para procesos con dinámica fundamentalmente de primer orden, y esto se puede verificar mediante pruebas de escalón [6].

- **PD: acción de control proporcional-derivativa**

Se aplica cuando la acción proporcional no logra la respuesta deseada y se vuelve inestable. Para remediar esto, incrementamos gradualmente la constante derivativa K , lo que nos permite obtener una respuesta estable. El parámetro derivativo (D) tiene un carácter predictivo y este anticipa el error para tomar la acción más adecuada. Esto nos permite tomar medidas correctivas antes de que sea demasiado tarde, ya que ajusta el error al modificar la velocidad. Es decir, actúa de manera preventiva para corregir el error antes de que se vuelva demasiado grande [6]. Esto se lo representa mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p T_d de(t)}{dt} \quad (6)$$

En donde T_d es una constante conocida como tiempo derivativo. Esta acción tiene un carácter predictivo, lo que acelera la acción de control. Sin embargo, tiene la desventaja significativa de que amplifica las señales de ruido y puede causar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se usa por sí sola, ya que solo es efectiva durante períodos transitorios [6].

La función de transferencia de un controlador PD es la siguiente:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d \quad (7)$$

Cuando se le añade una acción de control derivativo a un controlador proporcional, se obtiene un controlador de alta sensibilidad. Esto significa que responde a la velocidad de cambio del error y produce una corrección significativa antes de que el error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta directamente al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema. Esto permite un valor de ganancia K más grande, lo que resulta en una mejora en la precisión en estado estable [6].

- **PID: acción de control proporcional-integral-derivativa**

Se trata de una estrategia integrada que aprovecha los beneficios de cada una de las tres acciones de control por separado. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene a través de un proceso específico [7].

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + \frac{K_p T_d}{dt} \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Con su función de transferencia como la siguiente:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (9)$$

3.3.4.2 VARIANTES DE LA FORMULACIÓN DEL PID

- **PID Continuo**

El PID continuo es un sistema de control en el que las señales y los cálculos son funciones continuas del tiempo. Se utiliza en sistemas analógicos y en teoría de control clásico [5].

La ecuación del PID continuo en el dominio del tiempo es:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

En un sistema continuo, la integral y la derivada se calculan de forma continua a lo largo del tiempo, implica una representación matemática y procesamiento continuo de las señales [5].

- **PID Discreto**

El PID discreto se refiere a un sistema de control en el que las señales y los cálculos se realizan en instantes discretos de tiempo, típico de los sistemas digitales y controladores embebidos como microcontroladores y PLCs (Controladores Lógicos Programables) [5].

La ecuación del PID discreto es:

$$u(k) = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot T_s \sum_{i=0}^k e[i] + K_d \cdot \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (11)$$

En un sistema discreto, los cálculos son en puntos de tiempo específicos (instantes discretos) y las operaciones de suma y diferencia reemplazan las integrales y derivadas continuas [5].

- **PID paralelo**

El algoritmo conocido como PID no interactivo se refiere a la versión clásica en la que las acciones de control integral y derivativo operan de manera independiente, a pesar de la presencia de un parámetro específico en el controlador (la ganancia proporcional K_p) que afecte a las tres acciones (proporcional, integral y derivativa) [5].

La ecuación 12 expresa al PID paralelo:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d \quad (13)$$

- **PID ideal**

Es un controlador de tipo proporcional (P), integral (I) y derivativo (D). La ecuación del PID ideal está diseñada de tal manera que la ganancia (K_p) tenga un impacto igual en cada una de las tres acciones de control. Esto significa que las acciones proporcional, integral y derivativa se ven afectadas de manera uniforme por cualquier cambio en la ganancia proporcional [5].

La ecuación 14 expresa al PID ideal:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (14)$$

3.3.4.3 SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID

Para los métodos de sintonización necesitamos tener en cuenta siguientes parámetros:

- K = Ganancia del proceso
- τ = Constante de tiempo
- L = Tiempo muerto

Para sintonizar un controlador PID, usamos métodos desarrollados por distintos autores que nos indican cómo ajustar los parámetros anteriores según las características del sistema, estos enfoques ayudan a lograr un rendimiento óptimo y estable del sistema. Entre los principales métodos de sintonización para un controlador PID de un proceso autorregulado tenemos:

- **Ziegler and Nichols**

El método Ziegler-Nichols es uno de los enfoques clásicos para sintonizar controladores PID, especialmente útil en sistemas que presentan oscilaciones. Inicialmente, se desactivan las acciones integral y derivativa del controlador, dejando solo la ganancia proporcional (K). Se incrementa K hasta que el sistema entre en un estado de oscilación sostenida, es decir, oscile sin amortiguarse ni descontrolarse. Este valor se conoce como la ganancia crítica (τ), y el tiempo que tarda en completar un ciclo de oscilación es el período crítico (L). Con estos valores, se pueden calcular los parámetros PID que optimizan la respuesta del sistema [8].

$$K_c = \frac{1.2\tau}{KL} \quad (15)$$

$$T_i = 2L \quad (16)$$

$$T_d = 0.5L \quad (17)$$

- **Lambda**

El método de sintonización Lambda se basa en definir un tiempo de ajuste deseado, denominado λ , para el sistema. Este enfoque permite ajustar el controlador PID para lograr un tiempo de respuesta específico, controlando la rapidez con que el sistema se estabiliza tras una perturbación. Se trata de un enfoque flexible que se puede adaptar a diferentes necesidades de respuesta del sistema, permitiendo un control más fino y ajustado en función del desempeño deseado [9].

$$K_c = \frac{1}{K \left(\frac{\frac{L}{2} + \tau}{\frac{L}{2} + T_{CL}} \right)} \quad (18)$$

$$T_i = \tau + \frac{L}{2} \quad (19)$$

$$T_d = \frac{\tau L}{L + 2\tau} \quad (20)$$

- **Borresen and Grindal**

Este método de sintonización para controladores PID se basa en la identificación de las características dinámicas del sistema, como la ganancia y el tiempo de retardo. Se utiliza para ajustar los parámetros del PID de manera que el sistema responda de manera óptima a perturbaciones, minimizando el error y mejorando la estabilidad. Borresen y Grindal proponen reglas específicas basadas en la modelización del sistema, lo que permite una sintonización más precisa en comparación con métodos más generales [10].

$$K_c = \frac{\tau}{KL} \quad (21)$$

$$T_i = 3L \quad (22)$$

$$T_d = 0.5L \quad (23)$$

- **Callender**

El método Callender de sintonización PID está diseñado para sistemas con retardos importantes. Se enfoca en mejorar la respuesta del sistema mediante el ajuste de los parámetros del PID para compensar los efectos del retardo. Se basa en la identificación precisa del tiempo de retardo y la dinámica del sistema, proporcionando un ajuste que minimiza el impacto negativo del retardo en la respuesta del sistema. Es especialmente útil en procesos industriales donde los tiempos de retardo pueden afectar significativamente la calidad del control [10].

$$K_c = \frac{1.066}{KL} \quad (24)$$

$$T_i = 1.418L \quad (25)$$

$$T_d = 0.353L \quad (26)$$

Para ajustar los parámetros internos de un controlador PID, se efectúa un cálculo matemático previamente establecidos por los métodos de sintonización creados anteriormente por diferentes autores como se muestra en la Tabla 2, la cual es un resumen de las fórmulas de cada uno de los métodos en donde se obtienen valores que posteriormente se ingresaran en el bloque PID de Simulink [11].

Tabla 3.1 Métodos de sintonización de un controlador PID [11]

MÉTODO	K_c	T_i	T_d
Ziegler and Nichols	$\frac{1.2\tau}{KL}$	$2L$	$0.5L$
Lambda	$\frac{1}{K\left(\frac{L}{2} + T_{CL}\right)}$ TCL: τ a 3τ	$\tau + \frac{L}{2}$	$\frac{\tau L}{L + 2\tau}$
Borresen and Grindal	$\frac{\tau}{KL}$	$3L$	$0.5L$
Callender	$\frac{1.066}{KL}$	$1.418L$	$0.353L$

3.3.4.4 LA VARIANTE I-PD

El I-PD es una modificación del clásico controlador PID, diseñada para minimizar las oscilaciones bruscas en la salida del sistema, donde el error se integra y luego se resta de la suma de las partes proporcional y derivativa de la señal de salida. En la Figura 5, se describe de manera clara la variante I-PD.

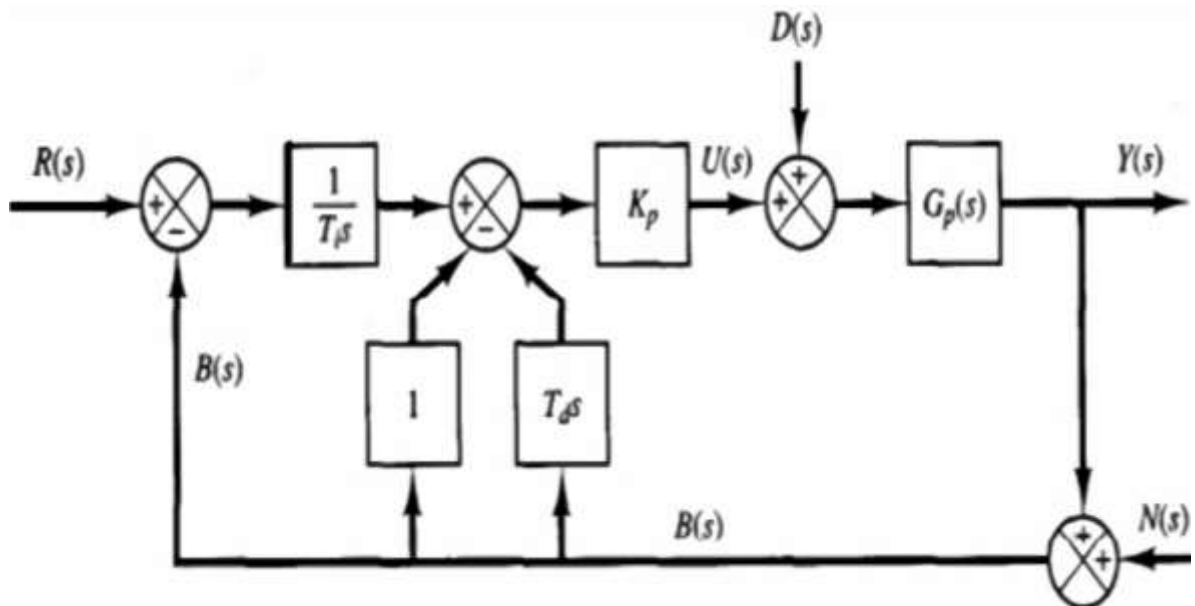


Figura 3.3 Esquema de variante I-PD [12]

Cuando la entrada de referencia es una función escalón, tanto el control PID como su variante PI-D, generan una respuesta escalonada en la señal manipulada. Sin embargo, en muchas situaciones, un cambio abrupto en la señal manipulada no es deseable. Para evitar este inconveniente, es posible trasladar las acciones proporcional y derivativa a la trayectoria de realimentación, de manera que estas solo afecten la señal de realimentación, sin impactar directamente la señal manipulada [12].

La ecuación 15 muestra tal esquema de forma matemática, enfocado hacia la señal manipulada se obtiene mediante

$$u(s) = K_p \frac{1}{T_i s} R(s) - K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) B(s) \quad (27)$$

Note que la entrada de referencia $R(s)$ se aplica únicamente en la parte del control integral. Por lo tanto, en el control I-PD, la acción integral es esencial para asegurar el funcionamiento correcto del sistema de control [12].

La función de transferencia en lazo cerrado $\frac{Y(s)}{R(s)}$, en ausencia de perturbaciones y ruido, se determina mediante la siguiente relación:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \left(\frac{1}{T_i s} \right) \frac{K_p G_p(s)}{1 + K_p G_p(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)} \quad (28)$$

El error se integra, mientras que las acciones proporcional y derivativa se suman y se restan directamente en la salida. Este enfoque permite suavizar la respuesta del sistema, lo que es crucial en procesos donde los cambios repentinos pueden ser problemáticos.

En resumen:

- Se elimina la rama proporcional y derivativa en la entrada.
- Se agrega un sumador para combinar las acciones K_p y $T_d s$ en la salida.
- Se resta esta combinación de la salida del integrador antes de aplicar la señal de control al proceso.

3.4 INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

La instrumentación industrial se refiere al conjunto de instrumentos eléctricos utilizados para medir, analizar y controlar aspectos físicos tanto eléctricos como no eléctricos en procesos industriales. En esencia, la instrumentación industrial permite medir cantidades específicas, transmitir los valores medidos y aplicar control, ya sea manual o automático. En operaciones de control automático, la señal de control enviada por la CPU a los dispositivos de control regula estas cantidades variables. Los sensores leen datos de campo como caudal, presión, temperatura, desplazamiento, vibraciones, y transmiten esta información a un sistema de control, que suelen ser autómatas programables (PLC) o sistemas de control distribuidos (DCS) en la industria [13].

3.4.1 SENSORES DE TEMPERATURA

Un sensor de temperatura es un dispositivo que mide la temperatura de su entorno y la convierte en una señal que puede ser leída y procesada por otros sistemas. Estos sensores son esenciales en una amplia variedad de aplicaciones, desde la industria hasta la electrónica y el control climático [14].

3.4.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

- **Sensores de contacto**

Termopares: Consisten en dos conductores de metales diferentes unidos en un punto conocido como la unión de medida. Cuando hay una diferencia de temperatura entre la unión de medida y la unión de referencia, se genera una tensión que es proporcional a esa diferencia de temperatura [14]. Un claro ejemplo de ellos se observa en la Figura 3.6, donde se puede ver algunos tipos de ello

Termistores: Son resistencias sensibles a la temperatura, hechas de materiales semiconductores. Existen dos tipos principales: NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo), cuya resistencia disminuye al aumentar la temperatura, y PTC (Coeficiente de Temperatura Positivo), cuya resistencia aumenta con la temperatura [14].

RTD (Detector de Temperatura de Resistencia): Utilizan la relación entre la temperatura y la resistencia eléctrica de un material, comúnmente platino. A medida que la temperatura sube, la resistencia del RTD también aumenta de manera predecible [14].



Figura 3.6 Sensores de contacto termopares [14]

- **Sensores sin contacto**

Pirómetros Infrarrojos: Miden la radiación infrarroja emitida por un objeto para determinar su temperatura sin necesidad de contacto físico. Son ideales para medir temperaturas muy altas o de objetos en movimiento [14]. En la Figura 3.7 se puede evidenciar a uno de ellos.

Sensores de Imagen Térmica: Utilizan cámaras infrarrojas para capturar la radiación térmica de una superficie y crear una imagen que representa las variaciones de temperatura [14].



Figura 3.7 Sensor infrarrojo funciona sin contacto [14]

3.5 SOFTWARE

3.5.1 MATLAB - SIMULINK

Simulink es una herramienta gráfica para la simulación y el modelado de sistemas dinámicos. Como parte del entorno de Matlab (Programa de computadora que se utiliza para hacer cálculos matemáticos, crear gráficos y analizar datos), proporciona una interfaz basada en bloques que permite construir modelos de sistemas de control, procesamiento de señales, comunicaciones y otros sistemas dinámicos. Su uso es común en la industria, la educación y la investigación para desarrollar, simular y probar sistemas complejos [15].

3.5.1.1 Características de Simulink

- Entorno Gráfico de Modelado: Facilita el diseño de sistemas y algoritmos mediante la conexión de bloques funcionales que representan componentes del sistema.
- Simulación en Tiempo Real: Ofrece la capacidad de simular el comportamiento de sistemas en tiempo real, esencial para aplicaciones de control y procesamiento de señales.
- Integración con Matlab: Permite el uso de funciones y scripts de Matlab dentro de los modelos de Simulink, proporcionando herramientas poderosas para análisis y simulación.
- Bibliotecas de Bloques Extensivas: Incluye una amplia gama de bloques para el modelado de sistemas de control, señales, comunicaciones, mecánicos, eléctricos, hidráulicos, entre otros.
- Generación Automática de Código: Permite generar código C, C++, HDL y otros lenguajes a partir de los modelos de Simulink, facilitando su implementación en hardware embebido.

3.5.1.2 Uso de Simulink en Procesos de Control Industrial

Simulink es especialmente útil en el desarrollo de sistemas de control industrial debido a sus capacidades de modelado, simulación y generación de código [16].

Sus aplicaciones incluyen:

1. Modelado de Sistemas de Control: Creación de modelos detallados de sistemas de control, como controladores PID, avanzados y lógica de control.
2. Simulación de Procesos: Simulación de procesos industriales para optimizar el diseño y la operación antes de la implementación física.
3. Optimización y Ajuste de Parámetros: Uso de herramientas de optimización para ajustar automáticamente los parámetros del sistema y cumplir con los objetivos de rendimiento.

3.6 DIAGRAMAS P&ID

P&ID es lo que se define como Diseño de Tuberías y Equipos (DTI), también conocido como Diseño/Dibujo de Tuberías y Equipos (P&ID) en inglés, y es un diagrama que muestra el flujo de tuberías y equipos. incluido en el equipo. Otro posible nombre utilizado para referirse a P&ID es PFD, aunque ahora está obsoleto, en su forma sencilla en inglés (Factory Design). El Diagrama consta de un conjunto de símbolos que nos ayudan a identificar todos los

componentes del proceso como tuberías, número de tuberías y tamaños, valores, controles, alarmas, instrumentos, niveles, presostatos, tuberías, limpieza, explosivos, etc [17].

Los diagramas P&ID han tomado auge en base a la proyección de manera simbólica como se encuentra constituidos los sistemas de procesos que puedan existir en una planta, donde se toman como base la utilización de la norma ISAS5, dicha normativa está vigente para realizar sistemas cerrados de control industrial. Dentro de la Figura 9 se puede ver un ejemplo de diagrama P&ID de una estación de entrenamiento para el control del nivel de temperatura [18].

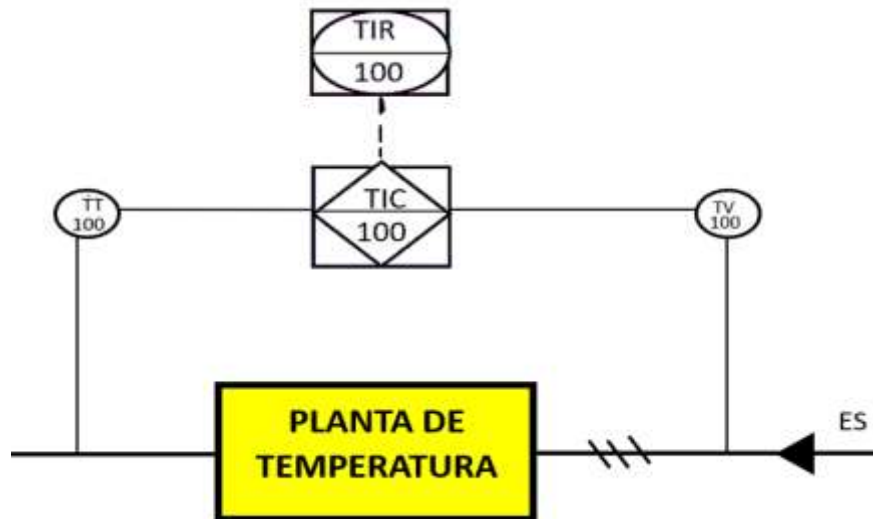


Figura 3.9 Diagrama P&ID de una estación de entrenamiento para el control del nivel de temperatura [19]

Un diagrama P&ID de un proceso industrial es un dibujo esquemático que podemos dar a conocer los criterios para la construcción de un P&ID.

- Los detalles de los instrumentos y tuberías del proceso, tanto las identificaciones como las dimensiones.
- Los esquemas de los sistemas de control y apagado.
- Los requisitos normativos y relativos a la seguridad.
- La información necesaria para la puesta en marcha y la etapa operativa.
- Los nombres y números de los equipos.
- Las válvulas, incluyendo sus identificaciones.
- Las direcciones de flujo.
- La identificación de cada subsistema y sus respectivos componentes.
- Los conductos o líneas de drenaje, de ventilación y de muestreo.
- El control de entradas y salidas.
- La capacidad de los equipos.

- La referencia de interconexiones.
- El sistema de control por computadora, etc.

4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La implementación de un controlador PID y una variante I-PD a un proceso de Temperatura como lo es la planta de Embebido y a otro proceso de nivel, conlleva aspectos técnicos y teóricos los cuales son sustentados en primera instancia mediante la modalidad de investigación bibliográfica, en la cual se recopila información importante 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 cada proceso a realizarse, podemos también decir que utilizaremos el 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 hace utilizará el método cuantitativo para el análisis de los datos obtenidos mediante la simulación de dichos posesos en la parte simulada o real que nos permite evaluar el desempeño de cada uno de los controladores.

4.1 PROCESO FÍSICO DE LA PLANTA DE EMBEBIDO DE TEMPERATURA

El proyecto implementa un sistema de control de temperatura utilizando un transistor TIP31C y un sensor LM35, con algoritmos PID y Fuzzy desarrollados en Arduino. Simulink se utiliza para identificar el modelo matemático, recolectar datos y analizar el desempeño del control. El resultado es un sistema embebido de bajo costo que facilita la experimentación con distintos algoritmos de control digital y el uso de herramientas avanzadas para mejorar el rendimiento del sistema [20].

4.1.1 Requerimientos y propuesta funcional del sistema embebido de temperatura

Como requerimientos del sistema se encuentra:

- Bajo costo: Sensor de temperatura, calentador, controlador, software.
- Rango de operación de 0-100 °C
- Controlador de código abierto que permita implementación de nuevos algoritmos.
- Sistema de análisis con software avanzado.

El sistema embebido consta de las siguientes partes constitutivas:

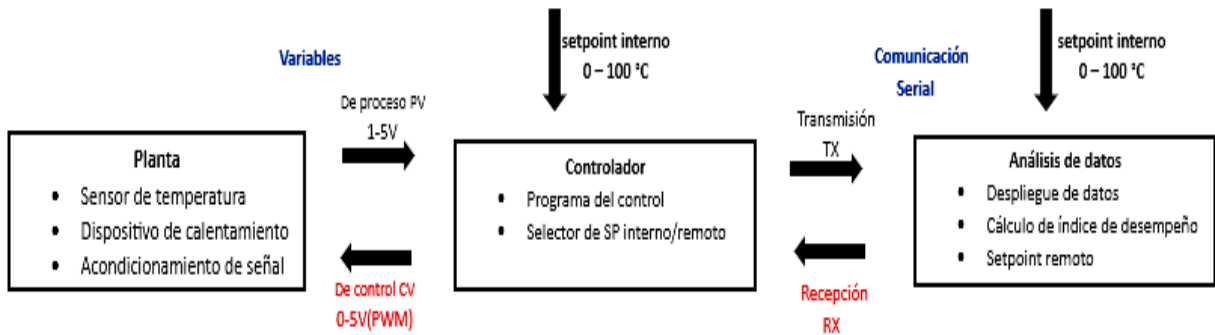


Figura 4.1 Diagrama sobre partes constitutivas del sistema embebido [20]

La Figura 4.1 refleja como la planta, se constituye básicamente de un sensor de temperatura y del dispositivo de calentamiento, la salida normalizada de 1 a 5 V, así mismo la señal de control que ingresará al canal analógico de Arduino es de 0 a 5 V(PWM)[20].

El controlador, donde se incluyen las relaciones matemáticas para un sistema de control de lazo cerrado. Se tiene un setpoint local en un rango de 0 a 100 °C y con un switch selector para escoger setpoint externo (remoto). El análisis de datos, con comunicación serial y capacidad de visualización del proceso y cálculo de parámetros de desempeño. También se puede manipular el setpoint si en el controlador se ha escogido el modo remoto [20].

Elementos utilizados para la construcción del circuito se muestra a continuación:

- Sensor de temperatura, el circuito integrado LM35 por su confiabilidad que es alta pues, ha sido probado en varios proyectos, la respuesta de temperatura es lineal por lo que no necesita hardware de acondicionamiento de señal extra [20].
- Calentador, se encuentra que se pueden aprovechar las características de disipación de calor de un transistor de juntura bipolar, específicamente el TPI31C cuyo costo es relativamente bajo y se puede conseguir en las electrónicas locales [20].
- Controlador, de las diversas opciones se escoge al Arduino UNO, especialmente porque presenta hardware de código abierto que permite implementar fácilmente nuevos algoritmos y funciones. El costo comercial es bajo, además que su software de programación no tiene valor adicional [20].
- Software de análisis, se halló una buena diferencia de valor entre software pagado y libre, es el caso de Matlab versus Octave; Arduino también ofrece su propio graficador, pero tiene limitadas facilidades para realizar un análisis. Tanto Arduino como Octave serían la elección idónea, sin embargo, son software en desarrollo, que en poco tiempo dispondrán de las librerías adecuadas para un análisis avanzado, al momento no lo

disponen. Se elige Matlab debido a que el sistema embebido está orientado a estudiantes que tienen acceso a una licencia estudiantil, lo que hace su uso factible. [20].

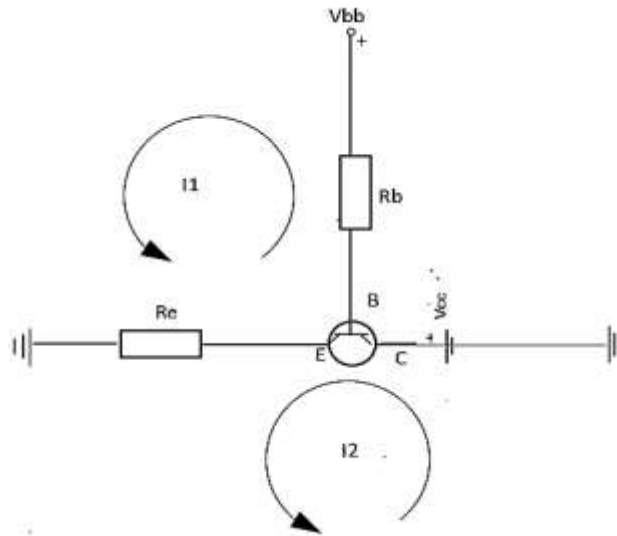


Figura 4.2 Circuito base del sistema embebido

En la Figura 4.2, se tiene un valor de juntura T_j de 100°C , se debe monitorear que la potencia del TBJ no sobrepase los 15W . Si bien el valor de temperatura de la juntura del transistor T_j es de 100°C , se prevé un 10% de factor de seguridad, para poder medir sobre picos de señal y evitar saturación en los distintos canales de medición, esto es un T_j de 90°C [20].

Una vez descrito el proceso del cual se extrae toda la información, se procede a determinar la Ecuación de transferencia de todo el sistema, con la ayuda del software Matlab y con Arduino UNO como tarjeta de adquisición de datos.

4.2 OBTENCIÓN DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

El Arduino UNO se utiliza como una tarjeta de adquisición de datos, permitiendo enlazar los puertos digitales de Simulink con los puertos analógicos de la planta, esto se lo ve claramente paso a paso en el Anexo 3. Enseguida se necesita la conexión de Simulink, Arduino Uno y la planta de embebido de temperatura lo cual se todo el procedimiento en el manual del Anexo 4. Esto ayuda a la recopilación de datos en tiempo real, asegurando una comunicación eficiente entre el software de simulación y el hardware del proceso.

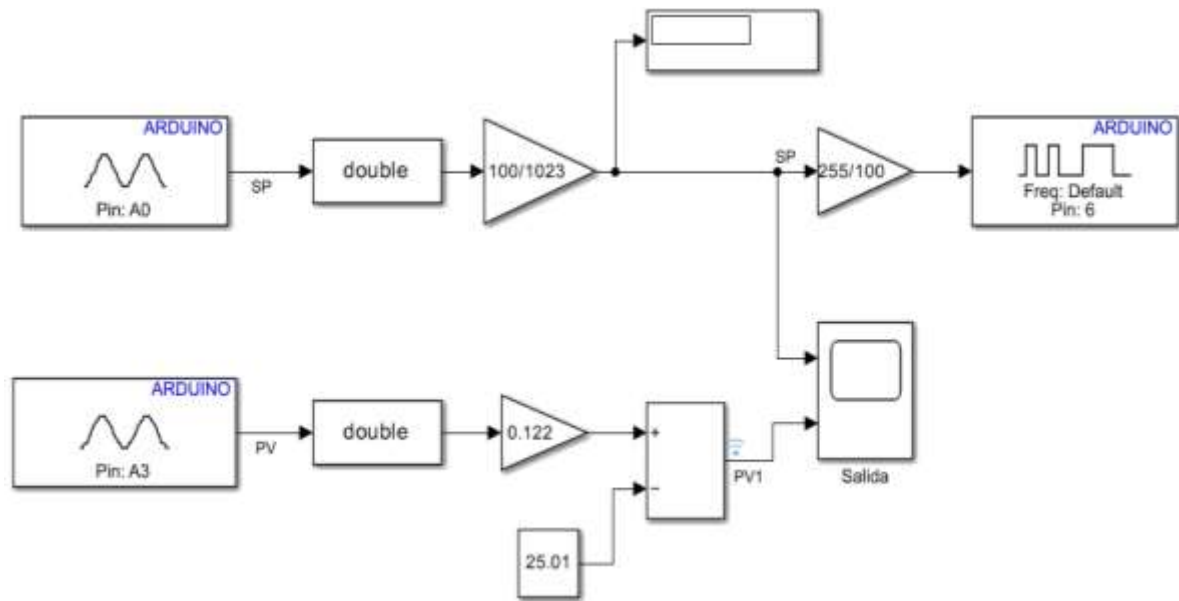


Figura 4.3. Esquema de lazo abierto en simulink con la planta de embebido.

En la Figura 4.3, se observa cómo se realiza la conexión del simulink con el Arduino UNO y la planta de embebido de temperatura el cual se describe con sumamente detalle en el Anexo 3, todo su proceso de conexión.

Una vez que se realiza el control de lazo abierto con la planta, se simula por un lapso de 30 minutos, obteniendo datos en tiempo real, sobre el comportamiento de la planta, pero sobre todo del proceso variable (PV) y control variable (CV), estos datos son los indicativos como varía la temperatura a medida que avanza el tiempo. Este proceso comienza con un tiempo 0 en donde tenemos ya una temperatura ambiente de unos 25°C, con un voltaje como referencia de 2.2V en la salida del PV y después del tiempo corrido tenemos unos 67°C, todos estos datos se los recopiló y almacenó en la salida del Workspace de Matlab como un Out.

Para obtener la función de transferencia, del sistema con los datos ya obtenidos de la simulación, necesitamos recurrir a al mismo Matlab en donde con el comando “SystemIdentification” dentro de Command Windows, se nos despliega una ventanilla en cual nosotros debemos ingresar los datos de la simulación de lazo abierto.

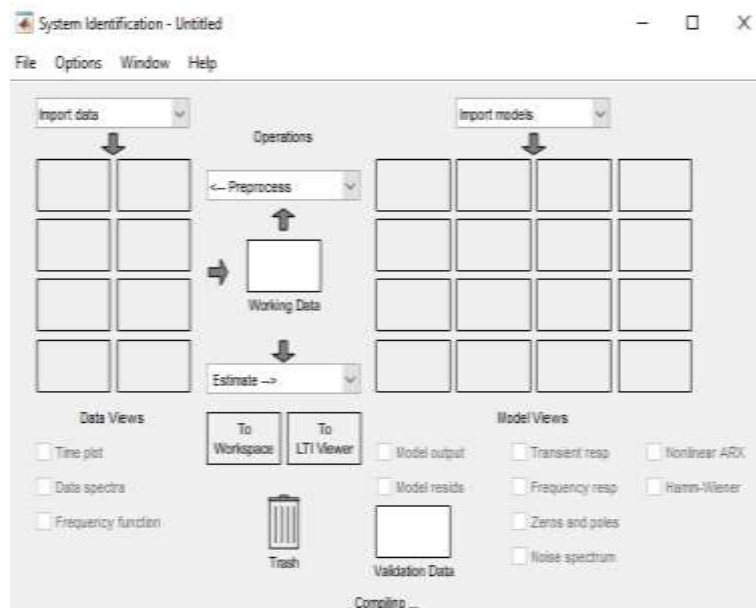
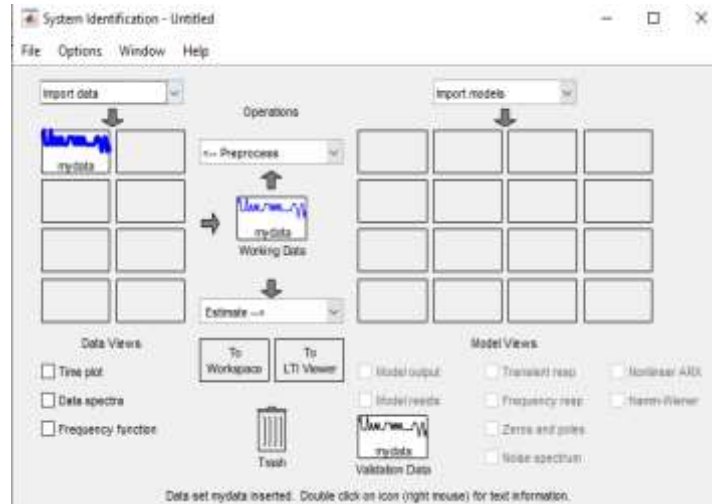


Figura 4.4. SystemIdentification

Para la Figura 4.4, se puede observar cómo se cargan las variables CV y PV, dentro del comando de SystemIdentification y con la opción Process Model, se observa el comportamiento de la planta, además especifica el tiempo de inicio y tiempo de muestreo.



(a) importación de variables



(b) SystemIdentification con las variables

Figura 4.5 Ajustes de SystemIdentification completo

En la Figura 4.5 se observa la curva de estabilidad del proceso de la planta y donde se obtiene el porcentaje de estimación de 95%. Para validar el modelo se debe seleccionar Model output en donde es importante que el porcentaje de estimación sea superior al 80%.

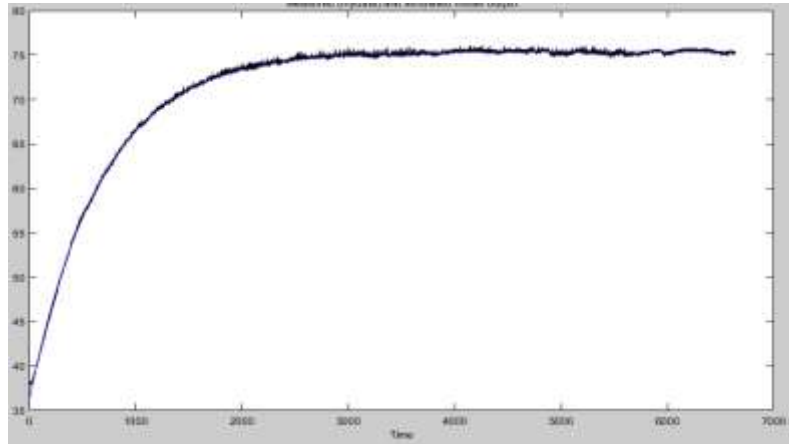


Figura 4.6 Validación y respuesta de la estimación ante una entrada escalón

En la Figura 4.6 se puede determinar el tiempo muerto en un proceso de temperatura controlado por un PID, este es el retraso entre la aplicación de una acción de control (CV) y la respuesta observable en el sistema (PV). Este retraso puede afectar la estabilidad y el rendimiento del controlador, complicando la precisión y efectividad del ajuste de temperatura. Como punto final, el modelo obtenido es el siguiente:

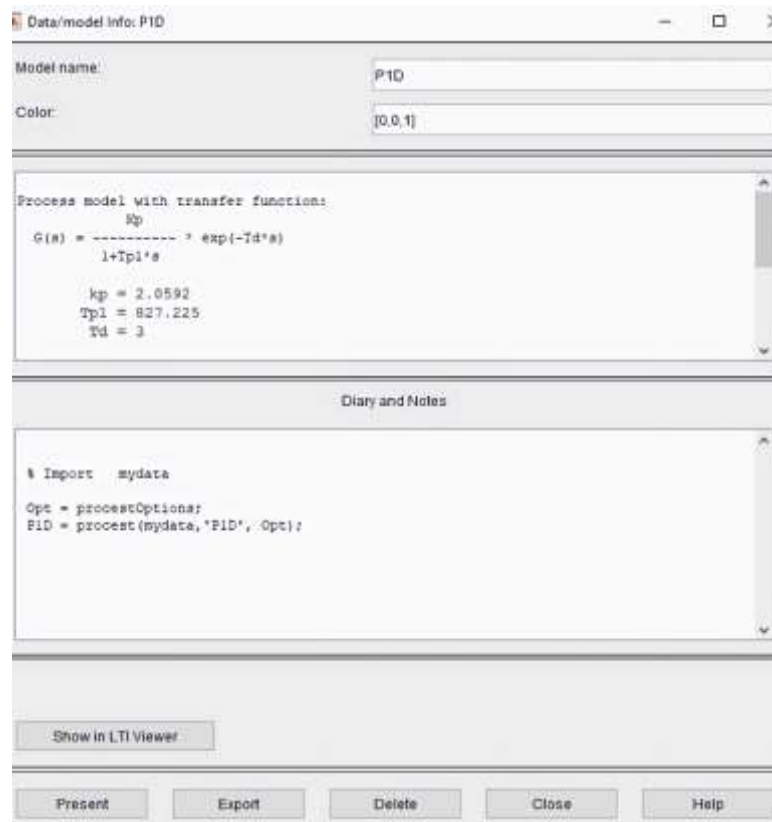


Figura 4.7 Obtención de Ecuación de transferencia

En la Figura 4.7 se puede observar cual es la ecuación de transferencia del sistema, obteniendo:

$$\text{Función de Transferencia} = \frac{2.0592}{1+827s} * e^{-3s} \quad (29)$$

Con la ecuación 29, se puede realizar las actividades de simulación. Cabe recalcar que con los datos que se obtuvieron de la simulación, se realizó una imagen referencial (Figura 30) para determinar el tiempo muerto y constante de tiempo del proceso.

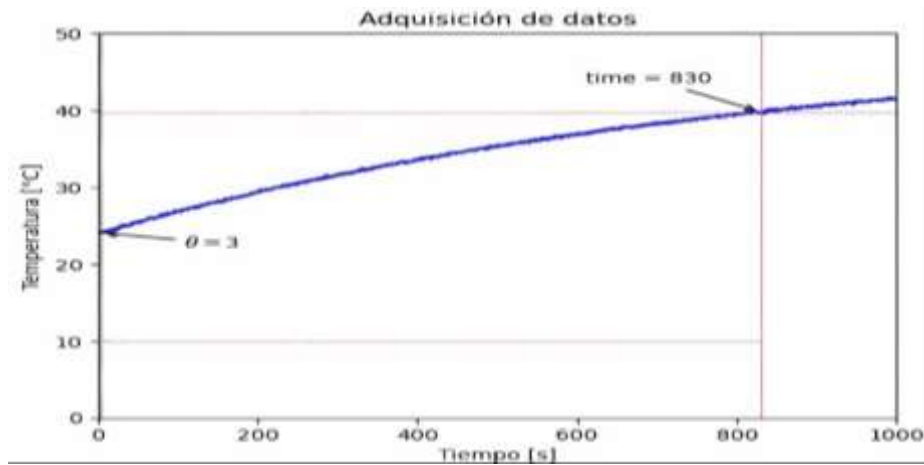


Figura 4.8 Determinación del tiempo muerto en forma gráfica

Para determinar el valor del tiempo muerto del proceso se recurre a la Figura 4.8, en donde se analiza desde el instante $t = 0$, se observa que la variable del proceso permanece estable y se encuentra el punto en el cual comienza a presentarse variaciones en el PV, para este caso aproximadamente se tiene un valor de 3 segundos, es literalmente muy corto, ya que el CV lo hace trabajar de manera instantánea. Se procede a determinar el instante de tiempo en el cual se produce este valor, siendo en este caso 830 segundos, al cual se le resta el valor del tiempo muerto:

$$\tau = \text{time} - L \quad (30)$$

$$\tau = 830 - 3 = 827 \text{ segundos} \quad (31)$$

En donde tenemos las siguientes constantes de este proceso de embebido de temperatura:

- $K(\text{ganancia del proceso}) = 2.059$
- $\tau (\text{constante de tiempo}) = 827 \text{ segundos}$
- $L(\text{tiempo muerto}) = 3 \text{ segundos}$

4.3 PROCESOS SIMULADOS EN SOFTWARE

4.3.1 CONTROLADOR PID EN UN PROCESO SIMULADO

Se procede a realizar un circuito que incluya un setpoint (bloque step), un bloque de suma (\pm), el bloque PID, un bloque para el tiempo muerto (transfer-delay), el bloque de la función de

transferencia y una salida (scope). Se lo ve claramente en la Figura 4.9.

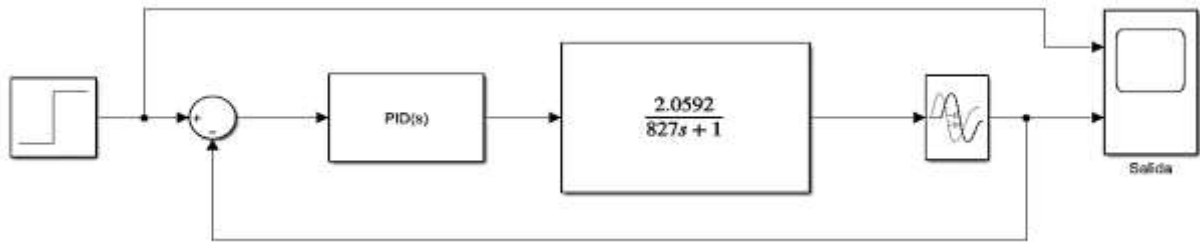


Figura 4.9 Construcción del controlador PID simulado

4.3.1.1 CÁLCULO DE PARÁMETROS DEL PID

Como se menciona en la Tabla 3.1, se tiene varios métodos de sintonización, los mismos que ayudan a determinar los valores de k_c , k_i y t_d ; para una correcta sintonización interna del PID.

- **Ziegler y Nichols**

$$K_c = \frac{1,2\tau}{KL} = \frac{1,2 * (827)}{(2,0592) * (3)} = 160,65 \quad (32)$$

$$T_i = 2L = 2 * (3) = 6 \quad (33)$$

$$d = 0,5(L) = 0,5 * (3) = 1,5 \quad (34)$$

- **Lambda**

$$K_c = \frac{1}{K} * \frac{\frac{L}{2} + \tau}{\frac{L}{2} + \tau cl} = \frac{1}{1,0592} * \frac{\frac{3}{2} + 827}{\frac{3}{2} + 827} = 0,4856 \quad (35)$$

$$T_i = \tau + \frac{L}{2} = 827 + \frac{3}{2} = 828,5 \quad (36)$$

$$T_d = \frac{\tau L}{L + 2T} = \frac{827 * 3}{3 + 2 * 827} = 1,4978 \quad (37)$$

- **Borresen y Grindal**

$$K_c = \frac{\tau}{KL} = \frac{827}{2,058(3)} = 133,87 \quad (38)$$

$$T_i = 3L = 3(3) = 9 \quad (39)$$

$$T_d = 0,5(L) = 0,5(3) = 1,5 \quad (40)$$

- **Callender**

$$Kc = \frac{1,066}{KL} = \frac{1,066}{(2,0592)(3)} = 0,1724 \quad (41)$$

$$Ti = 1,418L = 1,418(3) = 4,461 \quad (42)$$

$$Td = 0,353(3) = 0,353(3) = 1,059 \quad (43)$$

- **Tabla resumen de parámetros internos PID**

Tabla 4.1 Sintonización del Controlador PID

MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN	PID				PID reajustado			
	kc	ti	td	FILTRO	kc	ti	td	FILTRO
Método de Ziegler y Nichols	160,65	6	1,5	100	60	5	90	4
Lambda	0,4856	828,5	1,4973	100	0,5	0,05	0,8	0,7
Borresen and Grindal	133,87	9	1,5	100	110	11	170	3
Callender	0,1724	4,461	1,059	100	1	0,038	0,182	4

En la Tabla 4.1, se muestra los resultados de la resolución de cada método, obteniendo dichas constantes de manera práctica. Cabe recalcar que estos valores obtenidos, son referenciales y nosotros para obtener una mejor sintonización y más estable, debemos ajustarlos manualmente, mediante el ensayo y error, ya que dichos resultados son “referenciales”, en donde el programador debe tener el raciocinio suficiente para obtener valores más aproximados.

Con los valores de la Tabla 4.1, se realiza los siguientes procesos:

- PID simulado
- PID real
- I-PD simulado
- I-PD real

4.3.2 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON CONTROL PID SIMULADO

Para analizar los resultados de los distintos métodos de sintonización en un sistema embebido de control de temperatura simulado, se utiliza una función de transferencia representativa del proceso. Cada método de sintonización es evaluado determinando los diferentes tiempos de respuesta y estabilización, pero ajustando el punto de referencia (setpoint) a un valor fijo de 40°C de temperatura; este análisis compara la eficiencia y el rendimiento de cada método.

4.3.2.1 PID SIMULADO (Ziegler y Nichols)

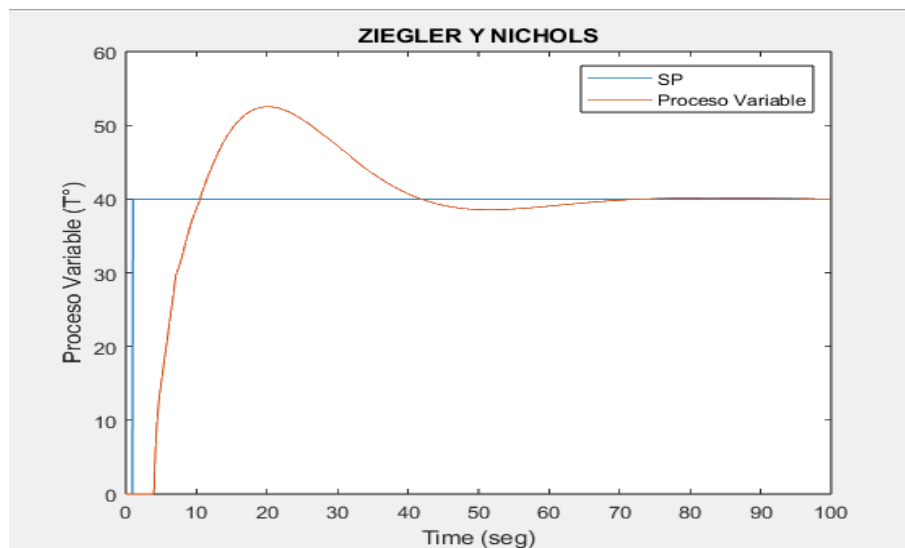


Figura 4.10 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols en 100 segundos

La gráfica ilustrada en la Figura 4.10 de un sistema controlado por un PID, sintonizado según el método de Ziegler y Nichols muestra un tiempo muerto de 3 segundos antes de reaccionar. A los 22 segundos, se observa un sobreimpulso significativo donde el proceso variable supera al setpoint, alcanzando un pico de 52°C. Luego el proceso variable desciende y oscila alrededor del setpoint antes de estabilizarse completamente en 40°C a los 80 segundos. Se refleja una respuesta inicial agresiva, pero con rápida estabilización.

4.3.2.2 PID SIMULADO (lambda)

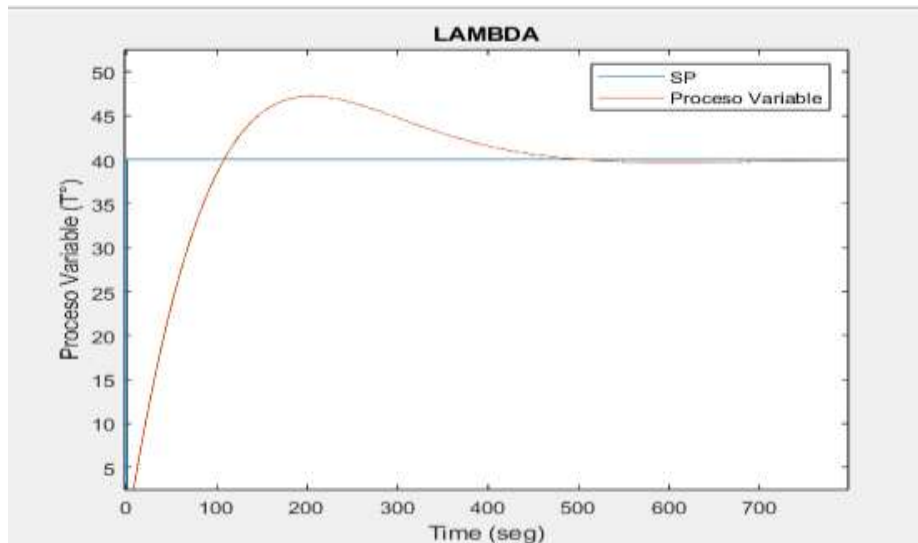


Figura 4.11 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Lambda en 800 segundos

Se conoce mediante la Figura 4.11, la salida del controlador PID y una prueba de 800 segundos. El sistema tiene un tiempo muerto de 5 segundos y se estabiliza en 700 segundos. La gráfica evidencia un sobreimpulso donde la variable de proceso (PV) supera el setpoint y alcanza 47° a los 220 segundos. Este comportamiento refleja una respuesta menos agresiva del sistema antes de estabilizarse. El método Lambda es menos agresivo que el método anterior, pero requiere más tiempo para estabilizarse, reduce los transitorios y utiliza valores de sintonización menores.

4.3.2.3 PID SIMULADO (Borresen and Grindal)

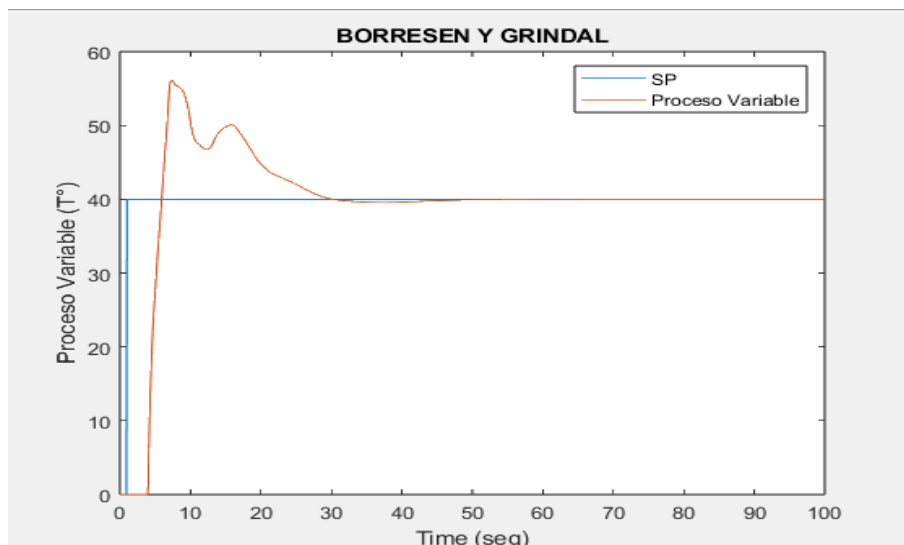


Figura 4.12 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Borresen y Grindal en 100 segundos

Esta prueba se efectúa durante 100 segundos, como se observa en la Figura 4.12, donde se evidencia que el sistema tiene un tiempo muerto de 3 segundos y se estabiliza en 55 segundos. La gráfica muestra dos sobreimpulsos significativos: el primero alcanza 57° a los 9 segundos y el segundo 50° a los 18 segundos. Estos sobreimpulsos indican una respuesta agresiva del sistema. Aunque la estabilización es rápida en 55 segundos, el método utilizado es más agresivo que el de Ziegler-Nichols. La rápida estabilización puede ser ventajosa en aplicaciones que requieren tiempos de respuesta cortos, aunque a costa de una mayor agresividad en los transitorios.

4.3.2.4 PID SIMULADO (Callender)

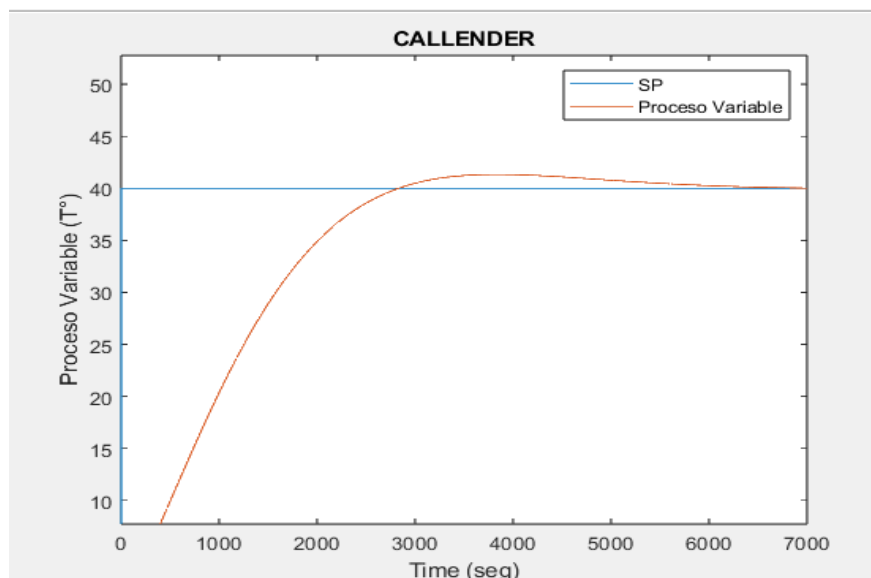


Figura 4.13 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Callender en 7000 segundos.

La Figura 4.13, muestra la salida del controlador PID en una prueba simulada de 7000 segundos. El sistema presenta un tiempo muerto de 300 segundos y se estabiliza en 6500 segundos. La gráfica evidencia un pequeño sobreimpulso donde la variable de proceso (PV) supera el setpoint y alcanza 42° a los 3900 segundos. Este sobreimpulso indica una respuesta muy sutil del sistema antes de estabilizarse, siendo casi imperceptible. Este método similar al de Lambda, es menos agresivo y más suave, con menos transitorios, se destaca por su similitud con el de Lambda en cuanto a suavidad y mínima agresividad, aunque requiere un tiempo de estabilización mucho mayor.

4.3.2.5 PID SIMULADO TOTAL (todos los métodos)

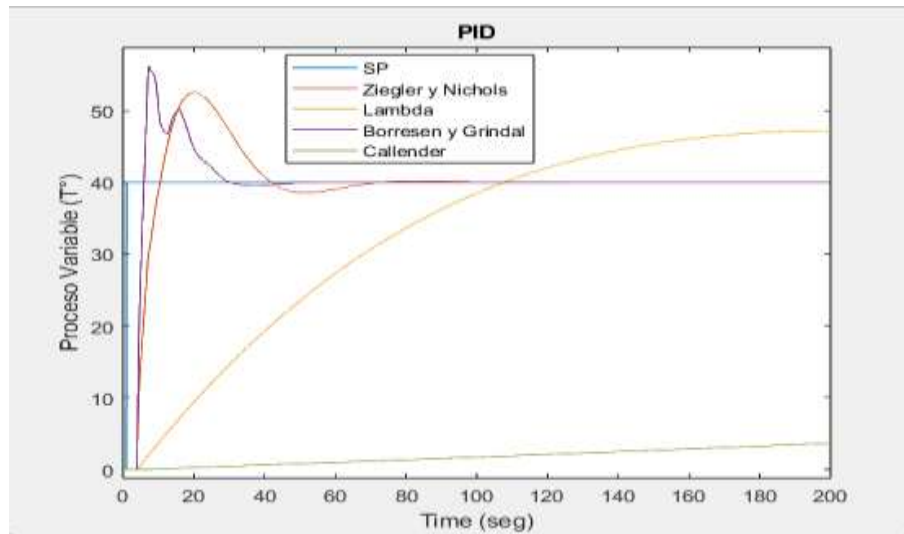


Figura 4.14 Control PID simulado, ajustado con todos los métodos de sintonización en 200 segundos

La Figura 4.14, presenta una comparación de las salidas del controlador PID utilizando todos los métodos discutidos anteriormente, mostrados en una única gráfica. El setpoint se fijó en 40° de temperatura para todos los métodos, y la prueba simulada tuvo una duración de 200 segundos. La mejor estabilización depende de los parámetros internos (K_c , T_i y T_d), configurados dentro del PID para cada método. Los métodos de Ziegler-Nichols y Borresen-Grindal son los más rápidos en estabilizarse, aunque también los más agresivos y con sobreimpulsos. En contraste, los métodos de Lambda y Callender son más lentos, pero proporcionan una estabilización más suave.

4.3.3 VARIANTE I-PD EN UN PROCESO SIMULADO

En la Figura 4.15, se realiza un circuito en Simulink, que incluya la variante I-PD, además se incluye un setpoint (bloque step), tres bloques de suma (\pm), el bloque PID, un bloque para el tiempo muerto (transfer-delay) y una salida (scope). Se puede observar cómo se aumentan bloques de ganancias para los parámetros derivativo e integral.

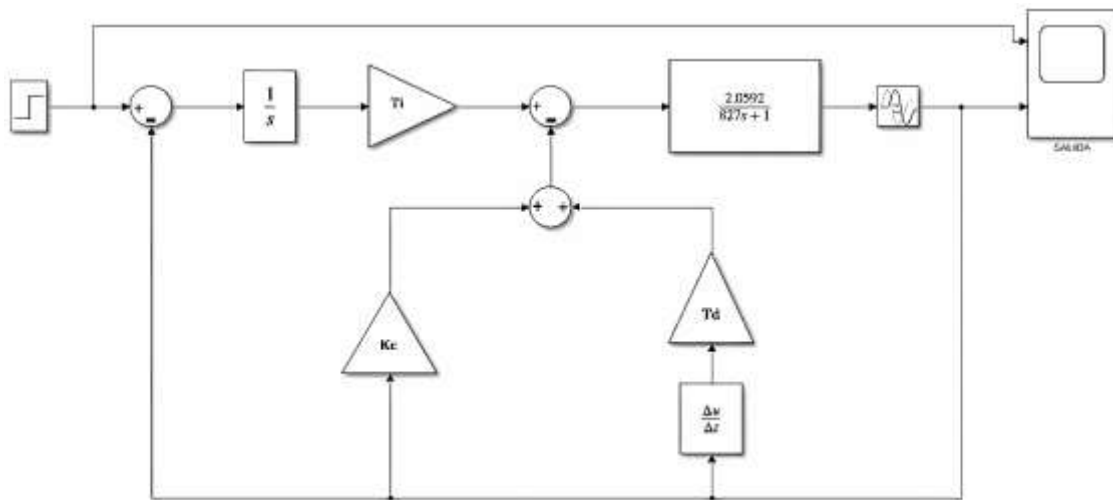


Figura 4.15 Construcción de la variante I-PD en el software

Los parámetros internos del I-PD (K_c , T_i y T_d), son los mismos que los del controlador PID para facilitar una comparación directa entre ambos controladores, además el setpoint se fija en 40° . Esta configuración permite observar cómo varía la respuesta del sistema al cambiar de un controlador PID a un I-PD, destacando las diferencias en el comportamiento de la salida y la eficiencia en la estabilización del proceso.

4.3.4 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON VARIANTE I-PD SIMULADA

4.3.4.1 I-PD SIMULADO (Ziegler & Nichols)

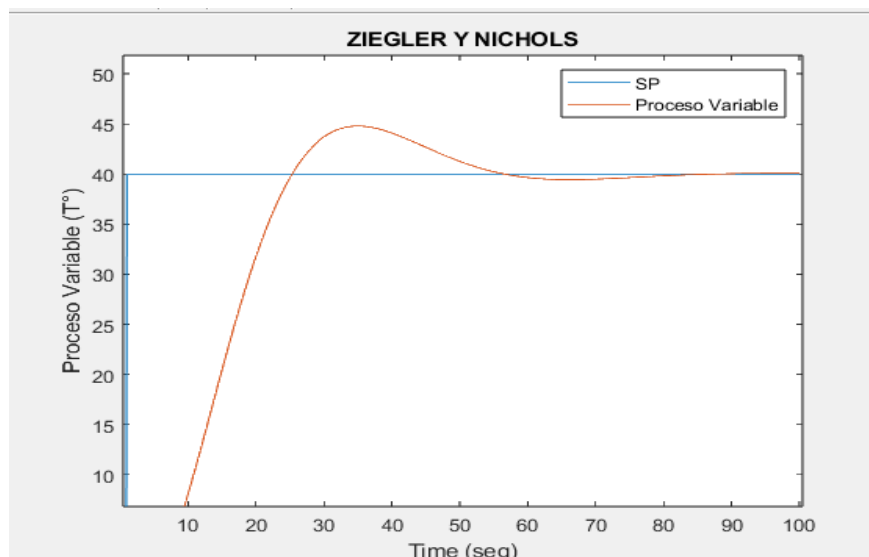


Figura 4.16 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols en 100 segundos

La Figura 4.16, ilustra los resultados de la variante I-PD usando el método de Ziegler-Nichols, con una prueba simulada de 100 segundos. El tiempo muerto del sistema es de 10 segundos, y el tiempo requerido para alcanzar la estabilización es de 80 segundos. Se muestra un sobrepulso de 44°C a los 32 segundos desde el inicio de la simulación.

4.3.4.2 I-PD SIMULADO (Lambda)

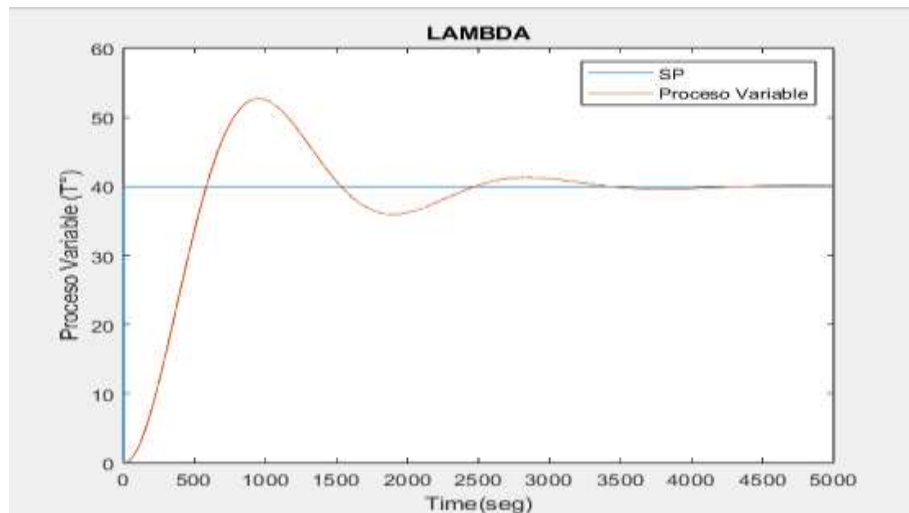


Figura 4.17 Proceso simulado del comportamiento del I-PD, ajustado con parámetros de Lambda en 5000 segundos

La Figura 4.17, presenta los resultados de la variante I-PD en una simulación de 5000 segundos, el sistema exhibe un tiempo muerto de 5 segundos y se estabiliza en 4000 segundos. La gráfica muestra un sobreimpulso notable, donde la variable de proceso (PV) supera el setpoint y alcanza un valor de 53°C a los 1000 segundos desde el inicio de la simulación. Esta simulación es rápida, pero con ausencia de transitorios notables.

4.3.4.3 I-PD SIMULADO (Borresen y Grindal)

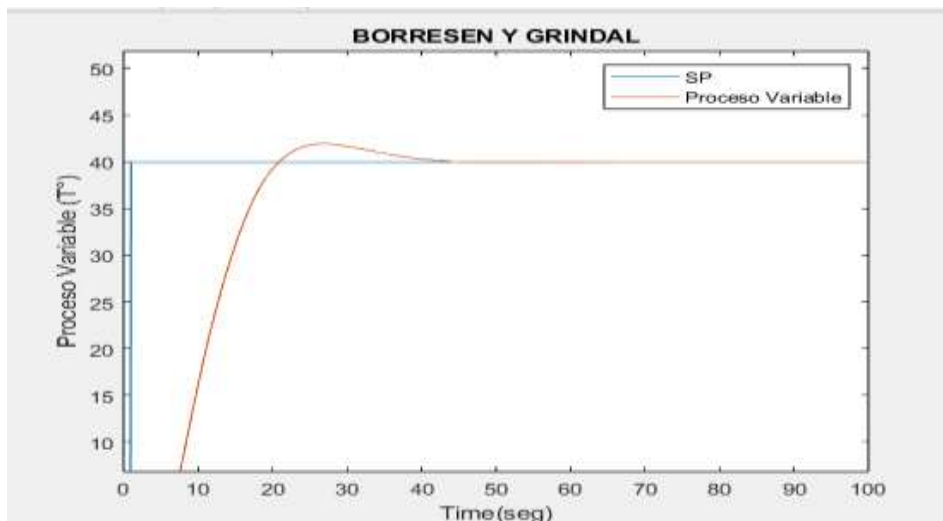


Figura 4.18 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Borresen y Grindal en 100 segundos

En la Figura 4.18, se observa los resultados de la variante I-PD en una simulación con una duración total de 100 segundos. El sistema, se tiene un tiempo muerto de 8 segundos, alcanza la estabilización en 50 segundos. Existe un sobreimpulso pequeño, donde PV supera los 40°C, alcanzando un máximo de 42°C a los 28 segundos desde el inicio de la simulación. Es

importante señalar que en este método ofrece una respuesta más controlada y menos agresiva, logrando una estabilización más suave y eficiente, pero con aumento de tiempo muerto

4.3.4.4 I-PD SIMULADO (Callender)

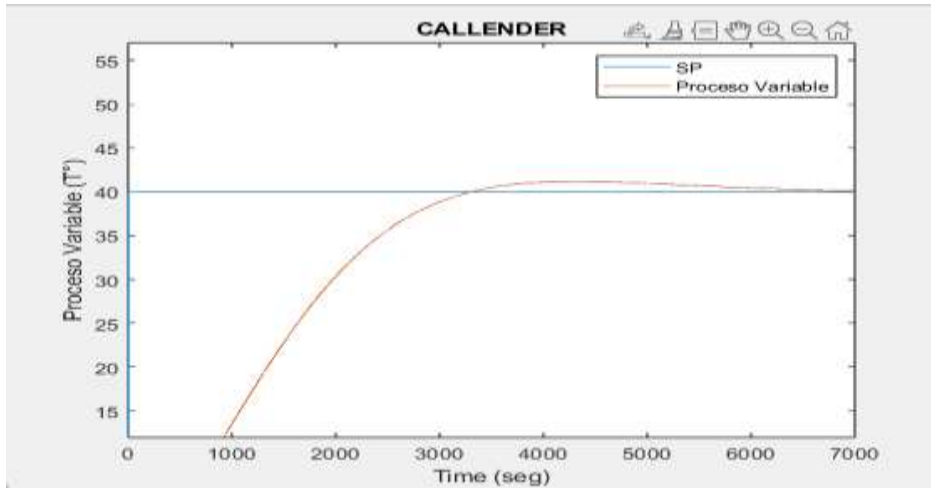


Figura 4.19 Proceso simulado del comportamiento del I-PD, ajustado con parámetros de Callender en 7000 segundos

En la Figura 4.19 se ilustra los resultados obtenidos de la variante I-PD en una simulación con una duración total de 7000 segundos. El sistema presenta un tiempo muerto de 980 segundos y alcanza la estabilización completa a los 6800 segundos. La gráfica revela un sobreimpulso de 41°C a los 4250 segundos desde el inicio de la simulación. Este sobreimpulso sugiere que el sistema tiene una respuesta menos agresiva en comparación con un controlador PID configurado con los mismos parámetros internos, pero es más lenta.

4.3.4.5 IPD SIMULADO (todos los métodos)

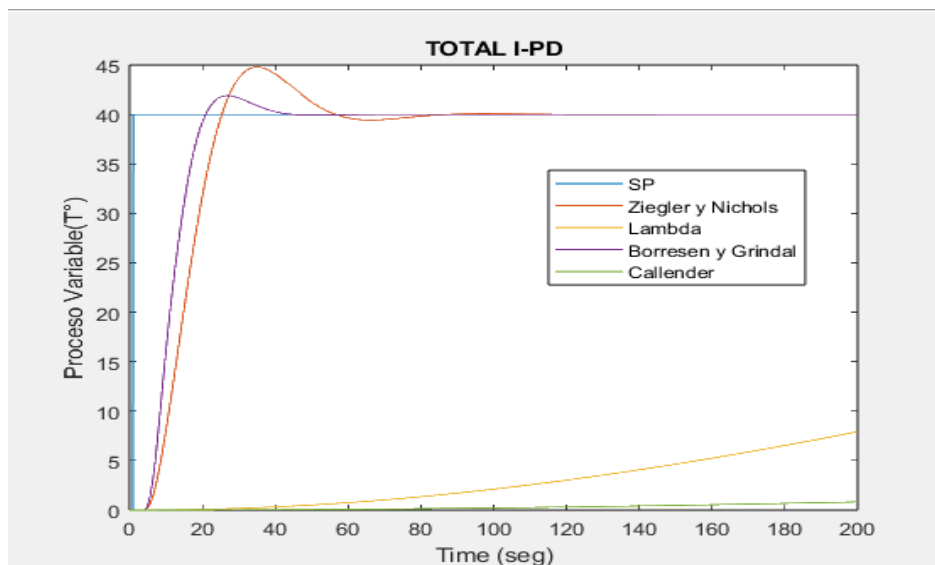


Figura 4.20 Proceso simulado del comportamiento del I-PD, ajustado con todos los métodos de sintonización en 100 segundos

La Figura 4.20, ofrece una comparación exhaustiva de las salidas de la variante I-PD en relación con otros métodos de sintonización, todos representados en una única gráfica. En cada prueba, se estableció un setpoint de 40°C y se ejecutó una simulación con una duración de 200 segundos. Cada método muestra distintos tiempos muertos, y el tiempo necesario para alcanzar la estabilización varía en función de los parámetros internos ajustados, los cuales son equivalentes a los utilizados en los métodos PID.

Los métodos de Ziegler-Nichols y Borresen-Grindal se destacan por su capacidad de estabilización rápida, pero menos agresiva que el PID. En contraste, los métodos de Lambda y Callender, aunque más lentos, ofrecen una estabilización más suave y menos agresiva. Al comparar el I-PD con el PID, se observa que el I-PD, utilizando los mismos parámetros, no solo iguala los tiempos de respuesta del PID, sino que también proporciona una regulación más estable y precisa. Este desempeño superior en términos de suavidad y eficiencia en las simulaciones hace que el I-PD sea una opción preferible para aplicaciones que requieren una respuesta equilibrada y menos agresiva.

4.3.5 CONTROLADOR PID VERSUS VARIANTE I-PD SIMULADOS

4.3.5.1 Ziegler & Nichols

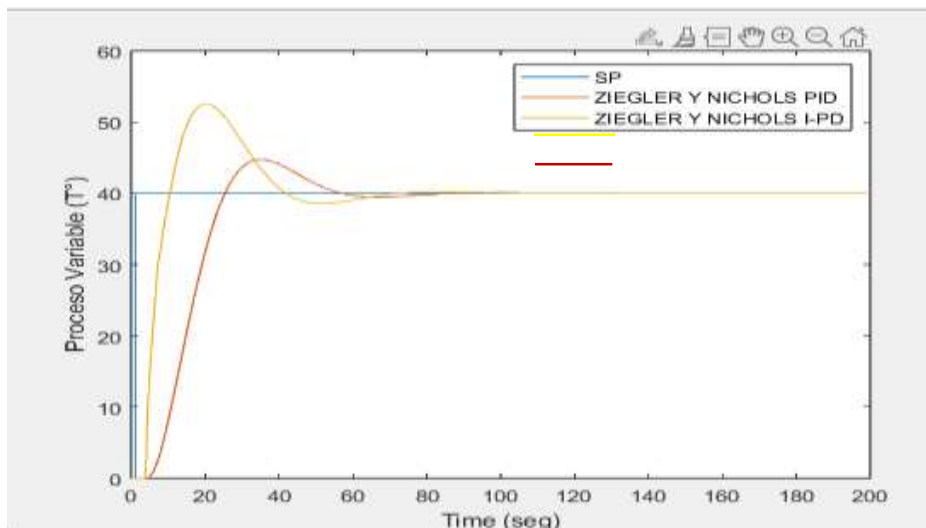


Figura 4.21 Comparación del PID vs I-PD en el método de Ziegler y Nichols

La Figura 4.21 muestra el control de temperatura en Ziegler-Nichols del control PID y su variante I-PD, ambos montados en una sola gráfica, el controlador PID alcanza el pico más alto en 52°C, esto significa que sobrepasa el setpoint con 12° más de temperatura, lo que es igual a un 30% más del valor deseado. El I-PD tiene un sobreimpulso de 44°C, lo que representa un 10% arriba del setpoint. Los dos controladores se estabilizan en el mismo tiempo de 80 segundos, pero la variante I-PD, se estabiliza con un valor de menos 20% diferente del PID.

4.3.5.2 Lambda

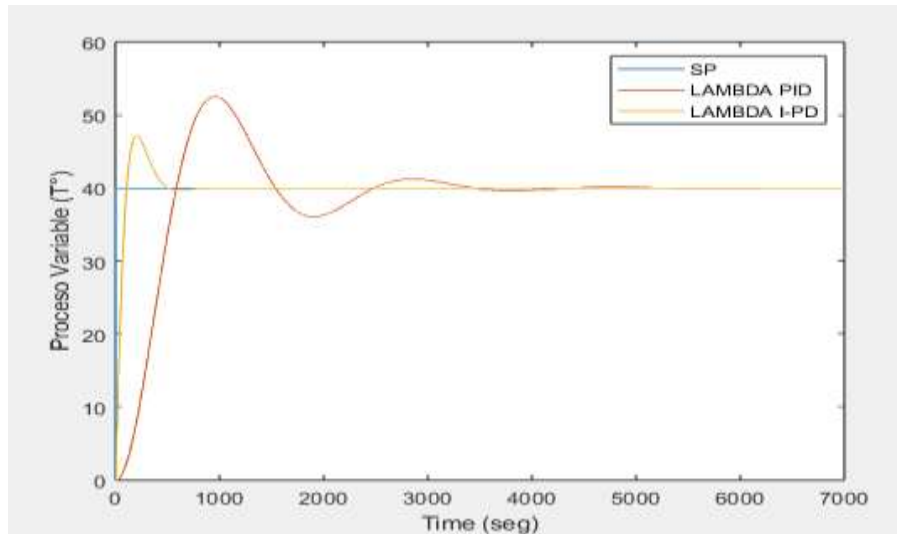


Figura 4.21 Comparación de PID vs I-PD en el método de Lambda.

Mediante la Figura 4.21 se muestra el control de temperatura simulado utilizando el método de Lambda del control PID y su variante I-PD, ambos montados en una sola grafica. Los resultados muestran un sobreimpulso inicial por los dos controladores, el controlador I-PD alcanza el pico de 53°C, esto significa que sobrepasa el setpoint con 13°C de temperatura, representando un 32% de sobreimpulso. Mientras la variante PID tiene un sobreimpulso de 47°C, lo que representa 7°C grados arriba del setpoint (17.5%).

El PID se estabiliza en 500 segundos y el I-PD en 4000 segundos, lo que representa que el PID es más rápido que el I-PD, con un 14.5%.

4.3.5.3 Borresen y Grindal

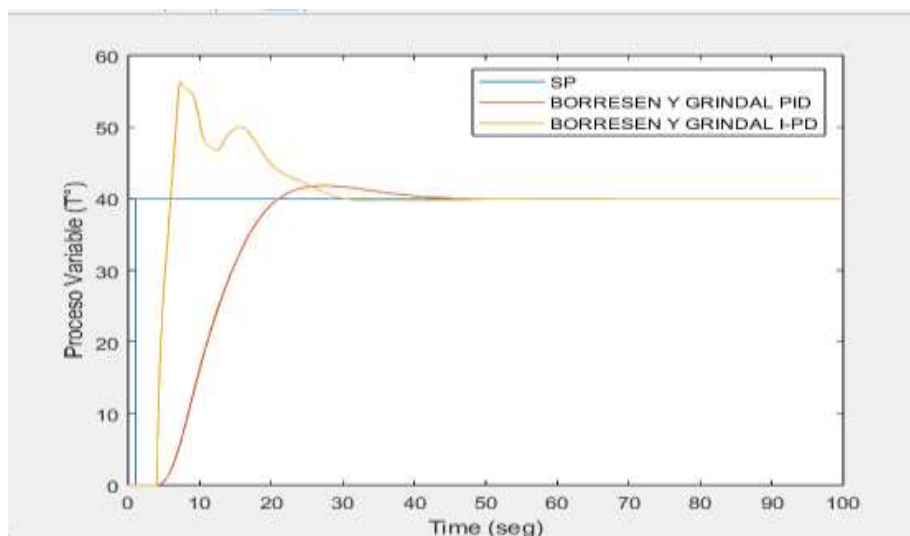


Figura 4.22 Comparación de PID vs I-PD en el método de Borresen y Grindal

En la Figura se muestra el control de temperatura simulado utilizando el método de Borresen y Grindal del control PID y su variante I-PD, ambos montados en una sola grafica. Los resultados muestran un sobreimpulso inicial por los dos controladores; el controlador PID alcanza el pico más alto en 57°C, esto significa que sobrepasa el setpoint con 17°C más de temperatura, representando un 42% de sobreimpulso. Mientras la variante I-PD tiene un sobreimpulso de 42°C, lo que representa 2°C grados arriba del setpoint (5%).

El PID se estabiliza en 30 segundos y el I-PD en 50 segundos, lo que representa que el PID es más rápido que el I-PD, con un 14.5%, lo que representa que el PID es más rápido que el I-PD, con 10 segundos más rápido, pero en cuanto a transitorios el I-PD tiene 37% menos.

4.3.5.4 Callender

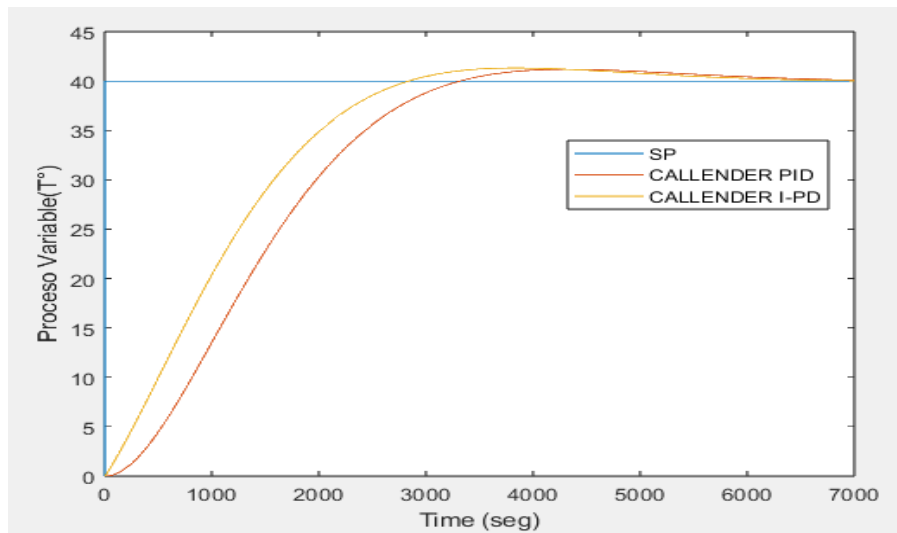


Figura 4.23 Comparación de PID vs I-PD en el método de Callender

La Figura 4.23 muestra el control de temperatura con el método Callender del control PID y su variante I-PD, ambos montados en una sola grafica. Ambos resultados son similares y muestran un sobreimpulso inicial; ambos controladores alcanzan el pico más alto, el PID en 42°C que son 2°C arriba del setpoint (5%) y el I-PD en 41°C representando 1°C por encima del setpoint (2.5%). El PID se estabiliza 300 segundos más rápido que el I-PD ya que este último aumenta su tiempo muerto, la estabilización de ambos es muy similar.

4.4 CONTROLADOR PID EN UN PROCESO REAL DE TEMPERATURA

Se lleva a cabo una simulación del proceso real de control de temperatura, el cual se logra mediante la conexión entre Simulink, Arduino UNO y la planta de embebido de temperatura. Los parámetros internos (K_c , T_i y T_d), de los controladores PID e I-PD se mantienen idénticos a los utilizados en el proceso simulado, lo que permite una comparación detallada y precisa del comportamiento de ambos controladores bajo condiciones controladas.

Durante la prueba, se fija un setpoint de 40° centígrados, con una duración de 1200 segundos. Las entradas y salidas tienen la misma configuración que la simulación del control en lazo abierto, solo se aumenta los bloques PID o su variante, además de líneas de realimentación y el uso de displays para observar cómo ingresan los datos de la planta en el proceso real o simulado Anexo 4.

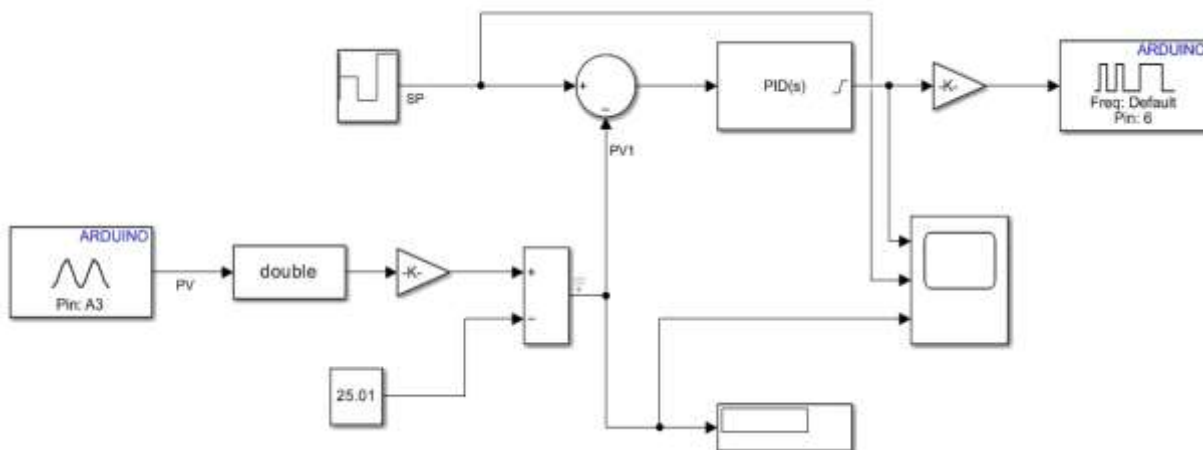


Figura 4.24 Controlador PID en un proceso real de temperatura.

La Figura 4.24 representa el diseño del control PID ya en un ambiente de proceso real en el cual se evalúa la resultante PV en función del tiempo y de su setpoint.

4.4.1 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON CONTROLADOR PID REAL

4.4.1.1 PID REAL (Ziegler y Nichols)

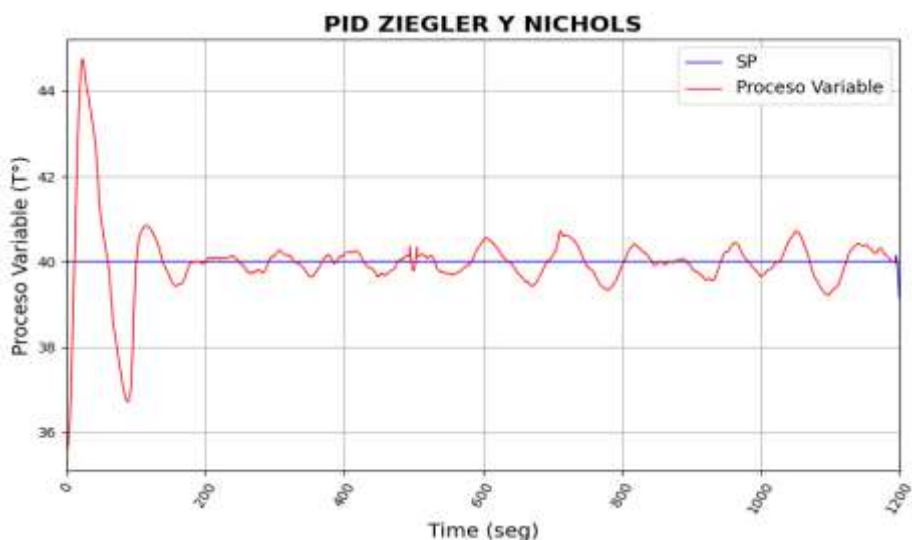


Figura 4.25 Proceso real del PID, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols

En la Figura 4.25, se muestra el resultado de la salida PV del controlador PID. Inicialmente, se observa un tiempo muerto de 3 segundos, el sistema no se estabiliza en los 1200 segundos. La gráfica muestra sobreimpulsos significativos, donde la variable de proceso alcanza un pico máximo de 45°C equivalente a 5°C (12.5%) arriba del setpoint y un bajón de 37°C equivalente 3°C (7.5%) por debajo del sp, se observa que el PID mediante el método de Ziegler-Nichols resulta muy agresiva y no llega al punto de estabilización por el tiempo.

4.4.1.2 PID REAL (Lambda)

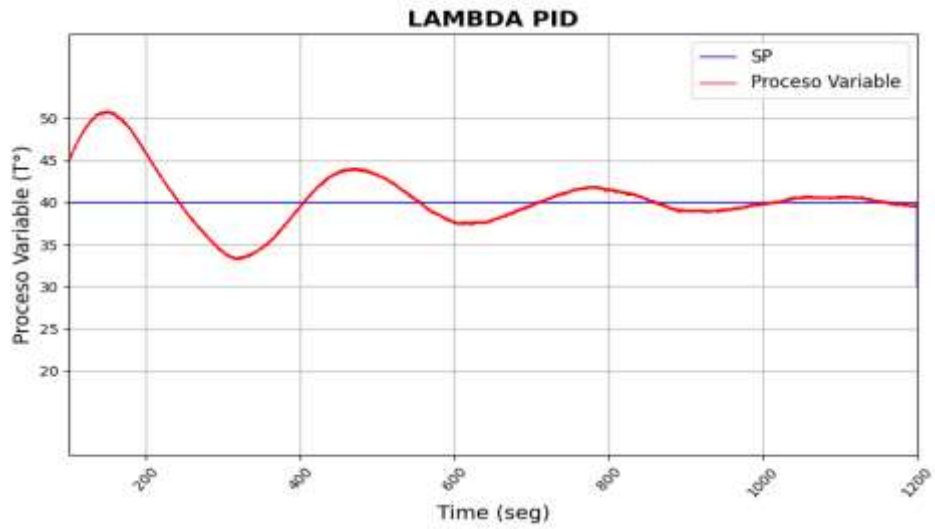


Figura 4.26 Proceso real del PID, ajustado con parámetros de Lambda

En la Figura 4.26, se observa que el tiempo muerto es de 3 segundos. El tiempo para estabilizarse es de 1200 segundos y se observan sobreimpulsos con un valor pico de 51°C teniendo 11°C arriba del setpoint (27.5%) y un mínimo de 34°C siendo 6°C por debajo (15%). La grafica presenta numerosos transitorios y requiere más tiempo para lograr estabilizarse. Esto concuerda con el proceso simulado, que muestra las mismas deficiencias. Por lo tanto, no sería adecuado para un proceso que demande rapidez y eficacia.

4.4.1.3 PID REAL (Borresen y Grindal)

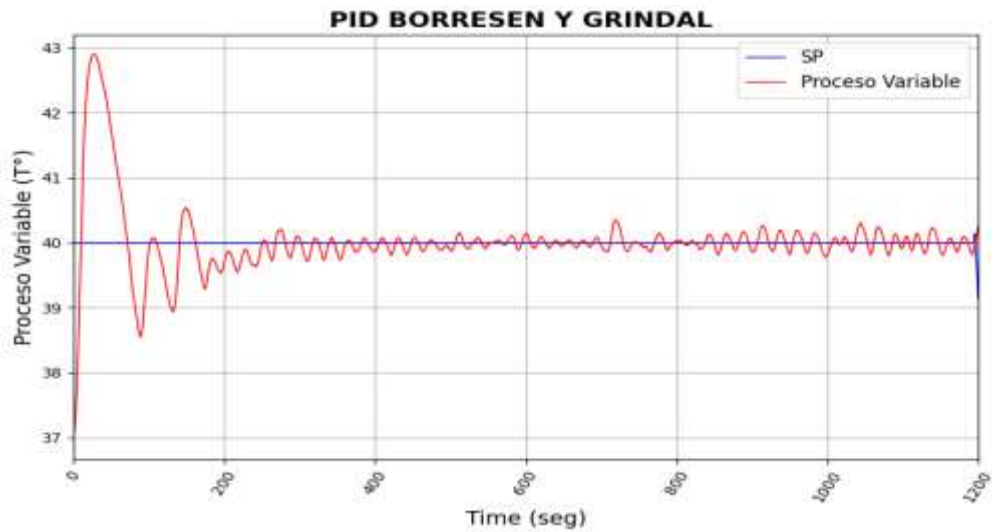


Figura 4.27 Proceso real del PID, ajustado con parámetros de Borresen and Grindal

La Figura 4.27, muestra inicialmente un tiempo muerto de 5 segundos, el sistema se estabiliza en 400 segundos, tiene un pico de 42.9°C (7.25%) y un mínimo de 38.5°C (3.75%). Esta gráfica muestra cómo la sintonización del controlador PID, utilizando el método de Borresen y Grindal es agresiva, pero llega a un rango de estabilización del $\pm 5\%$, mejor que el método anterior.

4.4.1.4 PID REAL (Callender)

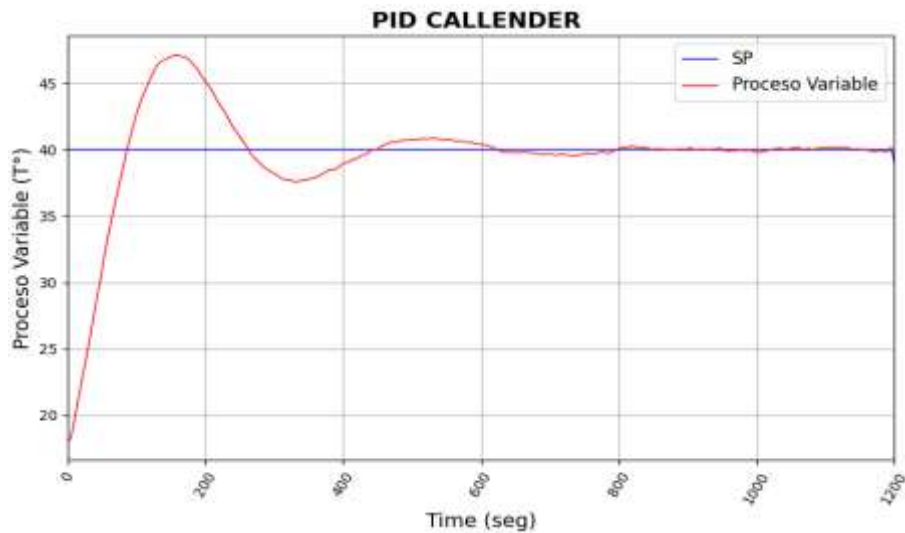


Figura 4.28 Proceso real del PID, ajustado con parámetros de Callender

Para la Figura 4.28, se observa un tiempo muerto de 5 segundos, el sistema se estabiliza en aproximadamente 850 segundos, con un sobreimpulso máximo de 47°C, con 7°C arriba del setpoint (17.5%) y un mínimo de 38°C (5%). El método de Callender es menos agresivo, pero mucho más lento en comparación con otros métodos, adecuado para un control más gradual y estable.

4.4.1.5 PID REAL TOTAL (todos los métodos)

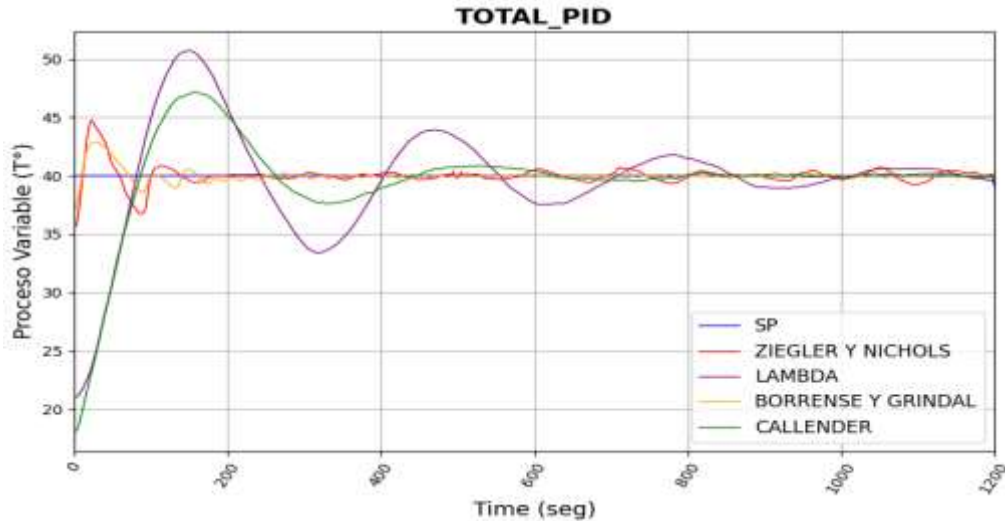


Figura 4.29 Proceso real del PID, ajustado con todos los métodos de sintonización.

La Figura 4.29, presenta una comparación de las salidas del controlador PID real con todos los métodos de sintonización. Los tiempos muertos oscilan entre 3 y 5 segundos, y el tiempo de estabilización varía según los parámetros internos ajustados para cada método. Entre los métodos Ziegler-Nichols y Borresen-Grindal muestran tener una cantidad de transitorios considerables, pero son más rápidos. En contraste Lambda y Callender presentaron un menor número de transitorios, pero un tiempo de estabilización más prolongado.

4.4.2 VARIANTE I-PD EN UN PROCESO REAL DE TEMPERATURA

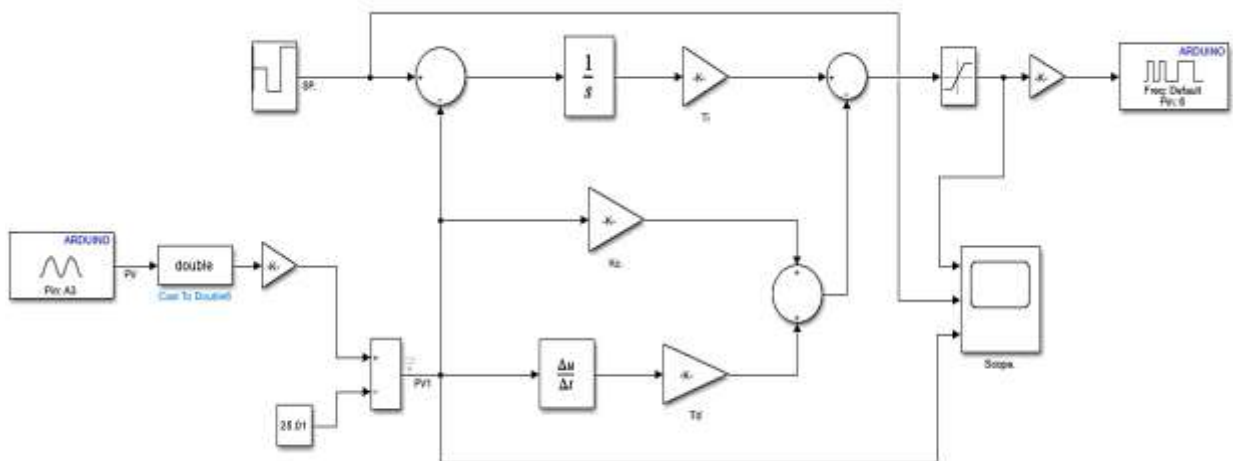


Figura 4.30 Variante I-PD en un proceso real de temperatura

La Figura 4.30, muestra cómo se construyen y colocan los bloques con parámetros internos de la variable I-PD (k_c , t_i y t_d); y la conexión hacia el proceso real es el mismo que se ve en el Anexo 4, en cuanto al ajuste interno son mismos del I-PD simulado, para obtener una correcta sintonización de todo el proceso real.

4.4.3 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON VARIANTE I-PD REAL

4.4.3.1 I-PD REAL (Zieglers y Nichols)

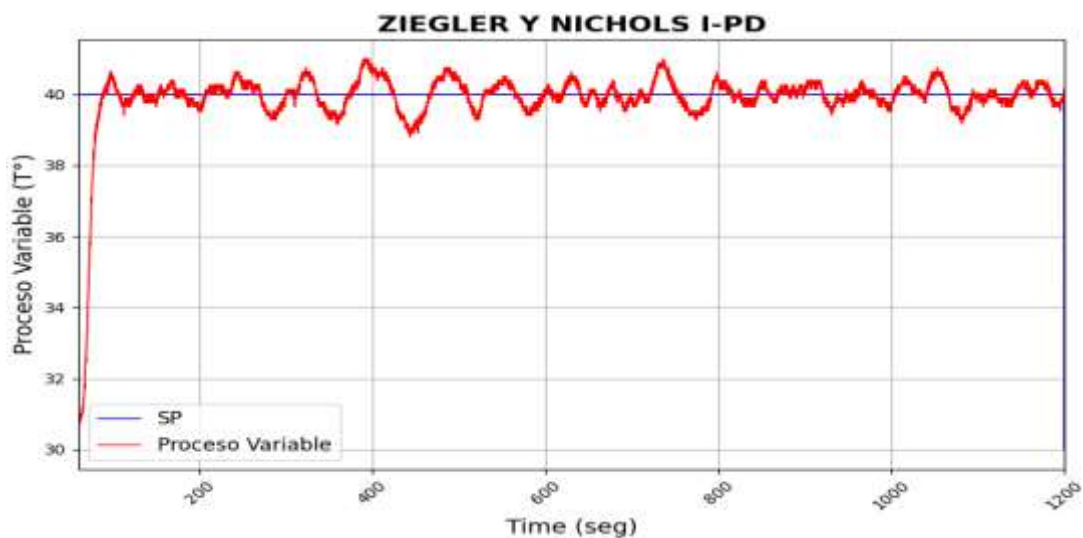


Figura 4.31 Proceso real del I-PD, ajustado con parámetros de Zieglers y Nichols

La Figura 4.31, demuestra el desempeño de la variante I-PD comparado con el PID usando el método de Ziegler-Nichols, con un tiempo muerto de 5 segundos, se estabiliza en un tiempo de 1200 segundos, pero no al punto exacto, la variable de proceso (PV) se encuentra oscilando dentro del 2.5% del setpoint y alcanzando un mínimo de 37°C y un máximo de 45°C. Estos resultados destacan que el controlador PID es superior a su variante I-PD en estabilización.

4.4.3.2 IPD REAL (Lambda)

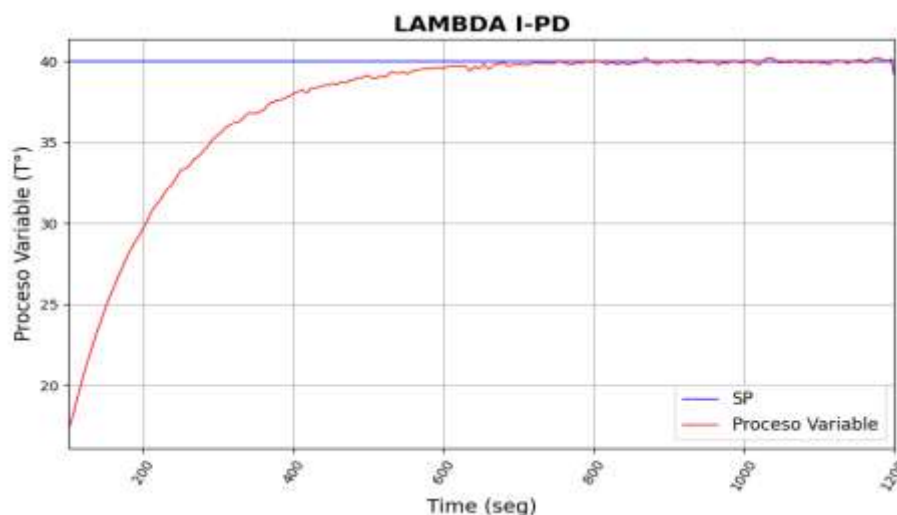


Figura 4.32 Proceso real del IPD, ajustado con parámetros de Lambda

La Figura 4.32, muestra el rendimiento del controlador I-PD con un tiempo muerto inicial de 5 segundos. En 40°C se estabiliza en 600 segundos. Este método muestra una estabilización más

rápida, suave y sin muchos transitorios en comparación con el PID, que presentó más transitorios y un tiempo de estabilización más largo en simulaciones anteriores.

4.4.3.3 I-PD REAL (Borresen y Grindal)



Figura 4.33 Proceso real del I-PD, ajustado con parámetros de Borresen and Grindal

La Figura 4.33, muestra el rendimiento del I-PD con un tiempo muerto de 5 segundos. El sistema se estabiliza en 300 segundos, con la variable de proceso (PV) fluctuando entre 39.8°C y 42°C, pero a medida que avanza el tiempo esta se llega a estabilizar mejor manteniéndose en un rango de $\pm 2\%$ en comparación del setpoint. Este método de Lambda aplicado al I-PD, mejora bastante en comparación de su contraparte, en cuanto a transitorios y estabilidad.

4.4.3.4 I-PD REAL (Callender)

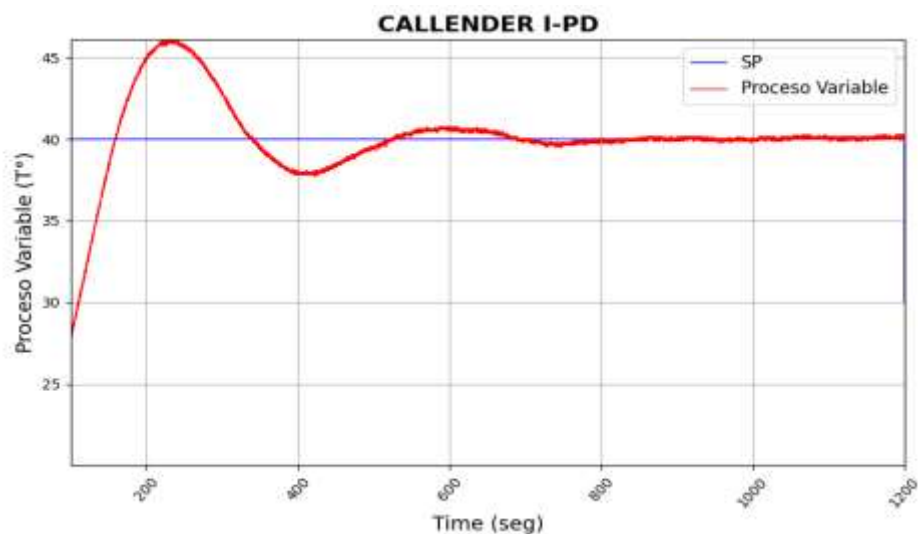


Figura 4.34 Proceso real del I-PD, ajustado con parámetros de Callender

La Figura 4.34, presenta el desempeño de la variante I-PD con un tiempo muerto de 5 segundos. El sistema se estabiliza en 800 segundos, con la variable de proceso alcanzando un mínimo de

37°C (-7.5%) y un máximo de 46°C (11.5%) antes de llegar a la estabilización. Se ilustra que el I-PD y PID tienen una estabilización muy parecida.

4.4.3.5 I-PD REAL TOTAL (todos los métodos)

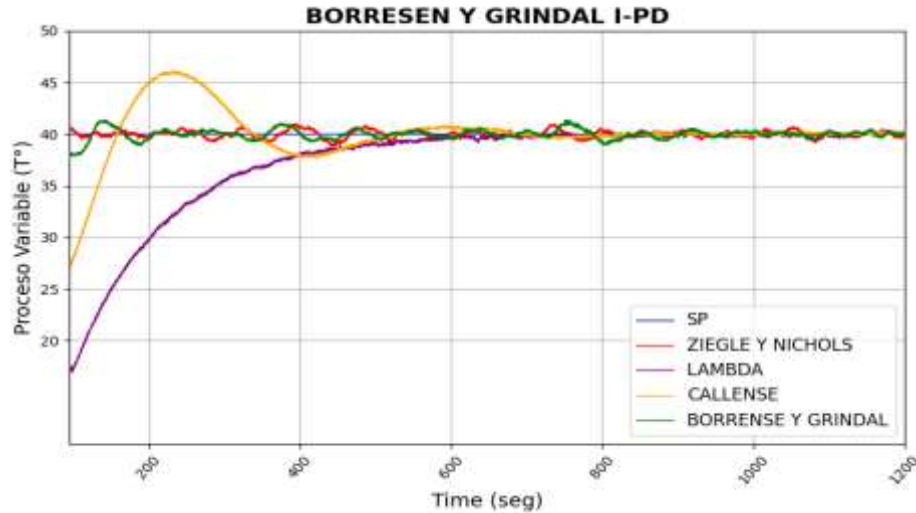


Figura 4.35 Proceso real del comportamiento del I-PD, ajustado con todos los parámetros de sintonización

En la Figura 4.35, se presenta una comparación de las salidas de la variante I-PD utilizando diferentes métodos, representadas en una sola gráfica. Se observa que los cuatro métodos analizados muestran una mejora significativa respecto a los procesos reales con el controlador PID. En particular, estos métodos ofrecen una reducción notable en los transitorios y una estabilización más suave del sistema.

También se aprecia una mejora considerable en la gestión de sobrepulsos y en el tiempo de respuesta. La comparación resalta cómo cada método optimiza diferentes aspectos del control, proporcionando un rendimiento más refinado y eficiente que el PID tradicional, especialmente en términos de estabilidad y rapidez de respuesta, en el proceso de embebido de temperatura.

4.4.4 CONTROLADOR PID VERSUS VARIANTE I-PD REALES

4.4.4.1 Ziegler & Nichols

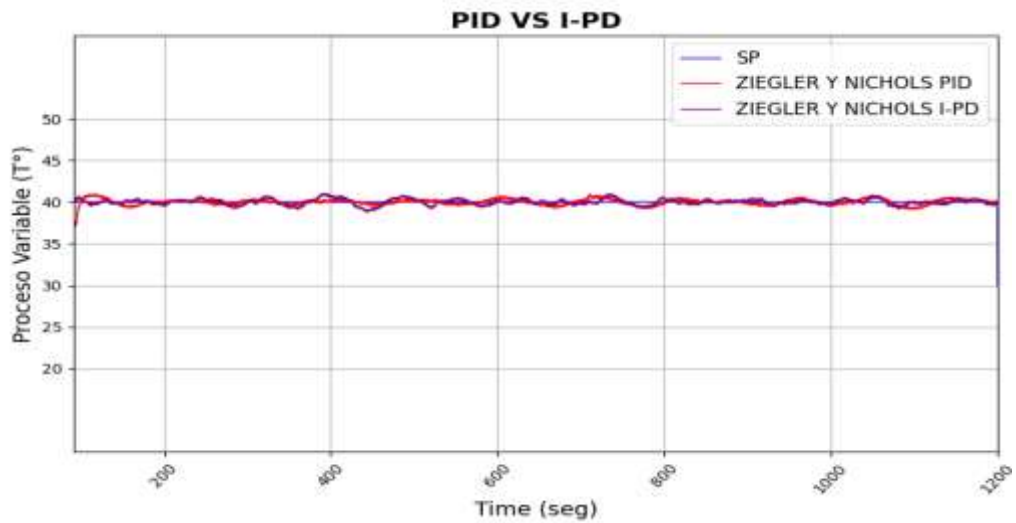


Figura 4.36 Comparación de PID vs I-PD en un proceso real con el método de Ziegler y Nichols.

En la Figura 4.36, se muestra una comparación entre el controlador PID y el I-PD con el método de Ziegler y Nichols al controlar la PV. El PID y su variante I-PD, tienen el mismo comportamiento no llegan a estabilizarse por completo, su pico más alto de 45°C y el más bajo de 37°C; y sigue así en una oscilación de $\pm 1^\circ\text{C}$ lo que significa un rango de $\pm 2.5\%$. Una clave importante es el tiempo de simulación, debe ser más prolongado.

4.4.4.2 Lambda

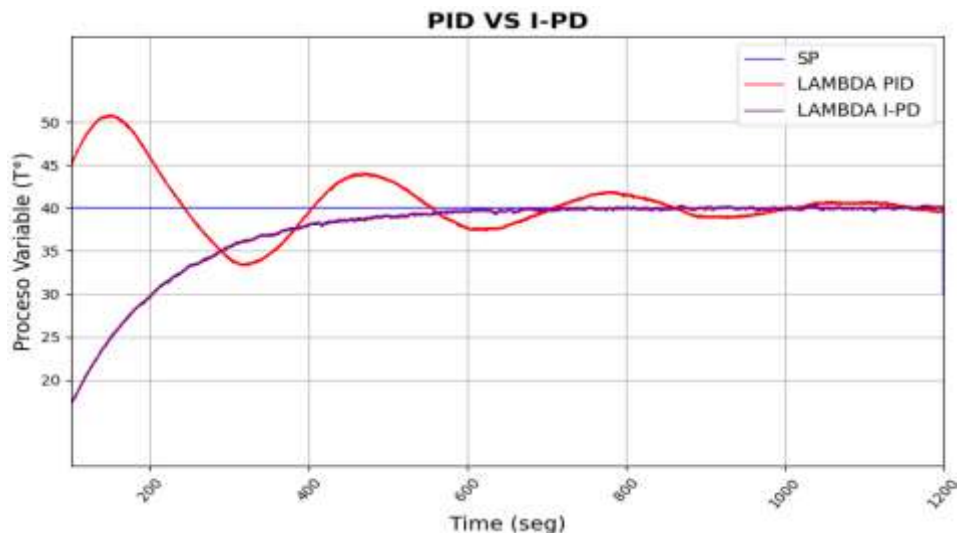


Figura 4.37 Comparación de PID vs I-PD en un proceso real con el método de Lambda.

Mediante la Figura 4.37, se compara la respuesta tanto del control PID y de la variante I-PD basados en el método de Lambda. El PID tiene muchos transitorios antes de estabilizarse, su

pico más alto es de 51°C excediéndose con 11°C del setpoint que equivale a un +27.5% y con un pico más abajo del setpoint de 34°C con -6°C equivalente a un -15%. El I-PD tiene una estabilización más suave y rápida sin transitorios notables

Los tiempos de estabilización para el PID es de 1200 segundos del tiempo de prueba, en cambio el I-PD se estabiliza en 600 segundos, mucho mejor que su contraparte PID

4.4.4.3 Borresen y Grindal

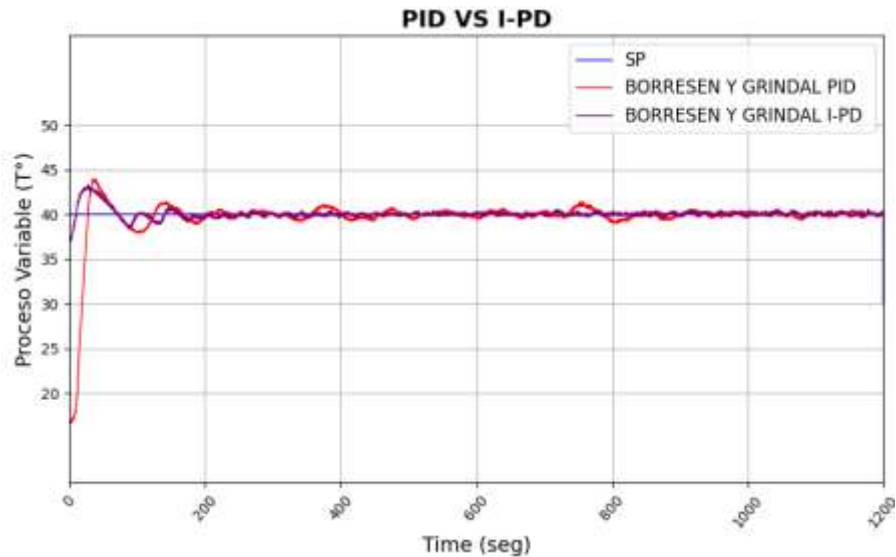


Figura 4.38 Comparación de PID vs I-PD en un proceso real con el método de Borresen y Grindal.

La Figura 4.38, compara la respuesta de un controlador como es el PID y la variante I-PD tiene un sobreimpulso inicial más pronunciado y oscilaciones ligeras antes de estabilizarse como se puede observar el pico más alto es de 42.9°C, siendo 2.9°C arriba del setpoint (7.25%), y el más bajo de 38.5°C, 1.5°C abajo del setpoint (3.75%). Este mismo llega a un punto de estabilización que oscila entre 40.2°C (+0.5%) y 39.8°C (-5%) a los 400 segundos, pero sigue en pequeñas oscilaciones hasta querer estabilizarse, pero con más tiempo de estabilización que el determinado. La resultante del I-PD tiene un comportamiento muy similar, en donde al comenzar tiene un sobre impulso donde el pico máximo es de 42°C siendo 2°C arriba del setpoint (+5%) y con un bajón de 39.8°C, abajo del setpoint (-0.5%), al igual que su contraparte llega a un punto de estabilización que oscila entre 40.2°C (+0.5%) y 39.8°C (-0.5%) a los 300 segundos, pero sigue en pequeñas oscilaciones hasta querer estabilizarse, pero con más tiempo de estabilización que el determinado.

4.4.4.4 Callender

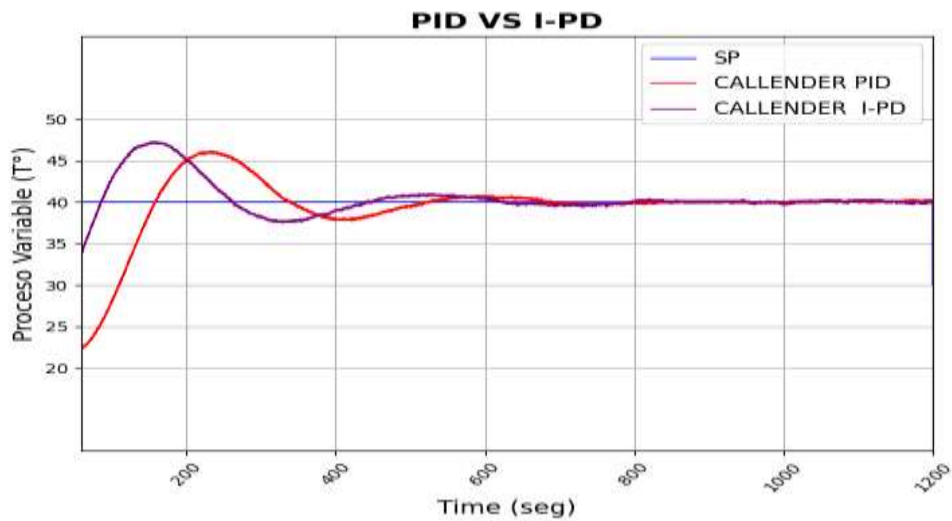


Figura 4.39 Comparación de PID vs I-PD en un proceso real con el método de Callender

Se observa en la Figura 4,39 el método Callender del proceso de controlador PID y de la variante I-PD, respectivamente. El PID muestra un sobreimpulso con pico máximo de 47°C siendo 7°C más arriba del setpoint equivalente a un (+17.5%) y un valor de transitorio bajo de 38°C representando 2°C abajo del valor deseado (-5%)

Mientras El I-PD tiene un valor pico de 46°C siendo 6°C más arriba del setpoint equivalente a un (+15%) y un valor de transitorio más bajo de 37°C representando 3°C abajo del valor deseado (-7.5%). Los procesos se estabilizan en 850 segundos para el PID y 800 segundos para la variante I-PD, ambas curvas de PV son totalmente muy parecidos en esta metodología.

4.5 PROCESO DIDÁCTICO DE CAUDAL

La planta o proceso a controlar se encuentra diseñado como un banco de pruebas para la ejecución de prácticas de laboratorio, en el cual el agua circula desde un tanque de reservorio hacia un tanque elevado principal. El elemento actuador de la planta lo conforma una bomba centrífuga, encargada de hacer circular el agua a través del circuito, misma que es comandada por la señal proveniente de un variador de frecuencia, logrando así que el líquido sea bombeado de acuerdo a los requerimientos del usuario. La Figura 4.40 presenta el esquema P&ID de la planta según la norma ANSI-ISA S5.1.

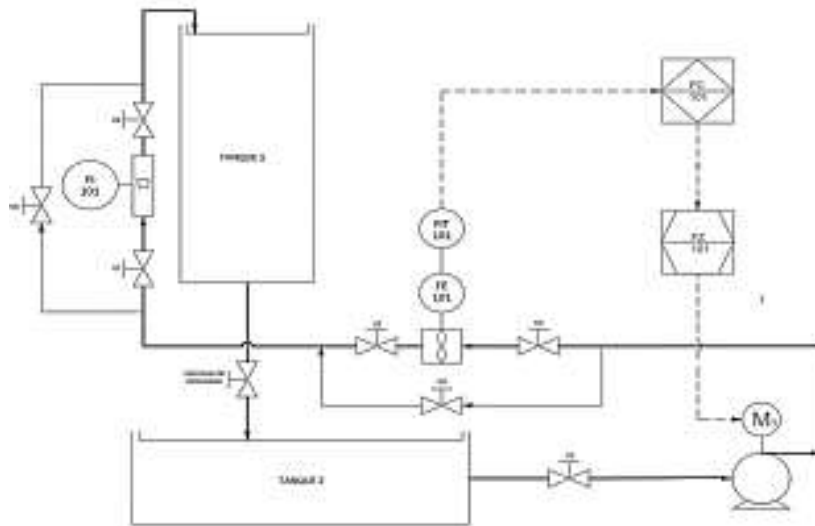


Figura 4.40 Diagrama P&ID de la estación de caudal

4.5.1 Requerimientos y propuesta funcional del sistema embebido de temperatura

- **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.
- **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 4.2 donde la región más cómoda y estable para la operación de la planta se establece en un rango de 30 a 80LPM.

Tabla 4.2 Rangos y características de operación de la planta

Voltios variado r	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.

4.6 OBTENCIÓN DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Para la Figura 4.41, se puede observar cómo se cargan las variables CV y PV, dentro del comando de SystemIdentification y con la opción Process Model, se observa el comportamiento

de la planta, además especifica el tiempo de inicio y tiempo de muestreo.

En la Figura 15 se puede determinar el tiempo muerto en un proceso de temperatura controlado por un PID, este es el retraso entre la aplicación de una acción de control (CV) y la respuesta observable en el sistema (PV). Este retraso puede afectar la estabilidad y el rendimiento del controlador, complicando la precisión y efectividad del ajuste de temperatura. Como punto final, el modelo obtenido es el siguiente:

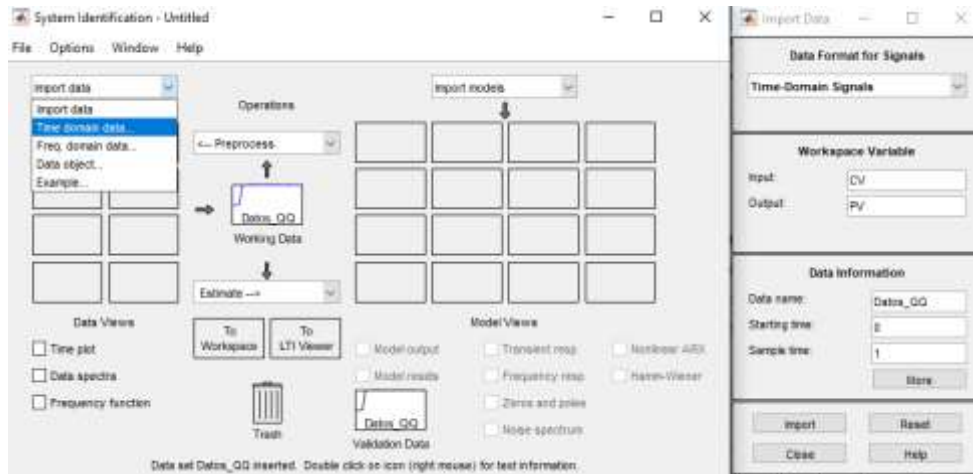


Figura 4.41 Obtención de Ecuación de transferencia

La estimación de la función de transferencia es representada de dos formas, la expresión (a) de la Figura 4.42, corresponde a la forma común de representación, y la expresión (b) muestra la forma 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 .

From input "u1" to output "y1":

$$\frac{-0.1603 s + 0.4638}{s + 0.4563}$$

(a)

Process model with transfer function:

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

$$\begin{aligned} K_p &= 1.0066 \\ T_{p1} &= 0.49269 \\ T_d &= 1.82 \end{aligned}$$

(b)

Figura 4.42 Obtención de Ecuación de transferencia

En la ecuación se puede observar cual es la ecuación de transferencia del sistema, obteniendo:

$$\text{Función de Transferencia} = \frac{1.0066}{1+0.49269s} * e^{-1.82s} \quad (44)$$

$K(\text{ganancia del proceso}) = 1.0066$

$\tau (\text{constante de tiempo}) = 0.49269 \text{ segundos}$

$L(\text{tiempo muerto}) = 1.82 \text{ segundos}$

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 matemáticos mediante ellos podemos decir que 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.

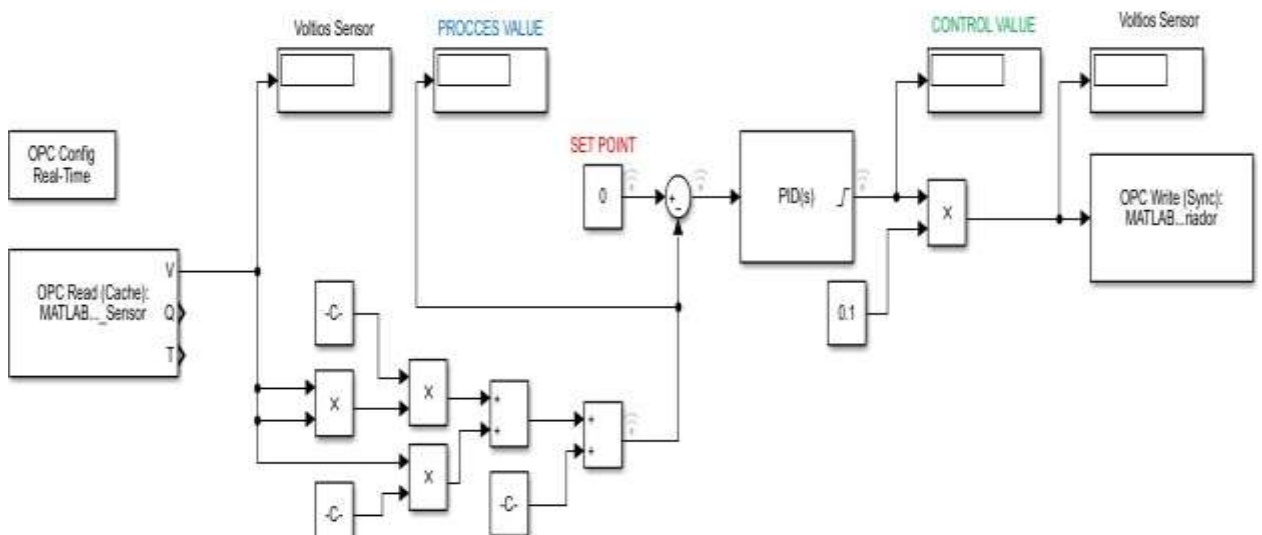


Figura 4.43 Estructura para la implementación de un controlador PID

4.7 PROCESOS SIMULADOS EN SOFTWARE

4.7.1 CONTROLADOR PID EN UN PROCESO SIMULADO

Se procede a realizar un circuito que incluya un setpoint (bloque step), un bloque de suma (\pm), el bloque PID, un bloque para el tiempo muerto (transfer-delay), el bloque de la función de transferencia y una salida. Se lo ve claramente en la Figura 4.44.

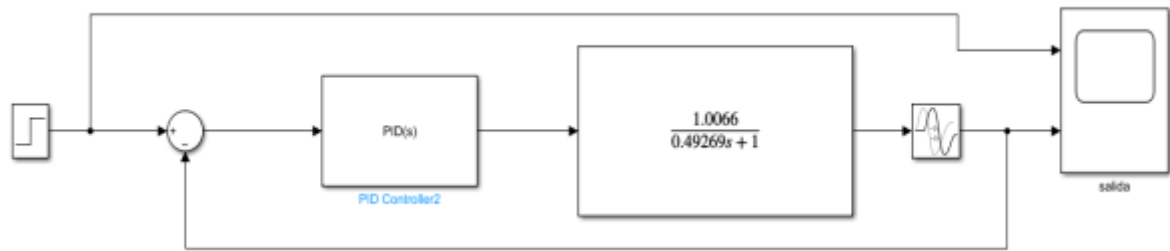


Figura 4.44 Construcción del controlador PID simulado

4.7.1.1 CÁLCULO DE PARÁMETROS DEL PID

Como se menciona en la Tabla 4.2, se tiene varios métodos de sintonización, los mismos que ayudan a determinar los valores de k_c , k_i y t_d ; para una correcta sintonización interna del PID

- **Ziegler y Nichol**

$$K_c = \frac{1,2\tau}{KL} = \frac{1,2 * (0.49269)}{(1.0066) * (1.82)} = 0.322721 \quad (45)$$

$$T_i = 2L = 2 * (1.82) = 3.72 \quad (46)$$

$$d = 0,5(L) = 0,5 * (1.82) = 0.91 \quad (47)$$

- **Lambda**

$$K_c = \frac{1}{K} * \frac{\frac{L}{2} + \tau}{\frac{L}{2} + \tau cl} = \frac{1}{1.0066} * \frac{\frac{1.82}{2} + 0.49269}{\frac{1.82}{2} + 0.49269} = 0.99344 \quad (48)$$

$$T_i = \tau + \frac{L}{2} = 0.49269 + \frac{1.82}{2} = 1.40296 \quad (49)$$

$$T_d = \frac{\tau L}{L + 2T} = \frac{0.49269 * 1.82}{1.82 + 2 * 0.49269} = 0.319634 \quad (50)$$

- **Borresen y Grindal**

$$K_c = \frac{\tau}{KL} = \frac{0.49269}{(1.0066) * (1.82)} = 0.268934 \quad (51)$$

$$T_i = 3L = 3(1.82) = 5.46 \quad (52)$$

$$T_d = 0,5(L) = 0,5(1.82) = 0.91 \quad (53)$$

- **Callender**

$$Kc = \frac{1,066}{KL} = \frac{1,066}{(1.0066) * (1.82)} = 0.581874 \quad (54)$$

$$Ti = 1,418L = 1,418(1.82) = 2.58076 \quad (55)$$

$$Td = 0,353(3) = 0,353(1.82) = 0.64246 \quad (56)$$

- **Tabla resumen de parámetros internos PID**

Tabla 4.3 Sintonización del Controlador PID

MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN	PID				PID reajustado			
	kc	ti	td	Filtro	kc	ti	td	Filtro
Método de Ziegler y Nichols	0.322	3.72	0.91	100	0.3	3.72	0.4	100
Lambda	0.993	1.402	0.319	100	0.9	1.4	0.25	100
Borresen and Grindal	0.268	5.46	0.91	100	0.2	5	0.8	100
Callender	0.581	2.58	0.642	100	0.5	2.58	0.3	100

En la Tabla 4.3, se muestra los resultados de la resolución de cada método, obteniendo dichas constantes de manera práctica. Cabe recalcar que estos valores obtenidos, son referenciales y nosotros para obtener una mejor sintonización y más estable, debemos ajustarlos manualmente, mediante el ensayo y error, ya que dichos resultados son “referenciales”, en donde el programador debe tener el raciocinio suficiente para obtener valores más aproximados.

Con los valores de la Tabla 4.2, se realiza los siguientes procesos:

- PID simulado
- PID real
- I-PD simulado
- I-PD real

4.7.2 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON CONTROL PID SIMULADO

Cada método de sintonización es evaluado determinando los diferentes tiempos de respuesta y estabilización, pero ajustando el punto de referencia (setpoint) a un valor fijo de 45 litros y con tiempos de simulación de acuerdo a cada método.

4.7.2.1 PID SIMULADO (Ziegler y Nichols)

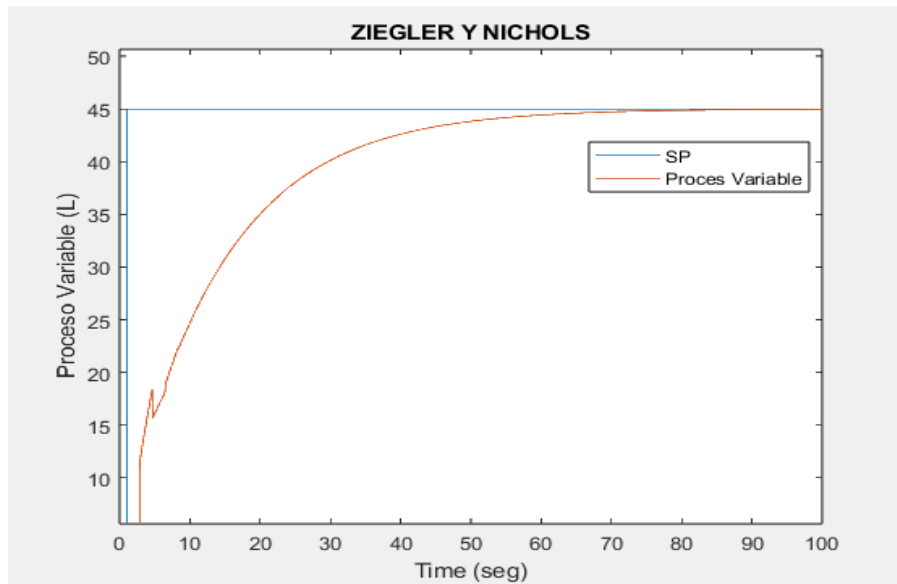


Figura 4.45 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols en 100 segundos

La gráfica ilustrada en la Figura 4.45, muestra un tiempo muerto de 2 segundos antes de reaccionar. A los 5 segundos, se observa un sobreimpulso significativo donde el proceso tiene un pequeño sobreimpulso, pero enseguida comienza a estabilizarse y lo hace completamente a los 78 segundos.

4.7.2.2 PID SIMULADO (lambda)

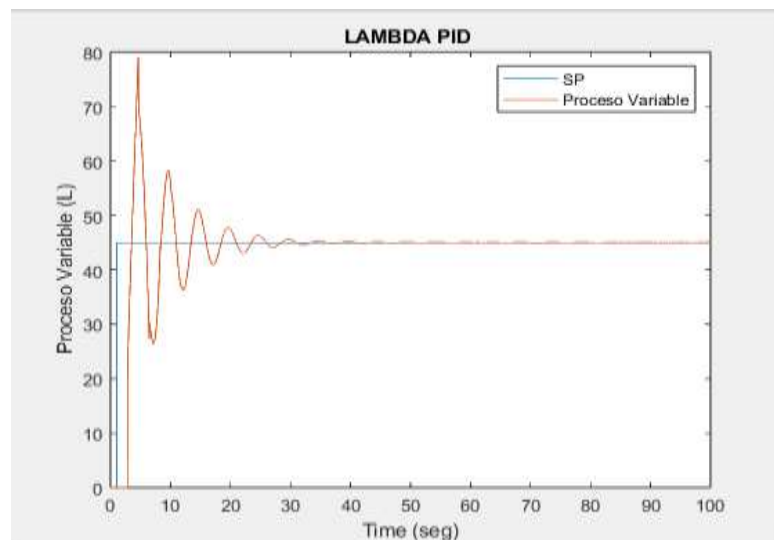


Figura 4.46. Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Lambda en 100 segundos

Se conoce mediante la Figura 4.46, una prueba de 100 segundos. El sistema tiene un tiempo muerto de 2 segundos y se estabiliza en 40 segundos. La gráfica evidencia un sobreimpulso donde la variable de proceso (PV) supera el setpoint y alcanza 80 litros a los 5 segundos y un

pico inferior de 25 litros a los 8.5 segundos. Este comportamiento refleja una respuesta agresiva que el método anterior, pero menos tiempo para estabilizarse.

4.7.2.3 PID SIMULADO (Borresen and Grindal)

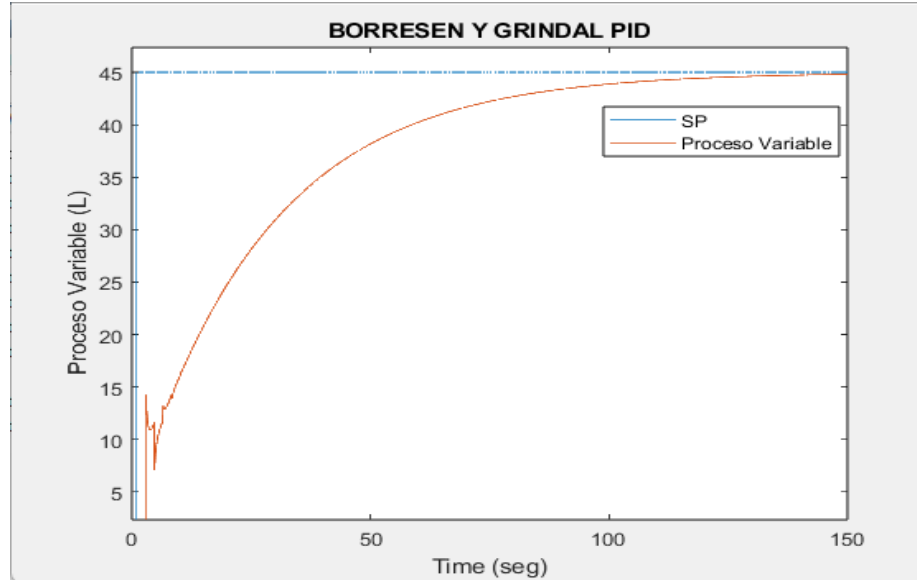


Figura 4.47 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Borresen y Grindal en 150 segundos. Esta prueba se efectúa durante 100 segundos, como se observa en la Figura 4.47, donde se evidencia que el sistema tiene un tiempo muerto de 2 segundos y se estabiliza en 140 segundos. La gráfica muestra dos sobreimpulsos significativos antes de estabilizarse. Estos sobreimpulsos indican una respuesta menos agresiva del sistema, pero muy lenta.

4.7.2.4 PID SIMULADO (Callender)

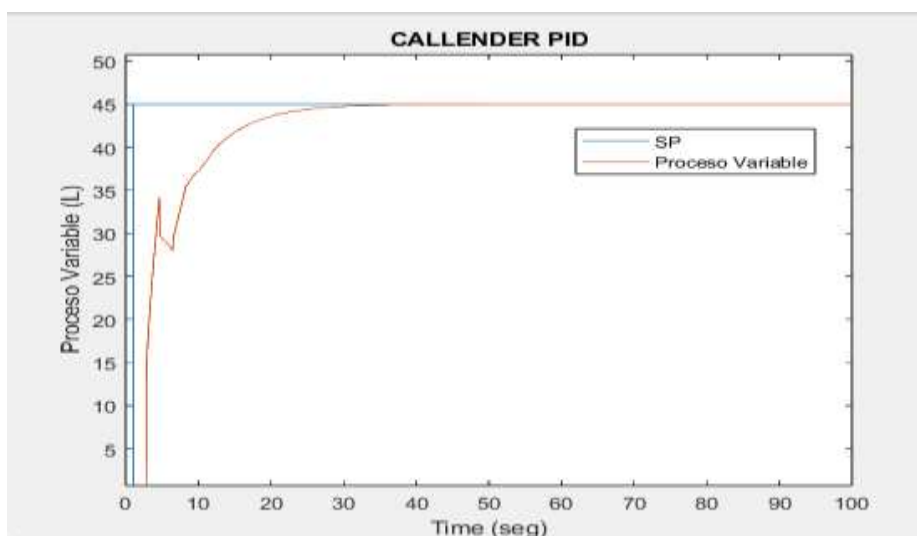


Figura 4.48 Proceso simulado del PID, ajustado con parámetros de Callender en 100 segundos

La Figura 4.48, muestra la salida del controlador PID en una prueba simulada de 100 segundos. El sistema presenta un tiempo muerto de 2 segundos y se estabiliza en 35 segundos. La gráfica evidencia un pequeño sobreimpulso a los 5 segundos. Este sobreimpulso indica una respuesta rápida de estabilización y el transitorio es casi imperceptible. Este método es menos agresivo y más suave, con menos transitorios, y requiere un tiempo de estabilización aceptable.

4.7.2.5 PID SIMULADO TOTAL (todos los métodos)

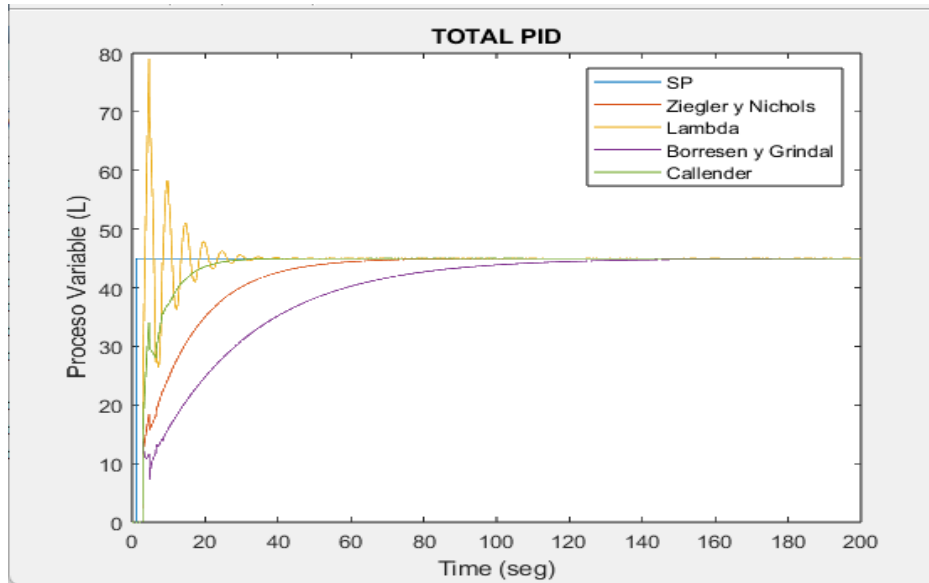


Figura 4.49 Control PID simulado, ajustado con todos los métodos de sintonización en 200 segundos

La Figura 4.49, presenta una comparación de las salidas del controlador PID utilizando todos los métodos discutidos anteriormente, mostrados en una única gráfica. El setpoint se fijó en 45 litros de caudal para todos los métodos, y la prueba simulada tuvo una duración de 200 segundos. La mejor estabilización depende de los parámetros internos (K_c , T_i y T_d), configurados dentro del PID para cada método. Los métodos de Ziegler-Nichols y Callender son los más rápidos en estabilizarse y con poca ausencia de sobreimpulsos. En contraste, los métodos de Lambda y Borresen and Grindal son más lentos y con transitorios destacables.

4.7.3 VARIANTE I-PD EN UN PROCESO SIMULADO

En la Figura 4.50, se realiza un circuito en Simulink, que incluya la variante I-PD, además se incluye un setpoint (bloque step), tres bloques de suma (\pm), el bloque PID, un bloque para el tiempo muerto (transfer-delay) y una salida (scope). Se puede observar cómo se aumentan bloques de ganancias para los parámetros derivativo e integral.

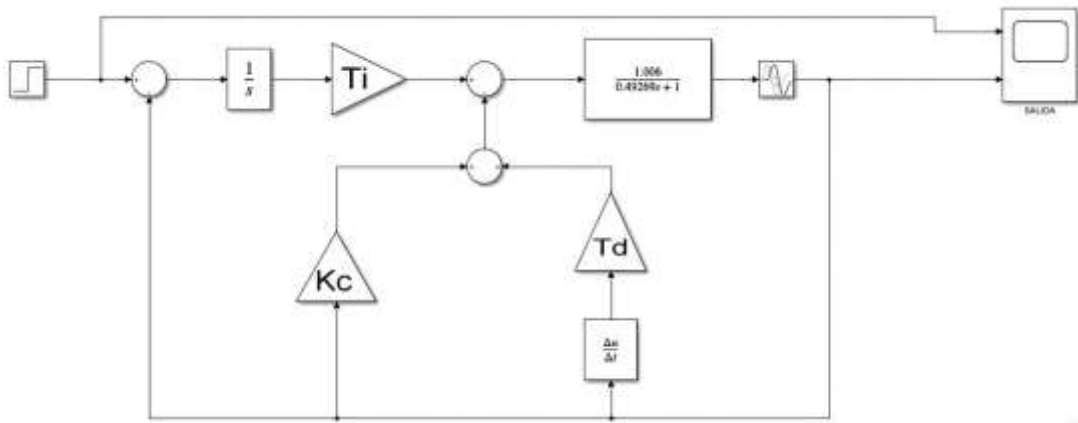


Figura 4.50 Construcción de la variante I-PD en el software

Los parámetros internos del I-PD (K_c , T_i y T_d), son los mismos que los del controlador PID para facilitar una comparación directa entre ambos controladores, además el setpoint se fija en 45 litros. Esta configuración permite observar cómo varía la respuesta del sistema al cambiar de un controlador PID a un I-PD, destacando las diferencias en el comportamiento de la salida y la eficiencia en la estabilización del proceso.

4.7.4 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN CON VARIANTE I-PD SIMULADA

4.7.4.1 I-PD SIMULADO (Ziegler & Nichols)

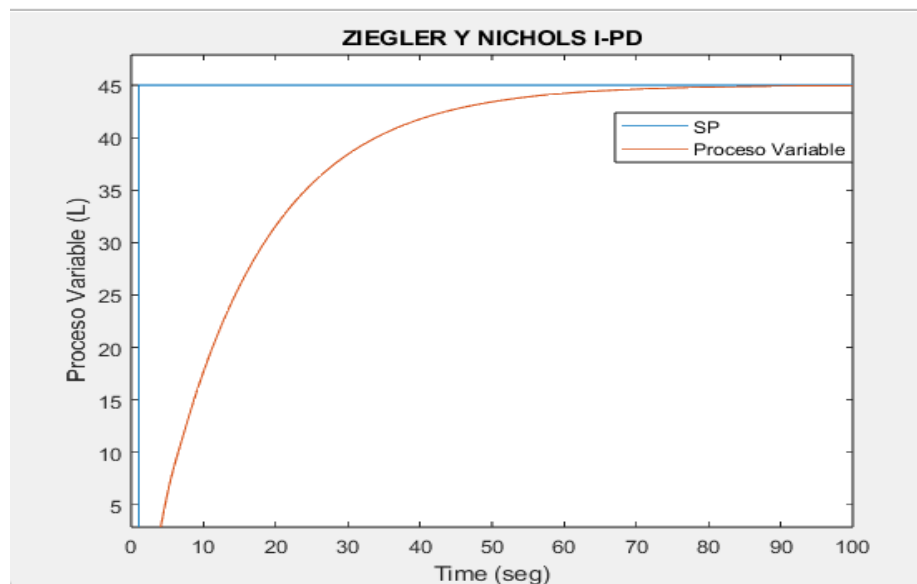


Figura 4.51 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Ziegler y Nichols en 100 segundos

La Figura 4.51, ilustra los resultados de la variante I-PD usando el método de Ziegler-Nichols, con una prueba simulada de 100 segundos. El tiempo muerto del sistema es de 4 segundos, y el tiempo requerido para alcanzar la estabilización es 78 segundos, no presentan sobreimpulsos.

4.7.4.2 I-PD SIMULADO (Lambda)

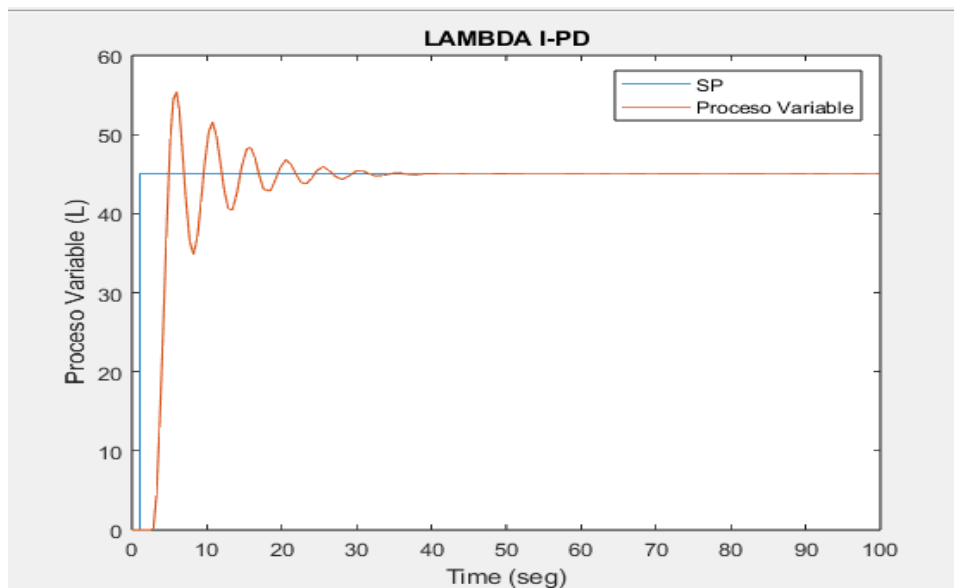


Figura 4.52. Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Lambda en 100 segundos

La Figura 4.52, presenta los resultados de la variante I-PD en una simulación de 100 segundos, el sistema tiene un tiempo muerto de 2 segundos y se estabiliza en 40 segundos. La gráfica muestra un sobreimpulso notable, donde la variable de proceso (PV) supera el setpoint y alcanza un valor de 55 litros a 5 segundos desde el inicio de la simulación, y un pico inferior de 35 litros antes de estabilizarse. Esta simulación es rápida, pero con ausencia de transitorios notables.

4.7.4.3 I-PD SIMULADO (Borresen y Grindal)

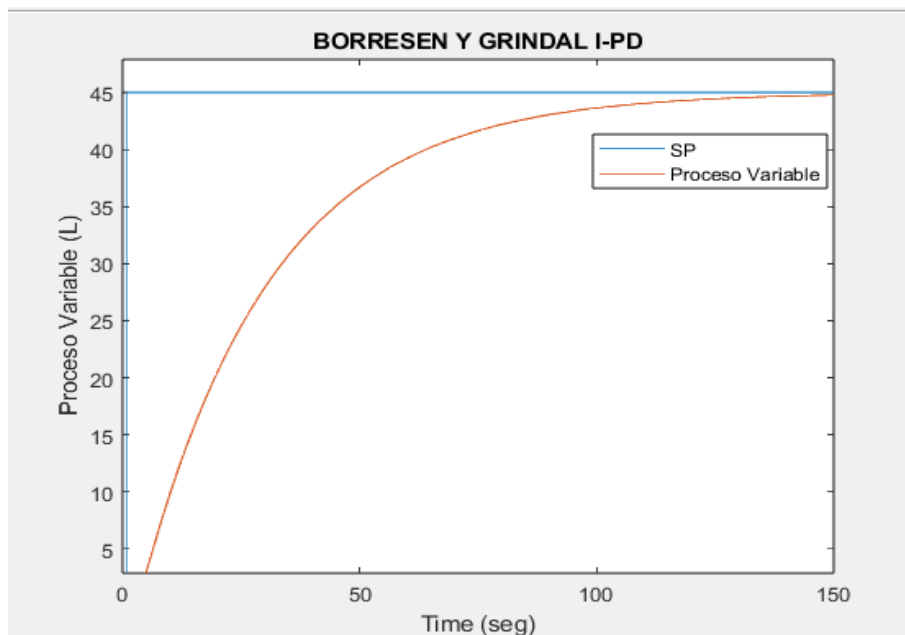


Figura 4.53 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Borresen y Grindal en 150 segundos

En la Figura 4.53, se observa los resultados de la variante I-PD en una simulación con una duración total de 150 segundos. El sistema, se tiene un tiempo muerto de 8 segundos, alcanza

la estabilización en 140 segundos. Es importante señalar que en este método ofrece una respuesta más controlada y menos agresiva, logrando una estabilización más suave y eficiente, pero con aumento de tiempo muerto.

4.7.4.4 I-PD SIMULADO (Callender)

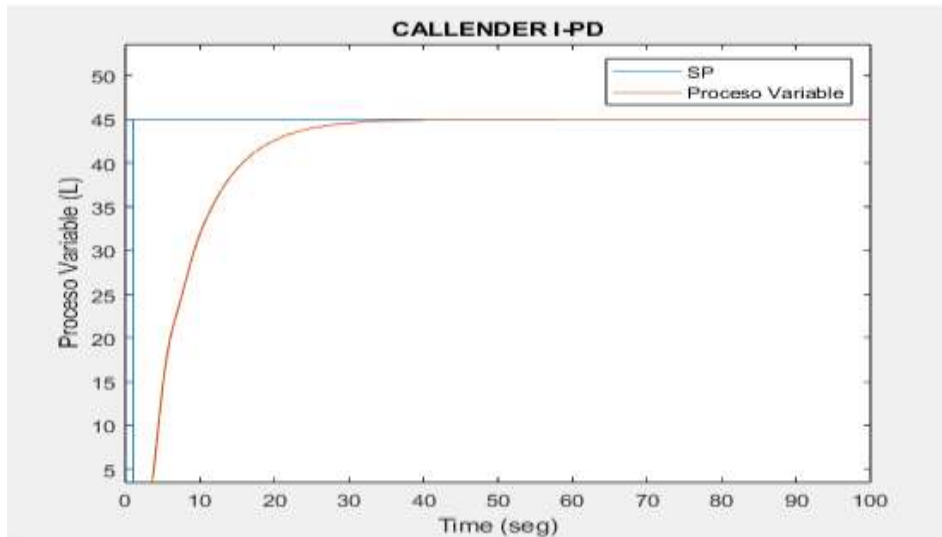


Figura 4.54 Proceso simulado del I-PD, ajustado con parámetros de Callender en 7000 segundos

En la Figura 4.54 se ilustra los resultados obtenidos de la variante I-PD en una simulación con una duración total de 100 segundos. El sistema presenta un tiempo muerto de 3 segundos y alcanza la estabilización completa a los 35 segundos.

4.7.4.5 IPD SIMULADO (todos los métodos)

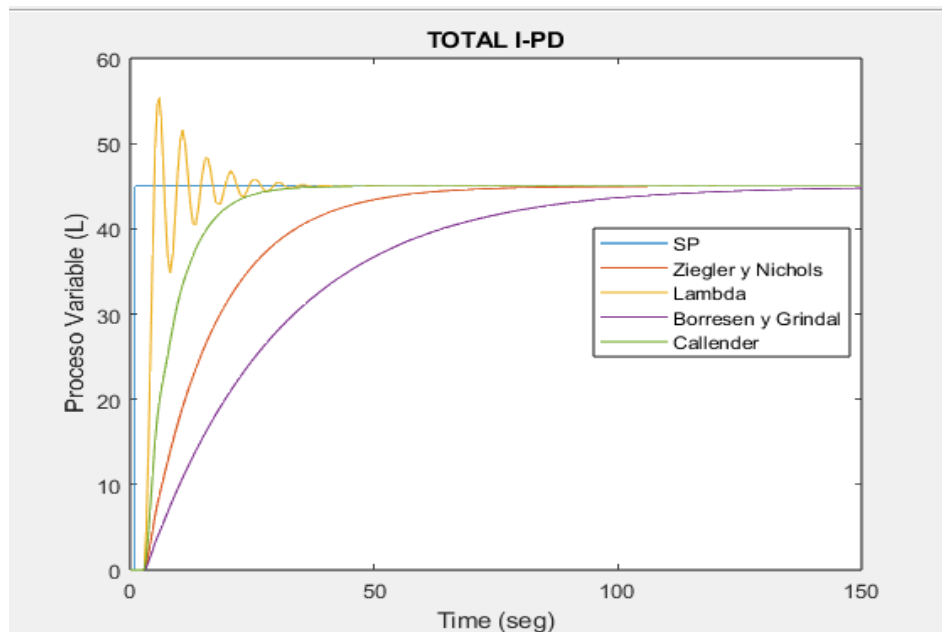


Figura 4.55 Proceso simulado del comportamiento del I-PD, ajustado con todos los métodos de sintonización en 100 segundos

La Figura 4.55, ofrece una comparación de la variante I-PD en relación con los métodos de sintonización. Se estableció un setpoint de 45 litros y se ejecutó una simulación con una duración de 200 segundos. Cada método muestra tiempos muertos similares, y el tiempo necesario para alcanzar la estabilización varía en función de los parámetros internos ajustados, los cuales son equivalentes a los utilizados en los métodos PID.

Los métodos de Ziegler-Nichols y Borresen-Grindal se destacan por su capacidad de estabilización rápida y menos agresiva que el PID. En contraste, Lamba ofrece una estabilización rápida, pero con gran impacto de transitorios y Callender una estabilización suave pero muy lenta. Este desempeño superior en términos de suavidad y eficiencia en las simulaciones hace que el I-PD sea una opción para aplicaciones que requieren una respuesta más equilibrada.

4.7.5 CONTROLADOR PID VERSUS VARIANTE I-PD SIMULADOS

4.7.5.1 Ziegler & Nichols

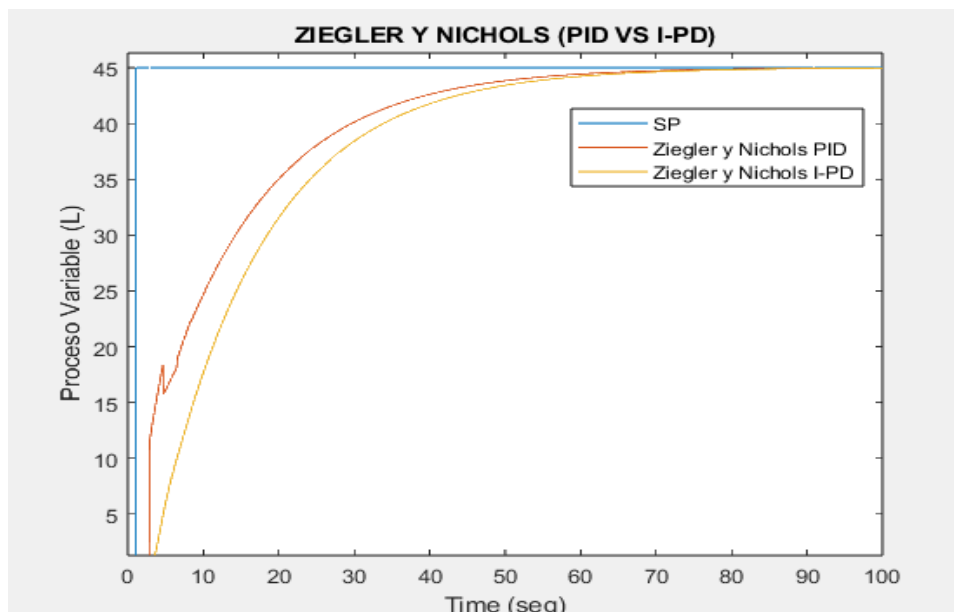


Figura 4.56 Comparación del PID vs I-PD en el método de Ziegler y Nichols

La Figura 4.56, muestra el control de caudal en Ziegler-Nichols del control PID y su variante I-PD, ambos montados en una sola gráfica. el I-PD es más lento con un tiempo muerto de 4 segundos en comparación del PID que es de 2 segundos, ambos llegan a estabilizarse en 78 segundos, la ventaja es que la estabilización del I-PD es suave y más equilibrada sin sobreimpulsos en comparación del PID.

4.7.5.2 Lambda

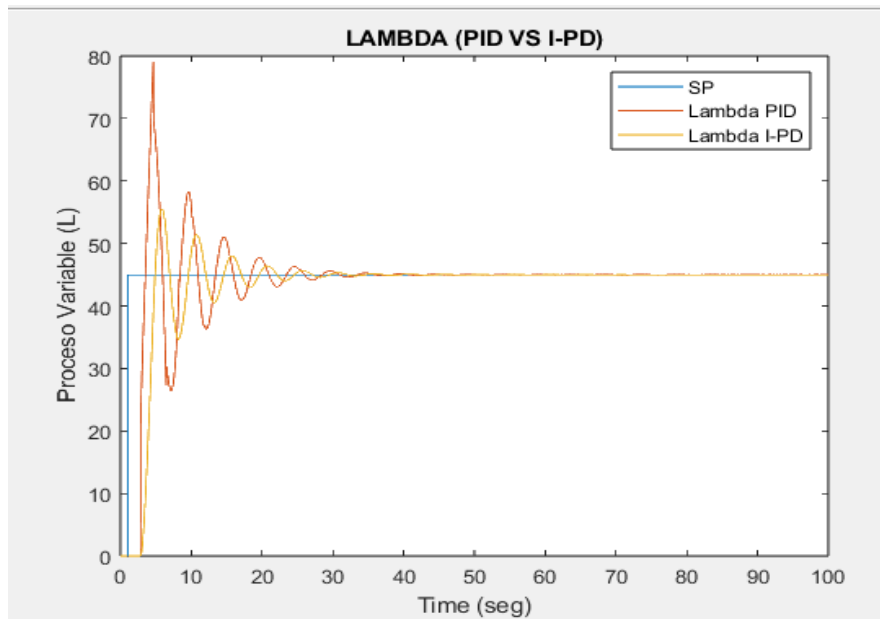


Figura 4.57 Comparación de PID vs I-PD en el método de Lambda.

Mediante la Figura se muestra el mismo proceso utilizando el método de Lambda del control PID y su variante I-PD. Los resultados muestran sobreimpulsos por parte de ambas curvas, la ventaja que el I-PD muestra menos picos en los transitorio antes de estabilizarse, al final ambos se estabilizan en el mismo tiempo de 40 segundos.

4.7.5.3 Borresen y Grindal

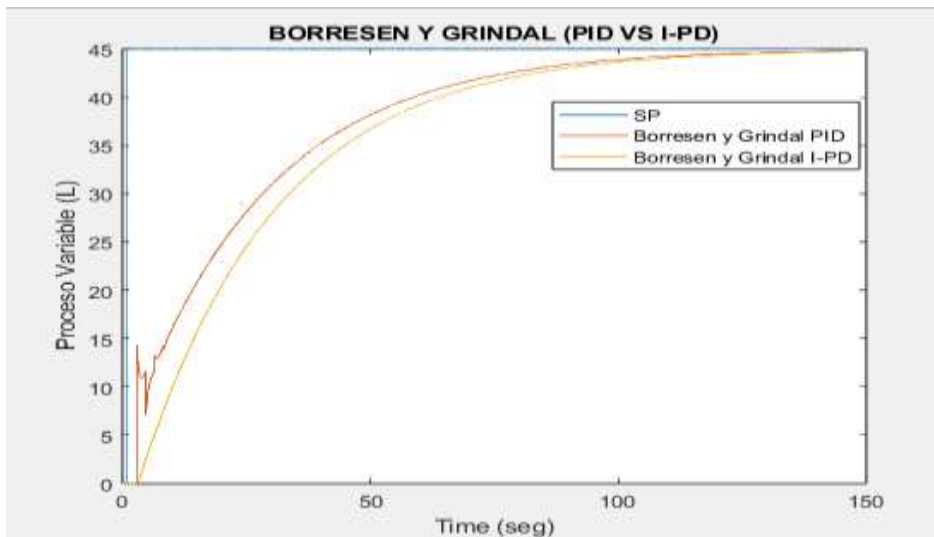


Figura 4.58. Comparación de PID vs I-PD en el método de Borresen y Grindal

En la Figura se muestra el mismo proceso utilizando el método de Borresen y Grindal, los resultados muestran que el PID tiene una ausencia de transitorios notable, ambos llegan a estabilizarse en los mismos tiempos, pero la el I-PD tiene una estabilidad más suave y equilibrada, pero aumenta su tiempo muerto.

4.7.5.4 Callender

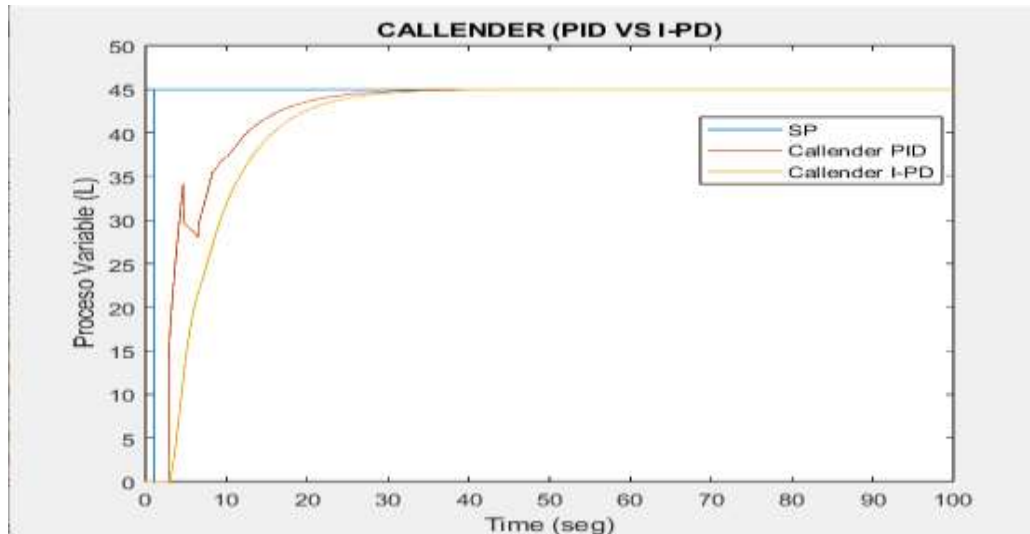


Figura 4.59 Comparación de PID vs I-PD en el método de Callender

La Figura 4.59 muestra el método Callender del control PID y su variante I-PD, ambos se estabilizan en el mismo tiempo de 35 segundos, pero el I-PD con mejor equilibrio de datos y sin picos de sobreimpulsos.

5. . ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se describen las diferentes acciones para validar los resultados obtenidos, entre el comportamiento del PID e I-PD dentro de un proceso de temperatura y caudal tanto en un escenario simulado como real.

5.1 IMPLEMENTACIÓN DE LA VARIANTE I-PD EN UN PROCESO INDUSTRIAL

Este proceso involucra la creación y configuración de tres bloques principales que conforman la variante del controlador: la parte integral (T_i), parte proporcional (k_c) y parte derivativa (T_d). En el diseño, la parte integral se encarga de acumular el error a lo largo del tiempo, permitiendo la corrección continua del sistema. Por otro lado, la parte proporcional ajusta la salida en función del error instantáneo, mientras que la parte derivativa anticipa futuros errores basándose en la tasa de cambio del error.

Después de realizar una serie de pruebas y ajustes para corregir errores, se logró un modelamiento funcional de la variante I-PD, tal como se observa en la Figura 5.1 Este modelamiento no solo demuestra la capacidad del controlador para gestionar y ajustar la salida en función de las variaciones del error, sino que se puede aplicar a distintos procesos, en este caso se lo involucro en temperatura y caudal.

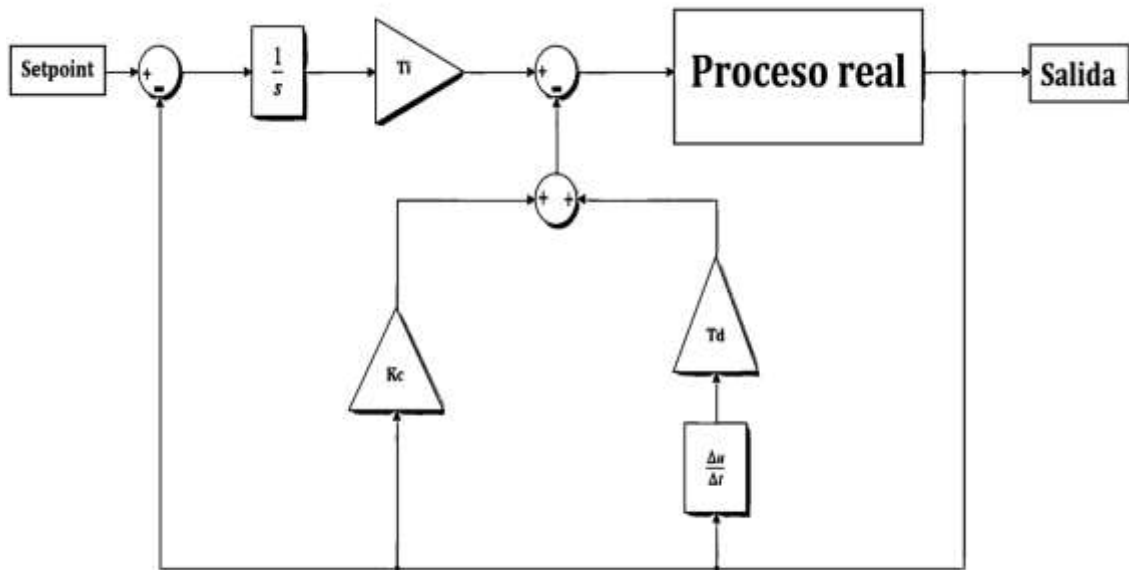


Figura 5.1 Diagrama de bloques final del controlador I-PD.

5.2 COMPARATIVA DE SIMULACIONES EN SOFTWARE Y PROCESOS REALES

5.2.1 PROCESO SIMULADO DE TEMPERATURA

En el estudio se obtuvo hallazgos significativos en cada etapa del proceso de simulación, evidenciando la importancia de los métodos de sintonización en el desempeño del controlador, ya que afectan de manera diferente la dinámica del mismo y por ende su capacidad para manejar distintos tipos de perturbaciones y cambios en el sistema.

En la Tablas 5.1 y Tabla 5.2 se observa que el I-PD presenta ventajas significativas en comparación con el controlador PID en los procesos simulados de temperatura. Aunque el I-PD muestra un aumento en los tiempos muertos, esto resulta en una mayor suavidad en el comportamiento de la curva de la variable de proceso (PV), lo que mejora la estabilidad final del sistema. En particular, el I-PD muestra una reducción notable en las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas durante las perturbaciones, en comparación con el PID.

Los métodos de sintonización del I-PD, como Ziegler-Nichols, Borresen y Grindal, y Callender, han demostrado ser efectivos al reducir el tiempo necesario para estabilizarse. El I-PD se estabiliza aproximadamente 10 segundos más rápido que el PID. Sin embargo, el método de Lambda en el I-PD presentó un inconveniente al ser más lento en comparación con el mismo método aplicado al PID. A pesar de esto, el I-PD en general ofrece una mejor sintonización, reduciendo los transitorios y perturbaciones en el proceso simulado.

Tabla 5.1 Resultados de sintonización del controlador PID simulado.

PID SIMULADO - PROCESO TEMPERATURA										
Método	SP [°C]	Tmax [°C]	Tmax %	Tmin [°C]	Tmin%	Tmuerto [seg]	Tiempo de estabilización [seg]	Tiempo Total simulación [seg]	Ausencia de Transitorios	Velocidad de estabilización
Ziegler and Nichols	40	52	30%	40	0	3	80	200	1 sobreimpulso	rápida
Lambda	40	47	18%	40	0	3	500	7000	1 sobreimpulso	lenta
Borresen and Grindal	40	57	42%	40	0	3	30	100	2 sobreimpulsos	rápida
Callender	40	42	18%	40	0	300	6500	7000	1 sobreimpulso	lenta

Tabla 5.2 Resultados de sintonización del controlador I-PD simulado

I-PD SIMULADO - PROCESO TEMPERATURA										
Método	SP [°C]	Tmax [°C]	Tmax %	Tmin [°C]	Tmin%	Tmuerto [seg]	Tiempo de estabilización [seg]	Tiempo Total simulación [seg]	Ausencia de Transitorios	Velocidad de estabilización
Ziegler and Nichols	40	44	10%	40	0	10	80	200	1 sobreimpulso	rápida
Lambda	40	53	32%	40	0	5	4000	7000	1 sobreimpulso	lenta
Borresen and Grindal	40	5	42%	40	0	8	50	100	3 sobreimpulso	rápida
Callender	40	41	15%	40	0	980	6800	7000	1 sobreimpulso	lenta

En la Tabla 5.3 se reflejan datos sintetizados de los porcentajes, en los que mejora el PID o la variante I-PD en cuanto a los sobreimpulsos y transitorios de cada controlador.

Estos hallazgos destacan cómo el I-PD no solo mejora la estabilidad del sistema, sino también optimiza la respuesta frente a perturbaciones en un 11.25% ante el PID simulado de temperatura.

Tabla 5.3 Resultados sintetizados en porcentajes del proceso simulado de temperatura

TRANSITORIOS %		
Método	I-PD MEJOR PID	PID MEJOR I-PD
Ziegler and Nichols	20,00%	-
Lambda	-	14,50%
Borresen and Grindal	37,00%	-
Callender	2,50%	-
PROMEDIO	11,25%	

5.2.2 PROCESO REAL DE TEMPERATURA

En este apartado se analiza los resultados del proceso real de embebido de temperatura, en la Tabla 5.4 y Tabla 5.5 se presentan un recopilado de los datos obtenidos en la simulación real del proceso de embebido de temperatura.

Tabla 5.4 Resultados de sintonización del controlador PID real de temperatura

PID REAL - PROCESO TEMPERATURA										
Método	SP [°C]	Tmax [°C]	Tmax %	Tmin [°C]	Tmin %	Tmuerto [seg]	Tiempo de estabilización [seg]	Tiempo Total simulación [seg]	Ausencia de Transitorios	Velocidad de estabilización
Ziegler and Nichols	40	45	12,5 %	37	7,50%	3	1200	1200	2 sobreimpulsos	rápida
Lambda	40	51	27,5 %	34	15,00%	3	1200	1200	3 sobre impulsos	lenta
Borresen and Grindal	40	42,9	7,25 %	38,5	3,75%	5	400	1200	diminutos	rápida
Callender	40	47	17,5 %	38	5,00%	5	850	1200	1 sobreimpulso	lenta

Tabla 5.5 Resultados de sintonización del controlador I-PD real de temperatura

I-PD REAL										
Método	SP [°C]	Tmax [°C]	Tmax %	Tmin [°C]	Tmin %	Tmuerto [seg]	Tiempo de estabilización [seg]	Tiempo Total simulación [seg]	Ausencia de Transitorios	Velocidad de estabilización
Ziegler and Nichols	40	45	12,5%	37	7,50%	5	1200	1200	1 sobre impulsó	rápida
Lambda	40	40	0,0%	40	0,00%	5	600	1200	ninguno	rapida
Borresen and Grindal	40	42	5,0%	39,8	0,50%	5	300	1200	diminutos	rápida
Callender	40	46	15,0%	37	7,50%	7	800	1200	1 sobreimpulso	lenta

En la Tabla 5.6 se reflejan los datos sintetizados de los porcentajes totales del PID o la variante I-PD en cuanto a los sobreimpulsos y transitorios de cada controlador.

El I-PD mejora en un 11.81% ante el PID en cuanto a porcentajes de ausencia de transitorios en un sistema real de temperatura.

Tabla 5.6 Resultados sintetizados en porcentajes del proceso real de temperatura.

TRANSITORIOS %		
Método	I-PD MEJOR PID	PID MEJOR I-PD
Ziegler and Nichols	-	-
Lambda	42,00%	-
Borresen and Grindal	5,25%	-
Callender	0,00%	-
PROMEDIO	11,81%	

Al analizar las Tablas 5.5 y 5.6, se observa que el controlador I-PD supera al PID en el control de temperatura, tanto en pruebas reales como simuladas. Al promediar los resultados de ambos entornos (simulado y real), se obtiene un indicativo porcentual que refleja la mejora del I-PD sobre el PID en los transitorios del sistema de temperatura.

$$\mathbf{I - PD > PID \text{ en un } 11.53\% \quad \text{ecu (57)}}$$

En cuanto al tiempo muerto el I-PD presentó un aumento, este porcentaje se lo calcula con los históricos presentados en las tablas anteriores de resultados obtenidos.

$$\mathbf{\text{Tiempo muerto}_{I-PD} > \text{Tiempo muerto}_{PID} \text{ en un } 66.6\% \quad \text{ecu(58)}}$$

5.2.3 PROCESO SIMULADO DE CAUDAL

En este apartado se presenta la Tabla 5.7 y Tabla 5.8 donde se observan los resultados detallados de la simulación dentro de un proceso de caudal simulado, en donde el PID e I-PD, presentaron un comportamiento muy similar en cuanto a poca ausencia de transitorios y velocidad al llegar al punto de estabilización.

No existe mucha diferencia en sus resultados ya que es un proceso rápido y simple, prácticamente son niveles de llenado, en este proceso los controladores deben actuar de manera eficiente y lo lograron.

Tabla 5.7 Resultados de sintonización del controlador PID simulado

PID SIMULADOS										
Método	SP [L]	LPM max	LPM max %	LPM min	LPM min %	Tmuerto [seg]	Tiempo de estabilización [seg]	Tiempo Total simulación [seg]	Ausencia de Transitorios	Velocidad de estabilización
Ziegler and Nichols	45	45	0%	45	0%	2	78	100	N/A	rápida
Lambda	45	80	77,78%	25	44,44%	2	40	100	3 sobreimpulsos	rápida
Borresen and Grindal	45	45	0%	45	0%	2	140	150	N/A	lenta
Callender	45	45	0%	45	0%	2	35	100	N/A	rápida

Tabla 5.8 Resultados de sintonización del controlador I-PD simulado.

I-PD SIMULADO - PROCESO CAUDAL										
Método	SP [L]	LPM max	LPM max %	LPM min	LPM min %	Tmuerto [seg]	Tiempo de estabilización [seg]	Tiempo Total simulación [seg]	Ausencia de Transitorios	Velocidad de estabilización
Ziegler and Nichols	45	45	0%	45	0%	4	78	100	N/A	rápida
Lambda	45	55	22,22%	35	22,22%	2	40	100	2 sobreimpulsos	rápida
Borresen and Grindal	45	45	0%	45	0%	8	140	150	N/A	lenta
Callender	45	45	0%	45	0%	3	35	100	N/A	rápida

En la Tabla 5.9 muestra una mejora del 22.22% en los transitorios del sistema con el controlador I-PD, obtenida únicamente al sintonizarlo con el método lambda.

Tabla 5.9 Resultados sintetizados en porcentajes del proceso simulado de caudal.

TRANSITORIOS %		
Método	I-PD MEJOR PID	PID MEJOR I-PD
Ziegler and Nichols	-	-
Lambda	22,22%	-
Borresen and Grindal	-	-
Callender	-	-
PROMEDIO	22,22%	

5.3 CARACTERÍSTICAS Y DIFERENCIAS GENERALES DEL CONTROLADOR CLÁSICO PID Y SU VARIANTE I-PD

La Tabla 5.10 y Tabla 5.11 brindan las principales características y diferencias que se encontró en este trabajo de estudio entre controlador clásico PID vs variante I-PD:

Tabla 5.10 Características entre el controlador PID e I-PD

Características	PID	I-PD
Complejidad	Simple	Complejo
Eficacia	Determinados casos	En general
Robustez	Igual	Igual
Flexibilidad	Igual	Igual
Facilidad de uso	Fácil	Complejo

Tabla 5.11 Diferencias entre el controlador PID e I-PD

Diferencias	PID	I-PD
Tiempo muerto	Menor	Mayor
Velocidad	lenta	levemente rápida
transitorios	Alta probabilidad	Baja probabilidad

En general, el controlador I-PD ofrece una mejoría sobre el controlador clásico PID. Sin embargo, los controladores clásicos siguen siendo una opción viable, ya que la elección del tipo de controlador adecuado depende de una serie de factores.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La variante I-PD puede modelar procesos complejos no lineales más efectivamente, además se adapta de manera factible a cambios fortuitos del proceso. Por lo tanto, puede proporcionar un control más preciso desempeñado en procesos de temperatura y de caudal, dependiendo del método de sintonización que se use, sin embargo, el controlador PID sigue siendo ampliamente utilizados hoy en día debido a su simplicidad, familiaridad y desempeño para distintos procesos.
- El I-PD elimina la necesidad de un filtro, siendo una clara ventaja sobre el PID tradicional; se observa que la parte integral del I-PD ayuda a mitigar los transitorios, mientras que la parte derivativa, en paralelo con la proporcional, contribuye a una respuesta más estable, esta estructura permite una operación más eficiente, simplificando la necesidad de componentes adicionales. En comparación, el PID clásico requiere un filtro separado para manejar transitorios y ruido, lo que hace que el I-PD sea una opción más práctica en términos de recursos y estabilidad.
- En cuanto a estabilidad de la variable PV en un proceso de temperatura tanto simulada como real el I-PD muestra un 11.53% mejor manejo de transitorios y para un proceso de caudal presento una mejoría del 22.22%; estos porcentajes ayudan a determinar como el I-PD tiene una mejor respuesta ante perturbaciones de distintos procesos.
- El tiempo de estabilización juega un papel importante, debido que en ambos casos de estudio los tiempos fueron equivalentes, en donde si hay una observación muy grande es en el tiempo muerto en el I-PD, aumenta en un 66.6% a comparación del PID, este último tiene una respuesta más rápida ante cambios de estado de la variable fija (setpoint), pero más agresiva en la mayoría de casos.
- La comparación de estos controladores con distintos métodos de sintonización permite identificar el método más adecuado para cada proceso. En el caso del I-PD, los métodos Lambda y Borresen and Grindal se adaptaron mejor en procesos de temperatura, con mejoras del 42% y 5.25% respectivamente. En procesos de caudal, solo el método Lambda mostró una respuesta eficiente, con una mejora superior al 20%.

6.2 RECOMENDACIONES

- Al momento de introducir la variable I-PD en cualquier proceso donde predomine el controlador PID, se necesita tomar en cuenta que la su parte integral, siempre debe entrar de forma directa a la línea principal del proceso y sus partes derivativa y proporcional de forma paralela, para ajustar los errores, si no se lo hace de esta manera el I-PD, no tiene repercusión alguna en el proceso.
- Para un proceso de temperatura se recomienda que al final de los bloques de ajustes internos del I-PD, se inserte un bloque de saturación, el mismo que nos ayuda a que la respuesta del controlador tenga un rango específico y la salida PV, sea más rápida.
- Cuando se hace el reajuste de los valores de los métodos de sintonización, tenemos que basarnos en ellos como referencia, no es necesario usar los mismos valores, ya que si no se hace un reajuste de estos parámetros a veces los resultados de estos métodos desaparejan entre sí y no se tiene una buena estabilización.
- Se recomienda implementar esta variante en procesos industriales donde la estabilidad y la reducción de transitorios son prioritarias por ejemplo en aplicaciones de control de temperatura en hornos industriales, la regulación de presión en sistemas hidráulicos, control de nivel en tanques de almacenamiento, etc.
- Esta variante no es recomendable en aplicaciones donde la rapidez de respuesta es crítica como control de velocidad en motores, control de dirección en vehículos autónomos, aplicaciones robóticas, etc.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Gonzalez-Longatt, “Introducción a los Sistemas de Control,” 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/294721439>
- [2] A. Arbildo López, “El control de procesos industriales y su influencia en el mantenimiento,” 2011, Accessed: May 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/3374/337428495003.pdf>
- [3] F. R. Paúl Manzano, “Diseño y Construcción de una Máquina Selladora y Codificadora Automática de Alimentación Manual para la Empresa DAS LEBEN,” 2023. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/6271?locale-attribute=en>
- [4] Caiza Luis, “SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO ABIERTO Y CERRADO DE VOLTAJE PARA DETERMINAR EL ERROR EN ESTADO ESTABLE A DIFERENTES PULSOS DE ENTRADA EN EL LABORATORIO DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE LA FICM,” 2015. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/13426/1/Tesis%20I.M.%20294%20-%20Caiza%20Lema%20Luis%20Fabi%20c3%a1n.pdf>
- [5] O. Gelvéz, “Estudio experimental de las estrategias de control On-Off y control continuo,” 2012, Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/73-82/3418>
- [6] R. Vilanov and V. M. Alfaro, “Control PID robusto: Una visión panorámica,” 2011, *Elsevier Doyma*. doi: 10.1016/j.riai.2011.06.003.
- [7] J. Pérez, “Aspectos Prácticos del Control PID en Procesos Industriales,” 2021, Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8229745.pdf>
- [8] Alfaro Víctor, “ACTUALIZACIÓN DEL MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES DE ZIEGLER Y NICHOLS,” 2015, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44170516003>
- [9] G. W. J. Aguilar and A. L. Flores Gutiérrez, “Sintonización de un controlador PID por el Método Lambda,” 2020. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/25881/2/M-ESPEL-ENT-0206.pdf>
- [10] Rosillón Kenneth, “Metodología para la sintonización de controladores PID industriales,” 2019. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7889104.pdf>
- [11] B. Vargas, G. Marilin, T. Ardila, and H. Andrés, “Sistema virtual 3D de una torre de destilación, mediante la técnica de Hardware in The Loop, para la enseñanza en el Control de Procesos,” 2020. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/23330/1/T-ESPEL-ENI-0451.pdf>
- [12] K. Ogata, “INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA,” 2010. Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://dademuchconnection.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/07/ingenieria-de-control-moderna-3c2b0-ed-katsuhiko-ogata.pdf>
- [13] A. Creus, “Instrumentación-Industrial-7ma-edicion-antonio-creus-sole-pdf,” 2005, Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/390412196/Instrumentacion-Industrial-7ma-Edicion-Antonio-Creus-Sole-pdf>
- [14] J. M. Saavedra, “SENSORES DE TEMPERATURA Y REDES DE SENSORES EN TECNOLOGÍA DE FIBRA ÓPTICA SANTANDER,” 2006. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/10707/TesisFMS.pdf>
- [15] A. Kurniawan, “Getting Started With Matlab Simulink and Arduino,” 2013. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://ilide.info/doc-viewer-v2>
- [16] Universidad de Oviedo, “Modelado y análisis de Sistemas con SIMULINK,” 2014. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: http://isa.uniovi.es/~arobles/AyC/S1_simulink.pdf
- [17] Alejandro Javier Delgado Araujo, “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA UNIDAD AUTOMATIZADA DE RECEPCIÓN DE LECHE DE 15,000 L/H,” 2012. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7892/1/CD-4694.pdf>
- [18] Carrascal Romero Emanuel David, “DESARROLLAR UN PLAN DE OPTIMIZACIÓN A PARTIR DEL CONTROL DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN,” 2020, Accessed: Aug. 14,

2024. [Online]. Available:
http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/4328/1/Carrascal_2020_TG.pdf
- [19] Ávila Luzuriaga David Israel, “Sistema SCADA para el control de riego, iluminación y seguridad de una finca agropecuaria familiar,” 2020. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/30767/2/ESPEL-MEI-0013-P.pdf>
- [20] Remache Juan Carlos, “Análisis comparativo de la aplicación de controladores en un proceso embebido de temperatura.,” 2023. Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/75a9d1ca-1014-4d4e-8498-6719243165b8/content>