

SINTONIZACIÓN DE LAZOS DE CONTROL DE NIVEL EN SISTEMAS DE TANQUES
INTERACTUANTES EMPLEANDO EL SOFTWARE DE EXPERTUNE

CAMILO ESTEFAN ANTONY CORREDOR CAJAMARCA
ANDRÉS FELIPE ESTRADA JACOBSON

PROYECTO:
TRABAJO DE GRADO No. 1313
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO
ING CARLOS COTRINO BADILLO M.SC.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
BOGOTÁ D.C.

2013

1. INTRODUCCIÓN	5
2. MARCO CONCEPTUAL	5
2.1. PLANTEAR MODELOS A PARTIR DE RESPUESTAS A ENTRADA PASO	6
2.1.1. Modelos de primer orden	6
2.2. MÉTODOS CLÁSICOS DE CONTROL	6
2.2.1. Ziegler-Nichols (Z-N) en lazo abierto.....	6
2.2.2. Cohen-Coon (C-C)	7
2.2.3. Integral Square Error (ISE)	7
2.2.4. Integral Time-weighted Absolute Error (ITAE)	8
2.3. ESTADO DEL ARTE: SOFTWARE DE OPTIMIZACIÓN DE LAZOS DE CONTROL.....	8
3. ESPECIFICACIONES	9
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	9
3.2. DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA	10
3.3. DIAGRAMA EN BLOQUES DEL PROYECTO	11
3.4. CONFIGURACIÓN DEL PLC.....	12
3.5. CONFIGURACIÓN DEL SERVIDOR OPC.....	14
3.6. CONFIGURACIÓN EXPERTUNE	16
4. MODELOS PLANTEADOS POR EXPERTUNE Y CÁLCULO DE CONTROLADORES	19
4.1. MODELOS Y CONTROLADORES PARA EL MODO 1	20
4.2. MODELOS Y CONTROLADORES PARA EL MODO 2	21
4.3. MODELOS Y CONTROLADORES PARA EL MODO 3	23
4.4. MODELOS Y CONTROLADORES PARA EL MODO 4	24
5. RESULTADOS	25
5.1. MODO 1	27
5.2. MODO 2	31
5.3. MODO 3	35
5.4. MODO 4	39
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CALIFICACIÓN DE LOS CONTROLADORES	43
6.1. MODO 1	43
6.2. MODO 2	44
6.3. MODO 3	45
6.4. MODO 4	46
6.5. EVALUACIÓN DE EXPERTUNE	47
7. OBSERVACIONES Y LIMITACIONES DE LA PLANTA	48
8. CONCLUSIONES	48
9. BIBLIOGRAFÍA	49

Lista de figuras

Figura 1, Modo 1 y 2: tanques independientes.....	9
---	---

Figura 2, Modo 3: tanques interactuantes, control de nivel sobre tanque lineal	10
Figura 3, Modo 4: tanques interactuantes, control de nivel sobre tanque no lineal	10
Figura 4, diagrama en bloques del sistema planteado	11
Figura 5, diagrama en bloques del proyecto	11
Figura 6, caracterización de la válvula de control.....	14
Figura 7, Configuración Física de los elementos PLC, Servidor OPC y Cliente OPC.....	16
Figura 8, Procedimiento de sintonización optima	18
Figura 9, modelos modo 1	20
Figura 10, modelos modo 2.....	21
Figura 11, Efecto de la acción derivativa en la señal de control	22
Figura 12, Modelos modo 3	23
Figura 13, Modelos modo 4	24
Figura 14, Respuesta paso 1 (modo 1)	27
Figura 15, Respuesta paso 2 (modo 1).....	28
Figura 16, Respuesta paso 3 (modo 1)	29
Figura 17, Respuesta a perturbación (modo 1)	30
Figura 18, Respuesta paso 1 (modo 2).....	31
Figura 19, Respuesta paso 2 (modo 2).....	32
Figura 20, Respuesta paso 3 (modo 2).....	33
Figura 21, Respuesta a perturbación (modo 2)	34
Figura 22, Respuesta paso 1 (modo 3).....	35
Figura 23, Respuesta paso 2 (modo 3).....	36
Figura 24, Respuesta paso 3 (modo 3).....	37
Figura 25, Respuesta a perturbación (modo 3)	38
Figura 26, Respuesta paso 1 (modo 4).....	39
Figura 27, Respuesta paso 2 (modo 4).....	40
Figura 28, Respuesta paso 3 (modo 4).....	41
Figura 29, Respuesta a perturbación (modo 4)	42

Lista de tablas

Tabla 1, Ziegler-Nichols	6
Tabla 2, Cohen-Coon	7
Tabla 3, coeficientes ISE.....	8
Tabla 4, coeficientes ITAE	8
Tabla 5, variables de Expertune	13
Tabla 6, datos de caracterización de la válvula	14
Tabla 7, Datos de configuración del PLC en OPC.....	15
Tabla 8, modos de control.....	15
Tabla 9, Estado de operación del sistema relacionado con la variable Modos	18
Tabla 10, modos de control	19
Tabla 11, controladores modo 1	21
Tabla 12, controladores modo 2.....	22
Tabla 13, Controladores modo 3.....	23
Tabla 14, controladores modo 4.....	25
Tabla 15, parámetros de desempeño ante paso 1 (modo 1).....	27
Tabla 16, parámetros de desempeño ante paso 2 (modo 1).....	28
Tabla 17, parámetros de desempeño ante paso 3 (modo 1).....	29
Tabla 18, parámetros de desempeño ante perturbación (modo 1).....	30
Tabla 19, parámetros de desempeño ante paso 1 (modo 2).....	31
Tabla 20, parámetros de desempeño ante paso 2 (modo 2).....	32
Tabla 21, parámetros de desempeño ante paso 3 (modo 2).....	33
Tabla 22, parámetros de desempeño ante perturbación (modo 2).....	34
Tabla 23, parámetros de desempeño ante paso 1 (modo 3).....	35
Tabla 24, parámetros de desempeño ante paso 2 (modo 3).....	36
Tabla 25, parámetros de desempeño ante paso 3 (modo 3).....	37
Tabla 26, parámetros de desempeño ante perturbación (modo 3).....	38
Tabla 27, parámetros de desempeño ante paso 1 (modo 4).....	39
Tabla 28, parámetros de desempeño ante paso 2 (modo 4).....	40
Tabla 29, parámetros de desempeño ante paso 3 (modo 4).....	41
Tabla 30, parámetros de desempeño ante perturbación (modo 4).....	42
Tabla 31, puntajes de los controladores para modo 1	44
Tabla 32, puntajes de los controladores para modo 2	45
Tabla 33, puntajes de los controladores para modo 3	46
Tabla 34, puntajes de los controladores para modo 4	46
Tabla 35, consolidación de resultados.....	47

1. INTRODUCCIÓN

La sintonización de los parámetros de un controlador tipo PID se convierte en un problema a medida que la naturaleza del sistema se modifica. Para resolver este problema se han desarrollado algunos programas que sintonizan un controlador a partir de un modelo dinámico del sistema. Expertune ofrece paquetes de software enfocados a la sintonización de controladores en procesos industriales. Es ampliamente usado en diversos campos como el petrolero, de alimentos e industria farmacéutica [17].

El sistema de tanques interactuantes descrito en [1], ubicado en el departamento de electrónica es un sistema de tipo industrial que cumple funciones de enseñanza y de experimentación en el área de control. Este sistema, permite variaciones en la configuración de los tanques para generar distintos comportamientos de la planta y por lo tanto de la función de transferencia del proceso. En este sistema se realizan prácticas en las cuales se caracteriza el proceso y posteriormente se implementa un control, sin embargo, cuando cambia la configuración del proceso el controlador implementado pierde sintonía.

En procesos como el de los tanques interactuantes que presentan variaciones en la función de transferencia es necesario estar modificando el controlador para que se mantenga sintonizado. Hacer esto manualmente resulta dispendioso y no siempre se obtiene el mejor desempeño. Por este motivo se usan sistemas de software para alcanzar un buen desempeño en todas las situaciones. Expertune Inc. es una de las compañías que ofrece este tipo de herramientas de sintonización.

El objetivo general del proyecto fue sintonizar lazos de control de nivel sobre el sistema de tanques interactuantes. Para poder sintonizar los controladores desde Expertune fue necesario realizar la configuración del servidor OPC para habilitar la comunicación con el PLC. También se hicieron cambios sobre el programa del PLC para que fuera posible controlar la planta a partir de variables de Expertune.

Se realizaron pruebas y se evaluó la respuesta de diferentes controladores, unos calculados por métodos heurísticos clásicos y otros sintonizados con Expertune OPC PID tuner. A partir de los resultados de las pruebas fue posible evaluar el desempeño de diferentes estrategias de control. Durante el proceso de pruebas se redactó un documento guía para el uso de Expertune OPC PID tuner donde se explican los puntos más importantes, desde la configuración inicial del lazo de control hasta la sintonización de los controladores.

2. MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo del proyecto es necesaria la teoría básica de control y en particular algunos ítems que serán expuestos de forma breve ya que no corresponden a estado del arte. La investigación sobre el estado del arte se hizo sobre los diferentes tipos de software disponibles para optimizar lazos de control.

2.1. PLANTEAR MODELOS A PARTIR DE RESPUESTAS A ENTRADA PASO

El comportamiento dinámico para este caso particular de tanques interactuantes se puede modelar con funciones de transferencia de primer orden con tiempo muerto.

2.1.1. Modelos de primer orden

La función de transferencia usada para modelar un sistema de primer orden con retardo se muestra en la ecuación (2.1) donde k corresponde a la ganancia, τ es la constante de tiempo y T el retardo [9].

$$\frac{k}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-s \cdot T} \quad (2.1)$$

Para definir la constante de tiempo de la función de transferencia a través de la respuesta paso se pueden usar tanto el tiempo de subida (t_r) como el tiempo de establecimiento (t_s) por medio de las ecuaciones (2.2) y (2.3)

$$t_r = t_{90\%} - t_{10\%} \approx 2.2 \cdot \tau \quad (2.2)$$

$$t_s \approx 4 \cdot \tau \quad (2.3)$$

La ganancia se encuentra mediante el teorema del valor final en el plano s . El tiempo muerto corresponde al rango de tiempo que transcurre desde el cambio de la señal de control hasta el primer cambio observado en la variable de control.

2.2. MÉTODOS CLÁSICOS DE CONTROL

2.2.1. Ziegler-Nichols (Z-N) en lazo abierto

La sintonización usando este método es sencilla y ampliamente utilizada. Permite sintonizar el controlador a partir de una respuesta a entrada paso. Uno de sus problemas es que se basa exclusivamente en la medida proporcional para estimar el control integral y derivativo [8]. Los parámetros necesarios del sistema para realizar la sintonización son la constante de tiempo (τ), la variación de la señal de control (ΔCO), la variación de la variable de proceso (ΔPV) y el tiempo muerto (L). A partir de ellos se calcula (K_o) con la ecuación (2.4) y finalmente se calculan los parámetros del controlador según la tabla 1.

$$K_o = \frac{\Delta CO \cdot \tau}{\Delta PV \cdot L} \quad (2.4)$$

Ziegler-nichols en lazo abierto	K_p	τ_i	τ_d
P	K_o	-	-
PI	$0.9K_o$	$3.33L$	-
PID	$1.2K_o$	$2L$	$0.5L$

Tabla 1, Ziegler-Nichols

2.2.2. Cohen–Coon (C-C)

Representa una mejora respecto al método Z-N en sistemas con tiempos muertos grandes (comparables con la constante de tiempo). Suele tener una respuesta en lazo cerrado más rápida. No es recomendable para sistemas con tiempo muerto pequeño ya que las ganancias del controlador toman valores más grandes de lo necesario. Este método está predeterminado para presentar una tasa de decaimiento de 0.25. Esto significa que, en la respuesta del sistema, la segunda oscilación será cuatro veces más pequeña que la primera [8].

Los parámetros necesarios para calcular el controlador C-C son los mismos usados en Z-N: la constante de tiempo (τ), la variación de la señal de control (ΔCO), la variación de la variable de proceso (ΔPV) y el tiempo muerto (L). La ganancia del sistema (K) se calcula como el cociente de (ΔCO) y (ΔPV). Los parámetros del controlador se calculan según la tabla 2.

Cohen-Coon	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{\tau}{K \cdot L} \left[\frac{3\tau + L}{3\tau} \right]$	-	-
PI	$\frac{\tau}{K \cdot L} \left[\frac{10.8\tau + L}{12\tau} \right]$	$\frac{30 + 3 \left(\frac{L}{\tau} \right)}{9 + 20 \left(\frac{L}{\tau} \right)} \cdot L$	-
PID	$\frac{\tau}{K \cdot L} \left[\frac{16\tau + 3L}{12\tau} \right]$	$\frac{32 + 6 \left(\frac{L}{\tau} \right)}{13 + 8 \left(\frac{L}{\tau} \right)} \cdot L$	$\frac{4L}{11 + 2 \left(\frac{L}{\tau} \right)}$

Tabla 2, Cohen-Coon

2.2.3. Integral Square Error (ISE)

La ecuación (2.5) muestra la representación matemática de ISE [10], para modo regulador.

$$ISE = \min \left[\int_0^{\infty} (e(t))^2 \cdot dt \right] \quad (2.5)$$

Los parámetros del controlador ISE se calculan reemplazando las características de la planta y los coeficientes de la tabla 3 en las ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8).

$$K_p = \frac{A_1}{K} \left(\frac{L}{\tau} \right)^{B_1} \quad (2.6)$$

$$\tau_i = \frac{\tau}{A_2} \left(\frac{L}{\tau} \right)^{B_2} \quad (2.7)$$

$$\tau_d = A_3 \cdot \tau \left(\frac{L}{\tau} \right)^{B_3} \quad (2.8)$$

ISE	A1	A2	A3	B1	B2	B3
P	1.411	-0.917	-	-	-	-

PI	1.305	-0.959	0.492	0.739	-	-
PID	1.495	-0.945	1.101	0.771	0.560	1.006

Tabla 3, coeficientes ISE

2.2.4. Integral Time-weighted Absolute Error (ITAE)

La ecuación (2.9) muestra la representación matemática de ITAE [11][12], para modo regulador.

$$ITAE = \min \left[\int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| \cdot dt \right] \quad (2.9)$$

De la misma forma que para los controladores ISE, los ITAE se calculan reemplazando las características de la planta y los coeficientes de la tabla 4 en las ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8) mostradas anteriormente.

ISE	A1	A2	A3	B1	B2	B3
P	0.490	-1.084	-	-	-	-
PI	0.859	-0.977	0.674	0.680	-	-
PID	1.357	-0.947	0.842	0.738	0.381	0.995

Tabla 4, coeficientes ITAE

2.3. ESTADO DEL ARTE: SOFTWARE DE OPTIMIZACIÓN DE LAZOS DE CONTROL

Hay múltiples aplicaciones que permiten optimizar diversos lazos de control. Todos se basan en una evaluación del sistema para caracterizar su respuesta dinámica. A partir de ella se generan diferentes tipos de controlador (PI, PID, etc...) donde se optimiza cierto parámetro. Todos los paquetes reconocidos permiten simular la respuesta del sistema; con lo que se evalúa el desempeño del controlador antes de implementarlo. A continuación se listan los programas más reconocidos de optimización industrial.

Expertune (PID tuner): Permite minimizar el error, optimizar los parámetros de desempeño (sobrepico y tiempo de establecimiento) y la robustez. Sintoniza tanto controladores PI como PID. Permite realizar diagnósticos del lazo de control para detectar problemas en la instrumentación y problemas de control. Identifica las interacciones entre diferentes partes del proceso. Realiza análisis estadístico [15].

PAS (PSS control loop optimization software, PSS MPC Analysis, PSS Process Analysis, TuneWizard): Disminuye la variabilidad del proceso. Revisa el estado de las válvulas. Evalúa y determina el desempeño de controladores predictivos multi-variables. Permite implementar control con restricciones. Identifica el origen de un bajo desempeño de control y facilita su mejoramiento al evaluar factores como sintonía, no-linealidad e instrumentación [13].

ETAP (power system optimization software): Enfocado al manejo de la energía eléctrica. Permite seleccionar diferentes parámetros a optimizar y asignar un peso a cada uno. Control más robusto y eficiente. El operario puede seleccionar objetivos y restricciones de control. Utiliza algoritmos de flujo óptimo de energía. Aumenta la confiabilidad del suministro eléctrico. Ampliamente usado en las plantas de energía nuclear [14].

La oferta actual de aplicaciones de optimización abarca una inmensa cantidad de variables y parámetros que pueden ser manipulados. La capacidad computacional permite plantear controladores por métodos numéricos que superan los planteados por métodos heurísticos.

3. ESPECIFICACIONES

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El sistema de tanques puede ser monitoreado desde la aplicación de sintonización de controladores de Expertune. Para esto, se satisfacen las siguientes especificaciones:

- Expertune lee y escribe múltiples variables sobre el servidor OPC
- El programa cargado en el PLC Siemens, a través del programa Step 7, interpreta las variables escritas por Expertune en el servidor OPC. Además, es en el PLC donde se implementa el algoritmo de control de nivel basado en las ganancias fijadas por Expertune.
- Sobre la aplicación de sintonización de Expertune se grafican las variables más importantes del sistema, la variable de proceso (nivel del tanque), la señal de control (apertura de la válvula) y la referencia.

Para poder evaluar el desempeño de Expertune con respecto a controladores planteados por métodos convencionales fue necesario configurar el paquete para que opere en modo manual o en modo automático. De esta forma los parámetros del controlador pueden ser elegidos por Expertune o introducidos manualmente.

Aunque dentro del estudio se incluyeron 4 modos de operación es posible realizar el control del sistema en cualquiera de sus modos de operación. Los modos probados en el proyecto se listan a continuación.

1. Tanque no lineal. Figura 1A.
2. Tanque lineal. Figura 1B.
3. Tanques interactuantes con Q_{in} en TK-002 y control de nivel sobre TK-002. Figura 2.
4. Tanques interactuantes con Q_{in} en TK-001 y control de nivel sobre TK-001. Figura 3.

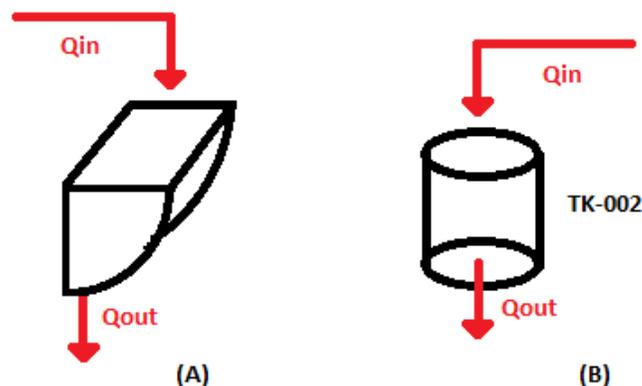


Figura 1, Modo 1 y 2: tanques independientes

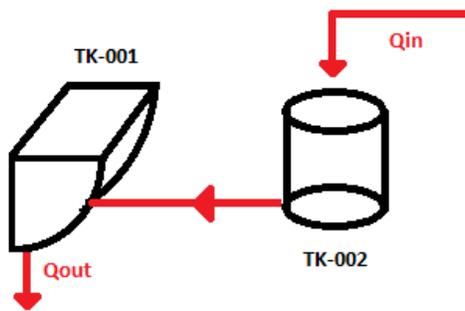


Figura 2, Modo 3: tanques interactuantes, control de nivel sobre tanque lineal

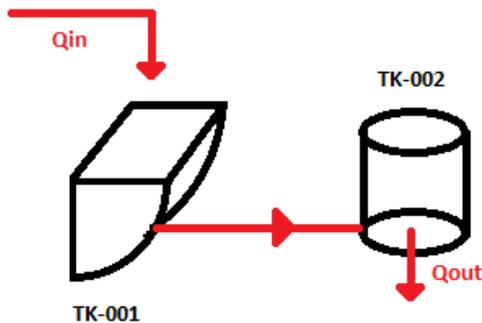


Figura 3, Modo 4: tanques interactuantes, control de nivel sobre tanque no lineal

Para todos los modos de operación se realizó una respuesta paso desde Expertune para que el programa encontrara el modelo. Todos los controladores fueron calculados a partir de los modelos encontrados de forma experimental.

Para cada uno de estos modos se realizó la comparación entre el desempeño de los controladores planteados por Expertune y los formulados a través de los métodos convencionales; Ziegler-Nichols (Z-N), Cohen-Coon (C-C), y Criterios integrales del error (Integral Square Error ISE e Integral Time-weighted Absolute Error ITAE). A cada controlador probado se le asignó un puntaje según la tabla de evaluación de cada modo.

La señal de control está restringida para evitar un desgaste prematuro de la válvula. Esto se hace directamente en los parámetros de configuración del posicionador de la válvula. El rango de apertura está limitado entre 3% y 75%. Estos límites fueron elegidos luego de estudiar la caracterización de la válvula mostrada más adelante en la figura 5. La restricción de apertura actúa directamente sobre la señal de control calculada en el PLC e incluye anti-windup.

3.2. DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA

En la figura 4 se muestra el diagrama en bloques del sistema. La parte física está compuesta por el sistema de tanques (incluidos sensores y actuadores) y el PLC Siemens S7 400. En cuanto a software, está el programa de configuración del PLC (Simatic Step7), el servidor OPC (WinCC) y OPC PID tuner de Expertune.

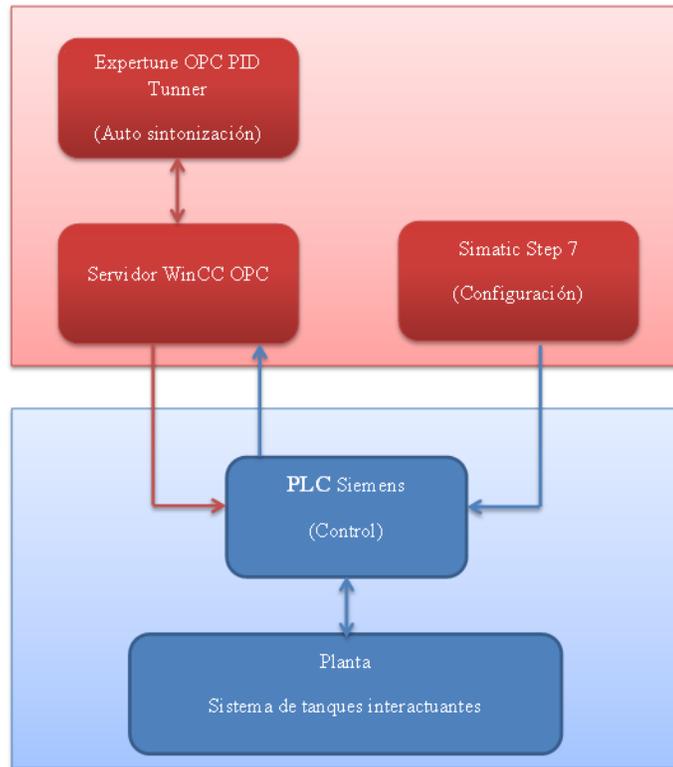


Figura 4, diagrama en bloques del sistema planteado

3.3. DIAGRAMA EN BLOQUES DEL PROYECTO

En la figura 5 mostrada a continuación se presenta un diagrama de bloques del proyecto



Figura 5, diagrama en bloques del proyecto

Las actividades llevadas a cabo durante el proyecto se describen a continuación:

1. Instalación y configuración de Expertune OPC PID tuner: En esta etapa se instaló el software y se hicieron las modificaciones necesarias en la configuración del sistema de tanques. Fue necesario realizar una nueva configuración del servidor OPC y modificar la programación del PLC para que funcionara en conjunto con Expertune.
2. Modelado a partir de la respuesta paso: A partir de la respuesta paso realizada desde Expertune se obtuvieron los parámetros que identifican la respuesta dinámica de cada uno de los 4 modos de operación a estudiar. En algunos modelos fue necesario ajustar la constante de tiempo y la ganancia para que la respuesta paso del modelo fuera muy similar a la respuesta real. El ajuste se hace necesario para tener el mejor modelo posible para sintonizar adecuadamente los controladores clásicos.
3. Planteamiento teórico de los controladores: A partir de los modelos encontrados se realiza el cálculo de los controladores por métodos clásicos.
4. Evaluación de los controladores planteados teóricamente: Se realizó una prueba del sistema con cada controlador para estudiar su respuesta. Luego, según los criterios de evaluación se calificó cuantitativamente cada controlador.
5. Controladores propuestos por Expertune: A partir de la respuesta paso para cada modo el programa calculó los controladores. Para realizar la re-sintonización de los controladores se hizo una respuesta paso en lazo cerrado a partir de la cual el programa propone nuevas leyes de control.
6. Evaluación de los controladores de Expertune: La metodología para evaluar los controladores planteados por Expertune fue exactamente la misma usada con los demás controladores; puntajes asignados según los criterios de evaluación.
7. Elaboración de la guía de uso de Expertune: Una vez completadas las pruebas, se redactó una guía para el uso de Expertune. En ella se explican los aspectos importantes para la configuración de un lazo de control, el modelado de una planta, la sintonización de controladores a partir de una respuesta paso en malla abierta y la re-sintonización de controladores a partir de una respuesta en malla cerrada. Esta guía está disponible en los anexos.
8. Comparación de resultados: A partir de los puntajes globales y específicos de cada controlador se realiza una comparación entre los controladores planteados teóricamente y los propuestos por Expertune.
9. Análisis y evaluación del desempeño de Expertune: A partir de los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto se evaluó el desempeño de Expertune en cada uno de los parámetros usados para calificar los controladores.

3.4. CONFIGURACIÓN DEL PLC

El programa del PLC permite almacenar y procesar las variables enviadas desde los sensores y hacia los actuadores, para su posterior publicación en la red con el servidor y finalmente, manipular estas variables a través de la interfaz gráfica de Expertune. Además de estas variables de medición y control, son necesarias dos variables adicionales, una para el Setpoint y otra para controlar el modo de operación deseado según la

selección en Expertune. En la tabla 5 se muestran las variables necesarias para el manejo del sistema de tanques desde Expertune.

Variables Expertune		
SYM	DESCRIPCION	RELACION A VARIABLES DEL SISTEMA
PV	Variable de proceso. Variables sobre la cual se requiere realizar el control.	Nivel Tanque Área Lineal Nivel Tanque Área No Lineal
SP	Set Point.	No existe variable física relacionada al sistema, por lo tanto se representa en una variable interna del PLC. Corresponde al nivel deseado.
CO	Salida del controlador	Set Point de la válvula de control.
Modo	Modo de operación del control	No existe variable relacionada al sistema, por lo tanto se representa en una variable interna del PLC. A través de esta variable, además de controlar el modo automático o manual del control PID
GAIN	Ganancia Proporcional	Variable de parámetro de control sobre los bloques de función PID
TI	Ganancia Integral	Variable de parámetro de control sobre los bloques de función PID
TD	Ganancia Derivativa	Variable de parámetro de control sobre los bloques de función PID

Tabla 5, variables de Expertune

Expertune no realiza el control del sistema directamente, pues este solo lo monitorea y realiza análisis sobre los datos adquiridos para optimizar el control (ganancias P, I y D). Por eso es necesario que el controlador sea implementado en el PLC utilizando el bloque FB41 incluido en las librerías del programador STEP7 [16]; el cual toma las ganancias P, I y D y genera la señal de control.

El bloque PID incluido en la función FB41 corresponde a la configuración PID en paralelo, donde el cálculo de la señal de control se realiza por medio de la ecuación 3.1.

$$CO = GAIN \cdot \left[1 + \frac{1}{TI} + TD \cdot s \right] \quad (3.1)$$

El parámetro CYCLE de este bloque indica el periodo de actualización de la señal de control. Este parámetro es muy importante ya que determina cada cuanto se hace al cálculo de la señal de control. Para que el sistema funcione correctamente este tiempo debe coincidir con el tiempo de llamado de interrupción del bloque OB35.

Para poder realizar el control de cualquiera de los dos tanques se implementaron dos bloques control. El lazo activo depende de la variable modos que será descrita más adelante. Para controlar múltiples variables en el PLC desde los modos de Expertune se definió la variable MODOS como byte. De esta forma se cuentan con 8 bits para configurar el sistema.

Por motivos de seguridad y linealidad de la válvula, se limitó el rango de la señal de control entre 3% y 75% según la caracterización de la válvula. Los datos obtenidos para la caracterización se presentan en la tabla 6. En la figura 6 se aprecia que con una apertura del 70% el actuador se encuentra saturado. El objetivo de esta prueba era encontrar la característica de flujo vs apertura sobre la planta física para determinar el límite de saturación.

Datos				Calculos	
Apertura [%]	flujo [m3/h]	flujo [gpm]	ΔP [psi]	CV [gpm/ $\sqrt{\Delta P}$]	flujo [cm3/s]
0%	0.000	0.00	30.00	0.000	0.000
10%	0.210	0.92	29.60	0.169	58.043
20%	0.420	1.85	28.54	0.346	116.717
30%	0.738	3.25	26.00	0.637	205.043
40%	1.110	4.92	21.70	1.056	310.404
50%	1.465	6.53	16.78	1.594	411.979
60%	1.880	8.28	8.14	2.902	522.387
70%	1.950	8.61	6.20	3.458	543.207
80%	2.020	8.90	4.85	4.041	561.503
90%	2.010	8.92	4.44	4.233	562.765

Tabla 6, datos de caracterización de la válvula

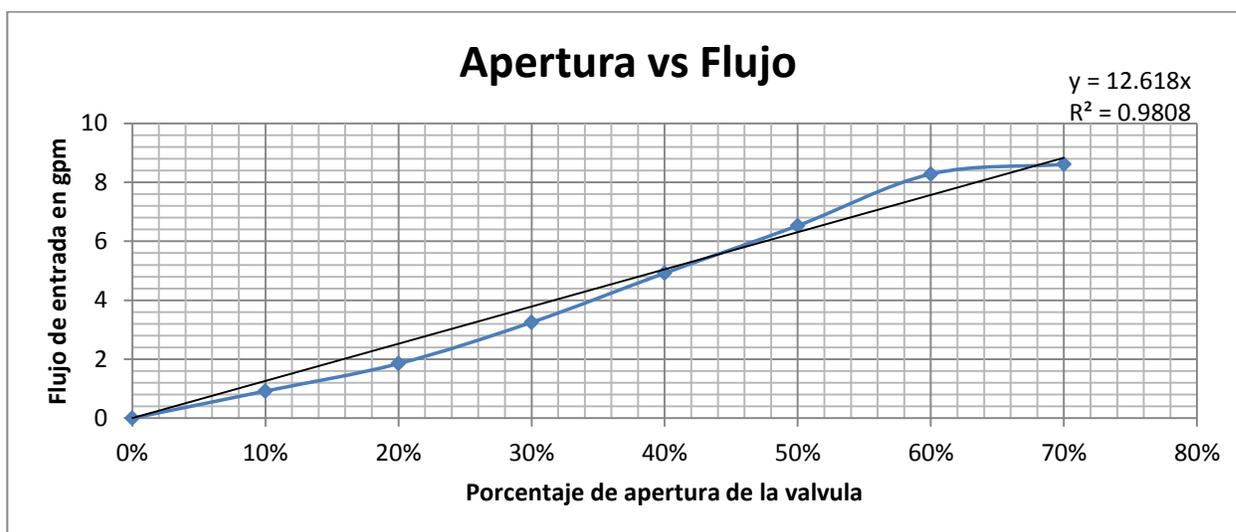


Figura 6, caracterización de la válvula de control

Los archivos de configuración del PLC para el uso particular de la aplicación de Expertune se prestan en los anexos.

3.5. CONFIGURACIÓN DEL SERVIDOR OPC

El servidor OPC utilizado es SIMATIC WinCC el cual es compatible tanto con el PLC Siemens S7-400, como con el software de Expertune. Este programa permite publicar las variables de proceso programadas en el PLC, en el estándar OPC.

En este servidor; se debió crear un nuevo proyecto de tipo “Proyecto para estación monopuesto”, lo que quiere decir que, la configuración de este servidor será únicamente manejada por el computador en el cual este instalado. De otro modo, si se utiliza la opción “Proyecto para estación multipuesto”, se necesitará adquirir una licencia adicional para este propósito. Sin embargo, con la configuración monopuesto, es suficiente para conectar en red los equipos con el software Expertune.

Una vez creado el proyecto, se despliega la pestaña de herramientas y se selecciona el menú de variables. En el se debió agregar el driver por el cual son obtenidas las variables, en este caso en específico, se agregó el canal SIMATIC S7 PROTOCOL SUITE.

Seguido de esta configuración, aparecen los diferentes protocolos por los cuales se puede realizar la comunicación del servidor con el PLC Siemens para obtener las variables de proceso. Entre estos protocolos cabe destacar “Ethernet” y “MPI”. En un principio se pensó utilizar el protocolo “TCP/IP”, sin embargo, para poder utilizar el servidor en red habría sido necesario añadir otra tarjeta de red al servidor. Por ese motivo se optó por usar el protocolo MPI, para así poder utilizar la red LAN como el medio de acceso del cliente OPC (Expertune). En cualquiera de los dos casos, TCP/IP y MPI, se configura el número de la dirección IP del PLC, el número del bastidor y el número de slot. La configuración implementada se muestra en la tabla 7.

Datos de configuración del PLC en el Servidor	
Dirección IP del PLC	192.168.0.1
Bastidor	0
Slot	3

Tabla 7, Datos de configuración del PLC en OPC

MPI, Multiple-Point Interface, es una interfaz propietaria de Siemens. Es utilizada para la conexión de la estación de programación (PC) con consolas de operador y otros dispositivos de la familia Simatic.

Una vez configurado el canal y el protocolo, se agregaron las variables de interés para el correcto uso del programa cliente. La tabla 8 muestra las variables agregadas en servidor OPC.

Variable servidor OPC	Tipo de Dato	Acceso de Expertune
MODOS	Byte	Lectura y Escritura
Salida hacia el actuador	Flotante	Lectura y Escritura
Set Point Nivel (lineal)	Flotante	Lectura y Escritura
Set Point Nivel (no lineal)	Flotante	Lectura y Escritura
Medición Nivel Lineal	Flotante	Solo Lectura
Medición Nivel No Lineal	Flotante	Solo Lectura
Ganancia Proporcional	Flotante	Lectura y Escritura
Tiempo Integral	Doble Palabra	Lectura y Escritura
Tiempo Derivativo	Doble Palabra	Lectura y Escritura
Error 2 (Lineal)	Flotante	Solo Lectura
Error 1 (No lineal)	Flotante	Solo Lectura

Tabla 8, modos de control

La figura 7 muestra la configuración física de los elementos. Se da por entendido que las variables de proceso son recopiladas en el PLC a través del protocolo PROFIBUS PA, no mostrado en la imagen.

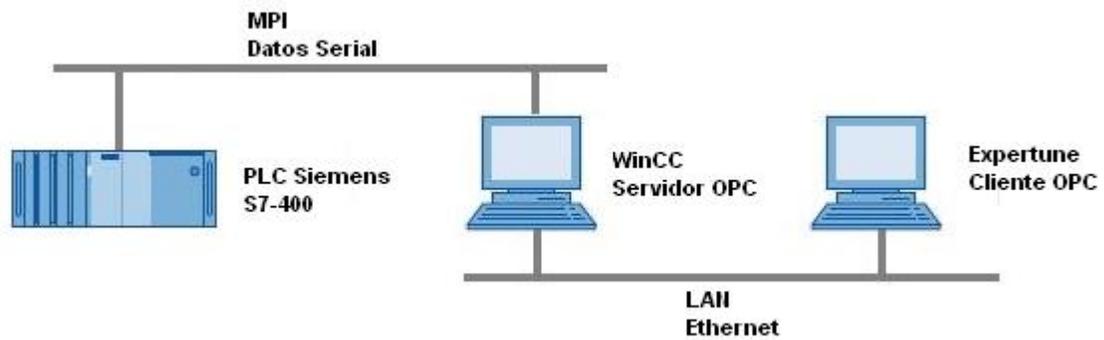


Figura 7, Configuración Física de los elementos PLC, Servidor OPC y Cliente OPC

La configuración IP de los equipos donde se encuentra el servidor y cliente OPC, es asignada por el servidor de la universidad. Este direccionamiento es fijo por lo cual las configuraciones de los equipos a través de los cuales podemos establecer el enlace son:

- Dirección IP Servidor OPC: 10.6.7.122
Cuenta de usuario: PC350
Contraseña: cpu350
- Dirección IP Cliente OPC: 10.4.7.253
Cuenta de usuario: PC350
Contraseña: cpu350

Para establecer la comunicación OPC en la red, también es necesario que se encuentre activo el servicio WinCC RT (Runtime), disponible cuando se abre el proyecto e identificado con el icono de “Play” o “Reproducción”. La función de este servicio es activar la publicación de las variables y permitir la conexión con el servidor WinCC OPC.

Los archivos de configuración del servidor WinCC, para el uso específico de la aplicación Expertune, se encuentran en los Anexos.

3.6. CONFIGURACIÓN EXPERTUNE

PID Loop Optimizer de Expertune es un programa cuyo objetivo es la sintonización de lazos de control, optimizando la respuesta del sistema, haciéndolo estable, y mejorando el desempeño de la planta.

Unas de las ventajas de este programa son: encuentra un modelo del sistema, permite obtener los parámetros del controlador para sistema servo o regulador, permite simular cambios en el Setpoint y disturbios y permite conectarse fácilmente a un servidor OPC.

PID Loop Optimizer utiliza un método de respuesta en frecuencia avanzado seguido de un sistema “experto” para hallar la sintonización PID y el mejor modelo. Primero, el programa convierte la respuesta en tiempo del sistema a una respuesta en frecuencia. Es por esta razón que los datos en tiempo deben empezar y terminar con el proceso en estado estable. La calidad de la respuesta en frecuencia y su

correspondiente sintonización vendrá dada por la calidad de los datos en tiempo, si ocurrió un disturbio en los datos de tiempo, la respuesta en frecuencia resulta alterada. Luego, el programa ejecuta un “sistema experto” para encontrar la mejor sintonización y el mejor modelo.

De este “sistema experto” no se posee información adicional, pues este es un producto patentado para el cual se compró la licencia necesaria para su uso.

Los resultados de la sintonización se muestran en cuatro categorías. Tres de las cuales son para rechazo a perturbaciones (regulador) y otro para cambio en el Setpoint (Servo). Para los sistemas reguladores hay 3 opciones, “más rápido”, “rápido” y “lento”. El usuario tiene control sobre el “factor de seguridad” en la sintonización.

Hay que tener en cuenta que siempre hay una relación entre una sintonización “rápida” y la sensibilidad a cambios en las condiciones del proceso (cambios de ganancia y tiempo muerto). Así, la sintonización “más rápida”, con el factor de seguridad mínimo, resulta en el más sensible a cambios del proceso. Por el contrario, la sintonización “lenta” con un factor de seguridad máximo, será el menos sensible a estos cambios.

Este procedimiento de sintonización puede realizarse para una respuesta en tiempo de malla abierta (Respuesta paso) o de malla cerrada (Respuesta con control).

Un aspecto importante sobre PID Loop Optimizer es el hecho que la aplicación no es quien realiza el cálculo algorítmico de la salida de control correspondiente a la posición de la válvula. Este proceso es realizado en la CPU del PLC. Esta es la razón de haber utilizado los bloques FB41 y los bloques de función PID en la configuración del PLC.

Cabe enfatizar que la optimización de los lazos de control, a través de la plataforma Expertune, puede ser un procedimiento iterativo, ya que como se menciona anteriormente, se realiza la sintonización de los parámetros PID a través de a la respuesta en frecuencia de un experimento real (Respuesta paso o Respuesta con controlador) y por tanto puede suceder que la primera sintonización no sea la mejor. En este caso, el punto de partida para el nuevo cálculo de los parámetros es la prueba realizada con la sintonización inmediatamente anterior. La figura 8 presenta un diagrama de flujo donde se ilustra cómo se lleva a cabo la sintonización.

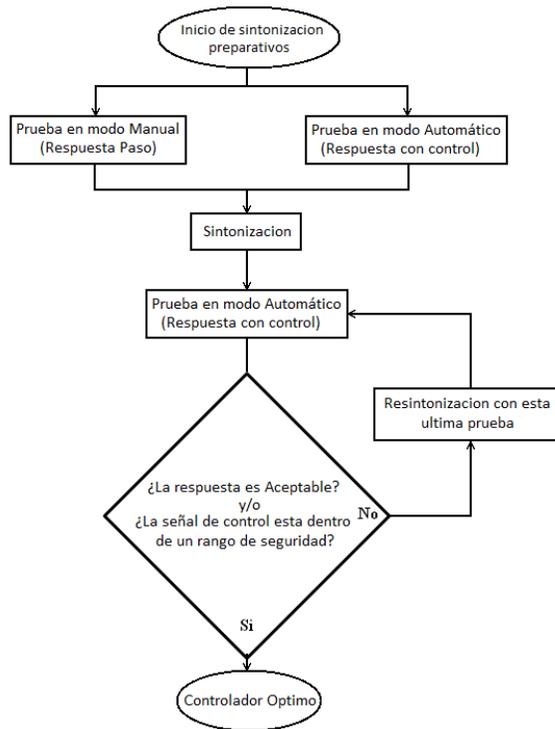


Figura 8, Procedimiento de sintonización óptima

La configuración de Expertune es relativamente sencilla una vez que este reconozca el servidor OPC en el cual están las variables necesarias para el manejo del sistema. Al ingresar la variable MODOS, se debe adicionar la tabla de los modos de control que se quieren implementar en el lazo. Para cada lazo que se quiera adicionar, se deberá indicar esta tabla de operación. La tabla 9 y tabla 10 relacionan los valores de la variable MODOS con las acciones que realiza.

Estado Operativo del Sistema	Acciones Realizadas
Manual	La bomba esta activa, por lo tanto habrá flujo de agua. El porcentaje de apertura de la válvula lo controla el usuario.
Auto	La bomba esta activa, por lo tanto habrá flujo de agua. El porcentaje de apertura de la válvula lo determina el cálculo del control según los parámetros P, I y D ingresados
Pausado	La bomba esta inactiva, por lo tanto NO habrá flujo de agua. El porcentaje de apertura de la válvula no se puede controlar, la posición está determinada por su estado inmediatamente anterior en Manual o Auto.
Reset	La bomba esta inactiva, por lo tanto NO habrá flujo de agua. El porcentaje de apertura de la válvula no se puede controlar, la posición está determinada por su estado inmediatamente anterior en Manual o Auto. Se realiza Reset al acumulado en la acción integral. Se utiliza al cambiar de parámetros P, I y D.

Tabla 9, Estado de operación del sistema relacionado con la variable Modos

Relación de operación de modos de control										
Modo de control		Representación de los bits (MSB a LSB)								Valor de la variable MODOS (Decimal)
		NA	NA	NA	NA	Selección de lazo PID	Activación de la Bomba	Manual/Automático PID	Reset bloque PID	
Control sobre tanque lineal	Manual	0	0	0	0	0	1	1	0	6
	Automático	0	0	0	0	0	1	0	0	4
	Pausado	0	0	0	0	0	0	1	0	2
	Reset	0	0	0	0	0	0	1	1	3
Control sobre tanque no lineal	Manual	0	0	0	0	1	1	1	0	14
	Automático	0	0	0	0	1	1	0	0	12
	Pausado	0	0	0	0	1	0	1	0	10
	Reset	0	0	0	0	1	0	1	1	11

Tabla 10, modos de control

En la configuración de las variables de SP y PV (tabla 5), se incluye la escalización para pasar de metros a centímetros. De esta forma los datos tienen mejor relación a la escala de los niveles de los tanques.

4. MODELOS PLANTEADOS POR EXPERTUNE Y CÁLCULO DE CONTROLADORES

Los modelos encontrados se basan en datos obtenidos de la planta ante una entrada paso. Como se menciona en la sección 3.6, a partir de la respuesta en tiempo, la aplicación interpreta una respuesta en frecuencia, la cual es usada para generar un modelo del proceso en el dominio de Laplace. A partir de ella Expertune genera dos modelos diferentes, uno forzando la ganancia de estado estable y otro permitiendo una ganancia flotante. El significado de cada opción radica en el hecho que la aplicación da más importancia a los ajustes de parámetros de la respuesta en frecuencia. Siendo así, forzar la ganancia prioriza el ajuste sobre bajas frecuencias, mientras que permitir una ganancia flotante da un peso mayor al ajuste de altas frecuencias. Sin embargo, la aplicación no obtiene datos de las frecuencias cercanas a cero y por lo tanto en el modelo de ganancia forzada, pareciera que el modelo no corresponde a la realidad. Es por esta razón que en algunos modos de operación, los modelos de Expertune no se acercan mucho a la respuesta real del sistema. Para evitar que esta característica de Expertune afecte la sintonización de los controladores clásicos, se plateó un tercer modelo en algunos de los modos. Este modelo, basado en el de Expertune pero con algunos ajustes realizados manualmente sobre la ganancia y el polo, se acerca más a los datos reales. El tiempo muerto no se modificó. Finalmente con ayuda de Matlab se encontró el error respecto a los datos obtenidos de la planta según la ecuación (4.1)

$$Error = \sum_{i=1}^n |Real_i - modelo_i| \quad (4.1)$$

El modelo elegido corresponde al que presenta el error más pequeño.

El código de Matlab donde se comparan los diferentes modelos está disponible en los anexos bajo la categoría consolidación de modelos.

Es importante notar que en todas las respuestas paso de los modelos la medición de nivel corresponde a una medida diferencial que no muestra el nivel inicial, solamente el cambio en el nivel. Esto se hizo para graficar fácilmente las respuestas obtenidas con los modelos en Matlab.

4.1. MODELOS Y CONTROLADORES PARA EL MODO 1

En la figura 9 se presenta una gráfica comparativa entre los modelos y la respuesta real del sistema.

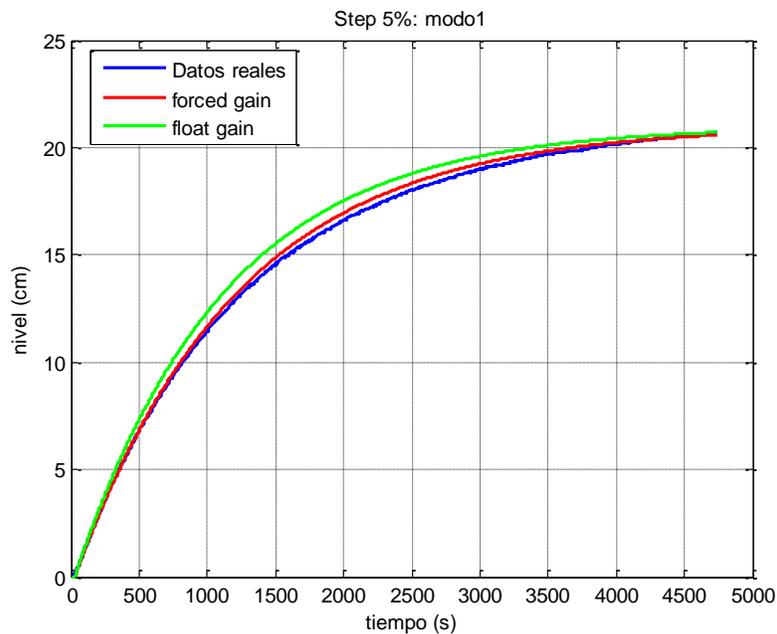


Figura 9, modelos modo 1

El modelo con el menor error respecto a los datos corresponde al de ganancia forzada cuya función de transferencia se muestra en la ecuación (4.2)

$$G_{M1} = \frac{4.2}{1200 \cdot s + 1} \cdot e^{-28 \cdot s} \quad (4.2)$$

$$Gain_{M1} = 4.2$$

$$\tau_{M1} = 1200 \text{ s}$$

$$T_{M1} = 28 \text{ s}$$

La tabla 11 muestra las ganancias de los diferentes controladores calculados para modo 1.

	P	I (s)	D (s)
Ziegler Nichols	12.2	56.0	14.0
Cohen Coon	12.3	69.3	10.0
ISE	12.4	60.1	15.3
ITAE	11.3	89.0	10.9
Expertune PI	17.0	55.0	-
Expertune PI2	47.0	25.0	-
Expertune PID	17.0	31.0	1.6
Expertune PID2	50.0	12.0	0.6

Tabla 11, controladores modo 1

4.2. MODELOS Y CONTROLADORES PARA EL MODO 2

En la figura 10 se presenta una gráfica comparativa entre los modelos y la respuesta real del sistema.

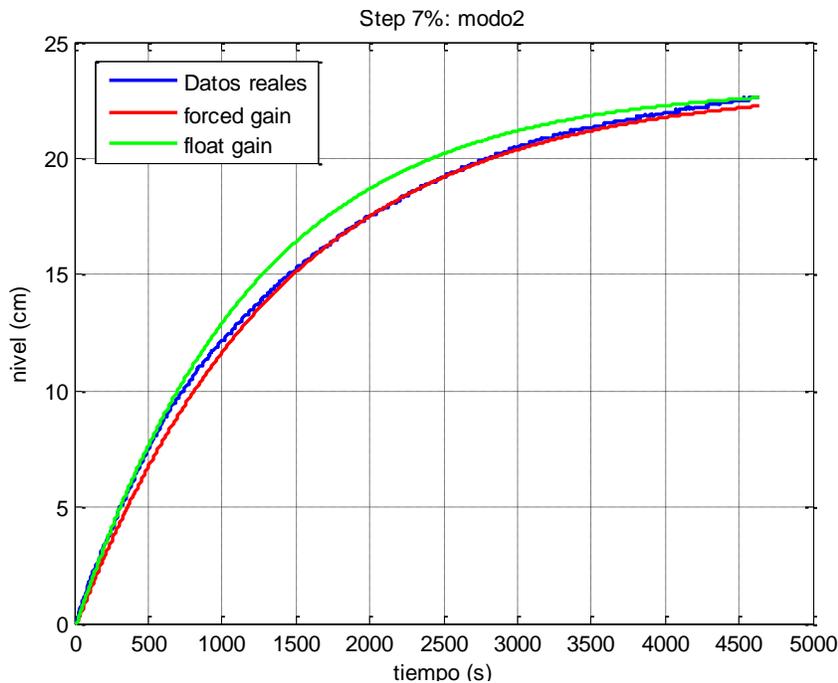


Figura 10, modelos modo 2

El modelo con el menor error respecto a los datos corresponde al de ganancia forzada cuya función de transferencia se muestra en la ecuación (4.3)

$$G_{M2} = \frac{3.3}{1400 \cdot s + 1} \cdot e^{-18 \cdot s} \quad (4.3)$$

$$Gain_{M2} = 3.3$$

$$\tau_{M2} = 1400 \text{ s}$$

$$T_{M2} = 18$$

Al calcular y probar los controladores PID se encontró que la señal de control presentaba una oscilación rápida de hasta 20% de apertura. Esto ocurrió por la misma naturaleza del componente derivativo y se vio amplificado por la baja resolución del sensor de nivel, de 0.1cm, disponible en el tanque no lineal. Este comportamiento de la señal, aunque no representaba peligro para la válvula por las limitaciones configuradas en el posicionador, resulta inaceptable. La figura 11 muestra la señal de control obtenida con los controladores PI2 y PID2 de Expertune. En ella se observa claramente el ruido generado por la acción derivativa. Los 4 controladores teóricos presentaban señales de control con aun más ruido. Se estudió la posibilidad de simplemente eliminar el componente derivativo del controlador PID pero, para no afectar tanto el desempeño de los controladores clásicos se decidió cambiar la estructura de control a PI. Los parámetros de desempeño del controlador sintonizado inicialmente como PI superan a los del controlador PID cuya acción derivativa es anulada.

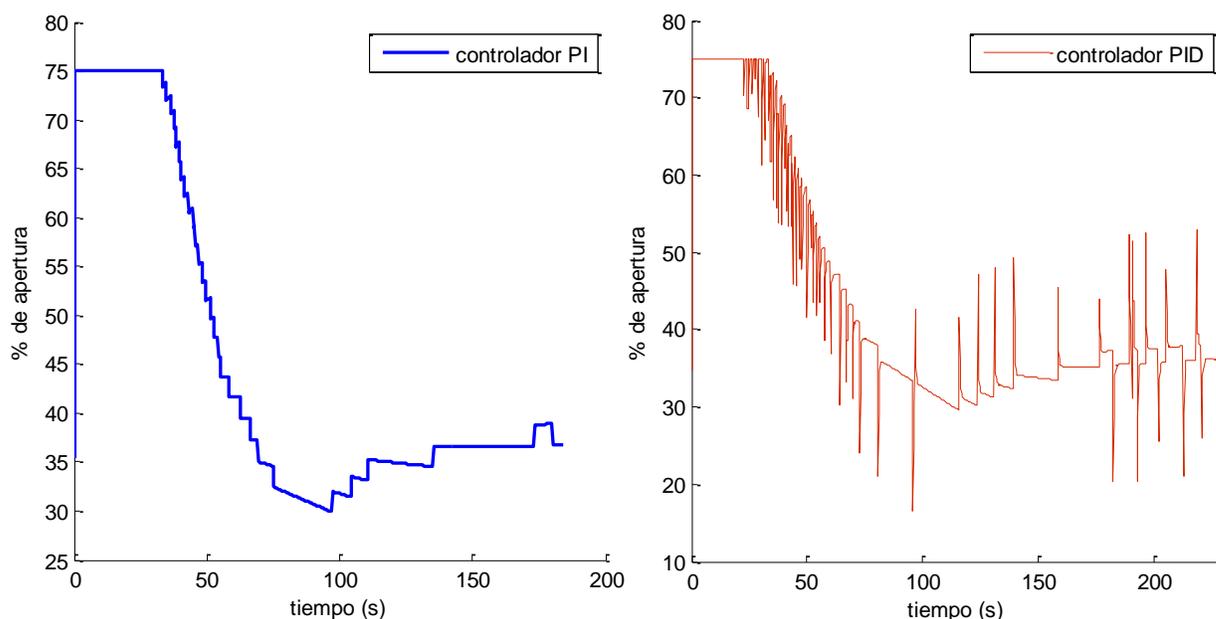


Figura 11, Efecto de la acción derivativa en la señal de control

La tabla 12 muestra las ganancias de los diferentes controladores calculados para modo 2.

	P	I (s)	D (s)
Ziegler-Nichols	21.2	59.4	-
Cohen-Coon	21.2	57.8	-
ISE	25.7	114.0	-
ITAE	18.3	107.6	-
Expertune PI	15.0	79.0	-
Expertune PI2	21.0	73.0	-
Expertune PID	14.0	44.0	2.3
Expertune PID2	18.0	48.0	2.6

Tabla 12, controladores modo 2

4.3. MODELOS Y CONTROLADORES PARA EL MODO 3

En la figura 12 se presenta una gráfica comparativa entre los modelos y la respuesta real del sistema.

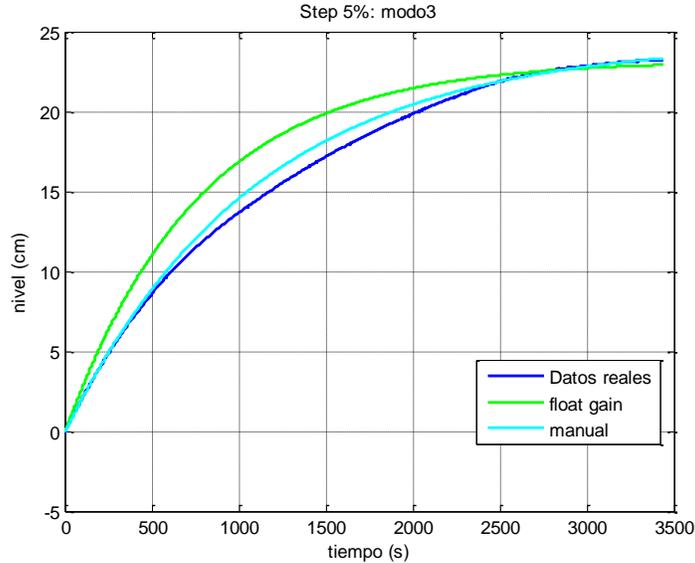


Figura 12, Modelos modo 3

En este modo de operación se omitió el modelo planteado por Expertune con ganancia forzada debido a que contenía un integrador. Esto se debe a la importancia que da esta opción a bajas frecuencias, al realizar el ajuste del modelo y a la respuesta inicial de la planta con comportamiento similar a una rampa.

El modelo con el menor error respecto a los datos corresponde al modelo al modelo ajustado de forma manual cuya función de transferencia se muestra en la ecuación (4.4)

$$G_{M3} = \frac{4.88}{1100 \cdot s + 1} \cdot e^{-4.5 \cdot s} \quad (4.4)$$

$$Gain_{M3} = 4.88$$

$$\tau_{M3} = 1100 \text{ s}$$

$$T_{M3} = 4.5 \text{ s}$$

La tabla 13 muestra las ganancias de los diferentes controladores calculados para modo 3.

	P	I (s)	D (s)
Ziegler Nichols	60.1	9.0	2.3
Cohen Coon	60.2	11.2	1.6
ISE	55.3	14.4	2.4
ITAE	50.8	22.6	1.8
Expertune PI	18.0	59.0	-
Expertune PI2	37.0	29.0	-
Expertune PID	18.0	33.0	1.8
Expertune PID2	47.0	13.0	1.7

Tabla 13, Controladores modo 3

4.4. MODELOS Y CONTROLADORES PARA EL MODO 4

En la figura 13 se presenta una gráfica comparativa entre los modelos y la respuesta real del sistema.

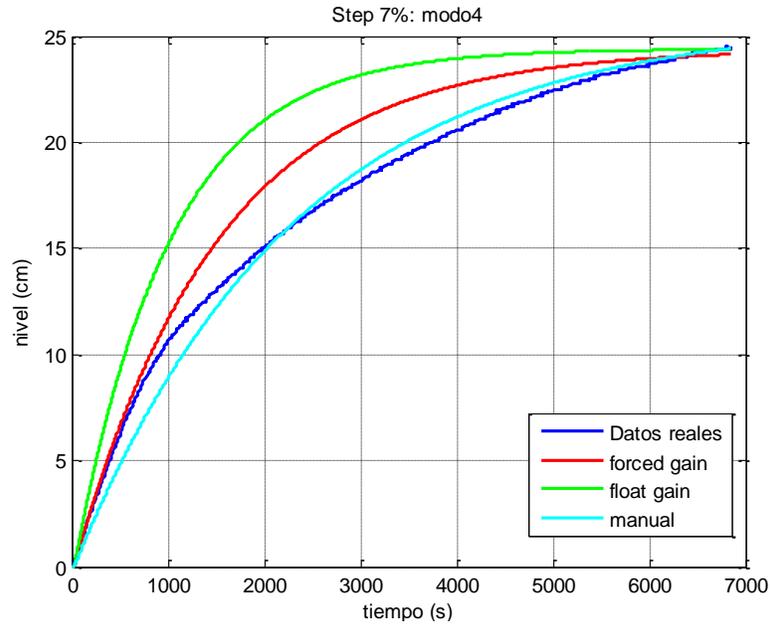


Figura 13, Modelos modo 4

El modelo con el menor error respecto a los datos al modelo ajustado de forma manual cuya función de transferencia se muestra en la ecuación (4.5)

$$G_{M4} = \frac{5.15}{2300 \cdot s + 1} \cdot e^{-26 \cdot s} \quad (4.5)$$

$$Gain_{M4} = 5.15$$

$$\tau_{M4} = 2300 \text{ s}$$

$$T_{M4} = 26 \text{ s}$$

Al igual que en el modo 2, los controladores PID daban como resultado señales de control muy ruidosas. En este modo el problema se extendió también a los controladores PID sintonizados por Expertune. Por este motivo todos los controladores probados corresponden a una estructura de control PI.

La tabla 14 muestra las ganancias de los diferentes controladores calculados para modo 4.

	P	I (s)
Ziegler Nichols	15.5	85.8
Cohen Coon	15.5	83.8
ISE	18.7	170.3
ITAE	13.3	161.9
Expertune PI	9.0	190.0
Expertune PI2	15.0	85.0

Tabla 14, controladores modo 4

5. RESULTADOS

Para medir el desempeño de los controladores de forma sistemática y objetiva se planteó un método para asignarle un puntaje a cada controlador en cada parámetro de desempeño específico. El controlador con el mejor desempeño en un parámetro para una prueba específica obtiene 100%. El controlador que obtuvo el peor desempeño recibe un 0%. Los demás controladores cuyos parámetros quedaron en algún punto intermedio reciben un puntaje proporcional. Si estuvieron cerca del mejor controlador, recibirán una puntuación igualmente cercana. La ecuación 5.1 determina el puntaje para los controladores.

$$Puntaje = 1 - \frac{ParamControlador_i - \min(Parametro)}{\max(Parametro) - \min(Parametro)} \cdot MaxScore \quad (5.1)$$

Las pruebas constan de 3 respuestas paso y una perturbación. Para los modos 1 y 3, las respuestas paso son de 29cm a 34cm, 34cm a 35cm y 35cm a 50cm. Para los modos 2 y 4, son de 25cm a 26cm, 26cm a 30cm y 30cm a 40cm. De esta manera se puede evaluar el comportamiento ante escalones de diferentes amplitudes y los efectos de la no-linealidad al trabajar en diferentes niveles. En todas las pruebas, la perturbación se realizó después del último escalón. Para los modos no interactuantes se cerró parcialmente la válvula de desagüe del tanque. En los modos interactuantes la perturbación consistió en abrir totalmente la válvula de salida del tanque a donde llegaba el flujo de entrada. Así, durante la perturbación ambas válvulas de desagüe en los modos interactuantes están totalmente abiertas.

Los parámetros de desempeño mostrados en las tablas de resultados se calcularon con los mismos criterios para todos los controladores dentro de un mismo modo. Sin embargo algunos criterios varían entre un modo y el otro. El criterio para el tiempo de establecimiento fue un error máximo respecto a la amplitud del escalón del 2%. Para el paso de 1cm fue necesario aumentar el porcentaje de error debido al ruido implícito de realizar una medida de nivel. También fue necesario ajustarlo para los modos 2 y 4 debido a la resolución de 0.1cm del sensor de nivel en el tanque no lineal. Para estos modos se estableció un rango de estado

estable diferente, mostrado en la ecuación 5.2. R_{SS} es el rango de estado estable y V_{SS} es el valor de estado estable.

$$R_{SS} = V_{SS} \pm 0.1 \text{ cm} \quad (5.2)$$

Por ejemplo, en el caso del escalón entre 25cm y 26cm el rango de estado estable es entre 25.9cm y 26.1cm. Es necesario hacerlo de esta manera debido a que el controlador no puede ajustar su salida cuando el sensor marca 26cm. El nivel debe subir o bajar.

El máximo sobrepico se calculó como la relación entre el punto más alto (o más bajo para las perturbaciones en modo 3 y 4) y la amplitud del escalón. Esto se representa en la ecuación 5.3

$$M_p = \frac{\text{Valor máximo}}{\Delta \text{Referencia}} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

La evaluación cuantitativa de la señal de control se había realizado inicialmente a partir de la energía y la potencia de la señal de control. Los resultados obtenidos no eran representativos ya que la variación entre los controladores era reducida. Por este motivo se decidió hacer la evaluación de una forma diferente. El método propuesto consiste en calcular la variación de la señal de control respecto al valor de esta señal en estado estable. Esta variación solo se calcula desde el tiempo inicial hasta el tiempo de establecimiento. El valor de la señal de control en estado estable se obtiene del promedio de la señal de control desde el tiempo de establecimiento hasta el fin de los datos. Para este promedio se tienen en cuenta las respuestas de todos los controladores para obtener un único valor de estado estable que incluye todos los controladores dentro de un mismo modo. La ecuación 5.4 muestra el cálculo de este promedio.

$$Mean_{CO} = \text{promedio}(ZN_{CO-SS} + CC_{CO-SS} + ISE_{CO-SS} + ITAE_{CO-SS} + XtunePI_{CO-SS} \dots) \quad (5.4)$$

La ecuación 5.5 muestra cómo se calculó la variación de la señal de control para el controlador i. El promedio es para evitar que el tiempo de establecimiento impacte la evaluación de la señal de control.

$$Var_i = \text{promedio}(\text{abs}(CO_i - Mean_{CO})) \quad (5.5)$$

A partir de Expertune OPC PID tuner se calculó un controlador PI y un PID con la información recopilada por el programa de una entrada paso en malla abierta. Luego, a partir de las respuestas en lazo cerrado se re-sintonizaron para obtener un nuevo PI y un nuevo PID. Cuando en este documento se hable del controlador PI y PID se está haciendo referencia a la primera sintonización de Expertune de los controladores PI y PID respectivamente. Cuando se mencione PI2 o PID2 se está hablando de los controladores de la segunda sintonización.

Todos los resultados fueron exportados a Matlab® donde se realizaron todos los cálculos de los parámetros y puntajes. El código está disponible en los anexos.

5.1. MODO 1

En la figura 14 se presenta la respuesta paso entre 29 y 35 para el modo 1

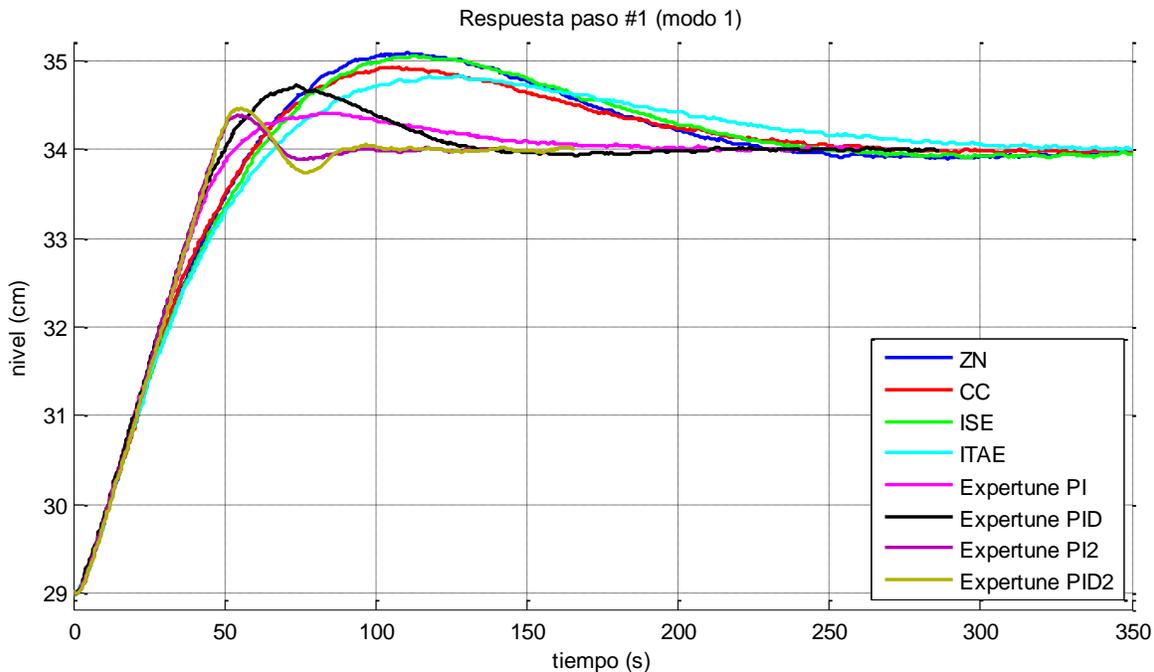


Figura 14, Respuesta paso 1 (modo 1)

En la figura 14 se aprecia como los cuatro controladores convencionales se comportan de forma similar. Los dos controladores de la primera sintonización de Expertune presentan una mejora importante respecto a los convencionales. Además, los 2 controladores de Expertune en su segunda sintonización alcanzan a presentar una pequeña oscilación pero en cuanto a sobrepico y tiempo de establecimiento son muy superiores a todos los demás.

La tabla 15 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 29 y 34 para el modo 1.

MODO 1: PASO 1	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	289.4	21.8476	7.1978
Cohen Coon	233.2	18.6798	8.2664
ISE	226.6	21.1020	8.5834
ITAE	281.6	16.6120	6.5570
Expertune PI	144.0	8.2744	12.9417
Expertune PID	120.2	14.4564	16.9690
Expertune PI re-sintonizado	79.8	7.9026	26.2821
Expertune PID re-sintonizado	84.8	9.2266	27.2536

Tabla 15, parámetros de desempeño ante paso 1 (modo 1)

La figura 15 muestra la respuesta paso entre 34 y 35 para el modo 1

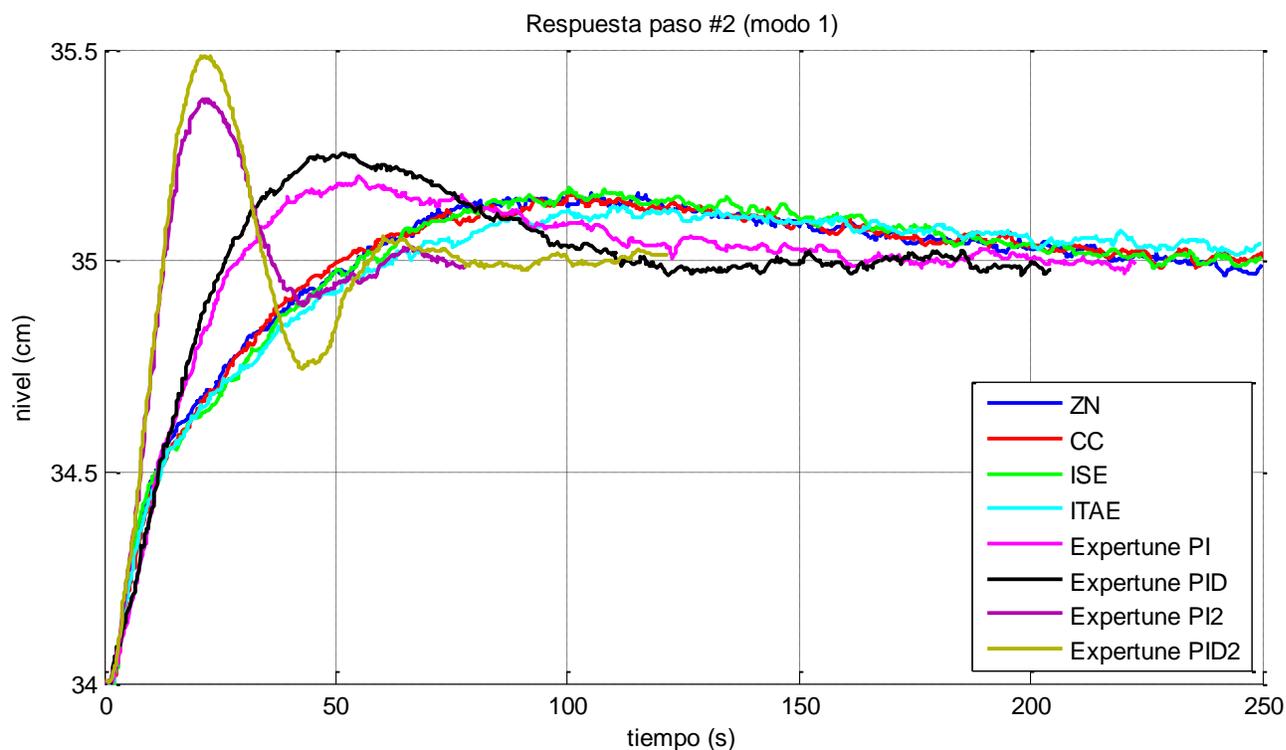


Figura 15, Respuesta paso 2 (modo 1)

En la figura 15 los controladores clásicos vuelven a presentar un comportamiento similar. Los de la primera sintonización de Expertune mejoran considerablemente el tiempo de establecimiento pero aumentan el máximo sobrepico. De nuevo, los controladores planteados por Expertune en la segunda sintonización dan los menores tiempos de establecimiento aunque en este caso el sobrepico aumenta.

La tabla 16 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 34 y 35 para el modo 1.

MODO 1: PASO 2	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	249.0	15.9320	1.5562
Cohen Coon	241.0	15.7670	1.6209
ISE	234.4	17.2310	1.7916
ITAE	249.8	13.0010	1.5383
Expertune PI	221.0	19.9830	1.9311
Expertune PID	204.4	25.5670	2.3758
Expertune PI re-sintonizado	68.4	38.2790	9.6506
Expertune PID re-sintonizado	116.8	48.4460	7.9779

Tabla 16, parámetros de desempeño ante paso 2 (modo 1)

En la figura 16 se presenta la respuesta paso entre 35 y 50 para el modo 1

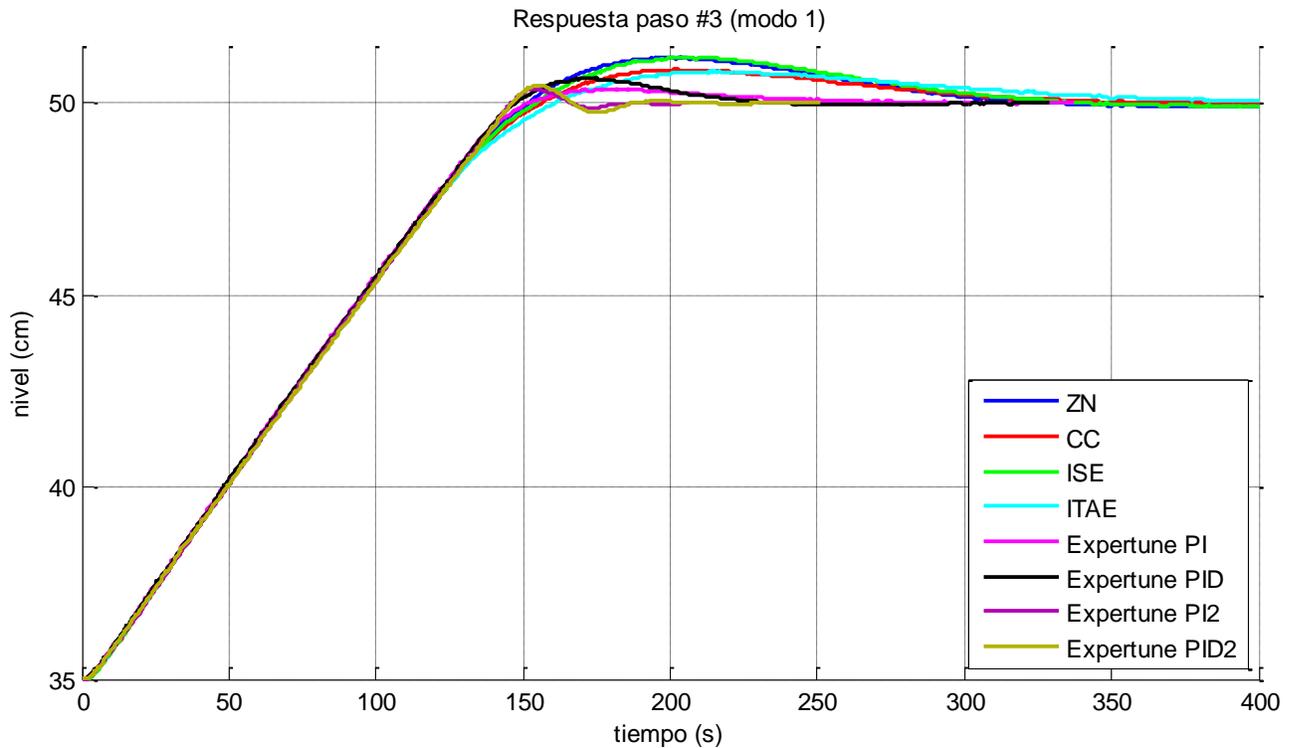


Figura 16, Respuesta paso 3 (modo 1)

La respuesta de los controladores en la figura 16 es muy similar a la del paso entre 29 y 34 mostrada anteriormente en la figura 12. La mejor respuesta en cuanto a tiempo de establecimiento y sobrepico se obtiene con los controladores de la segunda sintonización de Expertune. La similitud en las respuestas se debe principalmente a que en ambos casos el escalón fue de amplitud suficiente para saturar los controladores; por eso la subida es igual sin importar el controlador.

La tabla 17 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 35 y 50 para el modo 1.

MODO 1: PASO 3	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	285.2	7.8896	20.1822
Cohen Coon	288.0	5.7837	19.4409
ISE	294.0	7.9624	19.6187
ITAE	315.6	5.4898	17.5029
Expertune PI	198.2	2.3410	27.9541
Expertune PID	202.0	4.2560	28.2310
Expertune PI re-sintonizado	158.0	2.3891	36.1963
Expertune PID re-sintonizado	161.2	3.0463	36.3507

Tabla 17, parámetros de desempeño ante paso 3 (modo 1)

La figura 17 muestra la respuesta ante una perturbación para el modo 1

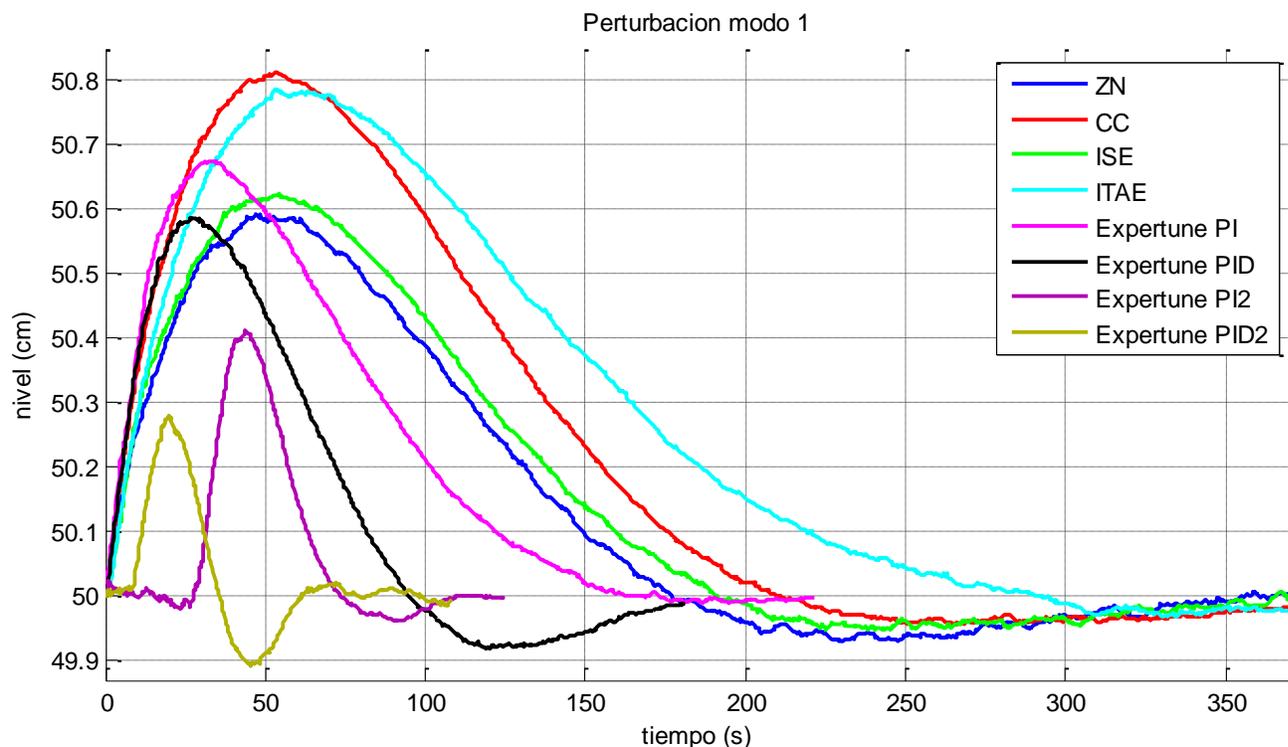


Figura 17, Respuesta a perturbación (modo 1)

La respuesta ante la perturbación mostrada en la figura 17 es la prueba de modo 1 que mayor variación presenta en cuanto al desempeño de los controladores. La peor respuesta la tienen ITAE y CC. Los controladores ZN e ISE presentan un menor sobrepico pero un mayor tiempo de establecimiento comparados con la primera sintonización de Expertune. Los mejores resultados están, nuevamente en los controladores de la segunda sintonización de Expertune donde el PID presenta menor sobrepico pero es más oscilatorio que el PI.

La tabla 18 presenta los parámetros de desempeño ante una perturbación en el modo 1.

MODO 1: PERTURBACIÓN	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	122.0	1.1866	2.6808
Cohen Coon	147.2	1.6289	3.2254
ISE	128.6	1.2468	2.1710
ITAE	173.8	1.5728	1.9986
Expertune PI	94.2	1.3508	4.1996
Expertune PID	66.8	1.1757	4.7040
Expertune PI re-sintonizado	54.6	0.8282	12.0626
Expertune PID re-sintonizado	23.2	0.5601	9.0868

Tabla 18, parámetros de desempeño ante perturbación (modo 1)

5.2. MODO 2

En la figura 18 se presenta la respuesta paso entre 25 y 26 para el modo 2

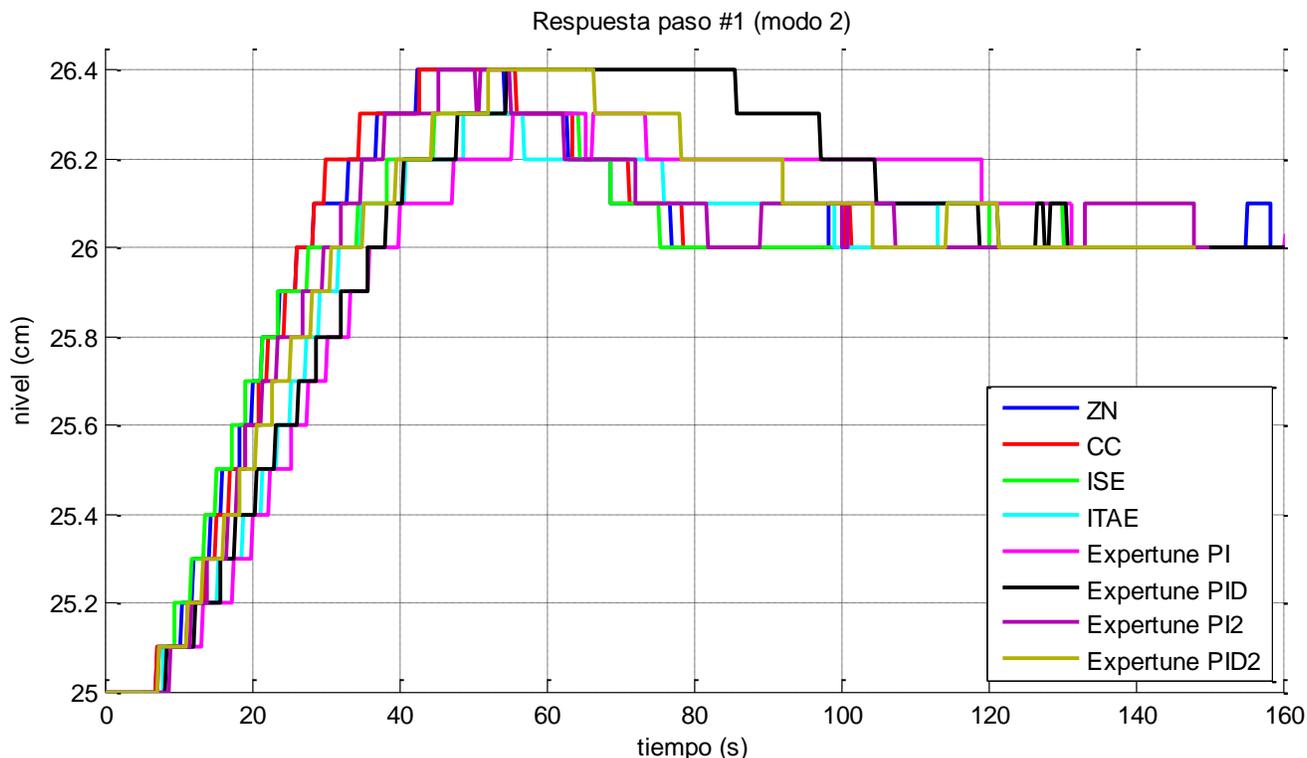


Figura 18, Respuesta paso 1 (modo 2)

En la figura 18 se ve que el único controlador de Expertune que se ubica dentro del grupo con los menores tiempos de establecimiento es el PI2. En cuanto a sobrepico todos los controladores alcanzan 26.3cm o 26.4cm. La señal verde (ISE) parece ser la que a primera vista presenta el mejor desempeño. La limitada resolución del sensor no solo afecta la respuesta de los controladores sino que también dificulta establecer las diferencias entre los controladores, sobre todo en este escalón de 1cm.

La tabla 19 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 25 y 26 para el modo 2.

MODO 2: PASO 1	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	68.6	40.00	8.7233
Cohen Coon	71.0	40.00	8.6705
ISE	68.6	30.00	9.2816
ITAE	75.8	30.00	6.8573
Expertune PI	119.0	30.00	4.7608
Expertune PID	104.6	40.00	6.0458
Expertune PI re-sintonizado	72.0	40.00	8.4819
Expertune PID re-sintonizado	92.0	40.00	6.9014

Tabla 19, parámetros de desempeño ante paso 1 (modo 2)

En la figura 19 se presenta la respuesta paso entre 26 y 30 para el modo 2

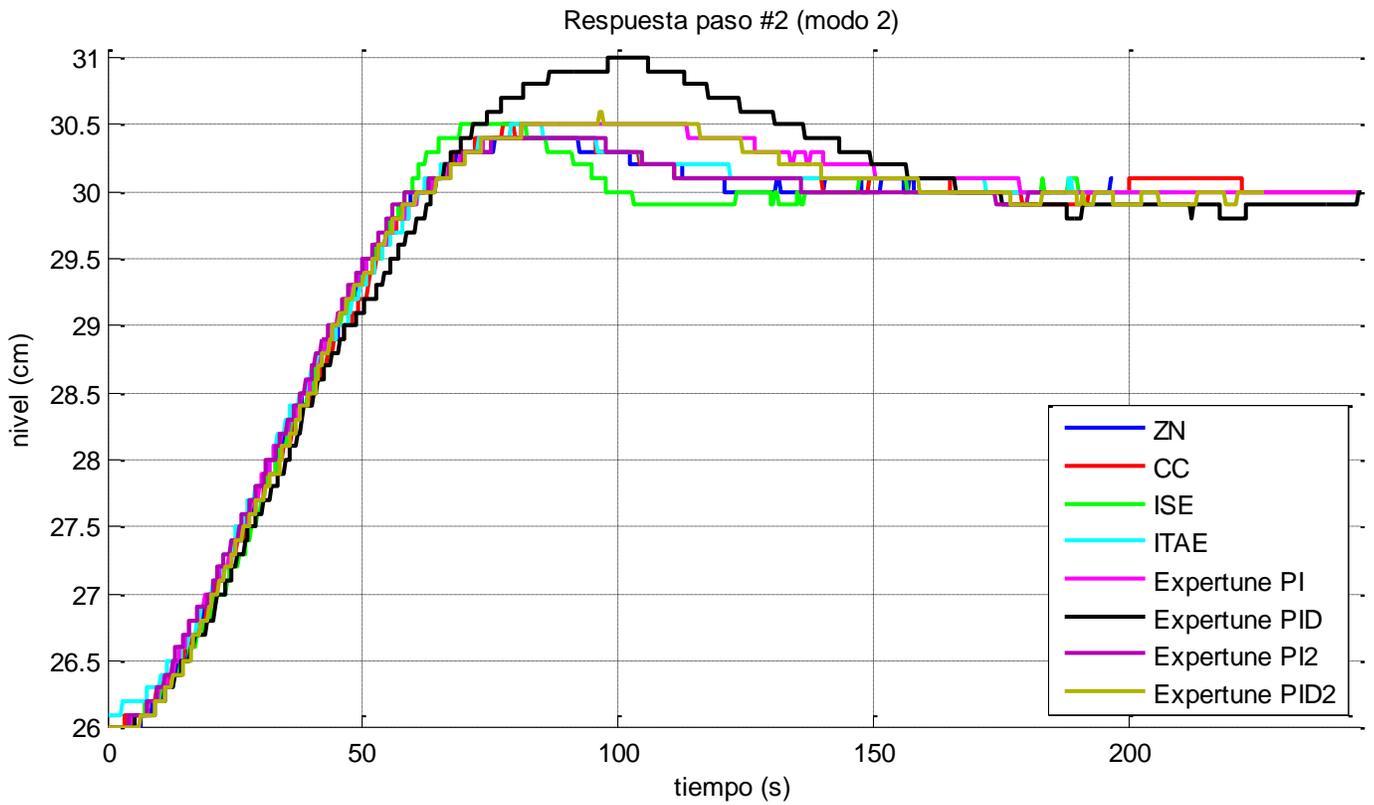


Figura 19, Resposta paso 2 (modo 2)

En la figura 19 el controlador PID de Expertune sobresale por su gran sobrepico y tiempo de establecimiento. Los demás controladores parecen tener sobrepicos comparables. El controlador ISE ostenta el menor tiempo de establecimiento. Los controladores PI y PID2 resaltan por su largo tiempo de establecimiento.

La tabla 20 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 26 y 30 para el modo 2.

MODO 2: PASO 2	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	112.4	10.00	18.3875
Cohen Coon	110.8	12.50	19.3622
ISE	94.6	12.50	23.2088
ITAE	121.6	12.50	16.4028
Expertune PI	150.0	12.50	13.6148
Expertune PID	222.6	25.00	11.7876
Expertune PI re-sintonizado	110.8	10.00	18.3798
Expertune PID re-sintonizado	139.6	15.00	15.6300

Tabla 20, parámetros de desempeño ante paso 2 (modo 2)

En la figura 20 se presenta la respuesta paso entre 30 y 40 para el modo 2

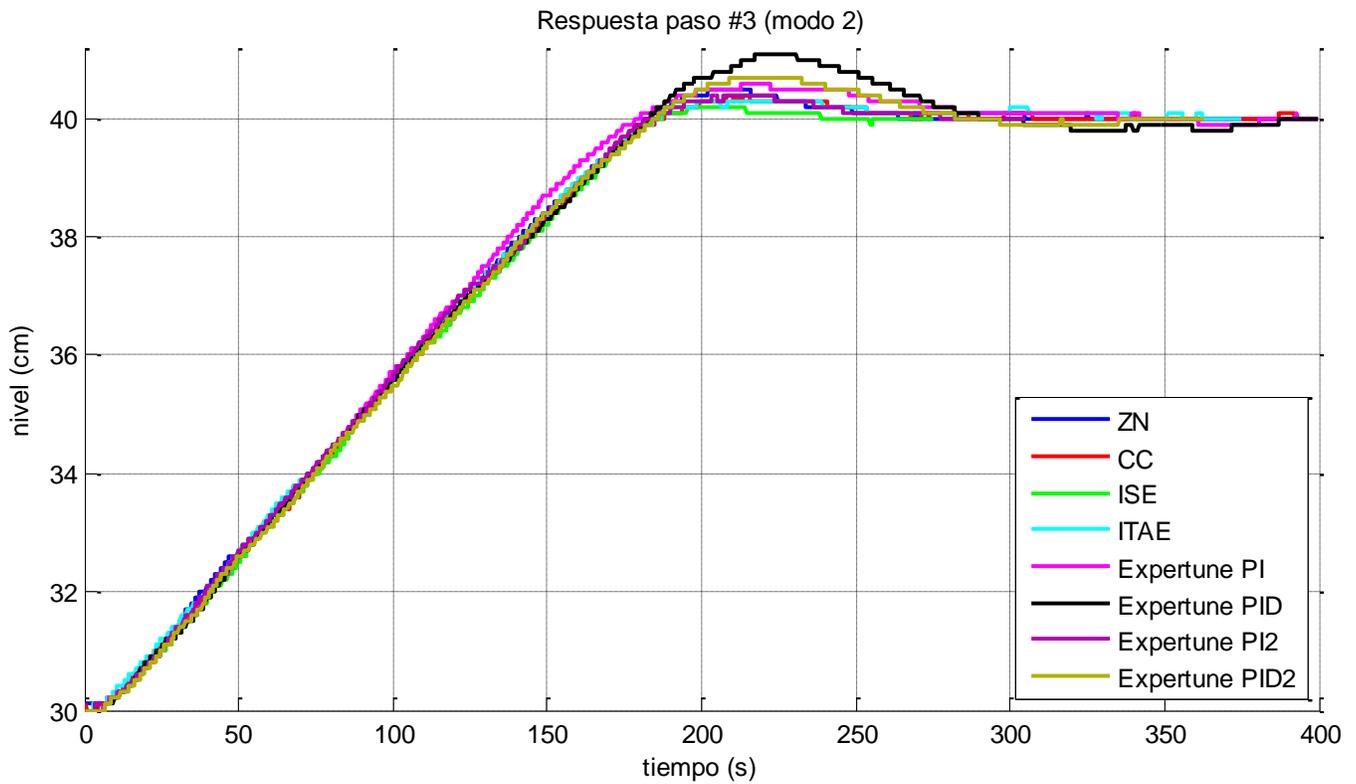


Figura 20, Respuesta paso 3 (modo 2)

Nuevamente los controladores de Expertune a excepción del PI2 presentan los mayores sobrepicos y tiempos de establecimiento. Los demás controladores presentan respuestas similares. A simple vista el controlador ISE es el mejor seguido de ITAE, ZN y PI2.

La tabla 21 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 30 y 40 para el modo 2.

MODO 2: PASO 3	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	248.6	5.00	25.4935
Cohen Coon	253.4	4.00	24.8986
ISE	214.2	2.00	28.9429
ITAE	305.8	3.00	20.0087
Expertune PI	281.6	6.00	21.5257
Expertune PID	371.8	11.00	19.0078
Expertune PI re-sintonizado	245.8	4.00	25.4263
Expertune PID re-sintonizado	271.6	7.00	24.4346

Tabla 21, parámetros de desempeño ante paso 3 (modo 2)

En la figura 21 se muestra la respuesta ante una perturbación para el modo 2

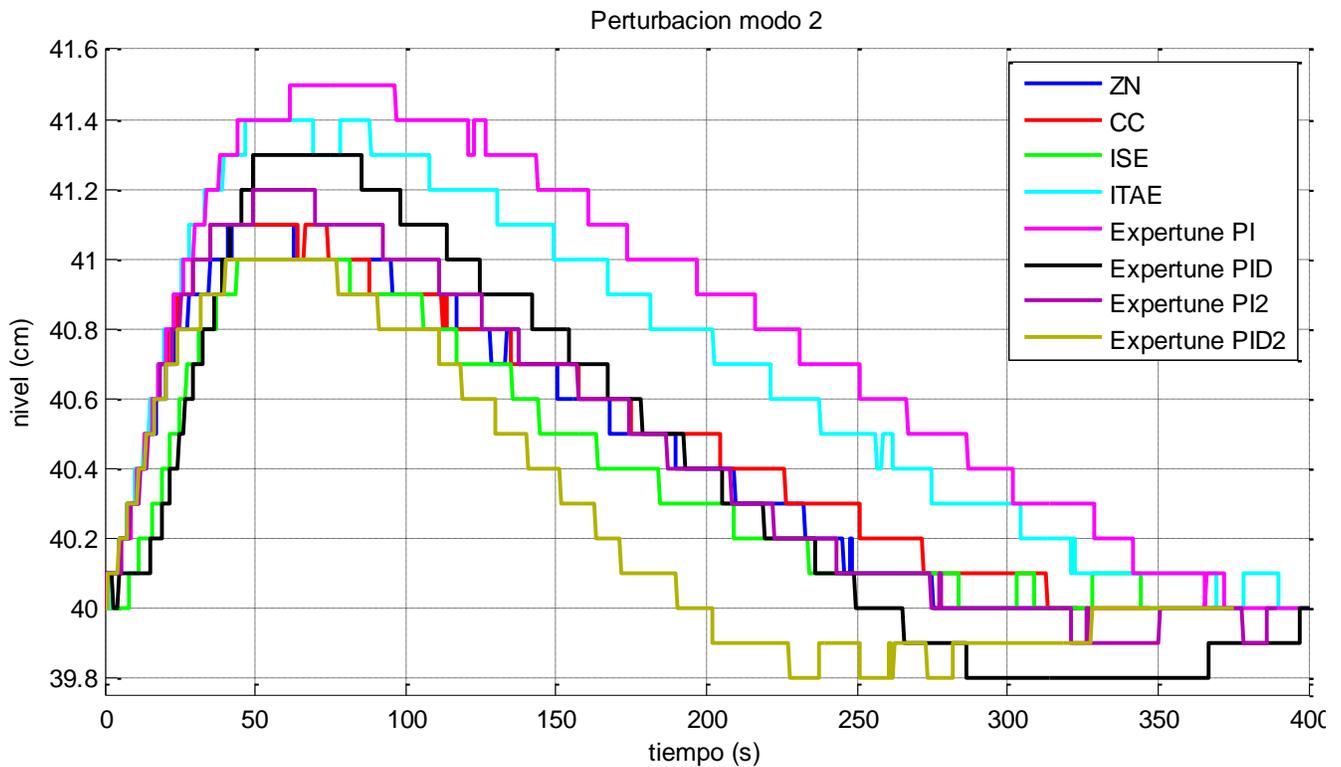


Figura 21, Respuesta a perturbación (modo 2)

En la figura 21 se presentan diferencias más notorias entre las respuestas. El controlador PID2 regresa rápidamente a la referencia aunque el pico negativo afecta su tiempo de establecimiento. La peor respuesta ante la perturbación la presenta ITAE y el controlador PI de Expertune.

La tabla 22 presenta los parámetros de desempeño ante una perturbación en el modo 2.

MODO 2: PERTURBACIÓN	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	248.2	2.75	6.8452
Cohen Coon	271.8	2.75	6.7390
ISE	233.8	2.50	5.8593
ITAE	322.2	3.50	6.3287
Expertune PI	341.6	3.75	6.7824
Expertune PID	366.6	3.25	6.3022
Expertune PI re-sintonizado	243.2	3.00	6.5946
Expertune PID re-sintonizado	281.0	2.50	5.6457

Tabla 22, parámetros de desempeño ante perturbación (modo 2)

5.3. MODO 3

En la figura 22 se presenta la respuesta paso entre 29 y 34 para el modo 3

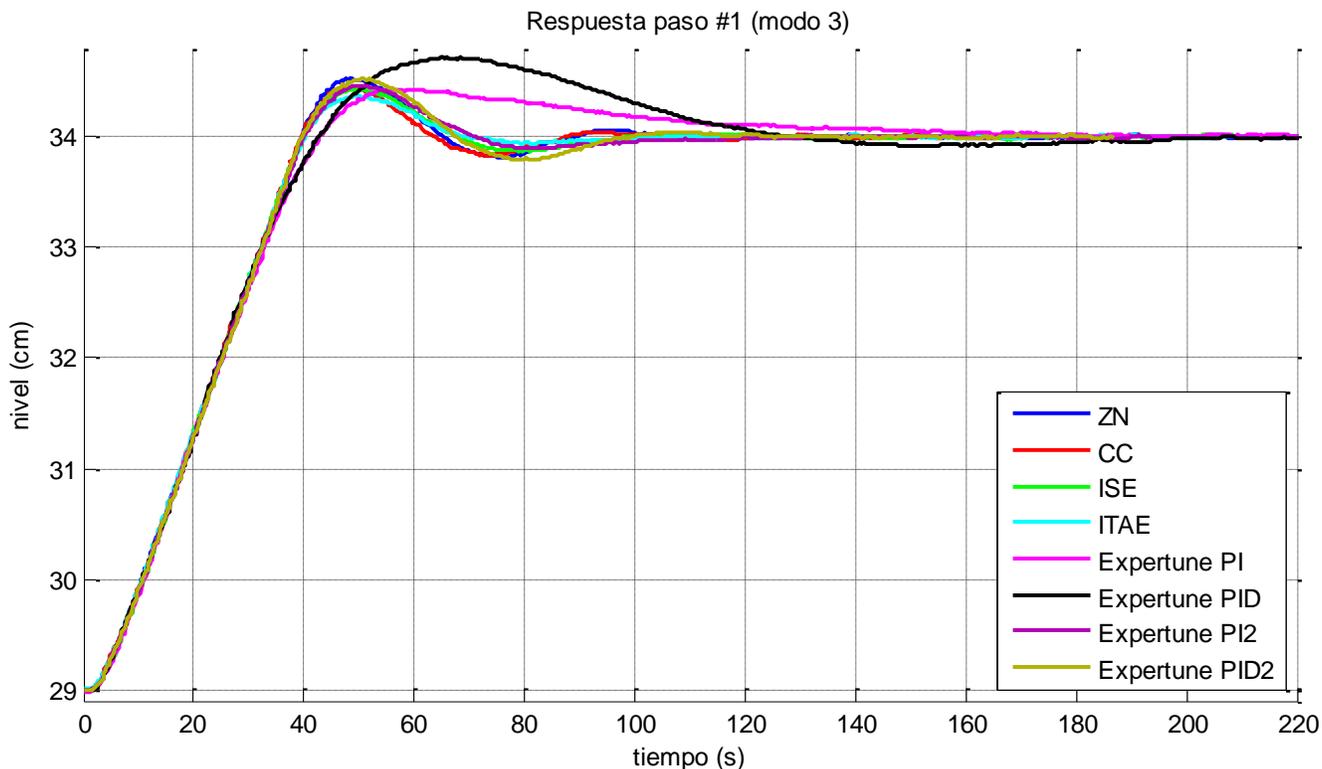


Figura 22, Respuesta paso 1 (modo 3)

En la figura 22 es evidente como los controladores PI y PID de la primera sintonización de Expertune presentan el peor desempeño en sobrepico y tiempo de establecimiento. Los demás controladores presentan respuestas muy similares. Los controladores ISE, ITAE y PI2 parecen ser un poco más lentos que CC y ZN pero su pico negativo de menor amplitud puede traducirse en una mejora del tiempo de establecimiento.

La tabla 23 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 29 y 34 para el modo 3.

MODO 3: PASO 1	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	82.0	10.5468	28.2095
Cohen Coon	80.2	8.8388	27.7230
ISE	86.4	8.6522	24.5926
ITAE	63.8	7.4746	30.8739
Expertune PI	125.6	8.5774	13.5574
Expertune PID	115.8	14.2972	17.2124
Expertune PI re-sintonizado	84.8	9.1836	24.2501
Expertune PID re-sintonizado	90.6	10.4946	25.1954

Tabla 23, parámetros de desempeño ante paso 1 (modo 3)

En la figura 23 se presenta la respuesta paso entre 34 y 35 para el modo 3

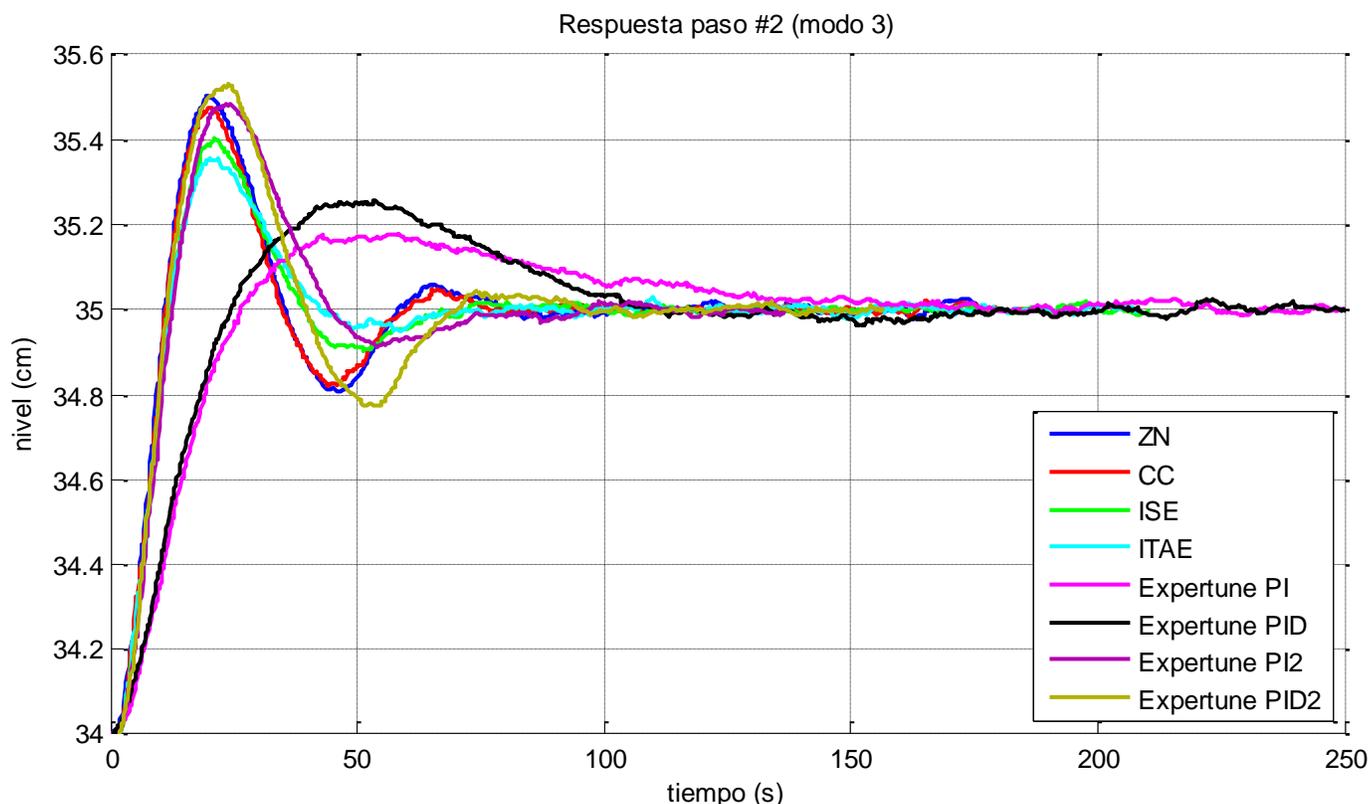


Figura 23, Respuesta paso 2 (modo 3)

Los resultados de la prueba mostrada en la figura 23 están divididos en dos grupos. La primera sintonización de Expertune con menor sobrepico pero mayor tiempo de establecimiento y los demás controladores con alto sobrepico pero bajo tiempo de establecimiento. Los controladores de minimización del error parecen estar en un buen punto entre sobrepico y tiempo de establecimiento.

La tabla 24 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 34 y 35 para el modo 3.

MODO 3: PASO 2	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	69.2	50.2960	13.3553
Cohen Coon	67.4	47.4870	12.9855
ISE	61.0	40.1260	10.3914
ITAE	60.2	35.5490	9.4930
Expertune PI	124.0	17.9270	2.8809
Expertune PID	152.2	25.6920	2.8386
Expertune PI re-sintonizado	68.8	48.2440	9.4553
Expertune PID re-sintonizado	74.6	52.9020	12.2540

Tabla 24, parámetros de desempeño ante paso 2 (modo 3)

En la figura 24 se presenta la respuesta paso entre 35 y 50 para el modo 3

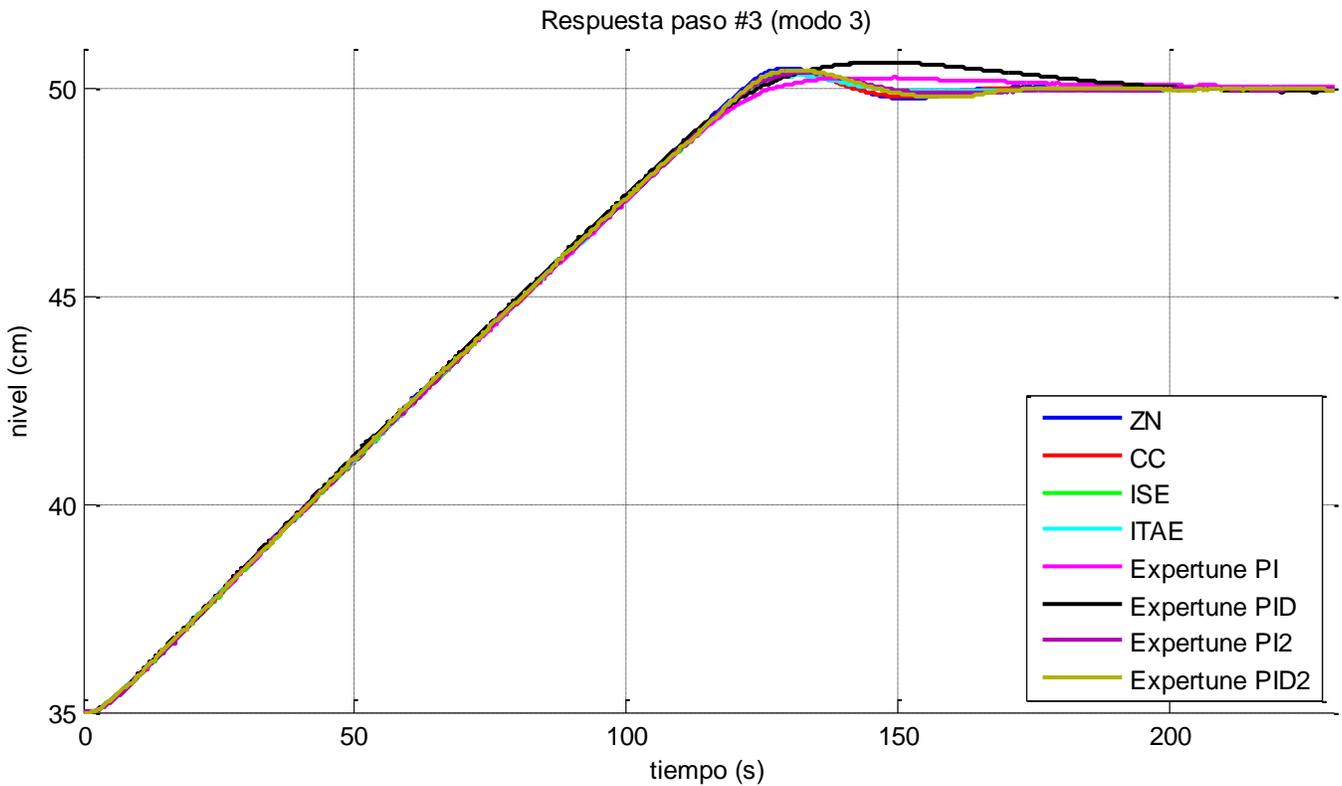


Figura 24, Respuesta paso 3 (modo 3)

Nuevamente los controladores de la primera sintonización de Expertune sobresalen por su aparente lentitud. Los demás controladores generan respuestas muy similares. En esta prueba cabe destacar la gran cantidad de tiempo (unos 120 segundos) que la señal de control se encuentra saturada. Una vez los controladores salen de saturación se estabilizan rápidamente.

La tabla 25 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 35 y 50 para el modo 3.

MODO 3: PASO 3	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	136.2	3.3734	41.2190
Cohen Coon	135.6	2.8406	41.0926
ISE	137.0	2.6829	40.0133
ITAE	134.8	2.2911	40.2301
Expertune PI	121.2	1.9028	42.1264
Expertune PID	178.0	4.3729	30.3614
Expertune PI re-sintonizado	138.8	2.6624	39.3103
Expertune PID re-sintonizado	139.0	3.1323	39.9324

Tabla 25, parámetros de desempeño ante paso 3 (modo 3)

En la figura 25 se presenta la respuesta ante perturbación para el modo 3

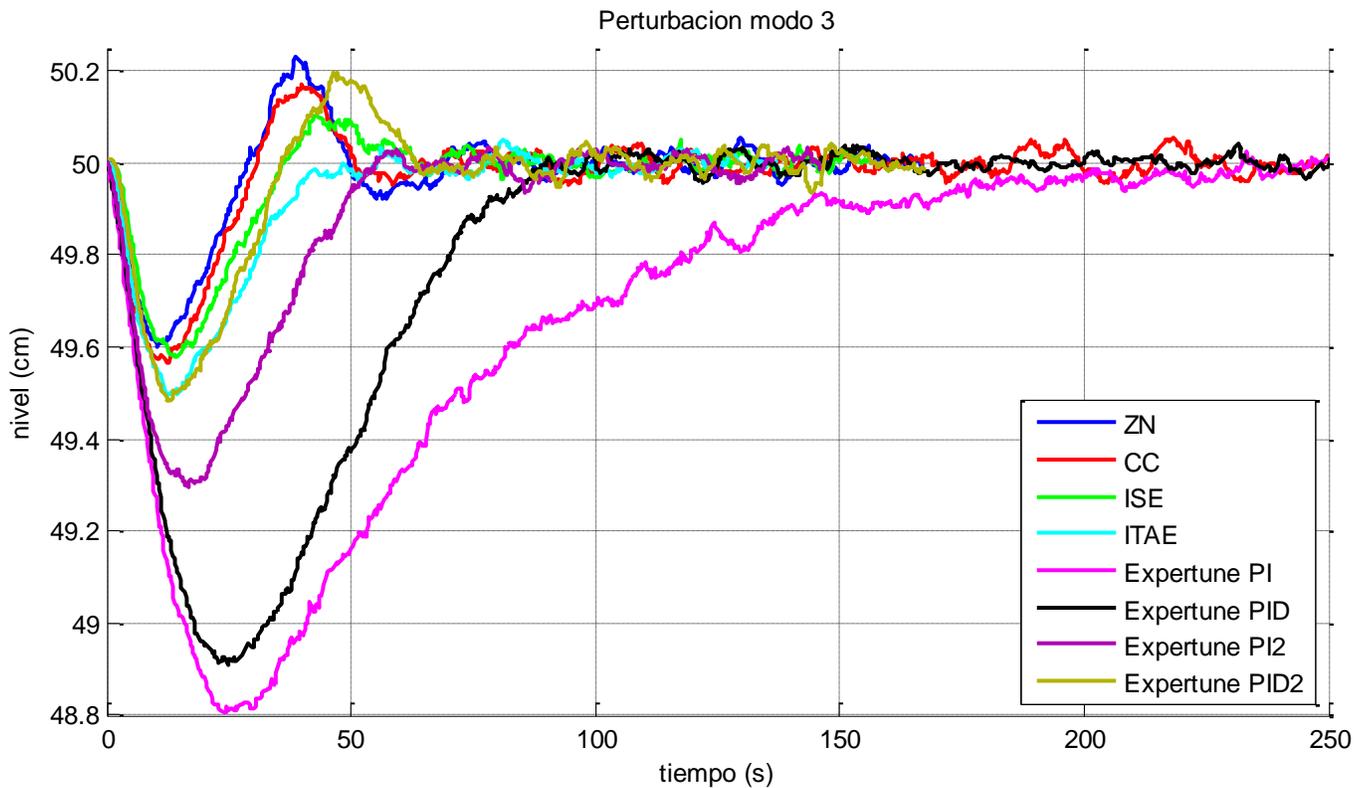


Figura 25, Respuesta a perturbación (modo 3)

En la figura 25 se aprecia como 3 de los 4 controladores de Expertune presentan los mayores errores de seguimiento de la referencia. Los 5 controladores restantes producen errores similares. El controlador ITAE es el único que con bajo sobrepico negativo no presenta luego un pico positivo, simplemente retorna a la referencia.

La tabla 26 presenta los parámetros de desempeño ante una perturbación en el modo 3.

MODO 3: PERTURBACIÓN	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	45.8	-0.7957	10.8710
Cohen Coon	45.0	-0.8682	10.3743
ISE	43.4	-0.8450	8.5065
ITAE	36.4	-1.0093	7.6712
Expertune PI	156.6	-2.3920	2.7911
Expertune PID	77.0	-2.1806	5.8375
Expertune PI re-sintonizado	48.2	-1.4085	9.5220
Expertune PID re-sintonizado	55.4	-1.0356	9.7964

Tabla 26, parámetros de desempeño ante perturbación (modo 3)

5.4. MODO 4

En la figura 26 se muestra la respuesta paso entre 25 y 26 para el modo 4

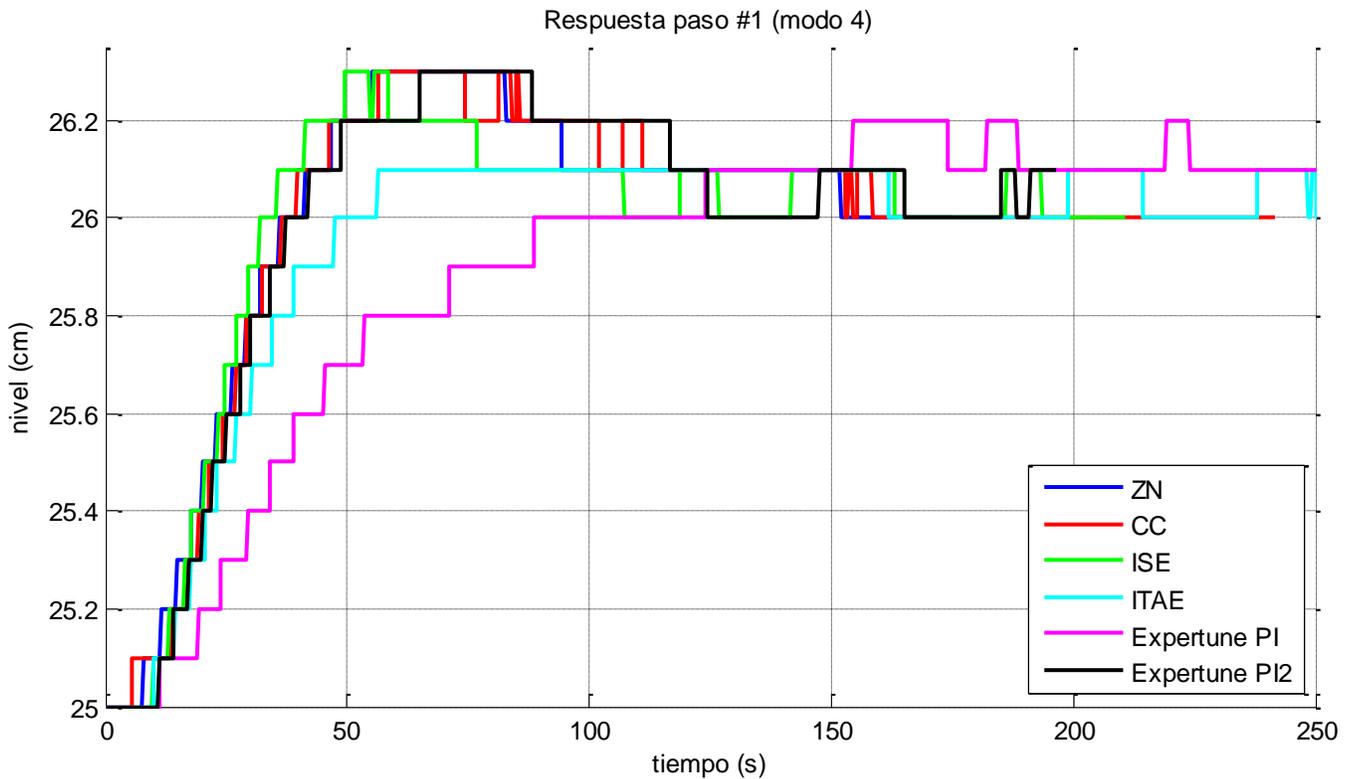


Figura 26, Resposta paso 1 (modo 4)

En la figura 26 el controlador ITAE aunque no presenta el mejor tiempo de subida sobresale por su bajo sobrepico lo que a su vez le genera una ventaja en el tiempo de establecimiento. El controlador PI de Expertune es el de peor desempeño.

La tabla 27 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 25 y 26 para el modo 4.

MODO 4: PASO 1	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	94.2	30.00	5.6102
Cohen Coon	110.8	30.00	4.9002
ISE	76.6	30.00	7.0060
ITAE	38.8	10.00	9.5001
Expertune PI	223.8	20.00	2.3776
Expertune PI re-sintonizado	116.6	30.00	4.9075

Tabla 27, parámetros de desempeño ante paso 1 (modo 4)

En la figura 27 se presenta la respuesta paso entre 26 y 30 para el modo 4

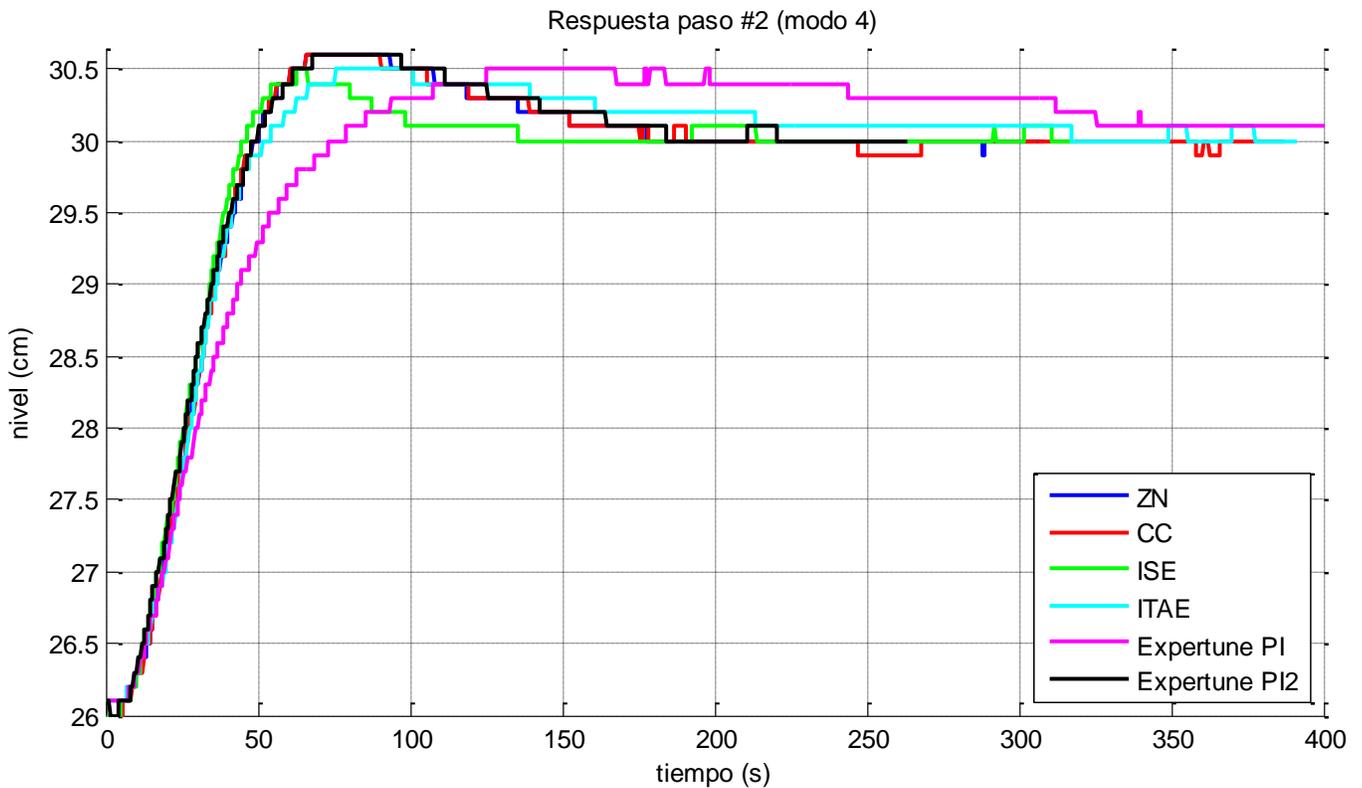


Figura 27, Resposta paso 2 (modo 4)

En esta respuesta paso, el controlador ISE sobresale por su rápido establecimiento y el PI de Expertune por su lentitud. Los controladores ZN, CC y PI2 muestran un comportamiento casi idéntico. El control ITAE presenta un sobrepico moderado pero un mayor tiempo de establecimiento que ZN, CC y PI2.

La tabla 28 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 26 y 30 para el modo 4.

MODO 4: PASO 2	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	152.0	15.00	13.5652
Cohen Coon	152.0	15.00	13.6609
ISE	98.4	12.50	18.9815
ITAE	213.0	12.50	8.5707
Expertune PI	339.8	12.50	5.1285
Expertune PI re-sintonizado	164.2	15.00	12.3477

Tabla 28, parámetros de desempeño ante paso 2 (modo 4)

En la figura 28 se presenta la respuesta paso entre 30 y 40 para el modo 4

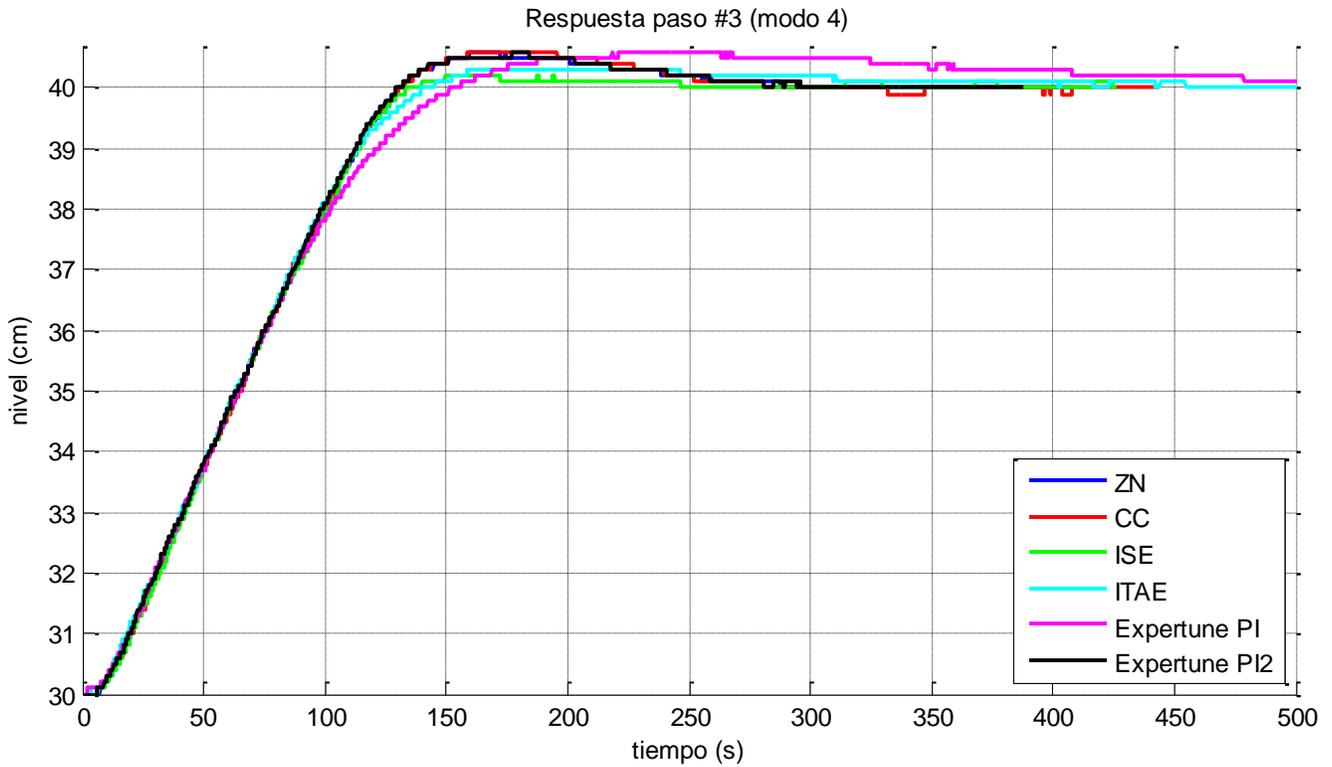


Figura 28, Resposta paso 3 (modo 4)

Nuevamente el controlador PI de Expertune es el más lento. Ahora, los controladores de minimización del error presentan los menores sobrepicos, aunque es ISE el que se establece rápidamente. Los controladores ZN, CC y PI2 se comportan de forma similar.

La tabla 29 presenta los parámetros de desempeño de la respuesta paso entre 30 y 40 para el modo 4.

MODO 4: PASO 3	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	258.8	6.00	21.9795
Cohen Coon	251.6	6.00	23.0012
ISE	194.6	2.00	27.6548
ITAE	310.6	3.00	16.9744
Expertune PI	478.4	6.00	11.24
Expertune PI re-sintonizado	258.2	6.00	21.7055

Tabla 29, parámetros de desempeño ante paso 3 (modo 4)

La figura 29 muestra la respuesta ante una perturbación para el modo 4

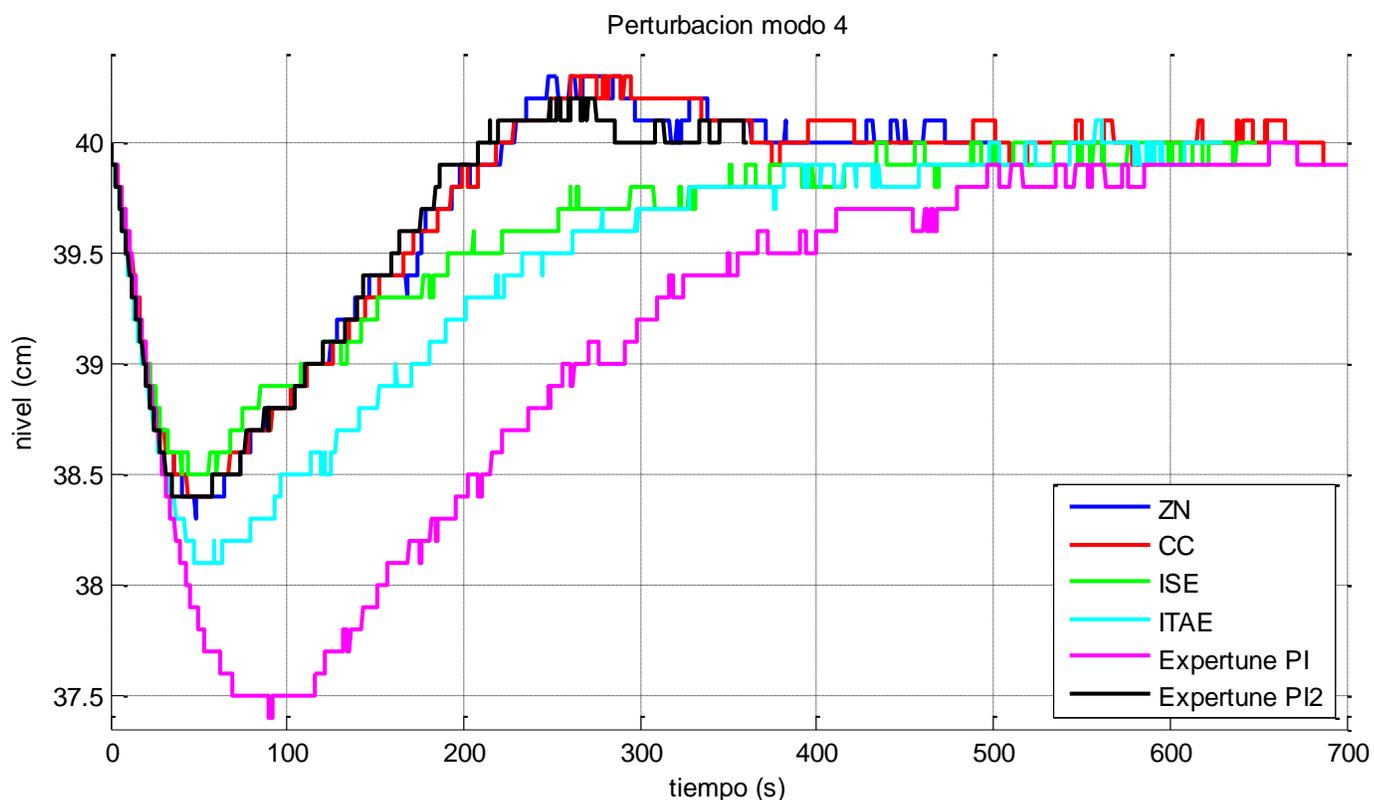


Figura 29, Respuesta a perturbación (modo 4)

La mejor respuesta ante la perturbación se logra con los controladores ZN, CC y PI2. Los controladores ISE e ITAE presentan sobrepicos aceptables pero un mayor tiempo de establecimiento a comparación de ZN y CC. La primera sintonización PI de Expertune ostenta el peor desempeño.

La tabla 30 presenta los parámetros de desempeño ante una perturbación en el modo 4.

MODO 4: PERTURBACIÓN	Tiempo de establecimiento (s)	Máximo sobrepico (%)	Señal de control
Ziegler Nichols	338.2	-4.25	6.7610
Cohen Coon	334.2	-4.00	7.2126
ISE	469.2	-3.75	2.4203
ITAE	457.4	-4.75	2.8451
Expertune PI	585.2	-6.50	2.8697
Expertune PI re-sintonizado	274.6	-4.00	6.2392

Tabla 30, parámetros de desempeño ante perturbación (modo 4)

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CALIFICACIÓN DE LOS CONTROLADORES

Se evalúan 3 aspectos fundamentales, el tiempo de establecimiento, el sobrepico y la suavidad de la señal de control. El sobrepico y la suavidad de la señal de control están estrechamente relacionadas. Si el nivel presenta oscilaciones es muy probable que la señal de control también. En la evaluación se le dio mayor importancia a la respuesta dinámica del sistema que a la señal de control. Por estas razones se asignó un mayor peso en la puntuación al tiempo de establecimiento que al sobrepico o a la señal de control. Esto aplica para todas las pruebas.

Dentro de las pruebas hay 3 respuestas paso. Con estas pruebas es posible estudiar mejor el comportamiento del sistema. Hay un escalón pequeño de 1cm, uno mediano y uno grande. De esta manera se evalúa el desempeño en diferentes escenarios, con controlador saturado o sin saturar y a diferentes niveles lo que toma importancia al considerar la no-linealidad del sistema. Solo se llevó a cabo una prueba ante perturbación. Para mantener la relevancia de la respuesta ante la perturbación su puntaje máximo es el doble que el de las respuestas paso. Aun así, se mantiene la mayor parte del puntaje en las respuestas paso ya que los controladores fueron sintonizados como reguladores. Las respuestas paso determinan el 60% del puntaje y la perturbación el 40% restante.

Los puntajes son calculados a partir del mejor y el peor resultado en cada rubro. El controlador con el mejor desempeño en una categoría determinada recibe 100% del puntaje, mientras que el peor 0%. Los demás controladores reciben sus calificaciones de forma proporcional. La ecuación 6.1 muestra el cálculo del puntaje que obtiene el controlador i -ésimo. $Tsstep1_M1$ corresponde a un vector con los tiempos de establecimientos de cada controlador para la primera respuesta paso en modo de operación 1. Todos los puntajes se calculan de la misma manera. Es importante notar que para todas las variables evaluadas lo un parámetro pequeño implica un mejor desempeño.

$$Puntaje_i = \left[1 - \frac{Tsstep1_M1_i - \min(Tsstep1_M1)}{\max(Tsstep1_M1) - \min(Tsstep1_M1)} \right] \cdot 100\% \quad (6.1)$$

Es usual que un buen desempeño en el tiempo de establecimiento conlleve una señal agresiva de control que recibe bajo puntaje. En algunos casos, como el del controlador ISE en modo 2 ante una perturbación obtiene buenos puntajes en los 3 rubros de la misma prueba. Esto demuestra que a veces, los parámetros de desempeño son buenos sin comprometer la señal de control. Debido a los puntajes definidos para el tiempo de establecimiento y sobrepico, un controlador obtiene una buena calificación cuando se desempeña bien en estos rubros, sin importar que su puntaje en la señal de control sea 0. Por otro lado, si un controlador presenta un tiempo de establecimiento y un sobrepico regulares, puede recuperar parte del puntaje si la señal de control es más suave. Por último, un controlador con un puntaje máximo en la señal de control pero bajos puntajes en los otros 2 rubros obtiene un puntaje acumulado bajo.

6.1. MODO 1

En la tabla 31 se muestran los puntajes obtenidos por los controladores para modo 1. El mejor desempeño lo presenta el PID2 de Expertune. El controlador PI2 ocupa el segundo puesto. Los controladores de la primera sintonización obtienen puntajes cercanos a los de PI2. Los 4 mejores puntajes son para Expertune. En el

caso de ambos controladores de la segunda sintonización de Expertune los parámetros de desempeño fueron sobresalientes, a expensas de usar una señal de control más agresiva lo que les quitó puntos. Para el caso de los controladores PI y PID los puntajes fueron más uniformes, sin sobresalir en desempeño pero con una señal de control más suave. Los controladores clásicos presentan los tiempos de establecimiento más largos y las señales de control más suaves. Los puntajes por sobrepico también fueron bajos. Los controladores ZN e ISE se comportan de forma aceptable ante perturbaciones con un desempeño similar al alcanzado por el PI de Expertune. Es de resaltar la excelente respuesta ante perturbación mostrada por PID2 que logra máximos puntajes en tiempo de establecimiento y sobrepico, logrando alcanzar un 30% en la señal de control. Cabe mencionar también que obtiene el peor desempeño ante el segundo escalón, el de menor amplitud. El controlador PI2, aunque recibe una menor puntuación total que PID2, presenta resultados más uniformes en las diferentes pruebas.

Evaluación modo 1		Peso	ZN	CC	ISE	ITAE	PI	PID	PI2	PID2
Paso 1	Ts	2	0%	27%	30%	4%	69%	81%	100%	98%
	Mp	1	0%	23%	5%	38%	97%	53%	100%	91%
	Control	1	97%	92%	90%	100%	69%	50%	5%	0%
Paso 2	Ts	2	0%	5%	8%	0%	16%	25%	100%	73%
	Mp	1	92%	92%	88%	100%	80%	65%	29%	0%
	Control	1	100%	99%	97%	100%	95%	90%	0%	20%
Paso 3	Ts	2	19%	18%	14%	0%	74%	72%	100%	98%
	Mp	1	1%	39%	0%	44%	100%	66%	99%	87%
	Control	1	86%	90%	89%	100%	45%	43%	1%	0%
Perturbación	Ts	2	34%	18%	30%	0%	53%	71%	79%	100%
	Mp	1	41%	0%	36%	5%	26%	42%	75%	100%
	Control	1	93%	88%	98%	100%	78%	73%	0%	30%
Promedios	Paso 1	1	24%	42%	39%	36%	76%	66%	76%	71%
	Paso 2	1	48%	50%	50%	50%	52%	51%	57%	42%
	Paso 3	1	31%	41%	29%	36%	73%	63%	75%	71%
	Perturbación	2	51%	31%	49%	26%	52%	64%	58%	82%
TOTAL			41%	39%	43%	35%	61%	62%	65%	70%

Tabla 31, puntajes de los controladores para modo 1

6.2. MODO 2

En la tabla 32 se muestran los puntajes obtenidos por los controladores para modo 2. A diferencia del modo 1, el puntaje más alto lo obtuvo el controlador ISE que sobresale por su tiempo de establecimiento y bajo sobrepico. En segundo lugar aparece el PI2 de Expertune, más balanceado y con pocos rubros en rojo. En tercer lugar con puntajes muy similares se encuentran ZN y PID2. ZN se caracteriza por sus bajos puntajes en la señal de control. PID2 al igual que PI2 resulta muy equilibrado; solo un rubro en rojo y todos los demás por encima de 40%. CC queda relegado al quinto lugar ya que con unos puntajes similares a ZN en la señal de control tiene un peor desempeño. Los controladores ITAE, PI y PID presentan bajos puntajes en la mayoría de sus rubros, sobre todo ante perturbación. Es de resaltar el desempeño ante perturbación mostrado por el controlador ISE.

Evaluación modo 2		Peso	ZN	CC	ISE	ITAE	PI	PID	PI2	PID2
Paso 1	Ts	2	100%	95%	100%	86%	0%	29%	93%	54%
	Mp	1	0%	0%	100%	100%	100%	0%	0%	0%
	Control	1	12%	14%	0%	54%	100%	72%	18%	53%
Paso 2	Ts	2	86%	87%	100%	79%	57%	0%	87%	65%
	Mp	1	100%	83%	83%	83%	83%	0%	100%	67%
	Control	1	42%	34%	0%	60%	84%	100%	42%	66%
Paso 3	Ts	2	78%	75%	100%	42%	57%	0%	80%	64%
	Mp	1	67%	78%	100%	89%	56%	0%	78%	44%
	Control	1	35%	41%	0%	90%	75%	100%	35%	45%
Perturbación	Ts	2	89%	71%	100%	33%	19%	0%	93%	64%
	Mp	1	80%	80%	100%	20%	0%	40%	60%	100%
	Control	1	0%	9%	82%	43%	5%	45%	21%	100%
Promedios	Paso 1	1	53%	51%	75%	81%	50%	32%	51%	40%
	Paso 2	1	79%	73%	71%	75%	70%	25%	79%	66%
	Paso 3	1	64%	67%	75%	66%	61%	25%	68%	54%
	Perturbación	2	65%	58%	96%	32%	11%	21%	67%	82%
TOTAL			65%	61%	82%	57%	41%	25%	66%	65%

Tabla 32, puntajes de los controladores para modo 2

6.3. MODO 3

En la tabla 33 se muestran los puntajes obtenidos por los controladores para modo 3. El mejor puntaje lo obtuvo el controlador ITAE con un desempeño muy equilibrado al obtener altos puntajes en las 4 pruebas. El segundo puesto es compartido por controlador PI2 de Expertune e ISE. El controlador PI2 presenta puntajes muy similares en cada prueba. Presenta buen desempeño en el tiempo de establecimiento pero regular en sobrepico y señal de control. ISE presenta un comportamiento similar. El cuarto lugar es para el PI de Expertune con muchos de sus rubros en 100% pero también varios en 0%. El quinto lugar es para el controlador CC con una señal de control agresiva y puntajes mediocres en el resto de los rubros. Los controladores ZN, PID y PID2 están en último lugar con puntajes similares. ZN y PID presentan varios rubros con puntajes muy bajos. PID2 obtiene puntajes un poco más equilibrados aunque el promedio es bajo. Ambos controladores PID de Expertune sobresalen por sus bajos puntajes. En cambio, los controladores PI presentan mejores resultados.

Evaluación modo 3		Peso	ZN	CC	ISE	ITAE	PI	PID	PI2	PID2
Paso 1	Ts	2	71%	73%	63%	100%	0%	16%	66%	57%
	Mp	1	55%	80%	83%	100%	84%	0%	75%	56%
	Control	1	15%	18%	36%	0%	100%	79%	38%	33%
Paso 2	Ts	2	90%	92%	99%	100%	31%	0%	91%	84%
	Mp	1	7%	15%	37%	50%	100%	78%	13%	0%
	Control	1	0%	4%	28%	37%	100%	100%	37%	10%
Paso 3	Ts	2	74%	75%	72%	76%	100%	0%	69%	69%

	Mp	1	40%	62%	68%	84%	100%	0%	69%	50%
	Control	1	8%	9%	18%	16%	0%	100%	24%	19%
Perturbación	Ts	2	92%	93%	94%	100%	0%	66%	90%	84%
	Mp	1	0%	5%	3%	13%	100%	87%	38%	15%
	Control	1	0%	6%	29%	40%	100%	62%	17%	13%
Promedios	Paso 1	1	53%	61%	61%	75%	46%	28%	61%	50%
	Paso 2	1	47%	51%	66%	72%	65%	44%	58%	45%
	Paso 3	1	49%	55%	58%	63%	75%	25%	58%	52%
	Perturbación	2	46%	49%	55%	63%	50%	70%	59%	49%
TOTAL			48%	53%	59%	67%	57%	48%	59%	49%

Tabla 33, puntajes de los controladores para modo 3

6.4. MODO 4

En la tabla 34 se muestran los puntajes obtenidos por los controladores para modo 4. El mejor puntaje lo obtiene el controlador ITAE. Sus resultados son sobresalientes con solo 1 rubro en rojo. El segundo puesto lo ocupa ISE con una señal de control más agresiva que la de ITAE y mayores sobrepicos. El tercer lugar lo ocupa Expertune con el controlador PI2. Presenta altos puntajes en tiempo de establecimiento, bajos en el sobrepico y regulares en la señal de control. Sobresale por tener el mejor puntaje ante perturbación. Resaltan sus malos puntajes para el sobrepico. El controlador PI de Expertune ocupa el último lugar con un puntaje de 0% en todos los tiempos de establecimiento. Logra altos puntajes en la señal de control.

Evaluación modo 4		Peso	ZN	CC	ISE	ITAE	PI	PI2
Paso 1	Ts	2	70%	61%	80%	100%	0%	58%
	Mp	1	0%	0%	0%	100%	50%	0%
	Control	1	55%	65%	35%	0%	100%	64%
Paso 2	Ts	2	78%	78%	100%	53%	0%	73%
	Mp	1	0%	0%	100%	100%	100%	0%
	Control	1	39%	38%	0%	75%	100%	48%
Paso 3	Ts	2	77%	80%	100%	59%	0%	78%
	Mp	1	0%	0%	100%	75%	0%	0%
	Control	1	35%	28%	0%	65%	100%	36%
Perturbación	Ts	2	80%	81%	37%	41%	0%	100%
	Mp	1	18%	9%	0%	36%	100%	9%
	Control	1	9%	0%	100%	91%	91%	20%
Promedios	Paso 1	1	49%	47%	49%	75%	38%	45%
	Paso 2	1	49%	48%	75%	70%	50%	48%
	Paso 3	1	47%	47%	75%	65%	25%	48%
	Perturbación	2	47%	43%	44%	52%	48%	57%
TOTAL			48%	46%	57%	63%	42%	51%

Tabla 34, puntajes de los controladores para modo 4

6.5. EVALUACIÓN DE EXPERTUNE

A primera vista los resultados obtenidos de Expertune en los diferentes modos no parecen ofrecer un gran desempeño. Expertune solo sobresale en el modo de operación 1 donde obtiene los 4 mejores resultados. El punto fuerte de Expertune está en que en las demás pruebas, donde no obtuvo el mejor resultado, se ubicó entre los primeros lugares. Esto saca a la luz una característica muy deseada, relacionada con poder controlar de manera eficiente diferentes sistemas. Los controladores ISE e ITAE mostraron resultados sobresalientes en algunas de las pruebas y malos resultados en otras.

La tabla 35 muestra los resultados de cada controlador en los diferentes modos seguidos del promedio y la varianza de los 4 modos. En la tabla se hace claro que, aunque Expertune no presenta los mejores resultados por prueba, obtiene los mejores resultados globales.

	ZN	CC	ISE	ITAE	PI	PID	PI2	PID2
Modo 1	41.1%	38.9%	43.1%	35.0%	61.3%	61.8%	65.0%	69.8%
Modo 2	65.1%	61.4%	82.4%	57.4%	40.6%	25.0%	66.4%	64.7%
Modo 3	48.2%	53.1%	59.1%	67.2%	57.2%	47.6%	59.0%	49.0%
Modo 4	47.6%	45.5%	57.2%	62.9%	41.6%		51.2%	
Promedio	50.5%	49.7%	60.4%	55.6%	50.2%	44.8%	60.4%	61.2%
Varianza	0.010	0.009	0.027	0.021	0.011	0.035	0.005	0.012

Tabla 35, consolidación de resultados

En los resultados también es evidente como la primera sintonización de Expertune calculada a partir de la respuesta paso en malla abierta no está diseñada para generar los mejores resultados, simplemente calcula un controlador que asegure la estabilidad del sistema y a partir del cual se puede hacer una sintonización en malla cerrada. En este proyecto solo se estudió el desempeño de una re-sintonización a malla cerrada. Con Expertune es posible volver a sintonizar los controladores para obtener mejores controladores; siguiendo la nomenclatura aquí usada se podría calcular PI3, PID3, PI4, PID4 etc... Es de esperarse que la mejoría en el desempeño del controlador sea baja al sintonizarlo múltiples veces. Incluso, en los resultados expuestos se aprecia como la segunda sintonización presentaba sobrepicos más altos y comportamientos menos amortiguados. Dependiendo de la respuesta deseada puede ser que la primera sintonización resulte más adecuada que la segunda.

Estudiando el promedio global, el mejor puntaje lo obtiene el controlador PID2 de Expertune. Le siguen los controladores PI2 e ISE con un mismo puntaje. Aunque ISE y PI2 obtienen los mismos puntajes globales, el controlador PI2 obtiene una baja varianza en comparación a ISE que obtiene una alta. Este resultado favorece al controlador PI2. La alta varianza de ISE implica que al sintonizarlo se puede obtener un resultado muy bueno pero también uno malo, lo que genera una gran incertidumbre sobre los resultados esperados. En cambio el controlador PI2 genera resultados más uniformes. El cuarto lugar lo ocupa ITAE que, al igual que ISE presenta una alta varianza. Los controladores PI y ZN presentan resultados similares tanto en promedio como en varianza. En los resultados globales también es apreciable algo ya mencionado anteriormente, el bajo desempeño de la primera sintonización de Expertune.

Un aspecto importante que sale a flote con los resultados es que, aunque Expertune sintoniza automáticamente los controladores, es necesario que sea operado por alguien con conocimiento en controles. El software solo hace una recomendación general sobre cuál de los controladores implementar, sugiriendo el más rápido. Esta recomendación no es específica para el sistema que está siendo controlado. El software tampoco aconseja sobre cuantas veces re-sintonizar el controlador. Dentro de los resultados, aunque el controlador PI2 no obtiene el mejor promedio, está cerca y con una varianza muy pequeña. Esto coincide con la teoría de control donde los sistemas de tanques al ser lentos pueden ser controlados adecuadamente con un controlador PI. El ruido implícito en la medición de nivel introduce un ruido considerable en la señal de control cuando se maneja un controlador con componente derivativo.

7. OBSERVACIONES Y LIMITACIONES DE LA PLANTA

- El sensor de nivel sobre el tanque no lineal es de onda guiada y su resolución es de 0.1cm. Esto genera dificultades al implementar un controlador. Con una ganancia proporcional grande, cualquier cambio registrado en el nivel provoca saltos sobre la señal de control. Este problema también afecta la parte integral y derivativa de los controladores.
- Los sensores de nivel empiezan a medir cuando el nivel sobrepasa los 17.5cm en el tanque no lineal y los 25cm en el tanque lineal. Esto no permite realizar un control en niveles bajos del tanque. Además limita los modos de operación interactuantes del sistema. Si se desea controlar sobre el tanque de salida, el tanque de entrada se reboza antes de alcanzar el nivel mínimo de lectura del sensor del tanque que se quiere controlar.
- Para proteger la válvula de desgaste excesivo se limitó el cambio a través del posicionador. Esto implica que la señal de control no determina directamente la apertura de la válvula. El posicionador actúa como un filtro pasa bajos para la señal de control, alterando la respuesta del sistema.

8. CONCLUSIONES

Se recopiló gran cantidad de datos sobre la sintonización de lazos de control de nivel en sistemas de tanques interactuantes. Fueron estudiadas las respuestas de controladores sintonizados por los métodos convencionales ZN, CC, ISE e ITAE y por métodos de optimización propietarios de Expertune. A partir de las pruebas realizadas se estableció que Expertune presenta resultados con un desempeño adecuado y uniforme a través de los diferentes sistemas controlados. Su rendimiento supera a Ziegler-Nichols y a Cohen-Coon en cuanto a los parámetros de desempeño. Comparado a los controladores sintonizados por métodos de minimización del error Expertune se destaca al presentar un desempeño más uniforme en diferentes sistemas lo que se comprobó con la varianza de los puntajes obtenidos para cada modo. En cuanto a la sintonización realizada por Expertune, la respuesta paso en malla abierta no genera buenos resultados, lo que era de esperarse del método de sintonización de Expertune. Es a partir de la respuesta en malla cerrada que Expertune genera controladores con desempeños sobresalientes. Un aspecto que no se estudió fue la re-sintonización repetitiva; este proyecto llegó hasta una

segunda sintonización. También sería interesante el desempeño de Expertune al re-sintonizar un controlador inicialmente planteado para una planta con un comportamiento dinámico diferente.

El paquete de software OPC PID tuner de Expertune facilita la conexión con la planta debido a la simplicidad propia del protocolo OPC y a su popularidad en el área de control de procesos. La forma en la que se configuró el sistema resultó muy versátil ya que las múltiples variables de la planta podían accederse desde Step7, Expertune o desde un cliente OPC en otro equipo dentro del mismo grupo de trabajo en la red.

El uso de Expertune es intuitivo pero aunque calcula los controladores de forma automática el operador debe tener conocimientos sobre la teoría de control y la planta. El usuario debe decidir entre un controlador PI o PID y además la velocidad de respuesta deseada, aspectos sobre los cuales el programa no guía al operario. Dentro de la guía de uso de Expertune incluida en los anexos se ilustra cómo se lleva a cabo la configuración inicial del programa, como se define un lazo de control y como se hace la sintonización en malla abierta y en malla cerrada. Con ayuda de la guía un sujeto con conocimiento en controles puede hacer uso de las herramientas de Expertune para sintonizar lazos de control. Los archivos de configuración del servidor OPC (WinCC) y del PLC necesarios para el funcionamiento de Expertune en el sistema de tanques interactuantes también se encuentran en los archivos adjuntos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Albarracín Afanador, trabajo de grado: “*Ingeniería detallada, modelamiento y simulación de un sistema de tanques interactuantes no lineales*”, Pontificia universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2010.
- [2] M. Manyari-Rivera, J. Carlos Basilio, “*Integrated Online Auto-tuning and Digital Implementation of PID Controllers in Industrial Processes*”, IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), Santiago, Chile, December 19-21, 2011.
- [3] J. Espinosa Oviedo, T. Boelen, P. Van Overschee, “*Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications*”, IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE, Febrero 2006.
- [4] K.Heong Ang, G. Chong, Y. Li, “*PID Control System Analysis, Design, and Technology*”, IEEE transactions on control systems technology, vol. 13, no. 4, July 2005.
- [5] L. Dongjiang, S.Ruiqi, “*Implement of Communication between Configuration Software and OPC Server based on Modbus/TCP*”, IEEE international conference on electronic measurement and instruments, pp. 218-221, 2011.
- [6] W. T. Jizhen Liu, T. Chenb, H. J. Marquez, “*Comparison of some well-known PID tuning formulas*”, Computers and Chemical Engineering 30, 2006.
- [7] Astrom, Karl J., Hagglund, Tore. Advanced PID Control, ISA, The Instrumentation, Systems and Automation Society.
- [8] Bennett, James. Bhasin, Ajay. Grant, Jamila. Lim, Wen Chung. "PID Classical Tuning", 2007. URL: <https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/PIDTuningClassical>. Consulta: 18 de agosto de 2013

- [9] "First order systems". URL: http://bass.gmu.edu/~gbeale/ece_421/xmpl-421-1st-order-01.pdf. Consulta: 18 de agosto de 2013.
- [10] Abdallah, Alla Eldin. Mamat, Rosbi bin. "New PID tuning rule using ITAE criteria". International Journal of Engineering. URL: <http://www.cscjournals.org/csc/manuscript/Journals/IJE/volume3/Issue6/IJE-121.pdf>. Consulta: 18 de agosto de 2013.
- [11] Martins, Fernando. "Tunning PID controlers using ITAE criterion". 2005. URL: <http://pessoal.utfpr.edu.br/avargas/Ijee1673.pdf>. Consulta: 18 de agosto de 2013.
- [12] Yi, Cao. "Correcting the minimum ITAE standard forms of zero-displacement-error systems", Journal of Zhejiang University (Natural Science) Vol. 23, No.4, pp. 550-559, 1989. Traducción URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18547-the-optimal-itae-transfer-function-for-step-input/content/itae/html/itaeoptimtf.html>. Consulta: 18 de agosto de 2013.
- [13] "PAS overview", 2013 PAS, Inc. URL: <http://www.pas.com/solutions/control-loop-performance/software.aspx>. Consulta: 18 de agosto de 2013.
- [14] "ETAP, energy management system software", 2013 operation technology, Inc. URL: <http://etap.com/energy-management-system/power-system-optimization-software.htm>. Consulta: 18 de agosto de 2013.
- [15] "Expertune, PID loop optimizer", 1999-2013 Expertune, Inc. URL: <http://www.expertune.com/PIDLoopOpt.aspx>. Consulta: 18 de agosto de 2013
- [16] Siemens. "Simatic, programming with step 7. Manual", mayo 2010. URL: http://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINUMERIK_SINAMICS_02_2012_E/S7P.pdf?p=1. Consulta: Agosto 27 de 2013.
- [17] "Expertune, industrial uses", 1999-2013 Expertune, Inc. URL: <http://www.expertune.com/Industries.aspx>. Consulta: 31 de agosto de 2013