

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



DISEÑO E IMPLEMENTACION DE LOS ALGORITMOS DE
ADAPTACION PARA TRES PARAMETROS DE UN
CONTROLADOR DE PROCESOS DE ALTO ORDEN

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN AUTOMATIZACION
(INGENIERIA DE CONTROL)

POR:

FRANCISCO CALLEJA BERNAL MENDOZA

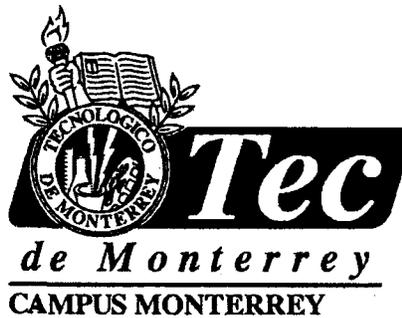
MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 2002

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE ADAPTACIÓN
PARA TRES PARÁMETROS DE UN CONTROLADOR DE
PROCESOS DE ALTO ORDEN**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO ACADÉMICO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS DE AUTOMATIZACIÓN
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA DE CONTROL**

**POR:
FRANCISCO CALLEJA BERNAL MENDOZA**

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE 2002

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE ADAPTACIÓN PARA TRES PARÁMETROS DE UN CONTROLADOR DE PROCESOS DE ALTO ORDEN

por

Francisco Calleja Bernal Mendoza

TESIS

Presentada al Programa de Graduados en Ingeniería

del

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey
Como requisito parcial para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias

con especialidad en Automatización

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Monterrey

Monterrey, Nuevo León a 16 de Diciembre del 2002

A mi mamá, por estar siempre

A mi papá, porque ha sido, es y será mi guía

A mi hermana, porque se ha atrevido

A mi hermano, por ser mi mejor amigo

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos Narváez por su apoyo, tanto en el desarrollo de esta tesis, como en mis estudios de maestría.

A Elvira Niño porque me apoyó y ayudó en mi labor como asistente y como estudiante desde el primer día en la maestría, por la excelente revisión que hizo de este trabajo, y sobre todo, porque es una gran persona y amiga.

Al Dr. Ricardo Ramírez por sus comentarios para la mejora de este trabajo.

Al Dr. Jorge Limón por ser un excelente profesor, por sus conocimientos, por estar siempre dispuesto a ayudarnos, por su ecuanimidad y por su paciencia. Muchas gracias.

A todo el claustro de profesores del Departamento de Mecatrónica y, especialmente, a Yolanda Sánchez porque es un ejemplo de dedicación.

A mis compañeros de maestría, sobre todo, a Francisco Montes, a Agustín Pando, a Luis Rosas, a Fernando Díaz, a Teodoro, a Octavio y a Miguel.

Un agradecimiento especial a Amparo Herrera y a Juan Francisco Pineda.

ÍNDICE

Índice	I
Resumen	III
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Control adaptable	1.1
1.2 Trabajos previos	1.2
1.3 Objetivo de la investigación	1.4
Capítulo 2. Algoritmos de adaptación	
2.1 Estructura del controlador	2.1
2.2 Modificaciones al controlador original	2.4
2.3 Constantes de los algoritmos de adaptación	2.5
2.4 Desempeño del lazo de control con los diferentes algoritmos de adaptación	2.10
2.5 Comportamiento de los parámetros adaptados en el tiempo	2.10
Capítulo 3. Pruebas de robustez	
3.1 Selección de las pruebas	3.1
3.2 Pruebas realizadas	3.2
3.3 Análisis de las pruebas de robustez	3.15
3.4 Selección de la mejor combinación de estructuras	3.16
Capítulo 4. Pruebas en simulación	
4.1 Pruebas realizadas y proceso utilizados	4.1
4.2 Resultados de las pruebas realizadas	4.2
4.3 Parámetros de desempeño de las pruebas en simulación	4.3
4.3.1 Parámetros de desempeño para la planta nominal	4.3
4.3.2 Parámetros de desempeño para la planta con el tiempo muerto modificado	4.5
4.3.3 Parámetros de desempeño para la planta con ganancia modificada	4.7
4.3.4 Parámetros de desempeño para la planta con la constante de tiempo líder modificada	4.9
4.4 Análisis de las pruebas en simulación	4.11
Capítulo 5. Pruebas en un proceso de temperatura	
5.1 Equivalencia discreta del controlador	5.1
5.2 Programación del controlador en Lab Windows CVI	5.2
5.3 El proceso de temperatura	5.4
5.4 Pruebas realizadas en el proceso de temperatura	5.5
5.5 Análisis de las pruebas realizadas en el proceso de temperatura	5.11

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones		
	6.1 Conclusiones	6.1
	6.2 Recomendaciones	6.2
Apéndice A	Máscaras de Matlab	A-1
Apéndice B	Gráficas obtenidas en simulación	B-1
Apéndice C	Programa en Lab Windows CVI	C-1
Apéndice D	Gráficas obtenidas en el proceso físico	D-1
Apéndice E	Comportamiento en el tiempo de los parámetros adaptados	E-1
Bibliografía		F-1

RESUMEN

En investigaciones anteriores a la presente, Narváez y Ramírez [1] desarrollaron un controlador de tres parámetros basado en modelos de segundo orden diseñado con la estructura IMC (controlador de modelo interno, por sus siglas en inglés).

En este trabajo se proponen algoritmos de adaptación para los tres parámetros del controlador propuesto por Narváez y Ramírez, con el objetivo de tener un mejor desempeño del controlador y sustituir la necesidad de una sintonía. Los algoritmos que se proponen son combinaciones de algoritmos lineales y exponenciales.

Las combinaciones de los algoritmos se prueban ante una planta nominal utilizando el programa de simulación Matlab-Simulink, después de un primer análisis se realiza una modificación al controlador original por no presentar una mejoría sustancial en presencia de la adaptación. Utilizando el controlador corregido y la combinación de tres algoritmos lineales para la adaptación de los parámetros se obtiene un mejor desempeño en comparación con el controlador original de parámetros fijos.

El controlador de parámetros adaptables se somete a pruebas de robustez en simulación cambiando los parámetros de la planta que se desea controlar. Además, el controlador se implementa en el programa Lab Windows CVI para comprobar los beneficios de éste contra sintonías tradicionales, al controlar un proceso físico.

CAPÍTULO 1. Introducción

1.1 Control adaptable

El control automático de procesos está dividido en varias ramas donde las más conocidas a nivel industrial son:

- a) El control lógico o de eventos discretos
- b) El control continuo
- c) El control digital

Estas ramas del control han sido enriquecidas y diversificadas por conceptos como la lógica difusa, las redes neuronales y también por la posibilidad que nos brinda el poder computacional actual para dejar de pensar en un sistema físico, o en el caso del control, un controlador, como un sistema con parámetros estáticos y además utilizar esto como un apoyo para desarrollar un avance en las diversas ramas de la ciencia, pero de manera más relevante para el área de control, permite el desarrollo del control adaptable.

El control adaptable considera a los procesos como variantes en el tiempo desde varios enfoques. El enfoque común es buscar que dentro de un lazo de control los parámetros del controlador estén siendo modificados en tiempo real, por medio de un algoritmo de sintonización en línea lo que permite que dependiendo de las variaciones en la planta el controlador se ajuste a las nuevas características de ésta. También encontramos el enfoque de supervisión de ganancia donde se busca encontrar un algoritmo que permita al controlador cambiar su ganancia dependiendo de la zona de operación y absorber la no linealidad del proceso. El concepto de supervisión se puede extender hacia aquellos controladores que buscan mejorar el desempeño del lazo de control apoyado en un algoritmo que se base en un parámetro de desempeño o en el error.

1.2 Trabajos previos

- I) Trujillo en [2] desarrolla un algoritmo de supervisión de ganancia para un controlador PID convencional en donde se propone una sintonía base sobre la que se realizará la adaptación de los parámetros. La sintonía utilizada por Trujillo es estructurada a partir de una modelación de primer orden del proceso con una aproximación de Padé en el tiempo muerto, a su vez la ecuación del controlador está dada por un PID ideal, a partir de lo anterior se obtiene que la máxima ganancia permisible es la mostrada en la ecuación 1.1

$$K_{us} = \frac{2\tau + \theta}{K\theta} \quad (1.1)$$

Y la ganancia del controlador queda definida con base en la ganancia última y la constante de tiempo integral y la constante de tiempo derivativa quedan definidas con base en las constantes del proceso como se muestra en las ecuaciones 1.2 a 1.5.

$$\tau_i = \tau + \frac{\theta}{2} \quad (1.2)$$

$$\tau_d = \frac{\tau \frac{\theta}{2}}{\tau + \frac{\theta}{2}} \quad (1.3)$$

$$K_c = aK_{us} = \frac{2\tau + \theta}{K\theta} \quad (1.4)$$

$$a = \frac{\frac{\theta}{\tau_i}}{2 + \frac{\theta}{\tau_i}} \quad (1.5)$$

donde τ_i es un parámetro para ajustar la sintonía que finalmente se encuentra que la mejor aproximación es $\tau_i \approx \tau$.

La supervisión de la ganancia se realiza con un algoritmo lineal basado en el error, utilizando el parámetro σ como factor de escala del error como se muestra en la ecuación 1.6.

$$K_c = a(1 + \sigma|e|)K_{us} \quad (1.6)$$

Este algoritmo de supervisión tiene la ventaja de estar caracterizado por sólo un parámetro de ajuste, con respuestas no oscilatorias ni ante cambios en referencia ni ante perturbaciones para procesos modelados como primer orden. En resumen, se mejoran las respuestas de controladores PID sintonizados por métodos tradicionales como Ziegler-Nichols, o por métodos de más reciente publicación, como el propuesto por Kitamori o por Zhao.

- II) Ramírez en [1] propone un controlador diseñado con base en la filosofía IMC (Internal Model Control, por sus siglas en inglés). El controlador se obtiene utilizando procesos modelados como segundo orden con el procedimiento propuesto por Narváez y Sánchez [3] y con la aproximación del tiempo muerto sugerida por Narváez [4]. La estructura del controlador se muestra en la ecuación 1.7

$$G_c = \frac{\tau_1 + \tau_2}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]} \frac{[(0.5a_f + 0.12)\tau_1 s + 1][(0.5a_f + 0.12)\tau_2 s + 1]}{(0.5a_f + 0.12)(\tau_1 + \tau_2)s} \frac{(a_v + 0.13)^2 \frac{\theta^2}{4} s^2 + (a_v + 0.13)\theta s + 1}{\frac{\theta^2}{64} s^2 + \frac{\theta}{4} s + 1} \quad (1.7)$$

donde K es la ganancia del proceso a controlar

τ_1 y τ_2 son las constantes del proceso

θ es el tiempo muerto del proceso

a_k es el factor de ganancia

a_f es el factor de frecuencia

a_v es el factor de velocidad

Cabe mencionar que este tiene tres parámetros de ajuste denominados a_k , a_f y a_v los cuales tienen un valor nominal de 1 y se sugiere un rango de variación entre 0 y 3 para obtener la respuesta deseada. Los parámetros de ajuste tienen la característica de tener una acción de suavizado. La idea fundamental de este controlador es poder realizar un mejor control sobre procesos que presentan dinámicas lentas; es decir, grandes constantes de tiempo y grandes tiempos muertos. Las respuestas lentas son típicas de procesos que implican, por ejemplo, transferencia de calor y para éstos la modelación de primer orden es insuficiente, por lo que es necesario una modelación de mayor orden y, por consiguiente, un controlador que esté basado en ese modelo de mayor orden, en este caso, un segundo orden.

En el caso de aumentar el factor de ganancia el sobretiro disminuye y se tiene una tendencia a reducir el tiempo de establecimiento ante cambios en referencia, pero ante perturbaciones aumenta el tiempo de establecimiento y la desviación de la variable de proceso. En el caso de aumentar el factor de frecuencia tiene la misma tendencia de comportamiento del factor de ganancia aunque de comportamiento más violento llegando a inestabilizar el proceso, ya sea ante cambios en referencia o ante perturbaciones, cuando este factor tiende a cero. En el caso de aumentar el factor de velocidad se tiene una tendencia a la reducción del tiempo de subida ante cambios en referencia y ante perturbaciones reduce la desviación de la variable, pero también ocasiona una tendencia a incrementar el tiempo de estabilización de la perturbación.

Ramírez muestra que el controlador es robusto con el apoyo del análisis de la función de sensibilidad, la relación se muestra en la ecuación 1.8.

$$S(s) = \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (1.8)$$

donde G_c es la función de transferencia del controlador

G_p es la función de transferencia del proceso

La función de sensibilidad de un lazo de control tiene la forma general mostrada en la figura 1.1. En la figura se muestra el margen de módulo que es definido por Landau [5] como el inverso del pico máximo de la magnitud de la función de sensibilidad y se sugiere esté entre -6dB y -8dB .

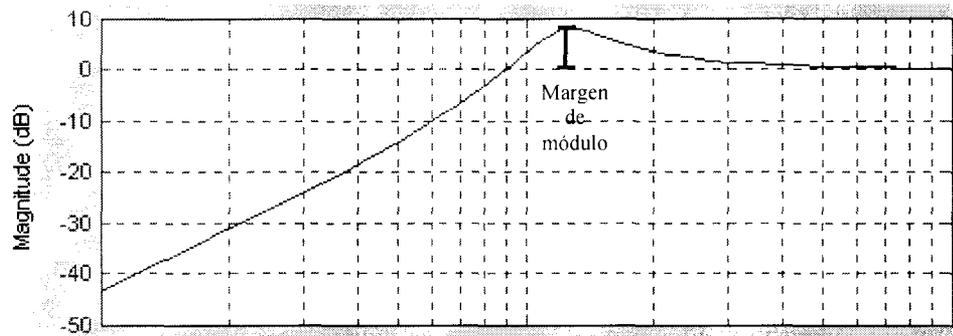


Figura 1.1 Forma general de la función de sensibilidad

El controlador propuesto por Ramírez llega a tener mayor robustez que un PID, en ocasiones con un margen de módulo menor en 1 dB, sintonizado por el criterio integral ITAE, sobre todo en el caso de controlar procesos de tercer o mayor orden.

1.3 Objetivo de la investigación

Esta investigación busca utilizar el controlador de parámetros fijos propuesto por Ramírez [1] y encontrar un algoritmo de adaptación que logre mejorar el desempeño del lazo de control en comparación con un controlador PID y en comparación con el controlador original enfocándose no sólo en la respuesta ante cambios en referencia sino también ante perturbaciones.

CAPÍTULO 2. Algoritmos de adaptación

En este capítulo se mostrará la estructura del controlador que se hará adaptable y los parámetros que se adaptarán. A su vez se mostrarán las estructuras para los algoritmos de adaptación, las constantes de los algoritmos de adaptación propuestos y las respuestas del lazo de control con cada uno de los algoritmos propuestos al controlar una planta de quinto orden que se utilizará como prueba.

2.1 Estructura del controlador

El controlador que se utilizará para ajustar un algoritmo de adaptación se muestra en la ecuación 1.7.

$$G_C = \frac{\tau_1 + \tau_2}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]} \frac{[(0.5a_f + 0.12)\tau_1 s + 1][(0.5a_f + 0.12)\tau_2 s + 1]}{(0.5a_f + 0.12)(\tau_1 + \tau_2)s} \frac{(a_v + 0.13)^2 \frac{\theta^2}{4} s^2 + (a_v + 0.13)\theta s + 1}{\frac{\theta^2}{64} s^2 + \frac{\theta}{4} s + 1} \quad (1.7)$$

Como se mencionó anteriormente este controlador tiene tres parámetros de ajuste. La estructura está acomodada de tal forma que asemeje una estructura PID con un compensador de adelanto-atraso. Para poder proponer una regla de adaptación se deberá conocer cual es el comportamiento de los parámetros cuando éstos cambian de valor. En la figura 2.1 a 2.3 se muestra el efecto de modificar los parámetros en un lazo de control ante un escalón unitario. Los tres parámetros, ante cambios en referencias, al ser incrementados disminuyen el sobretiro y provocan un aumento en el tiempo de establecimiento. En el caso de controlar perturbaciones, el incrementar el valor de éstos ocasiona un mayor tiempo de establecimiento, excepto a_v que lo disminuye.

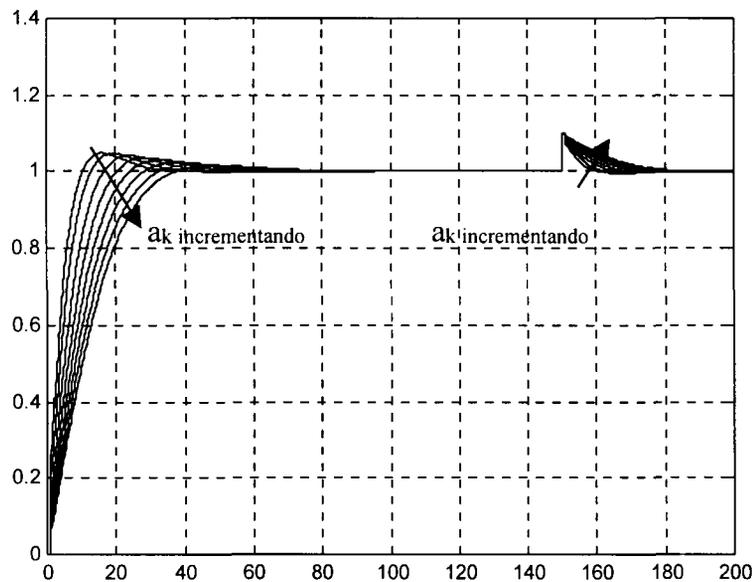


Figura 2.1 Efecto del factor de ganancia

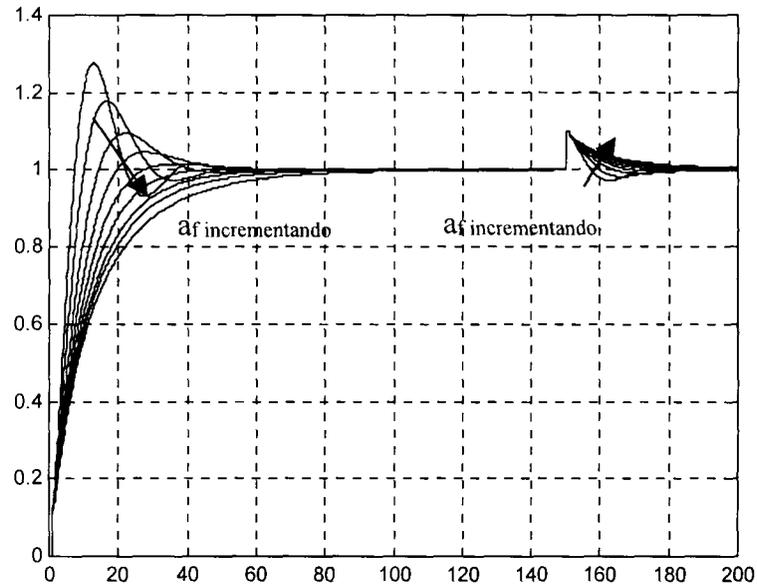


Figura 2.2 Efecto del factor de frecuencia

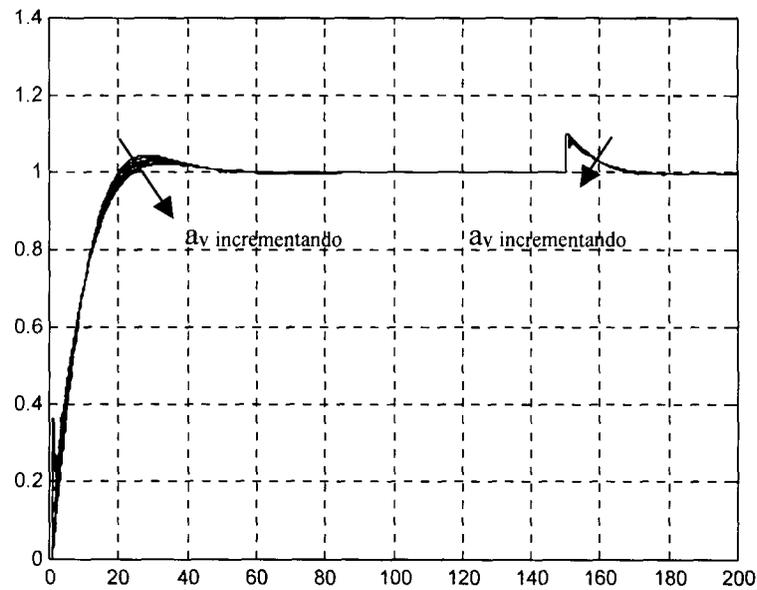


Figura 2.3 Efecto del factor de velocidad

Al tener como origen de este trabajo el controlador sugerido por Trujillo se propusieron algoritmos de adaptación con base en el error. En los algoritmos de adaptación propuestos se buscó tener la respuesta más veloz ante cambios en referencia sin llegar a la inestabilidad por lo que la lógica del comportamiento de los parámetros debe regirse con la tendencia de: a mayor error menor magnitud del parámetro adaptado.

Los algoritmos probados se muestran de la ecuación 2.1 a 2.4

Lineal con una constante: $a_n = C_{1a_n}|error| + 1$ (2.1)

Lineal con dos constantes: $a_n = C_{1a_n}|error| + C_{2a_n}$ (2.2)

Exponencial positiva con tres constantes: $a_n = C_{1a_n}e^{C_{3a_n}|error|} + C_{2a_n}$ (2.3)

Exponencial negativa con tres constantes: $a_n = C_{1a_n}e^{-C_{3a_n}|error|} + C_{2a_n}$ (2.4)

El comportamiento de los algoritmos de adaptación exponenciales se muestra en las figuras 2.4 y 2.5 para ilustrar la tendencia de estos algoritmos.

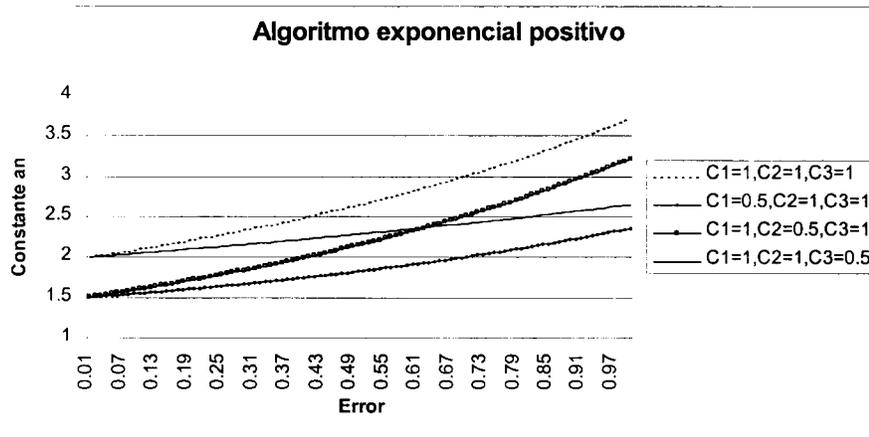


Figura 2.4 Comportamiento del algoritmo exponencial positivo

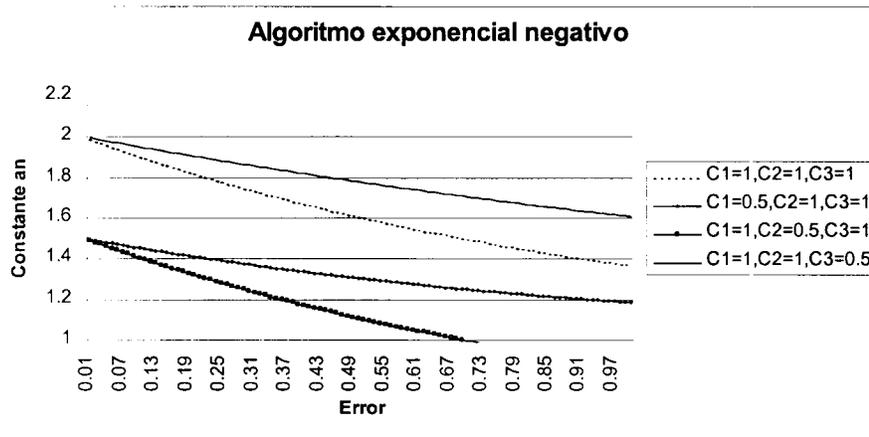


Figura 2.5 Comportamiento del algoritmo exponencial negativo

La opción de utilizar un algoritmo lineal de una sola constante limitó las opciones de adaptación, por lo que se descartó, aun con la posibilidad de tener un valor de la constante diferente a la unidad, que es el valor nominal propuesto por Ramírez, pero no es el óptimo en todos los casos, como él lo comenta en [1]. La inclusión de dos constantes en el algoritmo de adaptación lineal da mayor flexibilidad y permite regresar al valor nominal haciendo $C_{1_{a_n}} = 0$ y $C_{2_{a_n}} = 1$.

La opción de utilizar una exponencial positiva es muy limitada debido a su tendencia creciente y totalmente opuesta a lo deseado, y funcionó, de manera limitada, sólo cuando los valores de los parámetros adaptados no ocasionan la inestabilidad del lazo cerrado; es decir, alrededor de 0 y 3.

La opción de utilizar una exponencial negativa se consideró posible debido a que se tenía la tendencia deseada en el comportamiento con respecto al error.

2.2 Modificaciones al controlador original

Al realizar las primeras pruebas con los algoritmos de adaptación en simulación se tenían respuestas oscilatorias y sin beneficios tangibles con respecto al controlador original de parámetros fijos, por esta razón se decidió modificar la estructura original del controlador debido a que la parte del controlador que asemeja la acción integral y derivativa están ponderadas por el mismo parámetro; es decir, no hay un parámetro de acción derivativa y un parámetro de acción integral por separado, sólo hay un factor de frecuencia.

La modificación consistió en igualar a la unidad el factor de frecuencia, recurriendo al valor inicial sugerido por Ramírez, en todos los casos que éste estuviera en el numerador, para así sólo dejar la acción del factor de frecuencia como un equivalente a la acción integral totalmente independiente del equivalente a la acción derivativa.

La estructura del controlador con esta modificación se muestra en la ecuación 2.5.

$$G_{ic} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]} \frac{[0.62\tau_1s + 1][0.62\tau_2s + 1]}{(0.5a_f + 0.12)(\tau_1 + \tau_2)s} \frac{(a_v + 0.13)^2 \frac{\theta^2}{4} s^2 + (a_v + 0.13)\theta s + 1}{\frac{\theta^2}{64} s^2 + \frac{\theta}{4} s + 1} \quad (2.5)$$

Con la modificación anterior se realizaron pruebas en simulación para encontrar las constantes óptimas de los algoritmos mostrados en las ecuaciones 2.2 y 2.4 quedando definidas dos estructuras:

Estructura lineal (L)

$$a_n = C_{1_{a_n}} |error| + C_{2_{a_n}} \quad (2.2)$$

Estructura exponencial (E)

$$a_n = C_{1a_n} e^{-C_{3a_n}|error|} + C_{2a_n} \quad (2.4)$$

Se simuló el controlador en el programa MATLAB utilizando todas las combinaciones posibles con esas dos estructuras, utilizando el proceso de prueba que se muestra en la ecuación 2.5. Cabe mencionar que en este trabajo se supone el conocimiento previo de la planta para poder realizar la implantación del controlador de parámetros adaptables.

$$G_p = \frac{1}{(100s+1)^3(80s+1)(60s+1)} e^{-80s} \quad (2.5)$$

2.3 Constantes de los algoritmos de adaptación

Las constantes que dieron el mejor comportamiento se muestran en la Tabla 2.1. La mejoría se tuvo en sobretiro y tiempo de establecimiento ante cambios en referencia, también se buscó que tuvieran menor desviación de la variable de proceso ante perturbaciones y menor tiempo de establecimiento en comparación con el controlador de parámetros fijos.

Las estructuras de los algoritmos de adaptación se formarán con las combinaciones del algoritmo lineal y el exponencial, por ejemplo, se puede tener el parámetro a_k adaptado con el algoritmo lineal, el parámetro a_f adaptado con el algoritmo exponencial y el parámetro a_v adaptado con el algoritmo lineal y se tendría la estructura lineal-exponencial-lineal o LEL, por las iniciales del algoritmo de cada parámetro.

Algoritmo	a_k			a_f			a_v		
	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3
LLL	0.8	0.9	-----	0.75	0.55	-----	-0.25	1.3	-----
LLE	1	0.7	-----	0.75	0.55	-----	-0.2	1.4	0.1
LEL	0.9	0.59	-----	0.3	0.8	0.5	-0.2	1.14	-----
LEE	0.5	0.45	-----	0.7	0.53	0.4	-0.45	1.15	1.4
ELL	0.3	0.9	2	0.7	0.55	-----	-0.25	1.26	-----
ELE	0.8	0.9	0.3	0.75	0.3	-----	-0.28	1.5	0.1
EEL	1	0.4	2	1	0.6	1	0.1	1	-----
EEE	0.8	0.8	0.2	0.75	0.3	0.4	-0.45	1.45	0.1

Tabla 2.1 Parámetros para las diferentes combinaciones de estructuras de algoritmos

Las respuestas se obtuvieron aplicando un escalón unitario en tiempo 0 como referencia y un escalón unitario en tiempo 5000 como perturbación. Se graficó la respuesta del lazo de control tanto con el controlador con parámetros fijos (CPF) como con el controlador con parámetros adaptables (CPA). En las Figuras 2.6 a 2.13 se muestran las gráficas obtenidas.

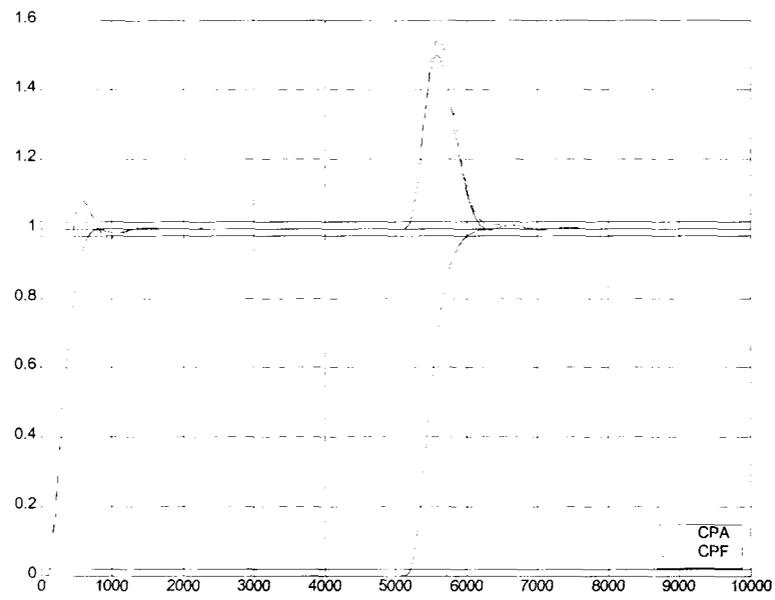


Figura 2.6 Respuesta del CPA con la combinación LLL y del CPF

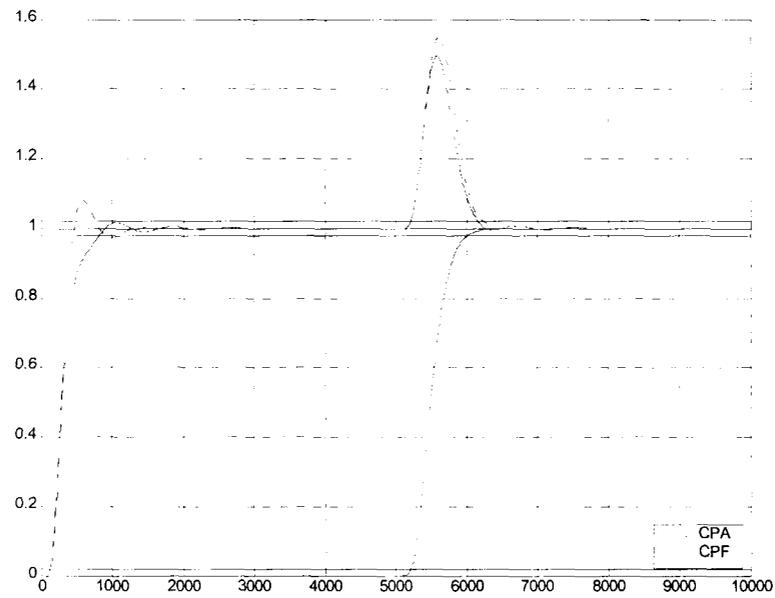


Figura 2.7 Respuesta del CPA con la combinación LLE y del CPF

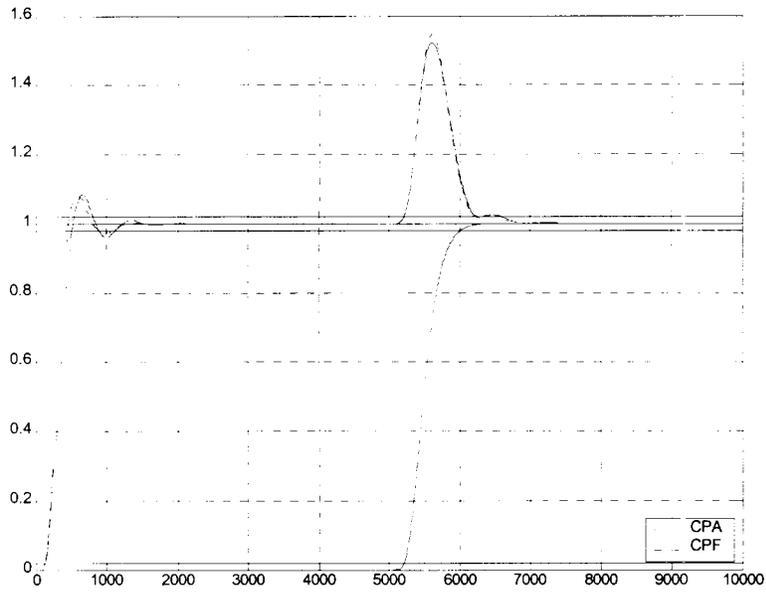


Figura 2.8 Respuesta del CPA con la combinación LEL y del CPF

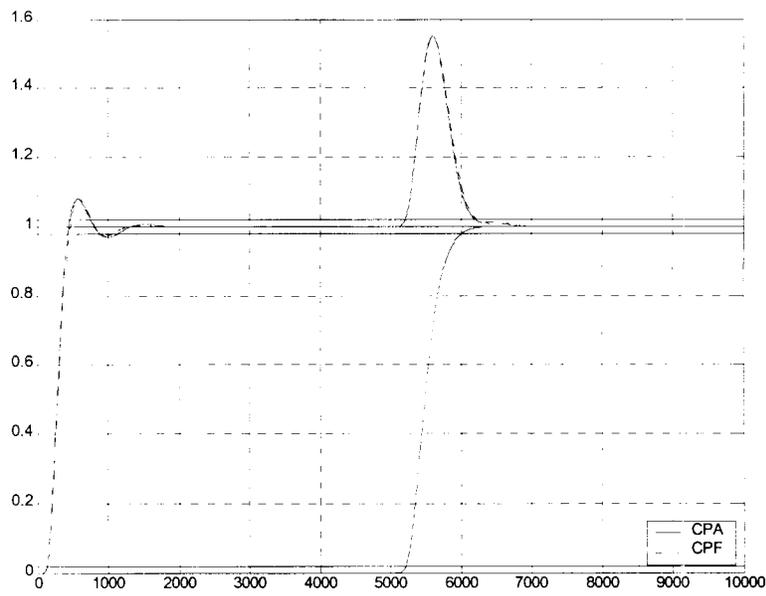


Figura 2.9 Respuesta del CPA con la combinación LEE y del CPF

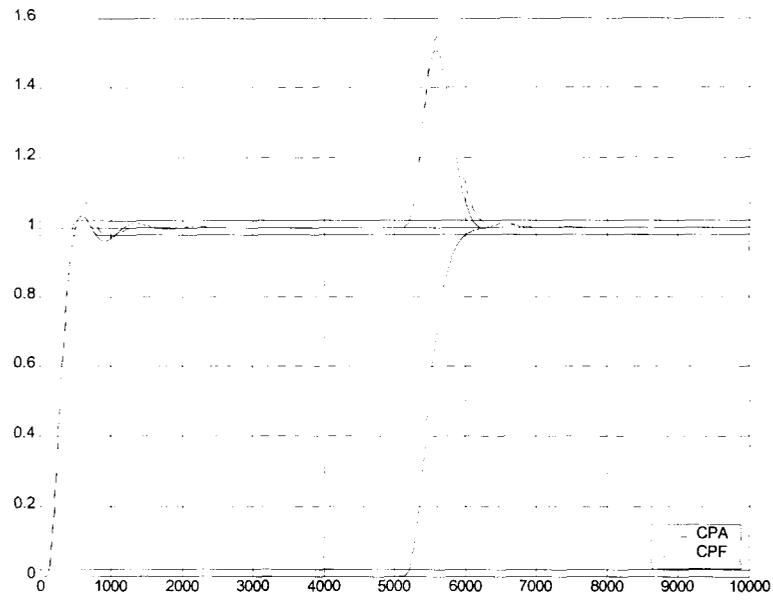


Figura 2.10 Respuesta del CPA con la combinación ELL y del CPF

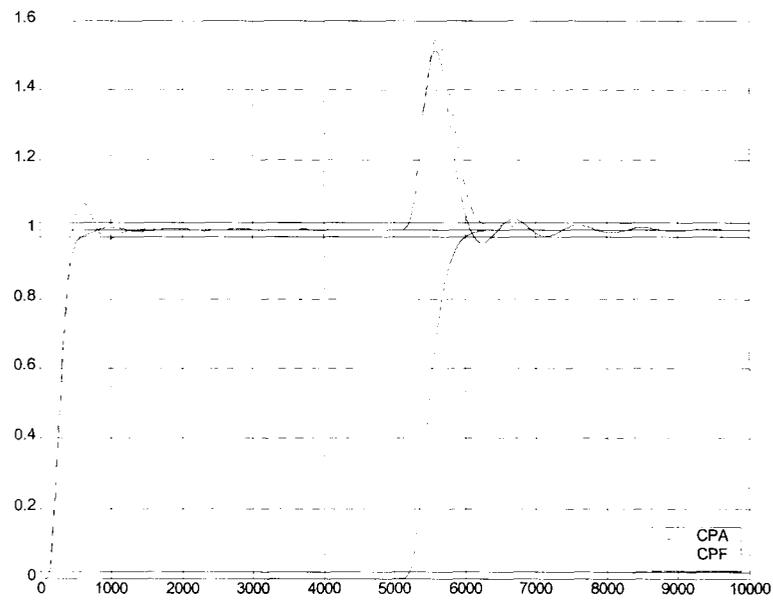


Figura 2.11 Respuesta del CPA con la combinación ELE y del CPF

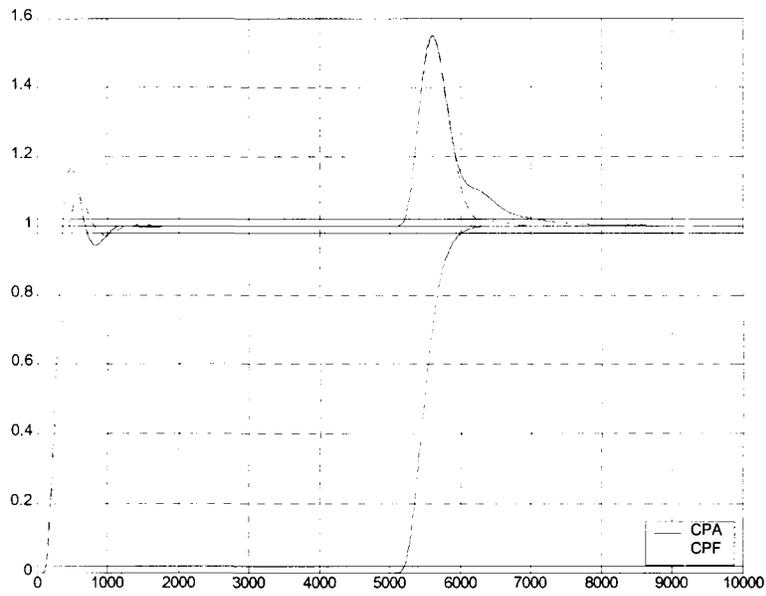


Figura 2.12 Respuesta del CPA con la combinación EEL y del CPF

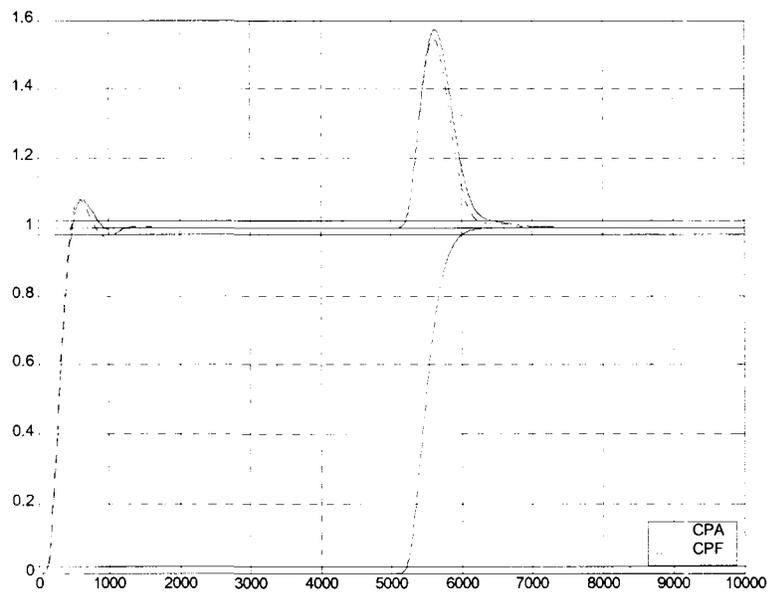


Figura 2.13 Respuesta del CPA con la combinación EEE y del CPF

2.4 Desempeño del lazo de control con los diferentes algoritmos de adaptación

De las gráficas mostradas en el apartado anterior se realizó un análisis de parámetros de desempeño para poder seleccionar, en el siguiente capítulo, la combinación de algoritmos que ofreciera una mejoría, en parámetros de desempeño y que su robustez no decreciera, con respecto al controlador de parámetros fijos. Los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla 2.3.

	<i>Seguimiento</i>				<i>Regulación</i>	
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	$\%M_p$	Desviación (%)	t_s (s)
CPF	460	600	1100	5.7143	54.2857	1125
LLL	660	660	660	0	49.5238	1050
LLE	810	810	810	<2	49.0476	1075
LEL	550	675	1150	8.5714	51.9048	1500
LEE	460	600	1100	5.7143	54.2857	1125
ELL	500	600	1100	3.8095	50.4762	1000
ELE	600	600	600	<2	50.7619	1750
EEL	360	500	1025	16.4762	54.2857	1925
EEE	500	650	850	5.7143	57.1429	1300

Tabla 2.3 Parámetros de desempeño del controlador adaptable con diferentes algoritmos

En el siguiente capítulo se mostrarán las pruebas de robustez ante cambios en la planta de todos las combinaciones de estructuras para poder seleccionar la estructura más robusta.

2.5 Comportamiento de los parámetros adaptados en el tiempo

Se obtuvo el comportamiento de los parámetros para poder conocer su dinámica y para ofrecer al usuario opciones de sintonías fijas con base ese comportamiento. En la figura 2.14 se muestra el comportamiento de los parámetros para la combinación LLL y las gráficas de las otras combinaciones se encuentran en el Apéndice E.

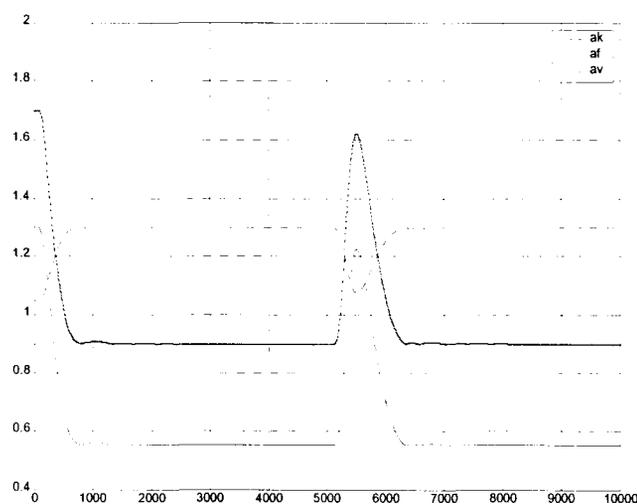


Figura 2.14 Comportamiento temporal de los parámetros adaptados

CAPÍTULO 3. Pruebas de robustez

En este capítulo se probarán las ocho diferentes estructuras de adaptación del controlador ante variaciones paramétricas de la planta nominal con el objetivo de definir cual de las estructuras presenta mayor robustez.

3.1 Selección de las pruebas

Las pruebas que se proponen para probar la robustez del controlador con parámetros adaptados (CPA) están definidas por tres modificaciones, a la planta de prueba de la ecuación 2.5, que degradan la respuesta del lazo; es decir, son modificaciones que no favorecen la acción del controlador. Las modificaciones se muestran en la tabla 3.1.

Número de modificación	Parámetro modificado
1	Tiempo muerto + 50%
2	Ganancia del proceso + 50%
3	$\tau_{\text{líder}} - 25\%$

Tabla 3.1 Modificaciones para comprobar la robustez del CPA con los diferentes algoritmos

El aumentar el tiempo muerto de una planta en el lazo de control simula el efecto de haber subestimado este parámetro al identificar la planta o por otra parte que el sensor fue cambiado de lugar. Al aumentar la ganancia se está suponiendo una alteración de la dinámica del proceso debido al tiempo de uso o a la falta de mantenimiento, al igual que en el caso de la disminución de la constante de tiempo líder.

Este tipo de sucesos pueden ocurrir en el lazo de control y el controlador debe soportar una variación de este parámetro en el proceso y controlarlo lo más rápido posible y con la menor desviación de la variable de proceso, hasta que sean corregidos los parámetros de la planta que fueron introducidos al controlador originalmente o aunque éstos no sean corregidos.

Cabe resaltar que el efecto de la modificación de la constante de tiempo líder es relevante por ser una constante de tiempo que se encuentra en tres polos y por la relación con la segunda constante de tiempo y el tiempo muerto, con respecto a los cuales se le hará más pequeña.

En el diagrama de Bode de la figura 3.1 se puede observar que el modificar el tiempo muerto provoca una modificación en la fase, el aumentar la ganancia provoca que la planta no inicie en magnitud cero, por lo que se puede observar el efecto de amplificación que ocasionará y como se podía esperar la disminución de la constante de tiempo líder ocasiona tener una frecuencia de corte retrasada con respecto a la frecuencia de corte de la planta nominal.

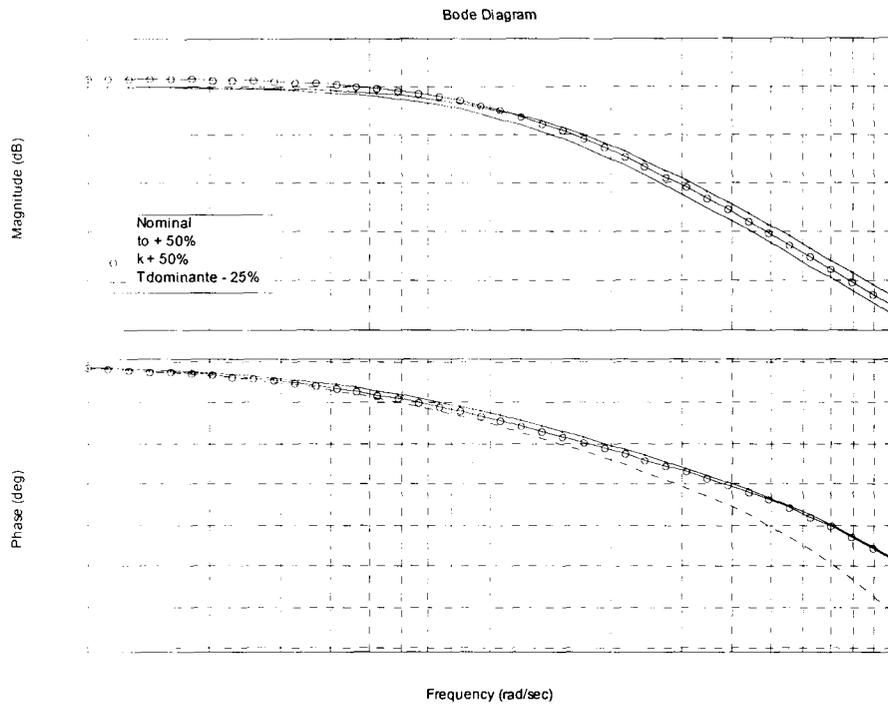


Figura 3.1 Diagrama de Bode de la planta que muestra el efecto de las modificaciones

3.2 Pruebas realizadas

Las pruebas realizadas consistieron en aplicar un escalón unitario tanto en la referencia como en la perturbación suponiendo que la perturbación afecta al lazo con la misma dinámica de la planta a controlar; utilizando la nomenclatura de la figura 3.2 se tiene que $G_d = G_p$. Las gráficas de las pruebas se muestran de la figura 3.3 a la figura 3.26.

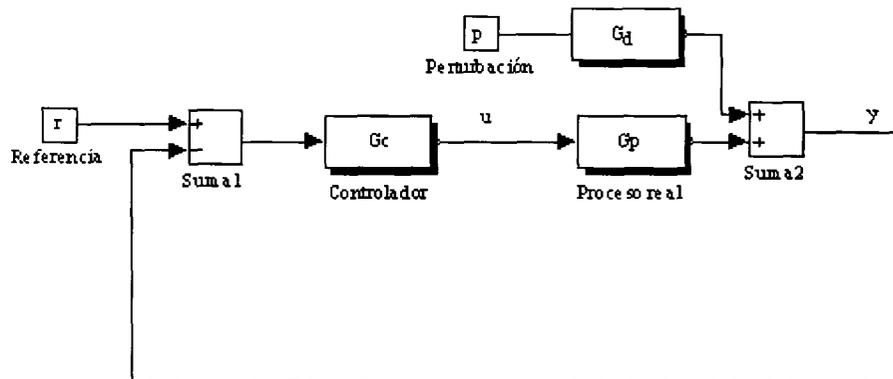


Figura 3.2 Esquemático del lazo a controlar

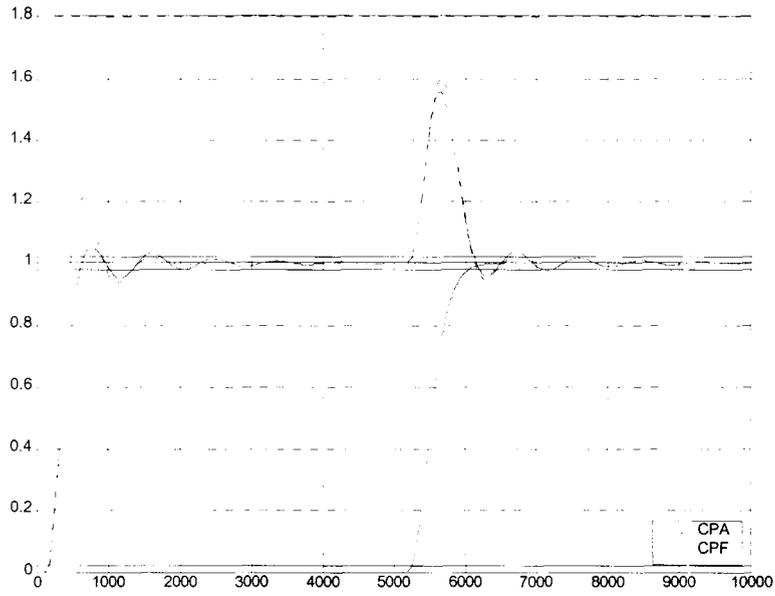


Figura 3.3 Modificación #1 para la combinación LLL

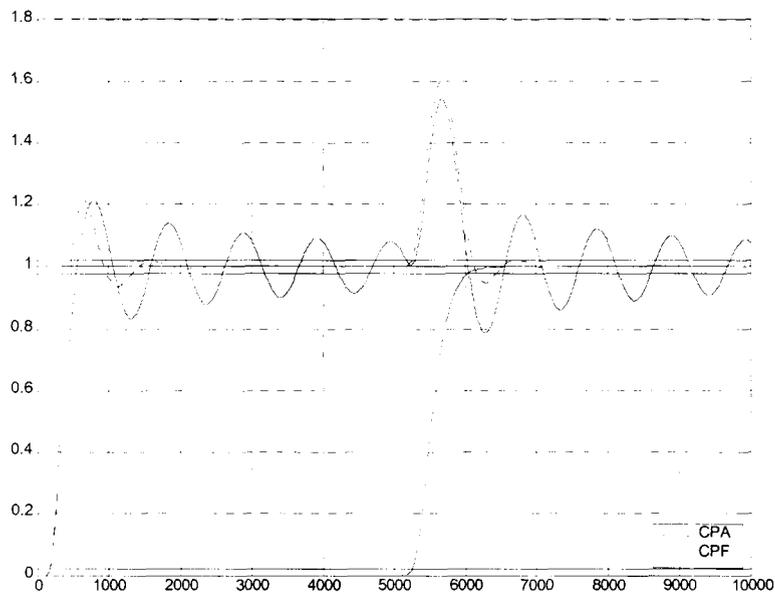


Figura 3.4 Modificación #1 para la combinación LLE

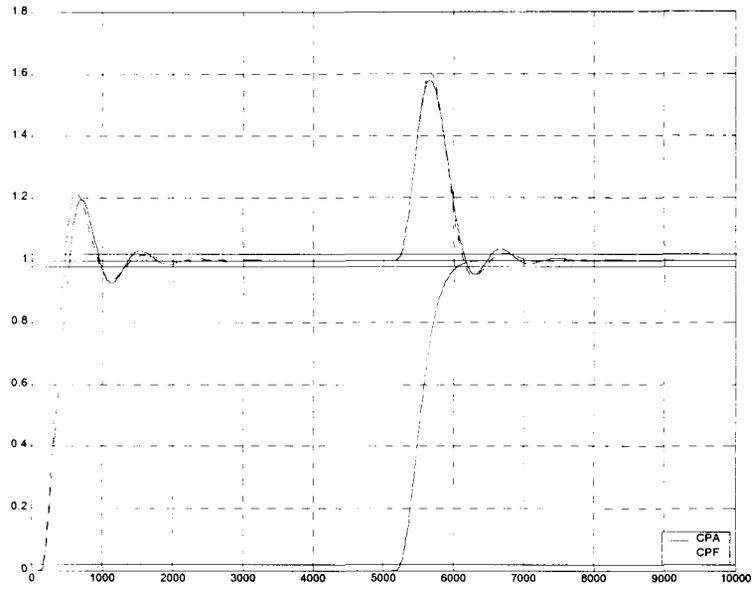


Figura 3.5 Modificación #1 para la combinación LEL

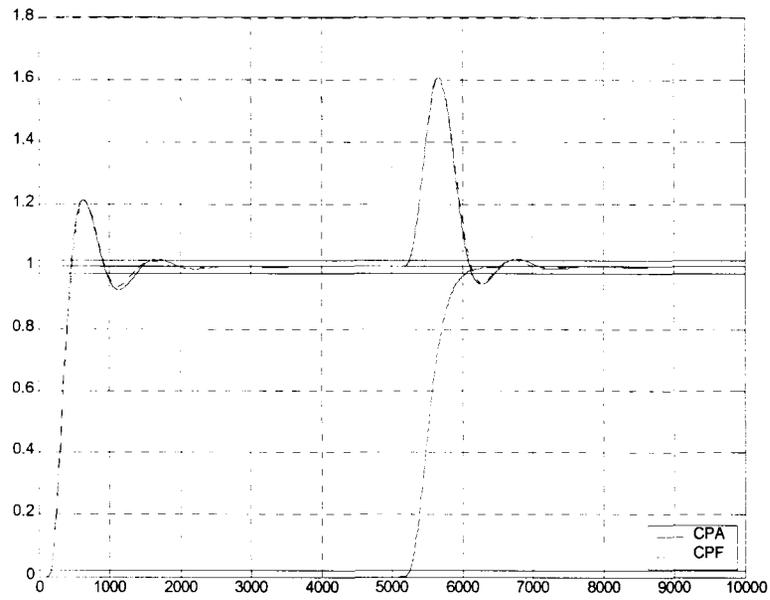


Figura 3.6 Modificación #1 para la combinación LEE

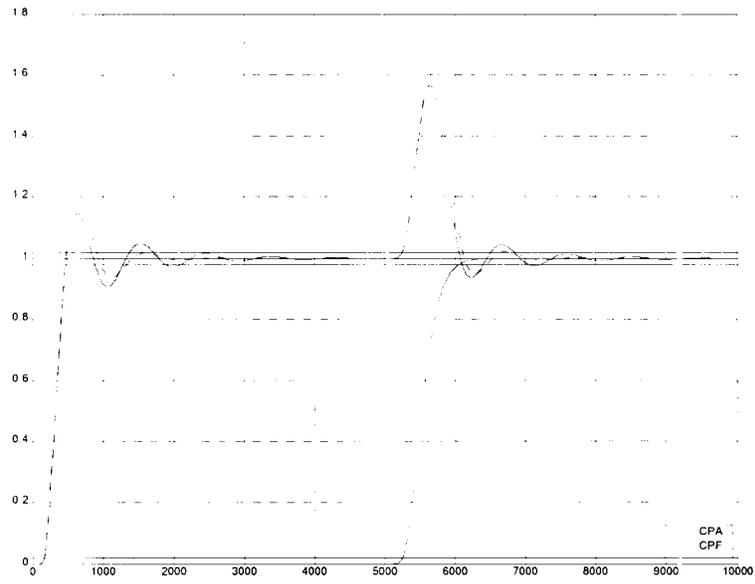


Figura 3.7 Modificación #1 para la combinación ELL

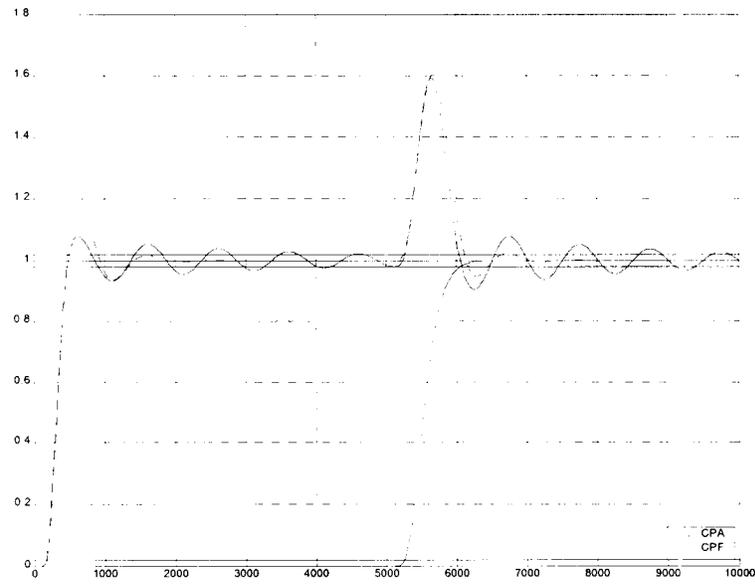


Figura 3.8 Modificación #1 para la combinación ELE

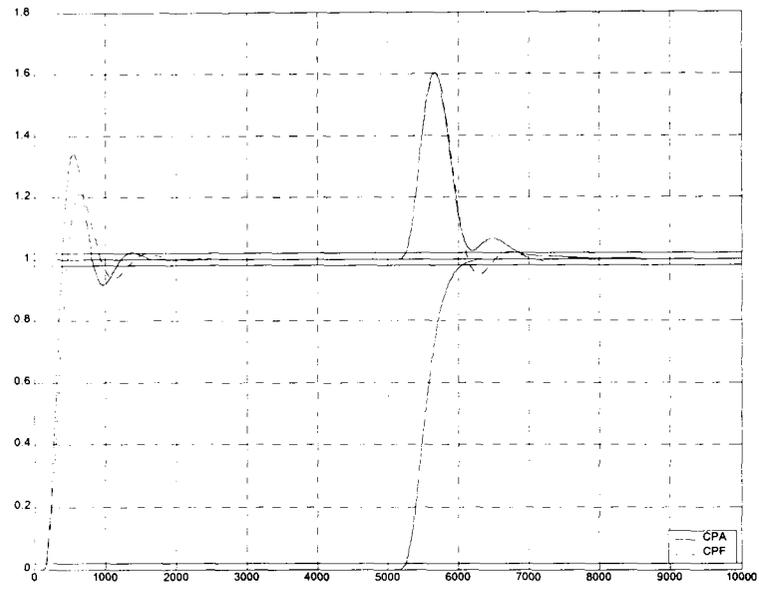


Figura 3.9 Modificación #1 para la combinación EEL

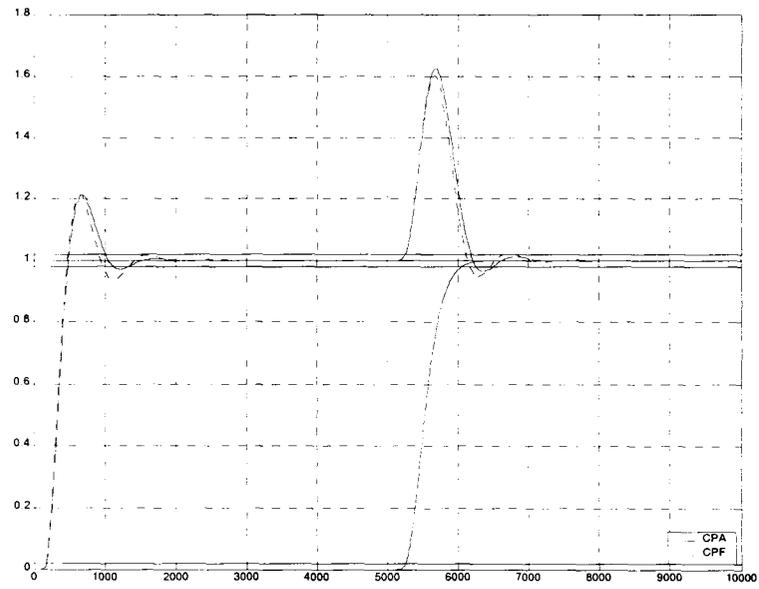


Figura 3.10 Modificación #1 para la combinación EEE

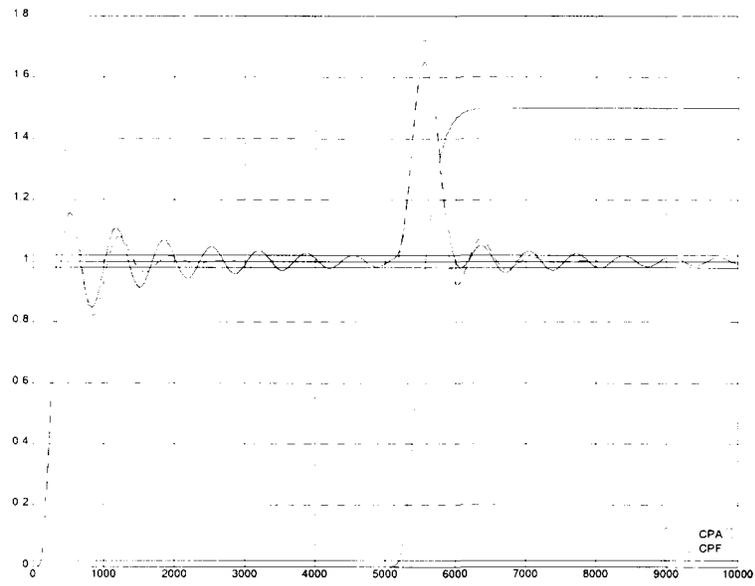


Figura 3.11 Modificación #2 para la combinación LLL

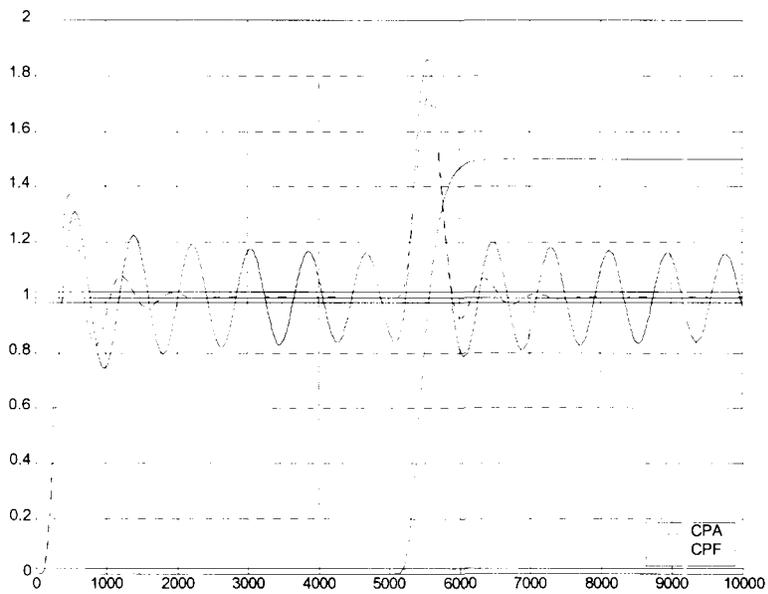


Figura 3.12 Modificación #2 para la combinación LLE

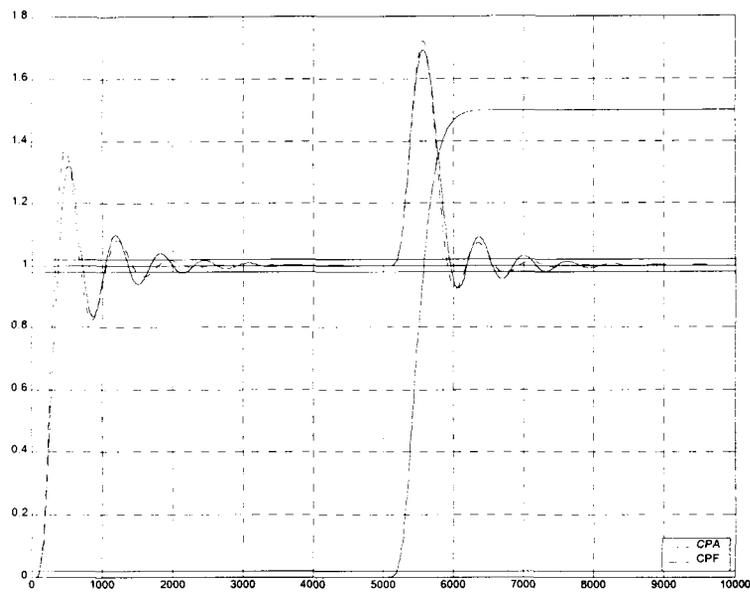


Figura 3.13 Modificación #2 para la combinación LEL

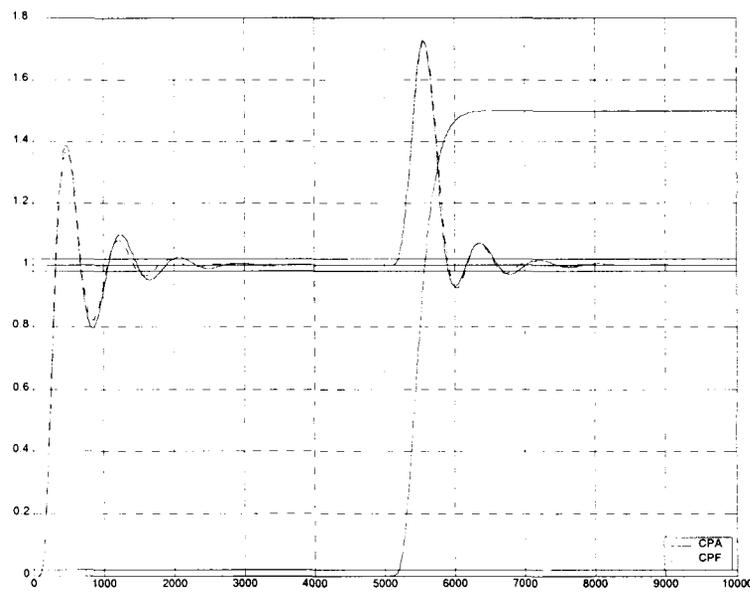


Figura 3.14 Modificación #2 para la combinación LEE

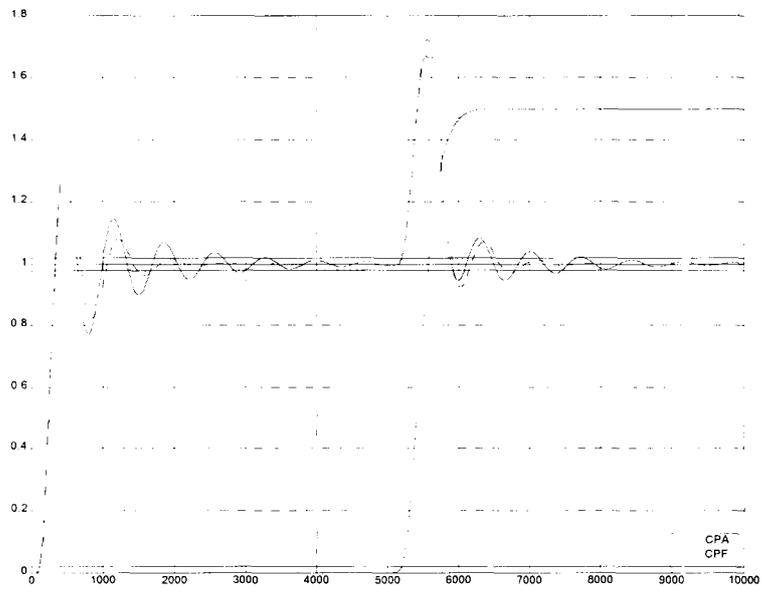


Figura 3.15 Modificación #2 para la combinación ELL

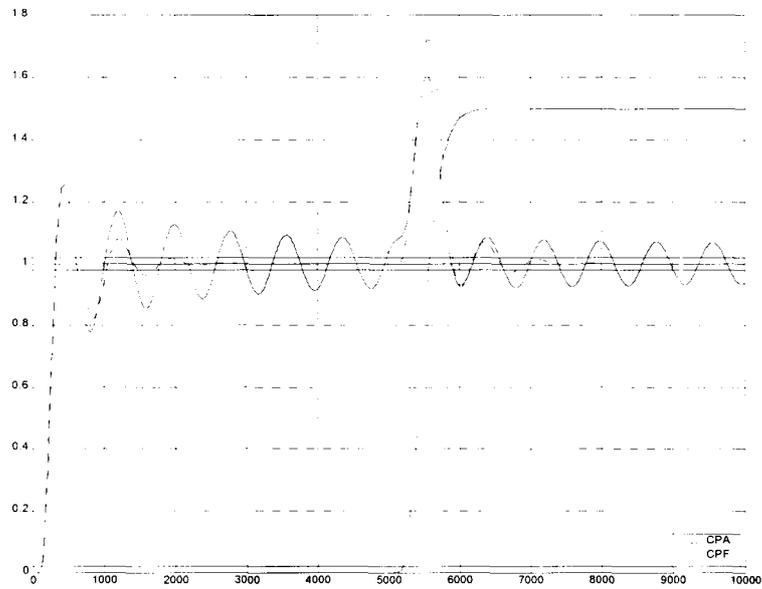


Figura 3.16 Modificación #2 para la combinación ELE

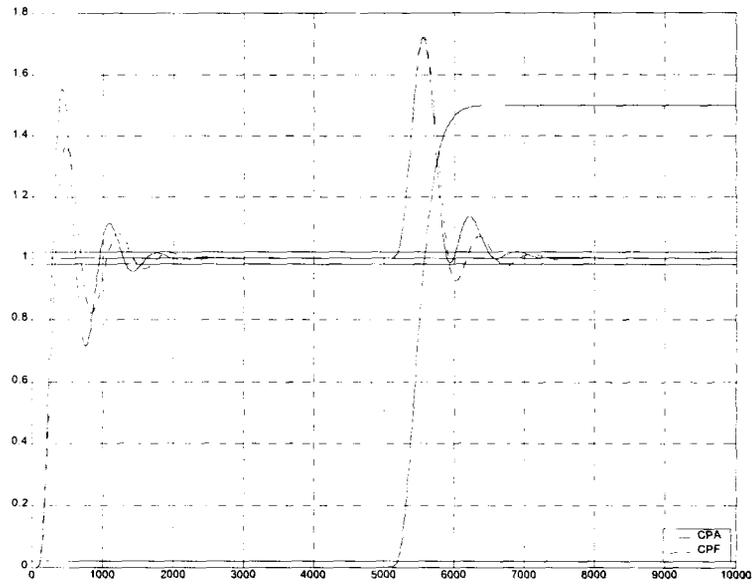


Figura 3.17 Modificación #2 para la combinación EEL

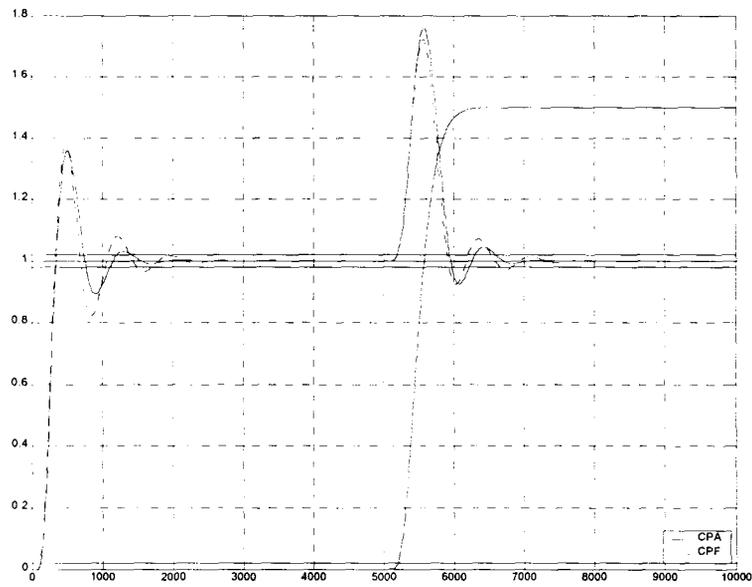


Figura 3.18 Modificación #2 para la combinación EEE

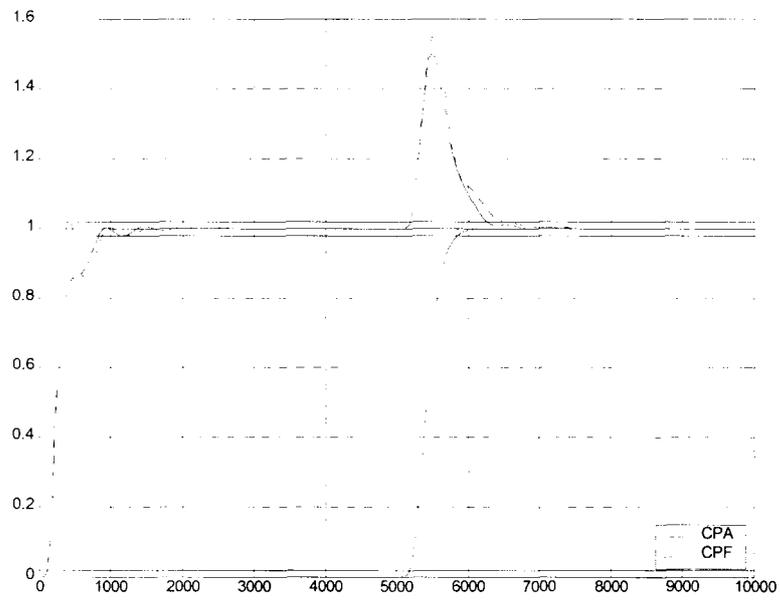


Figura 3.19 Modificación #3 para la combinación LLL

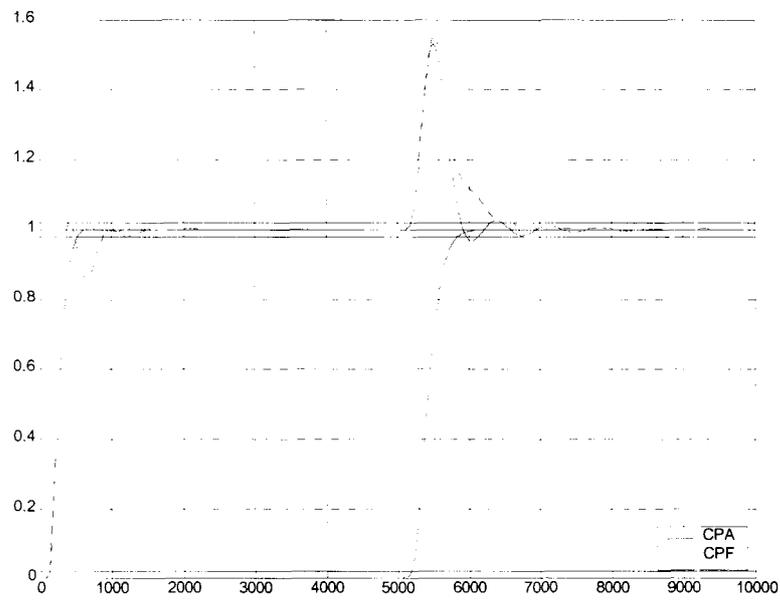


Figura 3.20 Modificación #3 para la combinación LLE

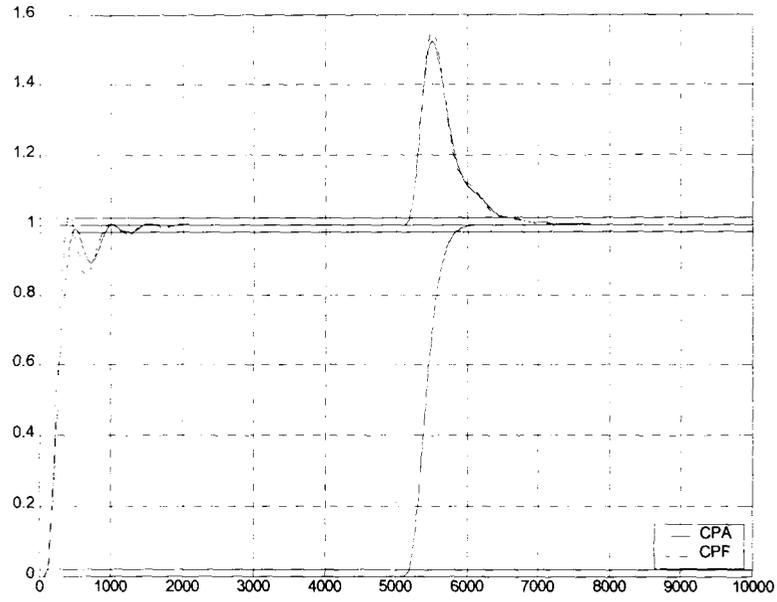


Figura 3.21 Modificación #3 para la combinación LEL

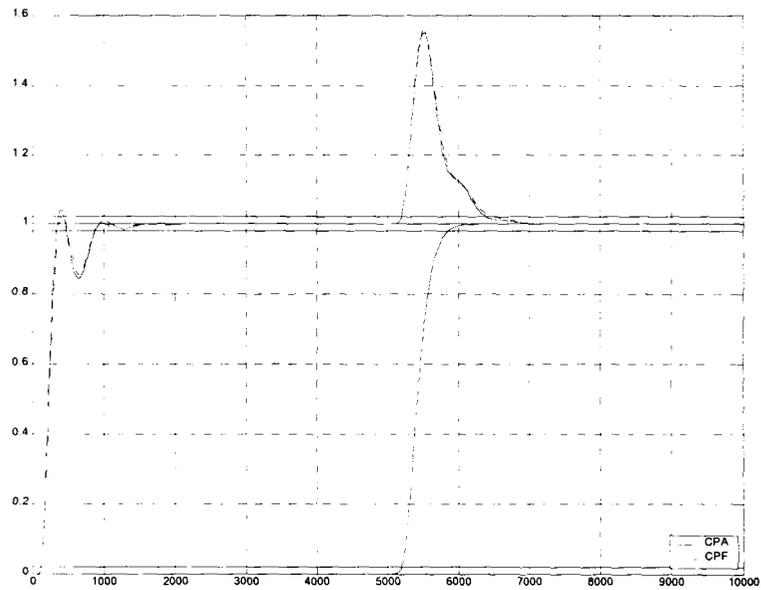


Figura 3.22 Modificación #3 para la combinación LEE

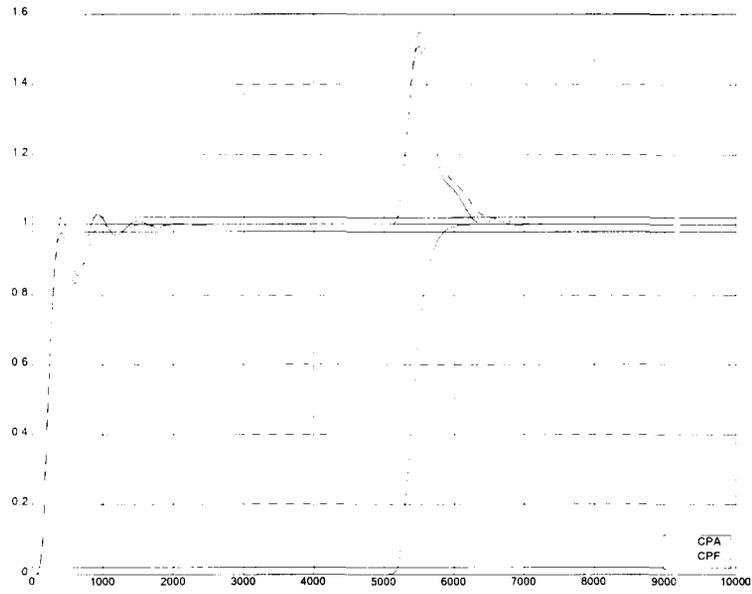


Figura 3.23 Modificación #3 para la combinación ELL

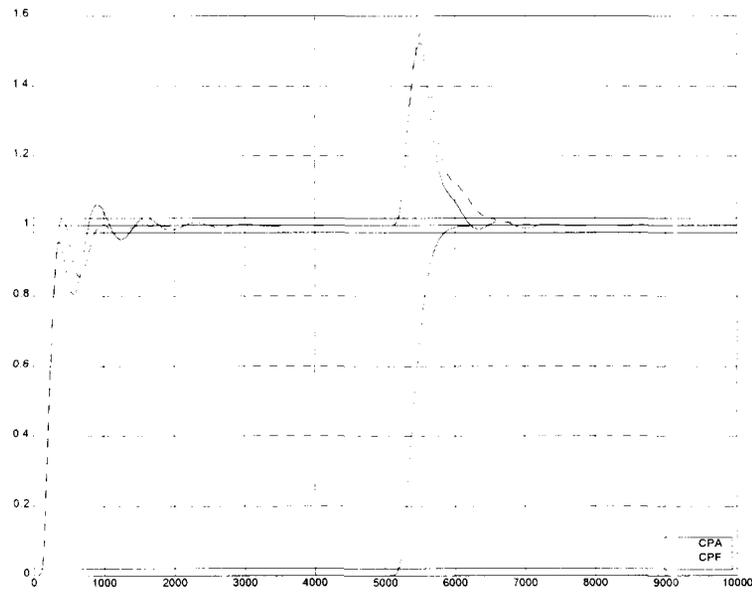


Figura 3.24 Modificación #3 para la combinación ELE

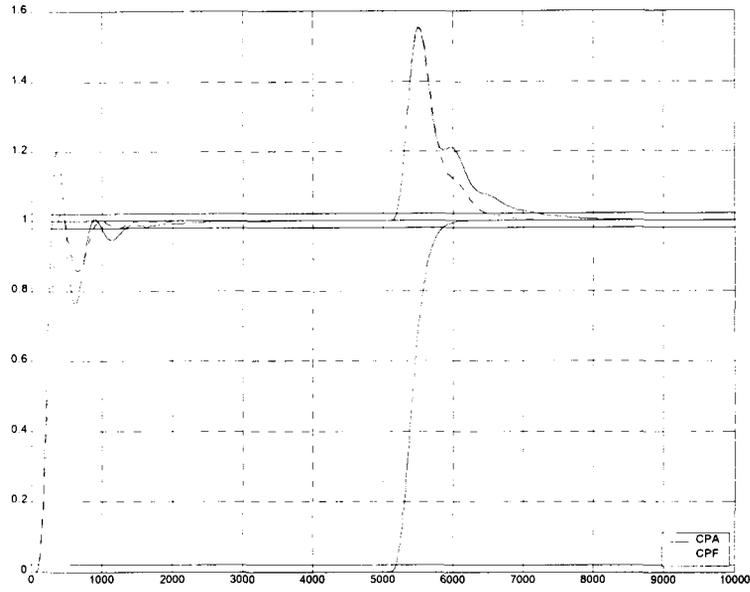


Figura 3.25 Modificación #3 para la combinación EEL

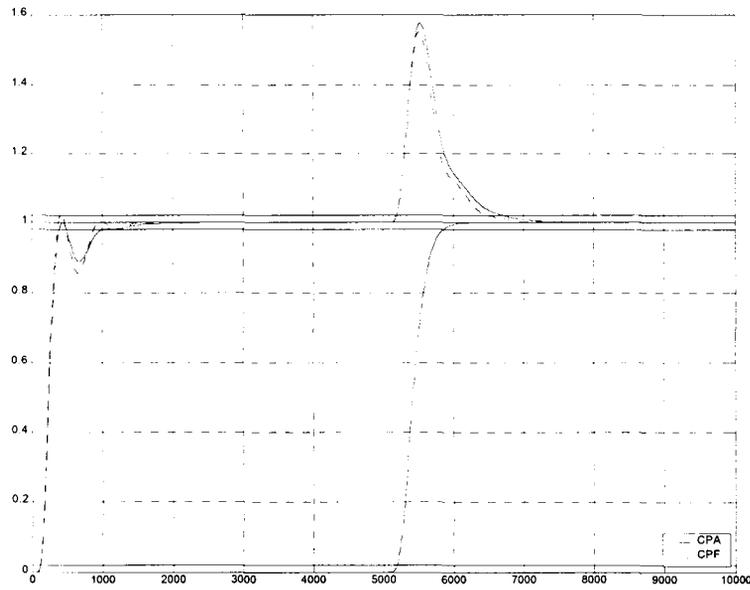


Figura 3.26 Modificación #3 para la combinación EEE

3.3 Análisis de las pruebas de robustez

Las pruebas de robustez fueron analizadas y se calcularon los parámetros de desempeño de cada una de éstas para poder tener una comparación entre las ocho diferentes combinaciones.

	<i>Modificación # 1</i>					
	<i>Seguimiento</i>				<i>Regulación</i>	
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	$\%M_p$	Desviación (%)	t_s (s)
CPF	450	650	1350	21.667	60	1700
LLL	610	750	1775	5.556	56.44	2100
LLE	550	800	>5000	21.67	N.A. ¹	>5000
LEL	550	725	1700	19.778	58.33	1750
LEE	450	635	1850	21.667	60.556	1775
ELL	490	650	2150	14.667	57.778	2150
ELE	460	625	>5000	7.778	60	>5000
EEL	400	550	1400	35.556	60	1750
EEE	495	700	1350	21.11	64.4	1425

Tabla 3.2 Parámetros de desempeño para todas las combinaciones aplicando la modificación #1

De las pruebas con la modificación número uno se puede observar que el mejor desempeño en tiempo de establecimiento lo tuvo la combinación EEE y en sobretiro lo tuvo la combinación LLL, en ambos casos igualando o mejorando el desempeño del controlador de parámetros fijos ante la misma modificación. Analizando el efecto de la perturbación una buena combinación fue la EEE con más desviación, pero con un tiempo de establecimiento menor a las demás, mientras que la combinación LLL tuvo el menor sobretiro y un tiempo de establecimiento promedio.

	<i>Modificación # 2</i>					
	<i>Seguimiento</i>				<i>Regulación</i>	
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	$\%M_p$	Desviación (%)	t_s (s)
CPF	325	465	1750	37.778	72.44	1750
LLL	400	525	4350	15.556	65	1850
LLE	395	575	>5000	31.5	N.A.	>5000
LEL	375	550	2250	32.778	69.11	2025
LEE	325	490	2200	39.33	72.44	1800
ELL	335	465	3000	30.556	68.11	2650
ELE	325	450	>5000	25.556	N.A.	>5000
EEL	300	435	1600	56.667	73.67	1400
EEE	350	500	1450	36.7	77.8	1525

Tabla 3.3 Parámetros de desempeño para todas las combinaciones aplicando la modificación #2

¹ N.A. significa que no es aplicable la medición debido a que el lazo de control no se logró estabilizar después de ser aplicado el cambio en referencia o su tiempo de estabilización fue demasiado grande y se aplicó una perturbación.

De las pruebas con la modificación número dos se puede observar que el mejor desempeño en tiempo de establecimiento lo tuvo la combinación EEE y en sobretiro lo tuvo la combinación LLL, en ambos casos mejorando el desempeño del controlador de parámetros fijos ante la misma modificación. Analizando el efecto de la perturbación una buena combinación fue la EEL, con un sobretiro alto, pero con un tiempo de establecimiento menor a los demás, sin embargo la LLL tuvo el menor sobretiro.

	<i>Modificación #3</i>					
	<i>Seguimiento</i>				<i>Regulación</i>	
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	$\%M_p$	Desviación (%)	t_s (s)
CPF	355	400	875	2.38	55.238	1350
LLL	830	1475	830	<2	50	1150
LLE	525	525	525	<2	52.857	1400
LEL	450	1350	1350	<2	52.38	1400
LEE	355	425	875	3.809	54.286	1300
ELL	800	935	1000	2.86	50.47	1150
ELE	750	925	1400	5.71	51.429	1050
EEL	300	325	1350	20	55.286	2150
EEE	400	450	1000	<2	57.143	1650

Tabla 3.4 Parámetros de desempeño para todas las combinaciones aplicando la modificación #3

De las pruebas con la modificación número tres se puede observar que el mejor desempeño en tiempo de establecimiento lo tuvo la combinación LLE y en sobretiro lo tuvo la combinación LLL, LLE, LEL y EEE, en todos los casos mejorando el desempeño del controlador de parámetros fijos ante la misma modificación. Analizando el efecto de la perturbación la mejor combinación fue la ELE con bajo sobretiro, pero con un tiempo de establecimiento menor a las demás combinaciones, de nueva cuenta la combinación LLL tuvo el mejor desempeño hablando de sobretiro.

3.4 Selección de la mejor combinación de estructuras

Después de realizar las pruebas de robustez y compararlas con los resultados obtenidos ante el proceso nominal la respuesta de la combinación LLL es la combinación seleccionada como la mejor manera de adaptar los parámetros. Esto debido a que en las pruebas de robustez es la que tiene menor sobretiro en todas las pruebas, mientras que sus tiempos de estabilización fueron competitivos contra los más rápidos. Por otra parte el desempeño de LLL con la planta nominal, mostrado en la figura 2.6, fue el mejor ante perturbaciones y el segundo mejor ante cambios en referencia sólo opacado en el tiempo de establecimiento por la combinación ELE, sin embargo, se demostró que ELE es demasiado oscilatoria, como se puede ver de las figuras 3.18 a 3.20. La combinación EEE es desechada debido a que sus resultados ante la planta nominal no presentan una mejoría significativa comparada con el controlador de parámetros fijos.

El controlador de parámetros adaptables propuesto por este trabajo de tesis se muestra en la ecuación 3.1.

$$G_c = \frac{\tau_1 + \tau_2}{K \left[(0.7[0.8|error| + 0.9] + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]} \frac{[(0.62)\tau_1 s + 1][(0.62)\tau_2 s + 1]}{[(0.5[0.75|error| + 0.55] + 0.12)(\tau_1 + \tau_2)s]} \frac{([-0.25|error| + 1.3] + 0.13)^2 \frac{\theta^2}{4} s^2 + ([-0.25|error| + 1.3] + 0.13)\theta s + 1}{\frac{\theta^2}{64} s^2 + \frac{\theta}{4} s + 1} \quad (3.1)$$

CAPÍTULO 4. Pruebas en simulación

En este capítulo se comparará el controlador con parámetros adaptables con el controlador de parámetros fijos y con un PID utilizando veinte diferentes procesos de diferentes órdenes (segundo, tercer, cuarto y quinto) ante variaciones paramétricas de la planta nominal con el objetivo de mostrar el desempeño del controlador propuesto.

4.1 Pruebas realizadas y procesos utilizados

Las pruebas que se proponen para probar la robustez del controlador con parámetros adaptados están definidas por las tres modificaciones que se utilizaron en el capítulo 3, y se realiza una simulación con la planta nominal. Las pruebas se aplicaron a los procesos que se muestran en las tablas 4.1 a 4.4.

Procesos de segundo orden											
Proceso	Proceso real				Aproximación a primer orden			Aproximación a segundo orden			
	τ_1	τ_2	θ	k	τ	θ	k	τ_1	τ_2	θ	k
1	100	60	40	1	131.9	69.1	1	104.1	49	50.5	1
2	100	80	50	1	145.2	86.4	1	103.1	67.6	59.8	1
3	100	80	80	1	146	116.2	1	103.1	67.6	89.8	1
4	100	100	20	1	165	59.5	1	103.6	103.1	12.7	1
5	100	100	100	1	161.5	142.3	1	103.6	103.1	92.7	1

Tabla 4.1 Procesos de segundo orden

Procesos de tercer orden												
Proceso	Proceso real					Aproximación a primer orden			Aproximación a segundo orden			
	τ_1	τ_2	τ_3	θ	k	τ	θ	k	τ_1	τ_2	θ	k
6	100	80	80	80	1	179.9	168	1	131.9	70.3	142.7	1
7	100	100	40	50	1	170.3	125.1	1	117.7	91.8	83.2	1
8	100	100	60	0	1	180.6	86.6	1	125.7	89	49.6	1
9	100	100	100	0	1	208	104.4	1	128.6	128.6	51.6	1
10	100	100	100	80	1	209.6	184	1	128.6	128.6	131.6	1

Tabla 4.2 Procesos de tercer orden

Procesos de cuarto orden													
Proceso	Proceso real						Aproximación a primer orden			Aproximación a segundo orden			
	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	θ	k	τ	θ	k	τ_1	τ_2	θ	k
11	100	60	60	60	0	1	170.99	125.71	1	110.6	110.6	69.3	1
12	100	100	60	60	80	1	197.6	222.48	1	126.98	126.98	157.8	1
13	100	100	80	40	100	1	200.59	239.61	1	124.5	124.5	177.4	1
14	100	100	80	40	50	1	200.29	189.68	1	124.5	124.5	127.4	1
15	100	100	80	80	100	1	220.89	263.41	1	136.8	136.8	196.5	1
16	100	100	100	100	100	1	247.35	281.47	1	153.1	153.1	207.4	1

Tabla 4.3 Procesos de cuarto orden

Procesos de quinto orden														
Proceso	Proceso real							Aproximación a primer orden			Aproximación a segundo orden			
	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	θ	k	τ	θ	k	τ_1	τ_2	θ	k
17	100	80	60	60	60	0	1	199.69	182.39	1	126.1	126.1	119.9	1
18	100	100	80	40	40	100	1	207.94	274.48	1	132.6	132.6	207.5	1
19	100	100	100	80	60	80	1	249.26	301.55	1	154.037	154.037	224.765	1
20	100	100	100	80	80	100	1	260.83	332.86	1	159.7	159.7	257	1

Tabla 4.4 Procesos de quinto orden

Las modificaciones se realizarán para conocer y comparar, no sólo el comportamiento del CPA contra el comportamiento del CPF, sino también analizar el comportamiento de un controlador PID no interactivo sintonizado, cuya estructura se muestra en la ecuación 4.1, tanto para perturbaciones como para referencia.

$$G_c = K_c + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \tag{4.1}$$

4.2 Resultados de las pruebas realizadas

Las gráficas que se obtuvieron de las pruebas ante las tres modificaciones tienen el formato que se presenta en la figura 4.1. La totalidad de las gráficas se puede encontrar en el Apéndice B.

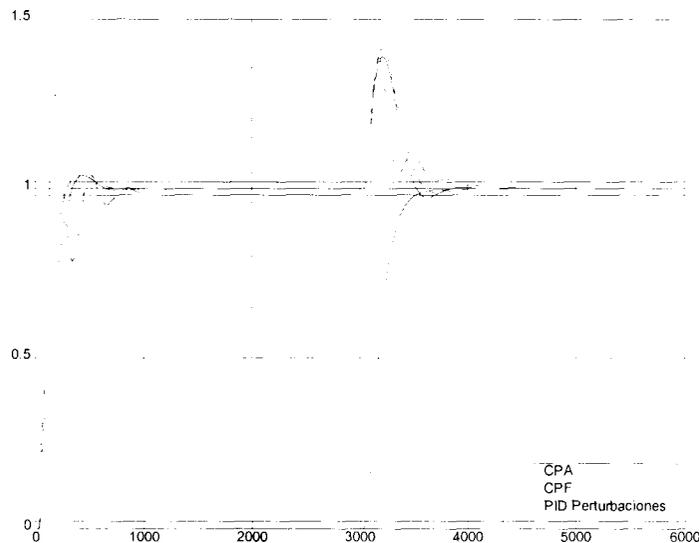


Figura 4.1 Respuesta del proceso 1 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

4.3 Parámetros de desempeño de las pruebas en simulación

Se obtuvieron los parámetros de desempeño de las pruebas realizadas para poder comparar el desempeño del controlador propuesto en esta tesis. Los parámetros obtenidos fueron el tiempo de establecimiento (t_s) y el sobretiro ($\%M_p$) tanto ante cambios en referencia como ante perturbaciones.

4.3.1 Parámetros de desempeño para la planta nominal

En estos experimentos se aplicaron las pruebas propuestas en el capítulo 3 con el objetivo de conocer el comportamiento del controlador propuesto ante una planta nominal de diversos órdenes para conocer la aplicabilidad del controlador.

Proceso	Controlador	Nominal			
		Seguimiento		Regulación	
		t_s (s)	$\%M_p$	t_s (s)	Desviación (%)
1	PID Regulación	735	28.18	882	39.09
	PID Seguimiento	1118	0	1353	44.54
	CPF	559	8.18	559	41.82
	CPA	559	8.18	706	39.09
2	PID Regulación	897	25	1029	41.82
	PID Seguimiento	1147	0	1397	47.27
	CPF	618	5	618	41.82
	CPA	618	4.5	794	39.09
3	PID Regulación	1050	23.8	925	50.48
	PID Seguimiento	900	0	1250	54.29
	CPF	600	3.3	750	45.52
	CPA	600	2.95	700	41.71
4	PID Regulación	775	22.58	950	27.9
	PID Seguimiento	1750	0	1950	35.19
	CPF	625	7.89	750	37.68
	CPA	625	7.64	800	36.9
5	PID Regulación	950	21.9	1100	53.43
	PID Seguimiento	940	0	1300	57.14
	CPF	675	4.67	750	46.76
	CPA	675	3.8	925	42.95

Tabla 4.5a Parámetros de desempeño con la plantas nominales de segundo orden

Proceso	Controlador	Nominal			
		Seguimiento		Regulación	
		t_r (s)	$\%M_p$	t_r (s)	Desviación (%)
6	PID Regulación	1425	21.9	1250	55.05
	PID Seguimiento	1050	-6.19	1400	59.05
	CPF	400	< 2	900	49.52
	CPA	450	< 2	805	44.76
7	PID Regulación	1200	22.73	1050	47.27
	PID Seguimiento	1190	0	1525	51.43
	CPF	725	4.64	750	44.55
	CPA	725	4.09	950	41.36
8	PID Regulación	1050	20.43	1200	32.88
	PID Seguimiento	625	0	1925	40
	CPF	725	6.44	700	39.31
	CPA	725	5.84	950	37.17
9	PID Regulación	1250	20	1400	33.73
	PID Seguimiento	1850	0	2150	40.91
	CPF	575	6.87	790	38.45
	CPA	575	6	1075	36.57
10	PID Regulación	625	21.9	1400	52.67
	PID Seguimiento	1200	0	1700	57.14
	CPF	800	3.81	950	46.67
	CPA	800	2.86	1100	42.86

Tabla 4.5b Parámetros de desempeño con la plantas nominales de tercer orden

Proceso	Controlador	Nominal			
		Seguimiento		Regulación	
		t_r (s)	$\%M_p$	t_r (s)	Desviación (%)
11	PID Regulación	1200	17.05	1100	43.14
	PID Seguimiento	1200	0	1550	49.52
	CPF	700	5.71	700	42
	CPA	700	4.67	950	39.52
12	PID Regulación	1075	14.57	14.57	59.05
	PID Seguimiento	550	< 2	1300	63.3
	CPF	550	2.95	2.95	51.43
	CPA	550	< 2	900	47.62
13	PID Regulación	1100	14.4	1500	62.1
	PID Seguimiento	550	< 2	1200	65.56
	CPF	600	5.56	1050	54.4
	CPA	550	< 2	950	50
14	PID Regulación	1225	16.38	1400	52.86
	PID Seguimiento	1150	0	1575	57.14
	CPF	775	4.29	900	46.76
	CPA	775	2.86	1100	43.05
15	PID Regulación	1500	15	1675	61.67
	PID Seguimiento	600	< 2	1350	65.56
	CPF	650	6.56	1140	54.4
	CPA	600	< 2	1040	49.78
16	PID Regulación	1675	16.1	1850	60
	PID Seguimiento	675	< 2	1650	64.4
	CPF	725	4.67	1210	53.3
	CPA	675	< 2	1135	48.67

Tabla 4.5c Parámetros de desempeño con la plantas nominales de cuarto orden

		<i>Nominal</i>			
Proceso	Controlador	<i>Seguimiento</i>		<i>Regulación</i>	
		t_r (s)	%M_p	t_s (s)	Desviación (%)
17	PID Regulación	1250	16.67	1400	50.48
	PID Seguimiento	1175	0	1600	56
	CPF	750	4.76	900	45.71
	CPA	800	2.86	1100	42.38
18	PID Regulación	1450	13.2	1575	65.56
	PID Seguimiento	1425	3.1	1800	68.78
	CPF	950	11.1	1350	57.89
	CPA	850	< 2	1050	53.3
19	PID Regulación	1750	15.56	1900	62.3
	PID Seguimiento	700	< 2	1475	66.1
	CPF	1050	8.3	1200	55.3
	CPA	690	< 2	1150	50
20	PID Regulación	1875	15.3	2000	65
	PID Seguimiento	1750	< 2	1525	68
	CPF	1200	12.2	1700	57.78
	CPA	1150	< 2	1250	52.56

Tabla 4.5d Parámetros de desempeño con la plantas nominales de quinto orden

4.3.2 Parámetros de desempeño para la planta con el tiempo muerto modificado

En estos experimentos se aplicaron las pruebas propuestas en el capítulo 3 con el objetivo de conocer el comportamiento del controlador propuesto ante un aumento del 50% del tiempo muerto en plantas de diversos órdenes para conocer la robustez del controlador.

		<i>Modificación 1</i>			
Proceso	Controlador	<i>Seguimiento</i>		<i>Regulación</i>	
		t_r (s)	%M_p	t_s (s)	Desviación (%)
1	PID Regulación	1853	53.33	1353	45.05
	PID Seguimiento	1000	10.48	1326	49.52
	CPF	559	7.62	735	45.05
	CPA	559	6.19	735	42.86
2	PID Regulación	2044	49.71	1618	48.57
	PID Seguimiento	1147	10.48	1412	52.38
	CPF	632	10.38	853	46.19
	CPA	632	7.43	824	43.71
3	PID Regulación	2950	56.67	2650	63.3
	PID Seguimiento	1050	17.8	1200	65.56
	CPF	625	15.56	925	57.67
	CPA	825	8.3	880	54.33
4	PID Regulación	850	35.19	950	30.9
	PID Seguimiento	1750	0	1950	37.34
	CPF	600	10.3	800	39.48
	CPA	875	8.58	800	38.63
5	PID Regulación	3100	55.4	2800	66.56
	PID Seguimiento	1275	13.44	1375	68.89
	CPF	990	23.67	1025	61
	CPA	990	10.22	1275	57.67

Tabla 4.6a Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de segundo orden

Proceso	Controlador	Modificación 1			
		Seguimiento		Regulación	
		t_s (s)	$\%M_p$	t_s (s)	Desviación (%)
6	PID Regulación	2400	42.78	2400	63.33
	PID Seguimiento	1150	14.4	1500	66.1
	CPF	725	15	1050	57.78
	CPA	975	5.56	1250	53.89
7	PID Regulación	1900	40	625	52.38
	PID Seguimiento	965	-12.38	1400	56.48
	CPF	725	9.52	1025	48.57
	CPA	725	6.19	1000	45.71
8	PID Regulación	>5000	65	4100	NA
	PID Seguimiento	1875	19.82	1750	49.55
	CPF	1075	18.89	1050	46.67
	CPA	1075	12.2	1350	45
9	PID Regulación	4375	56.19	3150	43.81
	PID Seguimiento	1650	-23.64	2000	49.09
	CPF	1150	17.3	1150	45.62
	CPA	1200	11.3	1500	43.71
10	PID Regulación	2650	40.95	2600	59.52
	PID Seguimiento	1250	12	1700	63.3
	CPF	850	13.14	1250	53.3
	CPA	850	5.9	1225	49.52

Tabla 4.6b Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de tercer orden

Proceso	Controlador	Modificación 1			
		Seguimiento		Regulación	
		t_s (s)	$\%M_p$	t_s (s)	Desviación (%)
11	PID Regulación	3000	48.57	2655	54.09
	PID Seguimiento	540	14.38	1350	58.76
	CPF	1050	20.48	1050	50.48
	CPA	1050	10.67	1350	47.62
12	PID Regulación	2000	31.1	2000	65.56
	PID Seguimiento	425	11	1300	68.89
	CPF	1050	18.78	1200	58.78
	CPA	1050	5.56	1475	54.56
13	PID Regulación	2100	33.1	2150	69.4
	PID Seguimiento	1050	13.89	1550	72.2
	CPF	1150	26.67	1600	63.3
	CPA	2150	8.89	2250	59.4
14	PID Regulación	1775	27.62	1475	57.14
	PID Seguimiento	1200	5.56	1600	61.44
	CPF	800	10	1150	51.43
	CPA	800	4.76	1150	47.52
15	PID Regulación	1250	31.2	2325	68.56
	PID Seguimiento	1125	13.3	650	71.3
	CPF	2300	25.4	1700	62.2
	CPA	2000	7.89	2400	58.78
16	PID Regulación	2500	31.67	2525	66.67
	PID Seguimiento	1500	11.3	1650	70
	CPF	1350	21.1	1465	60
	CPA	1725	6.67	1850	56.4

Tabla 4.6c Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de cuarto orden

Proceso	Controlador	Modificación 1			
		Seguimiento		Regulación	
		t_s (s)	$\%M_p$	t_s (s)	Desviación (%)
17	PID Regulación	2675	39.52	2625	59.05
	PID Seguimiento	1250	13.3	1700	63.3
	CPF	1150	19.05	1250	53.52
	CPA	1150	8.48	1525	49.8
18	PID Regulación	1850	28.89	2250	72.2
	PID Seguimiento	1350	14.2	1900	74.4
	CPF	1600	31.1	1700	65.56
	CPA	5000	9	5000	61.67
19	PID Regulación	2450	26.67	2500	67.78
	PID Seguimiento	1200	10	1750	70.56
	CPF	1350	21.3	1800	60
	CPA	1750	5.56	2225	56.56
20	PID Regulación	2650	28	2750	70.56
	PID Seguimiento	1425	12.1	2125	73.3
	CPF	1915	27.78	2050	63.89
	CPA	4550	7.89	4250	60

Tabla 4.6d Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de quinto orden

4.3.3 Parámetros de desempeño para la planta con ganancia modificada

En estos experimentos se aplicaron las pruebas propuestas en el capítulo 3 con el objetivo de conocer el comportamiento del controlador propuesto ante un aumento del 50% de la ganancia en plantas de diversos órdenes para conocer la robustez del controlador.

Proceso	Controlador	Modificación 2			
		Seguimiento		Regulación	
		t_s (s)	$\%M_p$	t_s (s)	Desviación (%)
1	PID Regulación	1529	58.09	1250	50
	PID Seguimiento	765	19.05	1235	56.2
	CPF	441	6.67	471	50
	CPA	426	5.62	618	47.62
2	PID Regulación	1559	54.57	1250	53.3
	PID Seguimiento	882	18.67	1265	62.2
	CPF	500	7.62	706	50
	CPA	471	5.71	706	47.71
3	PID Regulación	2350	62.3	2125	71.67
	PID Seguimiento	1000	24.4	1250	76.67
	CPF	475	8.3	575	61.1
	CPA	475	5.56	700	55.56
4	PID Regulación	875	41.72	100	44
	PID Seguimiento	1350	11.9	1800	41.82
	CPF	475	11.18	700	44.64
	CPA	700	9.27	700	45.27
5	PID Regulación	2450	59.4	2225	76.67
	PID Seguimiento	925	24.4	1050	79.4
	CPF	550	19.78	610	64.4
	CPA	550	7.2	800	59

Tabla 4.7a Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de segundo orden

Proceso	Controlador	Modificación 2			
		Seguimiento		Regulación	
		t_s (s)	%M _p	t_s (s)	Desviación (%)
6	PID Regulación	975	55.6	2700	74.4
	PID Seguimiento	1375	25.4	1225	80
	CPF	450	15.3	725	64.4
	CPA	425	4	700	58.89
7	PID Regulación	2175	53.11	1750	61.1
	PID Seguimiento	1150	20	1425	68.67
	CPF	550	8.89	850	54.67
	CPA	550	5.67	850	51.11
8	PID Regulación	1250	37.73	1100	39.09
	PID Seguimiento	1150	12.27	1725	48.82
	CPF	585	10	850	47.18
	CPA	585	8.09	850	45.36
9	PID Regulación	1500	37.3	1310	40.45
	PID Seguimiento	1325	12.29	2000	49.52
	CPF	650	10.91	950	46.36
	CPA	650	8.18	950	44.73
10	PID Regulación	3300	51.9	3000	70.56
	PID Seguimiento	1550	23.33	1400	76.7
	CPF	600	10.89	800	58.89
	CPA	575	4.4	1000	54.1

Tabla 4.7b Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de tercer orden

Proceso	Controlador	Seguimiento		Regulación	
		t_s (s)	%M _p	t_s (s)	Desviación (%)
11	PID Regulación	1550	38.09	1350	53.81
	PID Seguimiento	1175	14.4	1450	63.3
	CPF	600	11.3	850	50.67
	CPA	600	6.86	850	48.57
12	PID Regulación	2550	48.4	25.75	80.62
	PID Seguimiento	1325	23.7	1400	86.17
	CPF	750	26.05	750	68.02
	CPA	940	8.27	800	61.85
13	PID Regulación	2950	49.75	2700	84.94
	PID Seguimiento	1350	24.07	1425	89.88
	CPF	1225	36.05	1150	72.47
	CPA	2250	12.96	1150	66.3
14	PID Regulación	2350	46.4	2350	70
	PID Seguimiento	1225	20	1350	76.78
	CPF	585	13.4	750	59.2
	CPA	550	5.56	950	54.67
15	PID Regulación	3300	49.63	3000	83.95
	PID Seguimiento	1525	25.8	1600	89.88
	CPF	1400	34.81	1300	72.1
	CPA	2500	13.58	1300	63.83
16	PID Regulación	1805	49.88	3650	82.47
	PID Seguimiento	1690	25.19	1800	87.65
	CPF	1250	30	960	69.75
	CPA	1805	10.99	1400	63.58

Tabla 4.7c Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de cuarto orden

17	PID Regulación	2375	42.2	2075	65.56
	PID Seguimiento	1225	18.89	1375	73.3
	CPF	600	14.4	950	56.89
	CPA	575	6.67	950	52.78
18	PID Regulación	3225	49.88	3300	90.49
	PID Seguimiento	1450	27.41	1350	95.43
	CPF	2050	48.52	2100	77.53
	CPA	> 5000	20	> 5000	NA
19	PID Regulación	3825	49.88	3850	84.94
	PID Seguimiento	1750	26.3	2225	90.99
	CPF	1700	37.28	1825	72.35
	CPA	4550	14.4	2800	64.94
20	PID Regulación	4500	51.1	4550	88.64
	PID Seguimiento	1875	28.64	2375	94.69
	CPF	2600	46.17	2375	79.01
	CPA	> 5000	20.62	> 5000	76.3

Tabla 4.7d Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de quinto orden

4.3.4 Parámetros de desempeño para la planta con la constante de tiempo líder modificada

En estos experimentos se aplicaron las pruebas propuestas en el capítulo 3 con el objetivo de conocer el comportamiento del controlador propuesto ante un cambio del 50% en la constante líder en plantas de diversos órdenes para conocer la robustez del controlador.

Proceso	Controlador	Modificación 3			
		Seguimiento		Regulación	
		t_s (s)	%M _p	t_s (s)	Desviación (%)
1	PID Regulación	882	31.36	824	40.9
	PID Seguimiento	1147	0	1353	46.36
	CPF	294	< 2	559	41.82
	CPA	324	< 2	485	40
2	PID Regulación	794	26.36	971	43.64
	PID Seguimiento	1206	0	1412	48.64
	CPF	324	<2%	618	42.27
	CPA	500	2%	529	40
3	PID Regulación	950	25.71	1150	53.3
	PID Seguimiento	1025	0	1300	57.14
	CPF	365	< 2	700	46.67
	CPA	400	< 2	625	42.86
4	PID Regulación	815	23.09	985	29.44
	PID Seguimiento	1750	0	950	36.05
	CPF	300	< 2	565	38.54
	CPA	500	2.7	650	38.54
5	PID Regulación	1000	26.56	1200	61.1
	PID Seguimiento	1050	0	1350	63.3
	CPF	540	3.67	800	52.2
	CPA	4000	2.8	700	49.89

Tabla 4.8a Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de segundo orden

		Modificación 3			
		Seguimiento		Regulación	
Proceso	Controlador	t_s (s)	$\%M_p$	t_s (s)	Desviación (%)
6	PID Regulación	1340	20	1150	56.19
	PID Seguimiento	1000	0	1400	60
	CPF	550	0	950	50
	CPA	550	0	825	45.62
7	PID Regulación	1000	22.55	1200	50
	PID Seguimiento	1300	0	1550	54.29
	CPF	450	< 2	800	44.55
	CPA	450	0	690	41.82
8	PID Regulación	900	15.45	1100	32.88
	PID Seguimiento	1750	0	1900	40.09
	CPF	385	< 2	715	39.14
	CPA	400	< 2	600	37.34
9	PID Regulación	1000	11.16	1350	34.16
	PID Seguimiento	1925	0	2150	40.91
	CPF	500	0	825	38.28
	CPA	500	< 2	700	36.57
10	PID Regulación	1250	18.18	1600	49.09
	PID Seguimiento	1425	0	1900	53.3
	CPF	750	0	1200	41.82
	CPA	650	0	1000	37.18

Tabla 4.8b Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de tercer orden

		Modificación 3			
		Seguimiento		Regulación	
Proceso	Controlador	t_s (s)	$\%M_p$	t_s (s)	Desviación (%)
11	PID Regulación	1100	14.29	1050	43.8
	PID Seguimiento	1275	0	1550	49.62
	CPF	350	< 2	725	41.9
	CPA	400	< 2	825	39.24
12	PID Regulación	1375	12.2	1300	61.67
	PID Seguimiento	1000	0	1425	65.56
	CPF	690	0	1150	53.3
	CPA	650	0	950	48.3
13	PID Regulación	1425	12.2	1325	64.4
	PID Seguimiento	950	0	1400	67.78
	CPF	700	-12.55	1150	56.67
	CPA	650	< 2	1000	52.1
14	PID Regulación	1325	12.38	1250	54.29
	PID Seguimiento	1325	0	1650	59.05
	CPF	590	0	1000	46.76
	CPA	590	< 2	610	42.86
15	PID Regulación	1600	15.56	1475	63.3
	PID Seguimiento	1050	0	1500	66.78
	CPF	800	< 2	1300	55.56
	CPA	750	< 2	1100	50.2
16	PID Regulación	1590	-23.1	1950	63.3
	PID Seguimiento	1500	0	1900	66.67
	CPF	1100	0	1500	54.3
	CPA	1050	< 2	1325	48.89

Tabla 4.8c Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de cuarto orden

		Modificación 3			
		Seguimiento		Regulación	
Proceso	Controlador	t_s (s)	%M _p	t_s (s)	Desviación (%)
17	PID Regulación	950	13.8	1325	50.57
	PID Seguimiento	1175	0	1625	56.09
	CPF	400	< 2	700	45.71
	CPA	594	< 2	600	41.9
18	PID Regulación	1575	11.1	1425	67.78
	PID Seguimiento	950	< 2	1400	71
	CPF	1250	11.89	1250	59.4
	CPA	1450	3.1	1140	55.56
19	PID Regulación	1750	10	1625	63.89
	PID Seguimiento	1175	0	1725	67.78
	CPF	900	< 2	1500	55.56
	CPA	850	< 2	1250	50
20	PID Regulación	1900	-18	1750	66.56
	PID Seguimiento	1375	< 2	1775	69.4
	CPF	1475	-17.78	1550	57.78
	CPA	1425	-2.2	1350	53.3

Tabla 4.9 Parámetros de desempeño con la plantas modificadas de quinto orden

4.4 Análisis de las pruebas en simulación

Las ventajas y desventajas que presenta el controlador de parámetros adaptables se enlistan a continuación:

Planta nominal

- El controlador de parámetros adaptables presenta un tiempo de establecimiento de entre 7.7% y un 34.3% menor ante cambios en referencia controlando la planta nominal cuando ésta tiene un tiempo muerto cercano o igual a la constante de tiempo líder.
- El controlador de parámetros adaptables al menos presenta un tiempo de establecimiento igual al controlador de parámetros fijos cuando el lazo tiene la planta nominal.
- El controlador de parámetros adaptables tiene un menor sobretiro ante referencias y ante perturbaciones que el controlador de parámetros fijos trabajando con la planta nominal.
- El controlador de parámetros adaptables llega a tener desde un 23.9% hasta un 50% de menor tiempo de establecimiento ante cambios en referencia que los controladores PID sintonizados ante referencia o ante perturbaciones al controlar la planta nominal.
- El controlador de parámetros adaptables en 17 de 20 procesos tiene menos sobretiro que el controlador de parámetros fijos o que las dos sintonías del PID ante perturbaciones. Esta situación no se cumple cuando la planta nominal no tiene tiempo muerto.
- De manera general, el controlador de parámetros adaptables tiene peores parámetros de desempeño que el controlador de parámetros fijos en el caso que la planta nominal no tenga tiempo muerto.

Modificación 1

- El controlador de parámetros adaptables en 17 de 20 procesos tiene menos sobretiro que el controlador de parámetros fijos o que las dos sintonías del PID ante perturbaciones y ante referencias. Esta situación sólo se cumple cuando la planta nominal tiene tiempo muerto.
- Excepto en el caso de la planta 4, el controlador de parámetros adaptables presenta menor sobretiro que el PID con ambas sintonías y que el controlador de parámetros fijos ante cambios en referencia.
- El controlador de parámetros adaptables presenta mayor tiempo de establecimiento que el controlador de parámetros fijos, pero el beneficio en la reducción de sobretiro es un factor a considerar en el caso incrementos en el tiempo muerto.
- De manera general, el controlador de parámetros adaptables pierde robustez a comparación del controlador de parámetros fijos, mostrando un mayor tiempo de establecimiento, pero a su vez se tiene una mejora significativa en el porcentaje de sobretiro.

Modificación 2

- El controlador de parámetros adaptables tiene un comportamiento oscilatorio ante el incremento de la ganancia del proceso cuando el tiempo muerto de la planta a controlar es del orden de la constante de tiempo líder.
- El tener menor sobretiro al utilizar el controlador de parámetros adaptables sigue prevaleciendo ante el aumento de la ganancia de la planta.

Modificación 3

- El tener menor sobretiro al utilizar el controlador de parámetros adaptables prevalece ante la disminución de la constante de tiempo líder de la planta.

CAPÍTULO 5. Pruebas en un proceso de temperatura

En este capítulo se explicará como está estructurado el proceso de temperatura que se utilizará para probar el controlador propuesto, se mostrará la implementación del controlador propuesto en el programa Lab Windows CVI y, finalmente, se realizarán experimentos en el proceso físico.

5.1 Equivalencia discreta del controlador

La equivalencia discreta del controlador se realiza partiendo de la ecuación 3.1, de donde se obtiene la ecuación discreta y simplificada de éste, mostrada en la ecuación 5.1.

$$G_c = \frac{\tau_1 + \tau_2}{k \left[(0.7|error| + 0.9) + 0.3 \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]} \frac{[(0.62)\tau_1 s + 1][(0.62)\tau_2 s + 1]}{(0.5|error| + 0.55) + 0.12(\tau_1 + \tau_2)s} \frac{[(-0.25|error| + 1.3) + 0.13]^2 \frac{\theta^2}{4} s^2 + [(-0.25|error| + 1.3) + 0.13]\theta s + 1}{\frac{\theta^2}{64} s^2 + \frac{\theta}{4} s + 1} \tag{3.1}$$

$$G_c = P \left(\frac{[Q1s + 1][Q2s + 1]}{Q3s} \right) \left(\frac{R1s^2 + R2s + 1}{R3s^2 + R4s + 1} \right) \tag{5.1}$$

donde

$$\begin{aligned} a_k &= 0.8|error| + 0.9 & P &= \frac{\tau_1 + \tau_2}{k \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]} & R1 &= (a_v + 0.13)^2 \frac{\theta^2}{4} \\ a_f &= 0.75|error| + 0.55 & & & R2 &= (a_v + 0.13)\theta \\ a_v &= -0.25|error| + 1.3 & Q1 &= (0.62)\tau_1 & R3 &= \frac{\theta^2}{64} \\ & & Q2 &= (0.62)\tau_2 & R4 &= \frac{\theta}{4} \end{aligned}$$

Para transformar el controlador propuesto al dominio del tiempo discreto, se utilizó la equivalencia entre el plano-s y el plano-z llamada diferencias hacia atrás que se muestra en la ecuación 5.2, se utiliza esta aproximación para evitar la posibilidad de tener un polo con el efecto de timbrado.

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} \tag{5.2}$$

Se hace una nueva sustitución de variables quedando la función del controlador discreta como se muestra en la ecuación 5.3.

$$G_c = P \left(\frac{L - Mz^{-1} + Nz^{-2}}{K - Kz^{-1}} \right) \left(\frac{A - Bz^{-1} + Cz^{-2}}{D - Ez^{-1} + Fz^{-2}} \right) \quad (5.3)$$

donde

$$\begin{aligned} L &= Q1Q2 + T(Q1 + Q2) + T^2 & A &= R1 + TR2 + T^2 \\ M &= 2Q1Q2 + T(Q1 + Q2) & B &= 2R1 + TR2 \\ N &= Q1Q2 & C &= R1 \\ K &= Q3T & D &= R3 + TR4 + T^2 \\ & & E &= 2R3 + TR4 \\ & & F &= R3 \end{aligned}$$

Desarrollando la multiplicación expresada en la ecuación 5.3, se obtiene la ecuación 5.4.

$$G_c = \frac{m}{e} = \frac{PLA - P(LB + MA)z^{-1} + P(LC + MB + NA)z^{-2} - P(MC + NB)z^{-3} + PNCz^{-4}}{KD - K(E + D)z^{-1} + K(E + F)z^{-2} - KFz^{-3}} \quad (5.4)$$

Con base en esta función de transferencia se obtiene la ecuación en diferencias que se identifica como la ecuación 5.5

$$\begin{aligned} m_k &= \frac{E + D}{D} m_{k-1} - \frac{E + F}{D} m_{k-2} + \frac{F}{D} m_{k-3} + \frac{PLA}{KD} e_k - \frac{P(LB + MA)}{KD} e_{k-1} \\ &+ \frac{P(LC + MB + NA)}{KD} e_{k-2} - \frac{P(MC + NB)}{KD} e_{k-3} + \frac{PNC}{KD} e_{k-4} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Es oportuno recordar que esta ecuación en diferencias no es necesario pasarla a modo velocidad debido a la presencia de un integrador en el controlador.

5.2 Programación del controlador en Lab Windows CVI

La implementación del controlador en Lab Windows CVI consiste de varias partes de programación debido a que los parámetros (A,B,C,D,E,F...etc) que se muestran en la ecuación 5.5 no son parámetros fijos porque contienen los valores de los algoritmos de adaptación por lo que se programó la ecuación de diferencias como se muestra en la figura 5.1.

```

mantesis[0]=((EE[1]+DD[1])/DD[1])*mantesis[1]-((EE[2]+FF[2])/DD[2])*mantesis[2]+(FF[3]/DD[3])*mantesis[3]
+((P1[0]*L[0]*AA[0])/K[0]*DD[0])*errortesis[0]
-(P1[1]*((L[1]*BB[1]+M[1]*AA[1])/K[1]*DD[1])*errortesis[1]
+(P1[2]*((L[2]*CC[2]+M[2]*BB[2]+N1[2]*AA[2])/K[2]*DD[2])*errortesis[2]
-(P1[3]*((M[3]*CC[3]+N1[3]*BB[3])/K[3]*DD[3])*errortesis[3]
+(P1[4]*N1[4]*CC[4]/K[4]*DD[4])*errortesis[4];
    
```

Figura 5.1 Programación de la ecuación de diferencias

En la figura 5.1 se puede apreciar que los parámetros se asignaron en arreglos para poder ponderar a cada variable por los valores de adaptación que le correspondían de acuerdo al tiempo de muestreo.

Por otra parte, se tuvo que adecuar la adaptación propuesta de las pruebas realizadas en Matlab debido a que está basada en un cambio escalón unitario lo que ocasionaba un error máximo igual a la unidad. Para mantener la relación con la simulación se programó el algoritmo de adaptación dividiendo el error entre el cambio en referencia, para que la variable de adaptación permaneciera alrededor de la unidad. El algoritmo programado se muestra en la figura 5.2.

```
ak=c1_ak*fabs(errortesis[0]/(reftesis[1]-reftesis[0]))+c2_ak;
af=c1_af*fabs(errortesis[0]/(reftesis[1]-reftesis[0]))+c2_af;
av=c1_av*fabs(errortesis[0]/(reftesis[1]-reftesis[0]))+c2_av;
```

Figura 5.2 Parámetros adaptados

Como se puede observar en la figura 5.2 el cambio en referencia se hace cero en el siguiente instante de muestreo después de que el usuario indicó el cambio de referencia, por lo que la ponderación del error se pierde inmediatamente, para evitar esto se proponen dos opciones:

1. Guardar en una variable auxiliar el valor del cambio en referencia hasta que el usuario indique otro cambio en la variable de proceso.
2. Ponderar el error por el rango máximo de la variable de proceso

En la primera opción, existe la posibilidad de que se realicen cambios en referencia cuando la variable de proceso no está estabilizada todavía ocasionando así una adaptación no óptima, así como la dependencia de la supervisión del cambio en la variable que guarda el valor de la referencia.

En la segunda opción, se tiene la posibilidad de tener una ponderación absoluta para todo instante y todo el rango de la variable, además se tiene un parámetro de ajuste que permitirá tener un control fino sobre la velocidad de respuesta del controlador. Al disminuir o al aumentar la ponderación también ajustamos la variable de adaptación, que es el error, suavizando o acelerando los parámetros del controlador, por lo que el valor sugerido para esta ponderación, que se denominará a , es el rango máximo de variación de la variable de proceso, pero puede ser modificado para disminuir o aumentar la variable de adaptación. El algoritmo de adaptación que se programó es mostrado en la ecuación 5.6.

$$a_n = C_{1a_n} \left| \frac{error}{a} \right| + C_{2a_n} \quad (5.6)$$

La programación completa del controlador se muestra en el apéndice C.

5.3 El proceso de temperatura

El proceso que se utilizará para comprobar la utilidad del controlador consiste en un ventilador que obliga a pasar un flujo de aire a través de una resistencia eléctrica. La resistencia eléctrica eleva su temperatura o la disminuye debido a la cantidad de voltaje que se le envía por medio del control del ángulo de disparo de un tiristor. Un esquemático del proceso de temperatura se muestra en la figura 5.3.

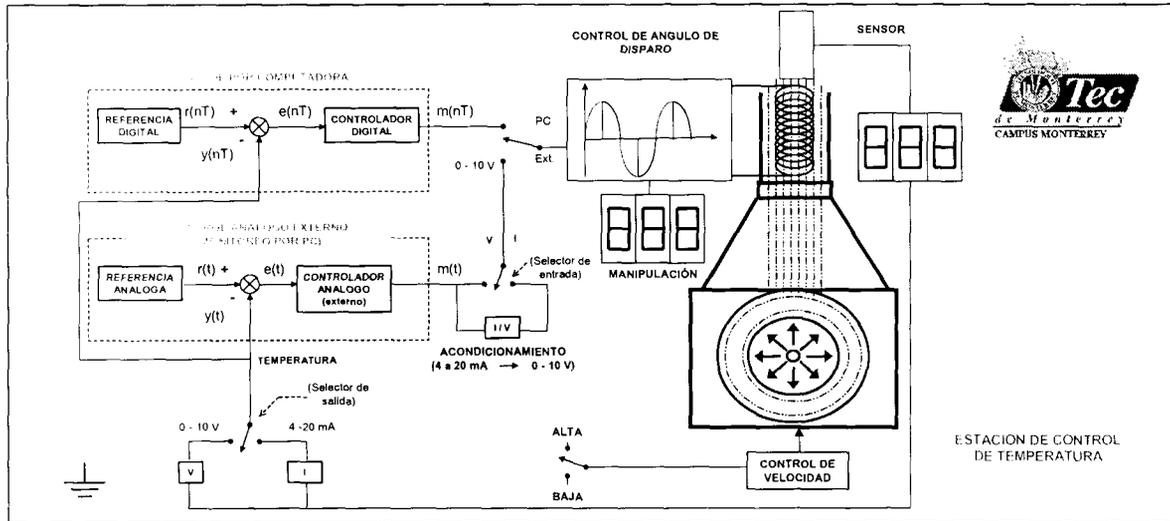


Figura 5.3 Esquemático del proceso de temperatura

Para realizar pruebas con el controlador propuesto se utilizarán diferentes materiales a manera de aislante térmico, para de esta manera poder alterar la dinámica del proceso, aumentando la(s) constante(s) de tiempo y el tiempo muerto. Se harán pruebas utilizando 5 aislamientos diferentes que son listados en la Tabla 5.1.

Aislamiento	Material
1	Cilindro de plástico rígido con el interior de metal
2	Cilindro de plástico rígido con un cilindro plástico flexible en su interior
3	Cilindro de plástico flexible
4	Cilindro plástico rígido de menor tamaño
5	Cilindro de tela

Tabla 5.1 Aislamientos a utilizar

5.4 Pruebas realizadas en el proceso de temperatura

Las pruebas se realizaron utilizando en el proceso de temperatura después de identificar el proceso con cada aislamiento. Las identificaciones se hicieron aproximando a un modelo de primer orden y de segundo orden. Los modelos identificados se presentan en la tabla 5.2.

<i>Aislamiento</i>	Aproximación de primer orden			Aproximación de segundo orden			
	K	τ	θ	K	τ_1	τ_2	θ
Sin aislamiento	2.03	25.43	0.289	2.04998	47.0075	0	0
1	0.9896	50.53	2.19	0.98499	46.6192	8.9645	1.6213
2	1.74	106.95	0	1.6849	253.3089	0	0
3	1.58	53.24	6.75	1.5949	63.34661	0	1.0269
4	1.45	39.11	5.55	1.4549	47.77451	0	0.1659
5	1.11	47.95	8.36	1.1049	54.59944	0	5.4753

Tabla 5.2 Modelos obtenidos con cada aislamiento

Las pruebas en el proceso físico consistieron en realizar tres cambios en referencia e introducir una perturbación tanto para el sensor libre de aislamiento como para el sensor con los aislamientos mencionados en el apartado anterior, las pruebas se describen en la tabla 5.3. Es conveniente mencionar que el valor de la ponderación del error fue fijado en 100, que es el rango máximo de la variable de proceso.

Prueba	Modificación realizada
A	Cambio en referencia de 35 °C a 50 °C
B	Cambio en referencia de 50 °C a 65 °C
C	Cambio en referencia de 65 °C a 50 °C
D	Perturbación (retirar el aislamiento)

Tabla 5.3 Pruebas realizadas con el CPA

Se realizó la prueba A con la finalidad de poder realizar una comparación entre el CPA, el CPF, un PID sintonizado como IMC convencional [6] y un PID sintonizado con Ziegler-Nichols, las sintonías del PID-IMC convencional y Ziegler-Nichols se listan en las tablas 5.4 a 5.9.

Proceso		IMC Convencional	Ziegler-Nichols
Sin aislamiento	K_c	1.46132	8.2079
	τ_i	25.5745	5.2541
	τ_d	0.14368	1.3135

Tabla 5.4 Sintonía para el proceso sin aislamiento

Proceso		IMC Convencional	Ziegler-Nichols
1	K_c	2.9082	20.6612
	τ_i	51.625	9.0048
	τ_d	1.0718	2.2512

Tabla 5.5 Sintonía para el proceso 1

Proceso		IMC Convencional	Ziegler-Nichols
2	K_c	1.7241	42.7985
	τ_i	106.95	10.1289
	τ_d	0	2.5322

Tabla 5.6 Sintonía para el proceso 2

Proceso		IMC Convencional	Ziegler-Nichols
3	K_c	1.6965	13.6177
	τ_i	56.615	11.8806
	τ_d	3.1738	2.9702

Tabla 5.7 Sintonía para el proceso 3

Proceso		IMC Convencional	Ziegler-Nichols
4	K_c	1.8269	10.8941
	τ_i	41.885	11.0042
	τ_d	2.5911	2.7511

Tabla 5.8 Sintonía para el proceso 4

Proceso		IMC Convencional	Ziegler-Nichols
5	K_c	2.3291	10.5119
	τ_i	52.13	10.7539
	τ_d	3.8448	2.6885

Tabla 5.9 Sintonía para el proceso 5

Las gráficas comparativas de la prueba A se muestran de la figura 5.4 a 5.9 . Las gráficas de todas las pruebas se muestran en el Apéndice D.

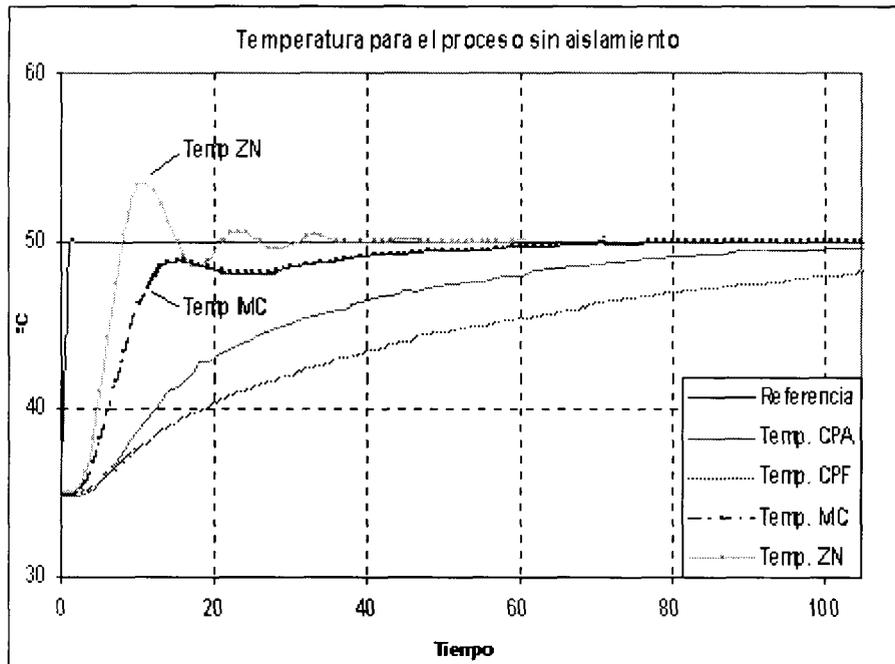


Figura 5.4 Prueba A para el CPA, CPF y PID sin aislamiento

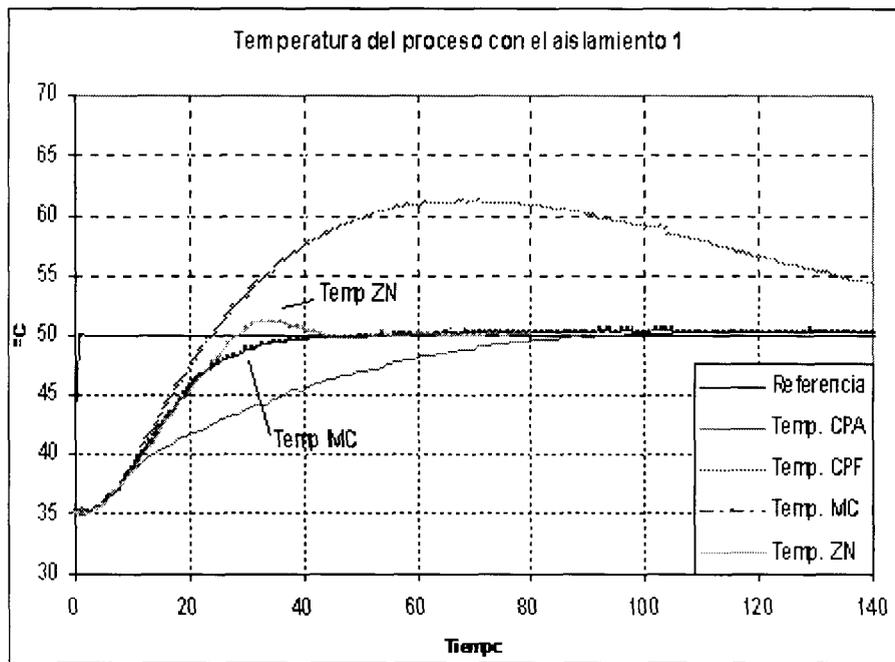


Figura 5.5 Prueba A para el CPA, CPF y PID con el aislamiento 1

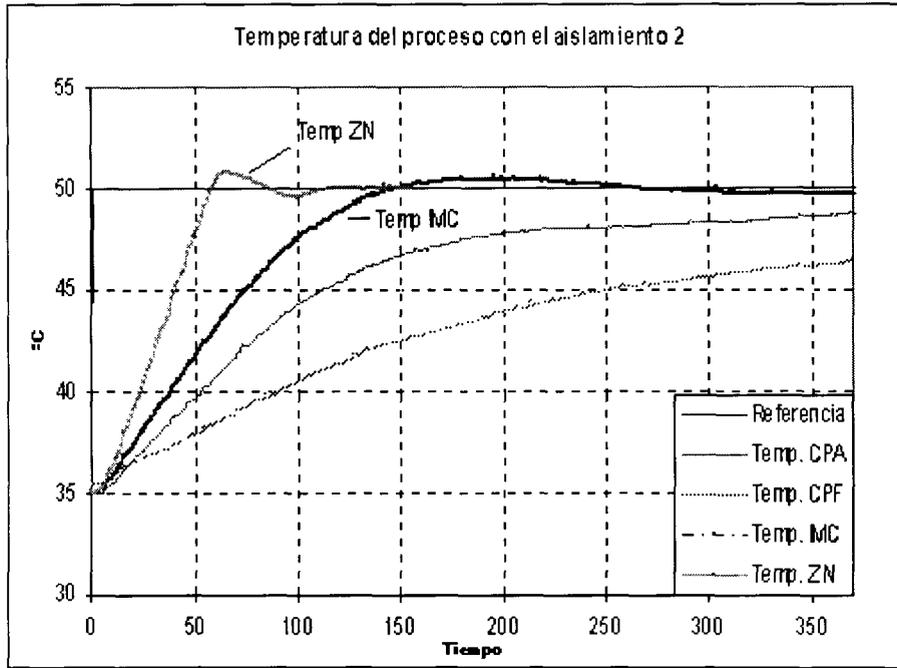


Figura 5.6 Prueba A para el CPA, CPF y PID con el aislamiento 2

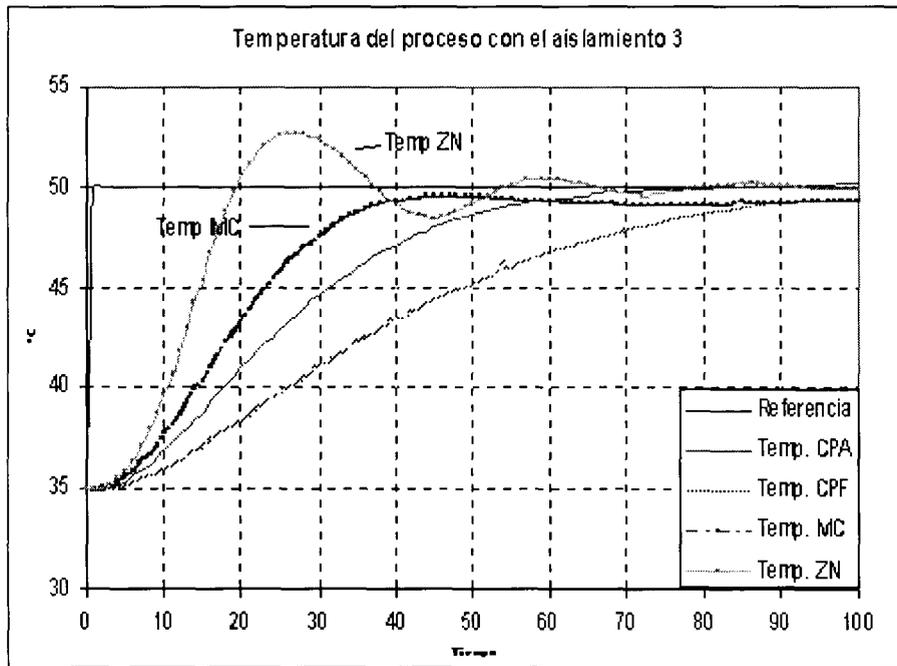


Figura 5.7 Prueba A para el CPA, CPF y PID con el aislamiento 3

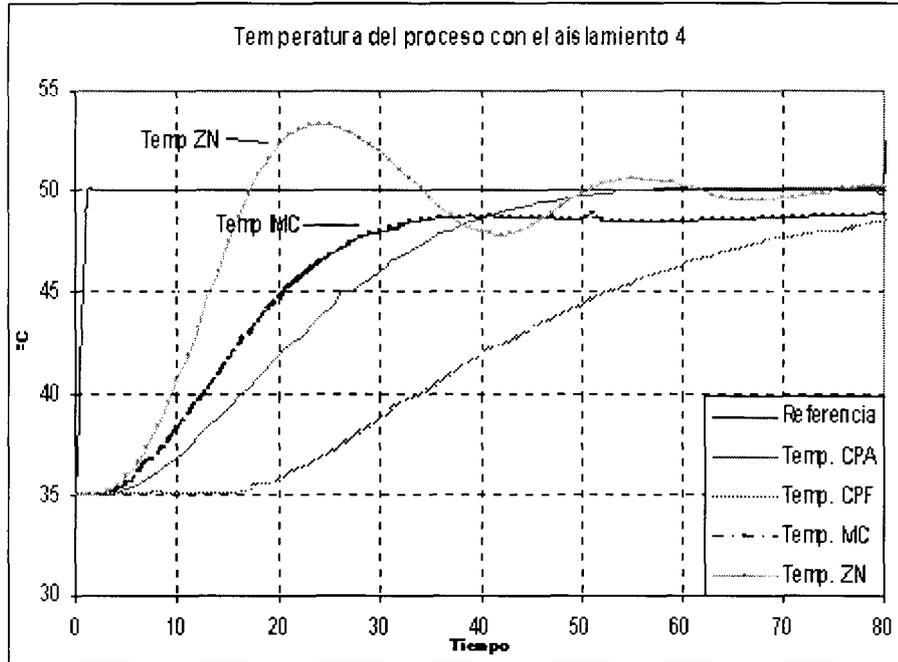


Figura 5.8 Prueba A para el CPA, CPF y PID con el aislamiento 4

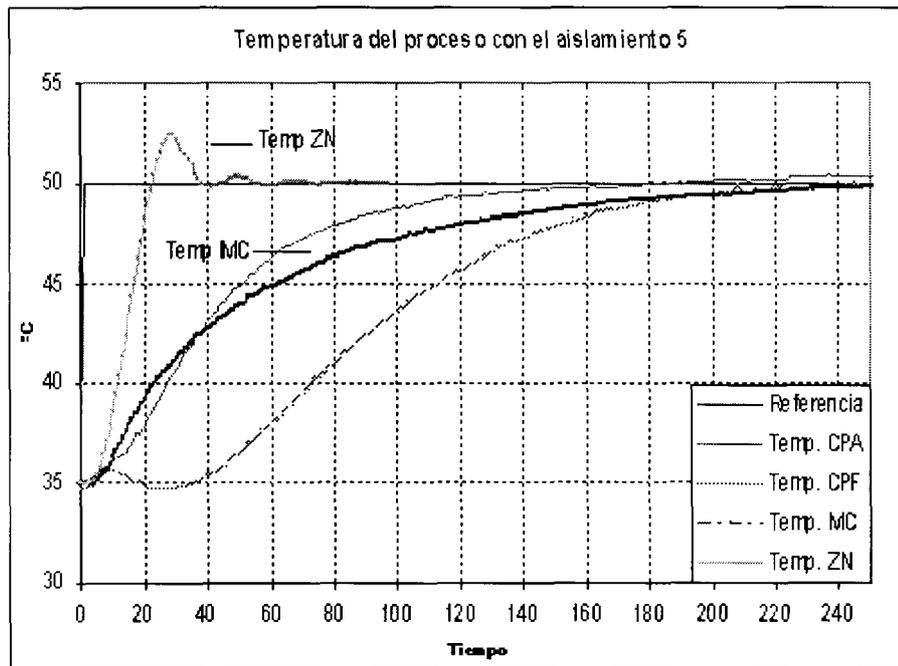


Figura 5.9 Prueba A para el CPA, CPF y PID con el aislamiento 5

En las gráficas 5.10 a 5.12 se presentan las gráficas del comportamiento ante una perturbación, ésta consistió en retirar el aislamiento. Para las pruebas ante perturbaciones se presenta el comportamiento del aislamiento 1, 2 y 4, por ser representativos de los tres tipos

de procesos que se obtuvieron con los aislamientos, segundo orden, sin tiempo muerto y con tiempo muerto.

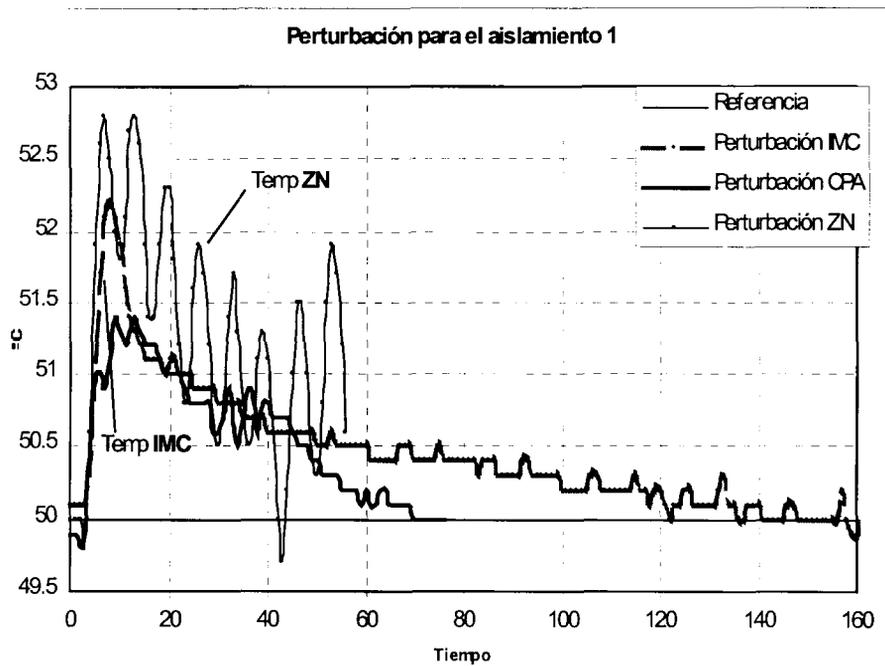


Figura 5.10 Respuesta del proceso con el aislamiento 1 ante una perturbación

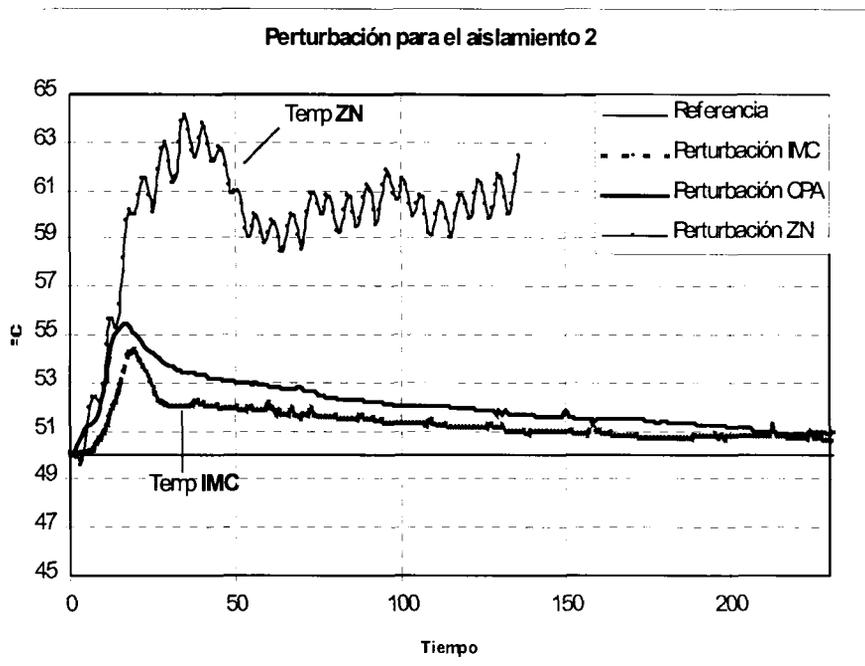


Figura 5.11 Respuesta del proceso con el aislamiento 2 ante una perturbación

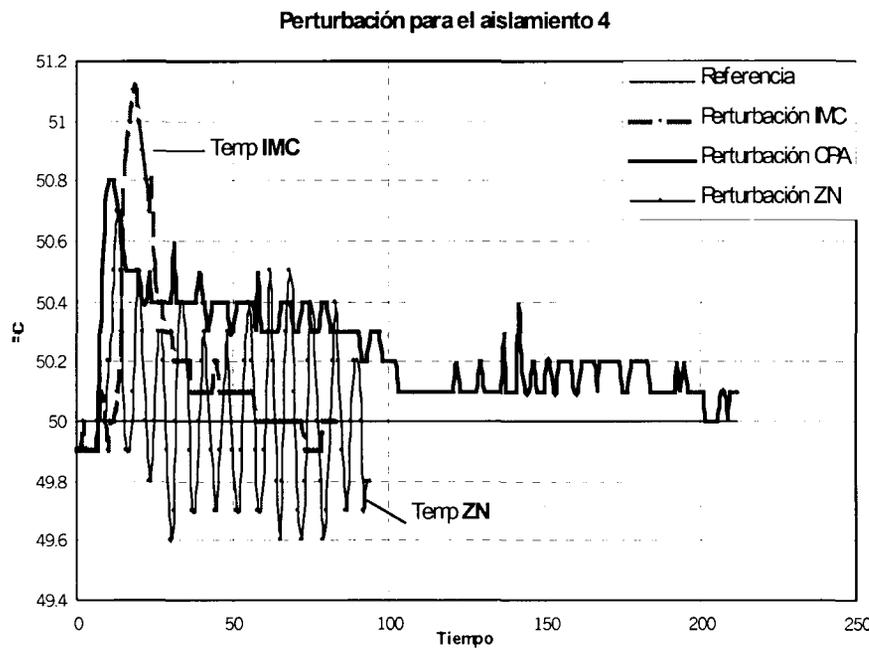


Figura 5.12 Respuesta del proceso con el aislamiento 4 ante una perturbación

5.5 Análisis de las pruebas realizadas en el proceso de temperatura

Las ventajas y desventajas que presenta el controlador de parámetros adaptables se enlistan a continuación:

- El controlador de parámetros adaptables presenta un tiempo de establecimiento al menos 29% menor que el controlador de parámetros fijos ante cambios en referencia controlando el proceso con cualquiera de los tipos de aislamiento.
- Cuando el proceso a controlar se pudo aproximar como un segundo orden el controlador de parámetros adaptables se desempeñó con menos tiempo de establecimiento que el controlador de parámetros fijos
- El controlador de parámetros adaptables mantiene la robustez ante cambios en referencia y ante perturbaciones
- El controlador de parámetros fijos y el controlador de parámetros adaptables presentan un transitorio al recibir el cambio de referencia en la presencia de plantas de segundo orden.
- El controlador de parámetros adaptables mejora el tiempo de establecimiento de la sintonía del PID sintonizado como IMC convencional y que el controlador de parámetros fijos cuando la planta presenta tiempo muerto considerablemente grande con respecto a la constante de tiempo; es decir, aproximadamente, mayor al 10% de la constante de tiempo.
- El controlador de parámetros adaptables tiene 2.2% más de sobretiro y aproximadamente el mismo tiempo de establecimiento que el controlador PID sintonizado como IMC convencional cuando la planta no tiene tiempo muerto como es el caso del aislamiento 2.

- El controlador de parámetros adaptables tiene 1.5% menos sobretiro cuando el proceso tiene tiempo muerto que el controlador PID sintonizado como IMC convencional aunque no mejora el tiempo de establecimiento.
- El controlador de parámetros adaptables, cuando controla un proceso de segundo orden, mejora en aproximadamente 60 segundos y en 1.8% en sobretiro la respuesta del IMC convencional.

CAPÍTULO 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

De lo presentado en este trabajo de tesis se puede concluir:

- El algoritmo de adaptación con una función lineal del valor absoluto del error que se escogió por su mejor desempeño, tuvo un efecto inverso al esperado en la respuesta, donde se buscaba que la adaptación acelerara la respuesta del lazo al existir más error y fuera frenando conforme el error disminuyera. Si se intentaba lograr este comportamiento el proceso se inestabiliza y se obtiene respuestas violentas, por lo que para mejorar la respuesta del controlador de parámetros fijos se obtuvo un algoritmo cuyas constantes hacían un aumento del suavizado con el error máximo y una disminución del suavizado cuando el error tiende a cero.
- El controlador propuesto puede ser utilizado sin realizar ajustes, o éstos serán mínimos, para controlar una planta conociendo los parámetros que la caracterizan.
- El comportamiento del controlador de parámetros adaptables tiene mejor respuesta y aporta mejores resultados con plantas de alto orden y tiempos muertos que se acerquen a las constantes de tiempo dominantes que con parámetros temporales pequeños, ya sea tiempo muerto o constantes de tiempo.
- Al realizar la implementación en un lenguaje de programación el algoritmo de adaptación se ponderó entre una constante. La constante se sugiere definirla como el rango máximo de la variable a controlar, de tal manera que el error máximo dividido entre la constante sea igual a la unidad. Esta sugerencia puede ser modificada para tener un parámetro de ajuste fino del controlador de parámetros adaptables ya sea acelerando la respuesta al aumentar la constante o viceversa.
- Al realizar pruebas en un proceso de temperatura se tuvo un mejor desempeño del controlador de parámetros adaptables en comparación de un PID sintonizado como IMC convencional ante cambios en referencia, cuando la planta presenta tiempo muerto.
- Al realizar pruebas en un proceso de temperatura se tuvo un mejor desempeño del controlador de parámetros adaptables en comparación de un PID sintonizado como IMC convencional ante perturbaciones, cuando la planta se comporta como un segundo orden y cuando la planta presenta tiempo muerto se tiene un menor sobretiro, pero no se logran mejores tiempos de establecimiento.
- El controlador de parámetros adaptables mantiene la robustez ante cambios en referencia y ante perturbaciones.
- El controlador de parámetros adaptables supera el tiempo de establecimiento del controlador de parámetros fijos en el proceso de temperatura.

6.2 Recomendaciones

Las recomendaciones para investigaciones posteriores son:

- a) Aplicar la estrategia de control antealimentado para mejorar el desempeño del controlador de parámetros adaptables ante perturbaciones, aplicando una ganancia estática adaptable ya sea de manera continua, con relaciones lógicas o difusas
- b) Utilizar el controlador de parámetros adaptables para aplicaciones específicas relacionadas con señales de referencia tipo diente de sierra o señales triangulares.
- c) Utilizar el controlador de parámetros adaptables para controlar procesos multivariantes
- d) Obtener un algoritmo de adaptación óptimo por medio de alguna metodología de inteligencia artificial (por ejemplo, algoritmo genéticos) para aplicaciones específicas
- e) Comprobar la estabilidad del controlador propuesto utilizando el concepto de estabilidad de Lyapunov.
- f) Realizar una supervisión de los parámetros de la planta para adaptar el controlador con base en éstos.
- g) Utilizar control híbrido para detener la adaptación de los parámetros en la cercanía del error igual a cero y para los demás instantes usar algoritmos más agresivos

APÉNDICE A. Máscaras de Matlab

Para lograr la simulación del controlador propuesto en Simulink se programó en forma de una suma de nueve términos. La estructura de los nueve términos se muestra en las ecuaciones A.1 a A.9.

$T1 = \frac{(a_v + 0.13)^2 \frac{\theta^2}{4}}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right] (0.5a_f + 0.12)}$	(A.1)
$T2 = \frac{(a_v + 0.13)\theta}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right] (0.5a_f + 0.12)}$	(A.2)
$T3 = \frac{1}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right] (0.5a_f + 0.12)}$	(A.3)
$T4 = \frac{0.62\tau_1\tau_2(a_v + 0.13)^2 \frac{\theta^2}{4}}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]}$	(A.4)
$T5 = \frac{0.62\tau_1\tau_2(a_v + 0.13)\theta}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]}$	(A.5)
$T6 = \frac{0.62\tau_1\tau_2}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]}$	(A.6)
$T7 = \frac{(\tau_1 + \tau_2)(a_v + 0.13)^2 \frac{\theta^2}{4}}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]}$	(A.7)
$T8 = \frac{(\tau_1 + \tau_2)(a_v + 0.13)\theta}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]}$	(A.8)
$T9 = \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{K \left[(0.7a_k + 0.3) \left(\tau_1 + \frac{\tau_2}{2} \right) + \theta \right]}$	(A.9)

donde

$$a_k = 0.8|error| + 0.9$$

$$a_f = 0.75|error| + 0.55$$

$$a_v = -0.25|error| + 1.3$$

La ecuación del controlador propuesto se muestra en la ecuación A.10.

$$\begin{aligned}
 G_c = & T1 \frac{s}{\frac{\theta^2}{64}s^2 + \frac{\theta}{4}s + 1} + T2 \frac{1}{\frac{\theta^2}{64}s^2 + \frac{\theta}{4}s + 1} + T3 \frac{1}{\frac{\theta^2}{64}s^3 + \frac{\theta}{4}s^2 + s} \\
 & + T4 \frac{s^3}{\frac{\theta^2}{64}s^2 + \frac{\theta}{4}s + 1} + T5 \frac{s^2}{\frac{\theta^2}{64}s^2 + \frac{\theta}{4}s + 1} + T6 \frac{s}{\frac{\theta^2}{64}s^2 + \frac{\theta}{4}s + 1} \\
 & + T7 \frac{s^2}{\frac{\theta^2}{64}s^2 + \frac{\theta}{4}s + 1} + T8 \frac{s}{\frac{\theta^2}{64}s^2 + \frac{\theta}{4}s + 1} + T9 \frac{1}{\frac{\theta^2}{64}s^2 + \frac{\theta}{4}s + 1}
 \end{aligned} \tag{A.10}$$

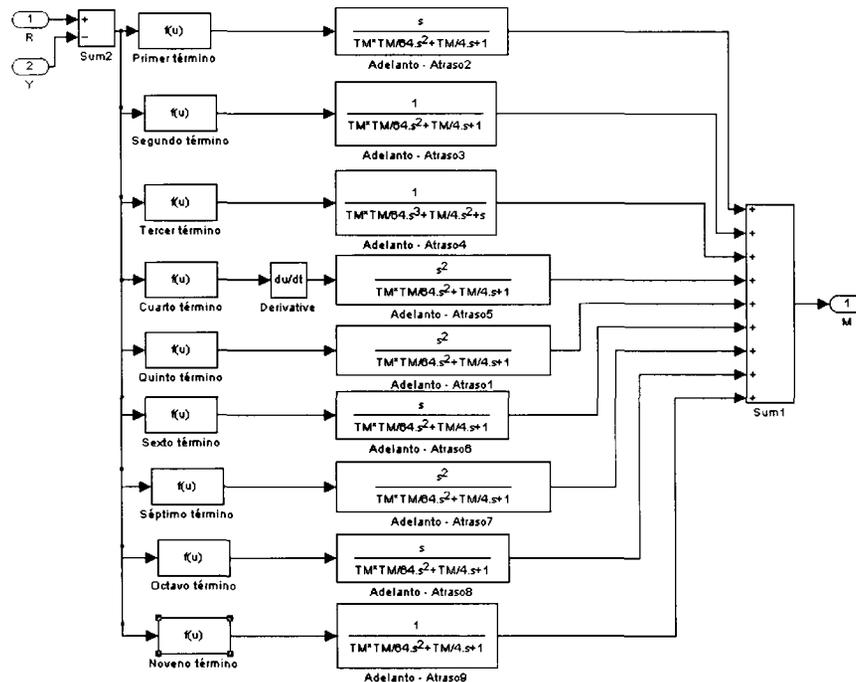


Figura A.1 Controlador de parámetros adaptables

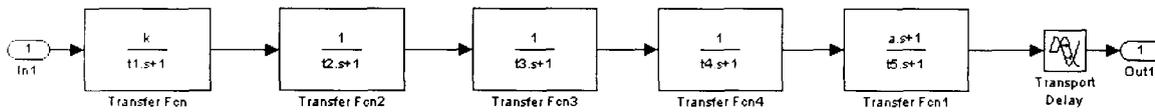


Figura A.2 Proceso a controlar

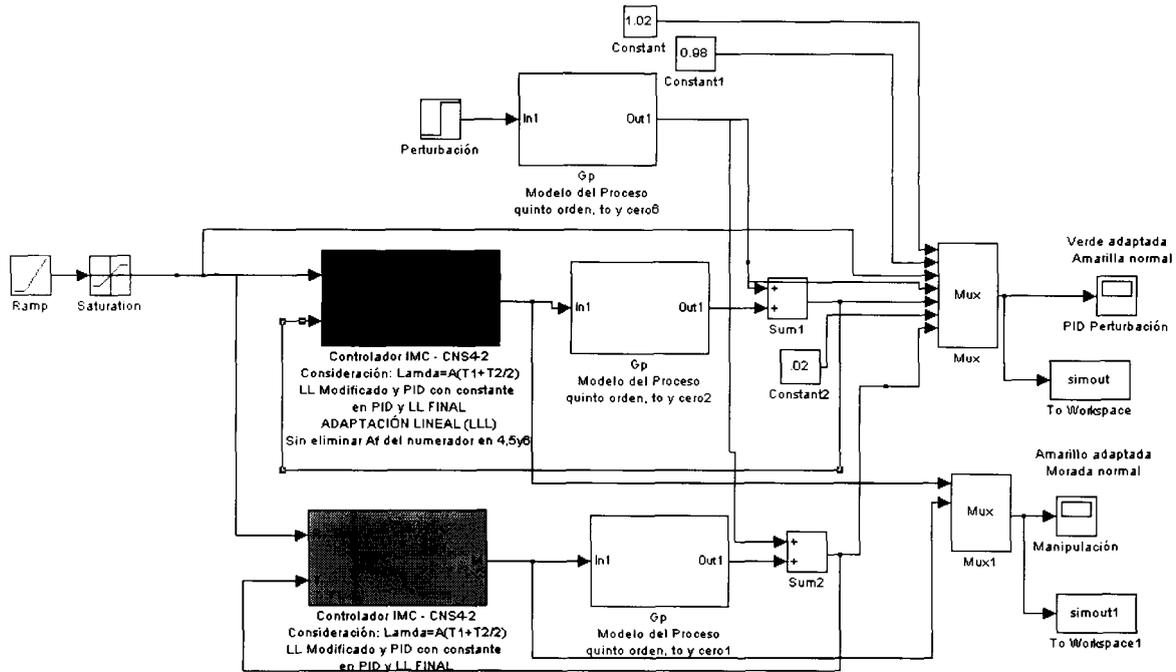


Figura A.3 Esquema en Simulink del lazo cerrado para simular el controlador de parámetros adaptables

APÉNDICE B. Gráficas de las pruebas en simulación

En este apéndice se muestran las gráficas de la respuesta del controlador propuesto ante los veinte diferentes procesos de diferentes órdenes (segundo, tercer, cuarto y quinto) con variaciones paramétricas de la planta nominal.

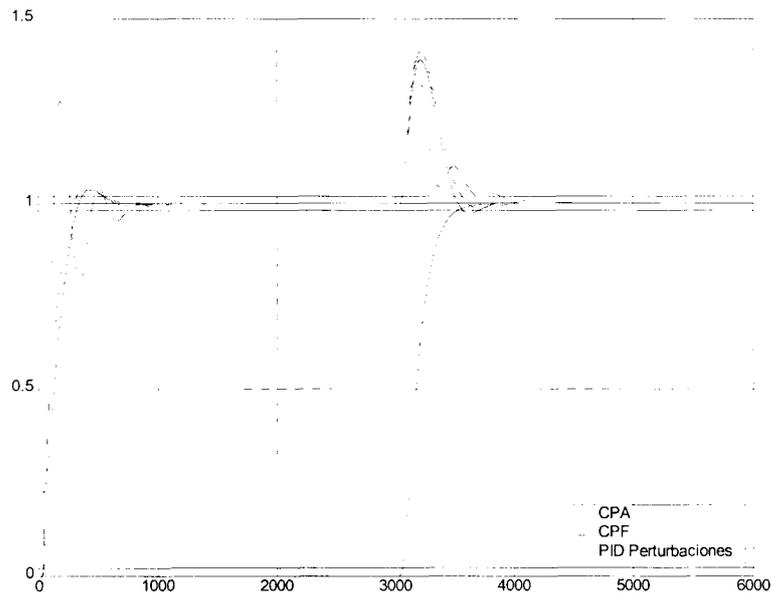


Figura B.1 Respuesta del proceso 1 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

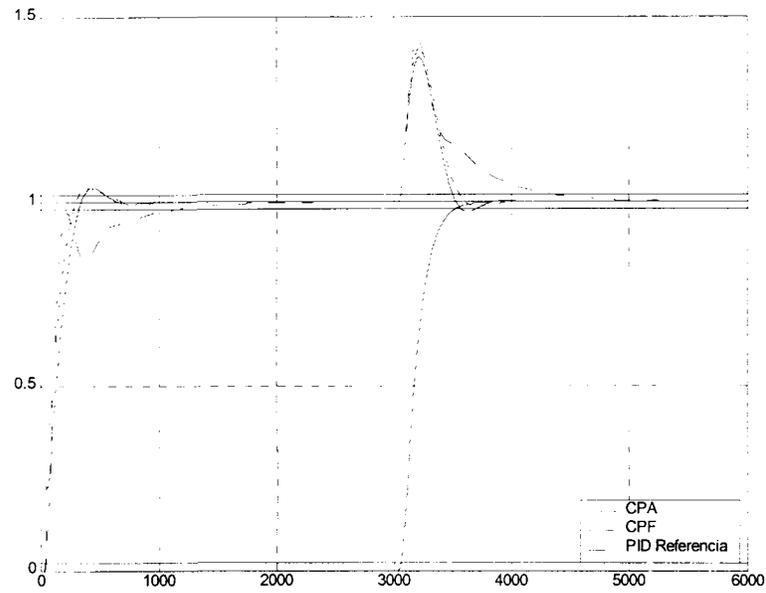


Figura B.2 Respuesta del proceso 1 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

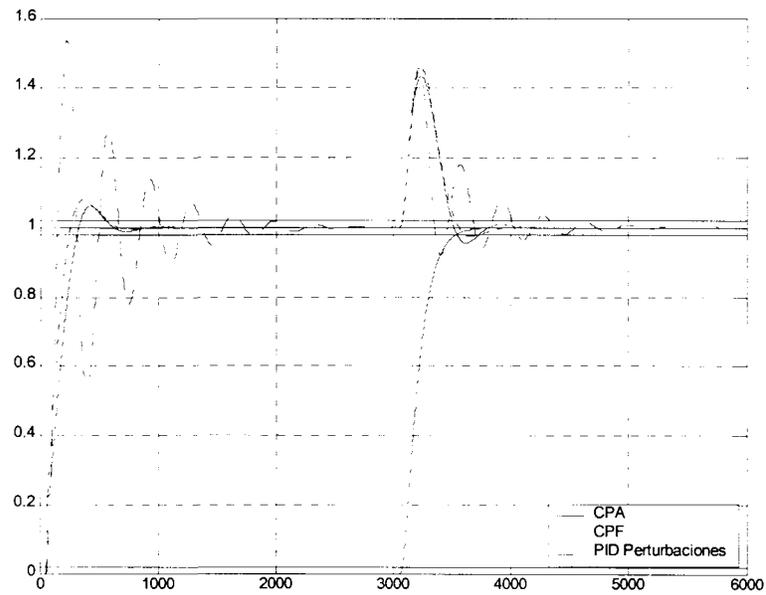


Figura B.3 Respuesta del proceso 1 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50%

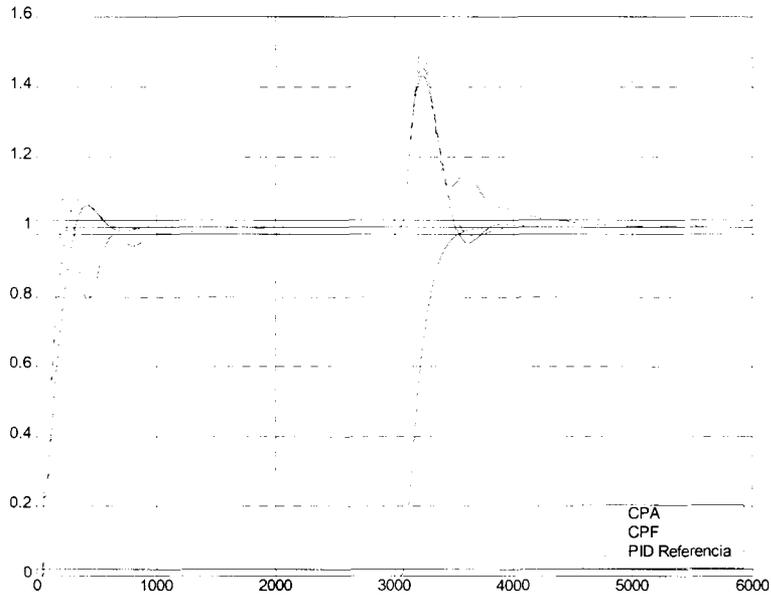


Figura B.4 Respuesta del proceso 1 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50%

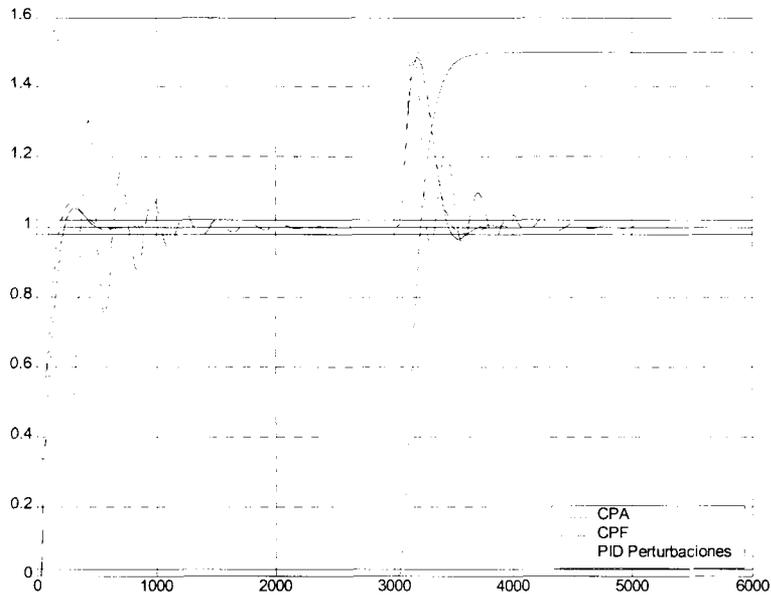


Figura B.5 Respuesta del proceso 1 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

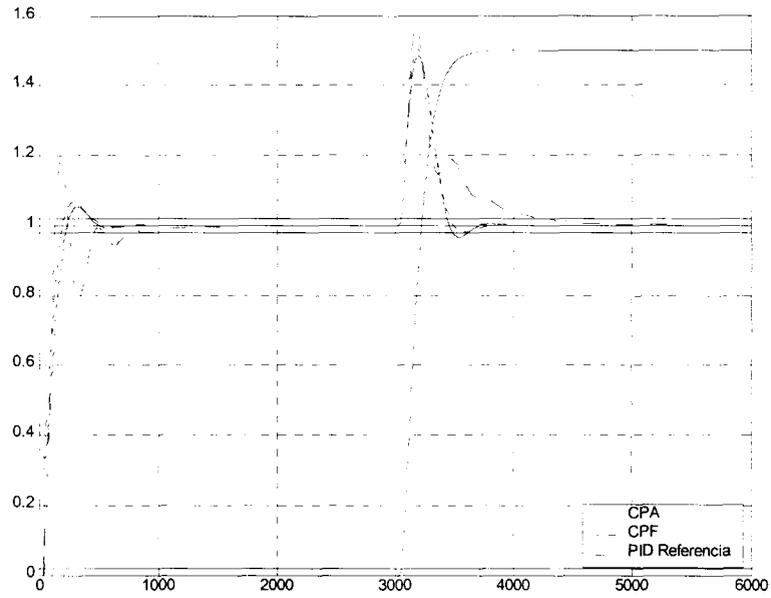


Figura B.6 Respuesta del proceso 1 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

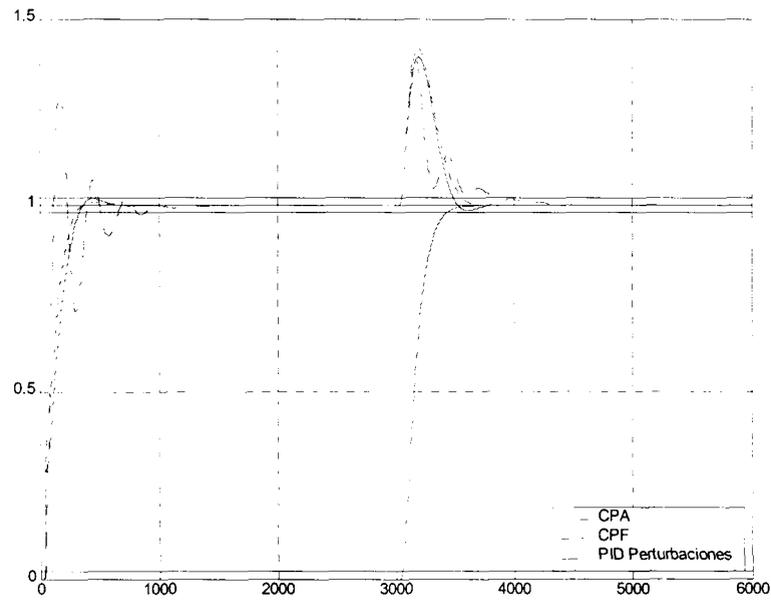


Figura B.7 Respuesta del proceso 1 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{\text{lider}} - 25\%$

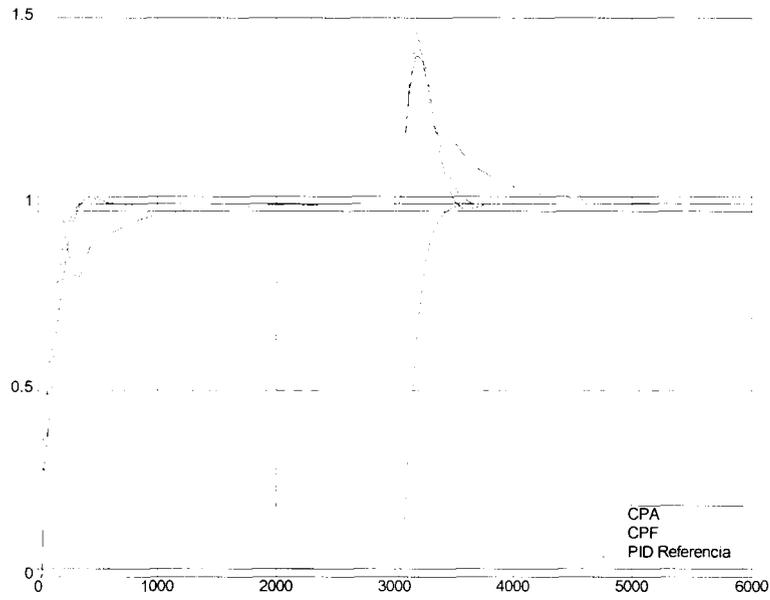


Figura B.8 Respuesta del proceso 1 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{\text{líder}} - 25\%$

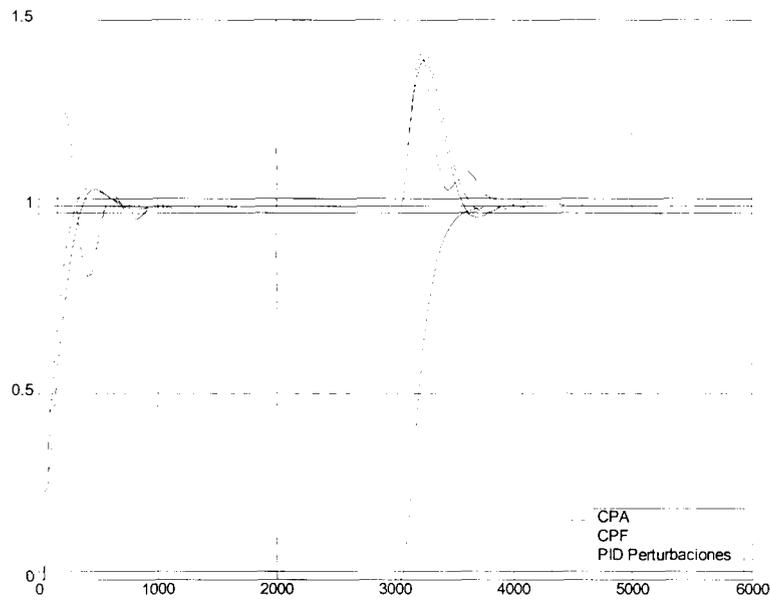


Figura B.9 Respuesta del proceso 2 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

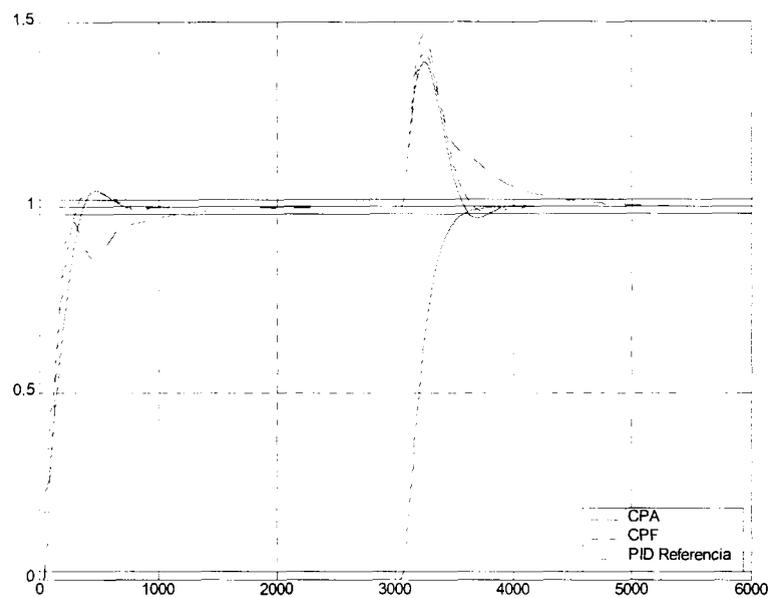


Figura B.10 Respuesta del proceso 2 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

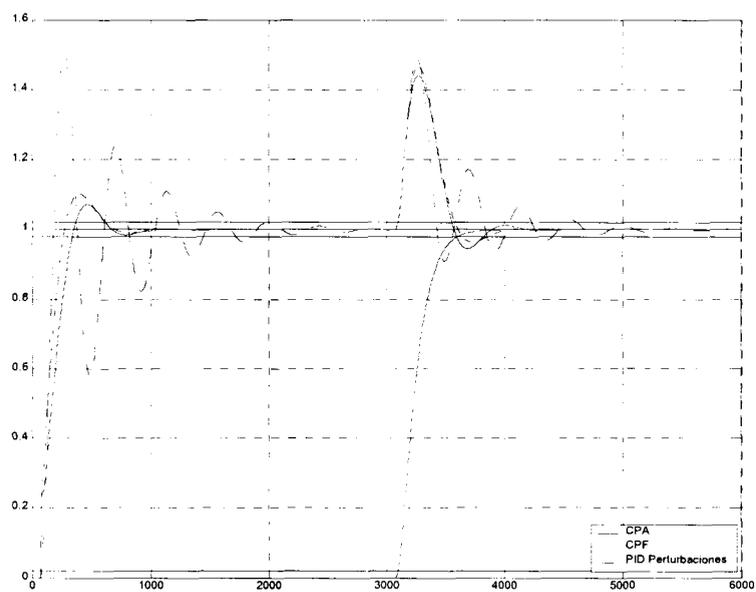


Figura B.11 Respuesta del proceso 2 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50%

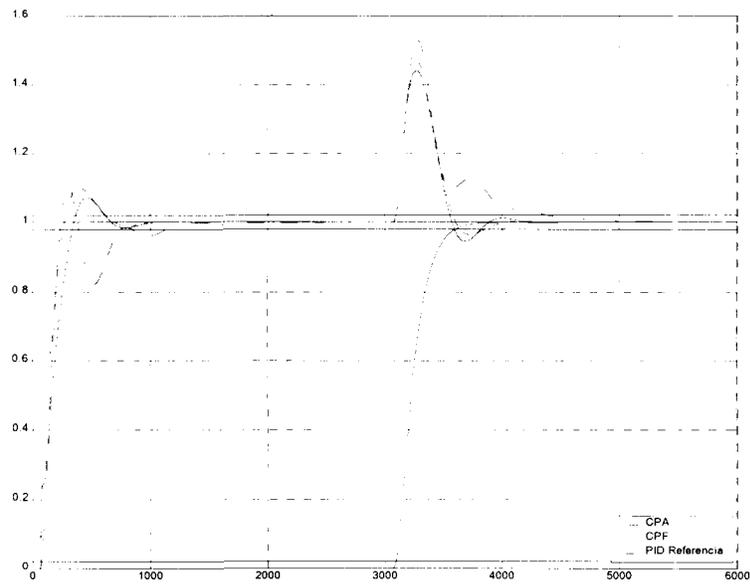


Figura B.12 Respuesta del proceso 2 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50%

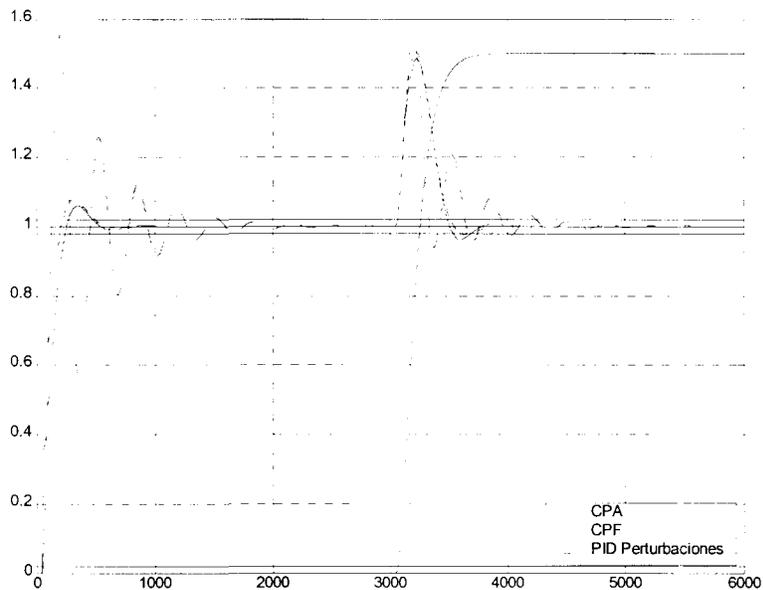


Figura B.13 Respuesta del proceso 2 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

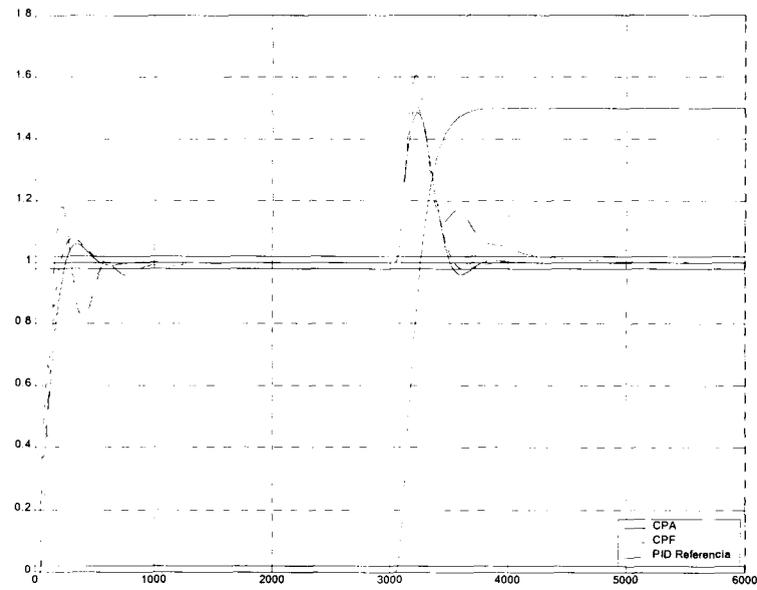


Figura B.14 Respuesta del proceso 2 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

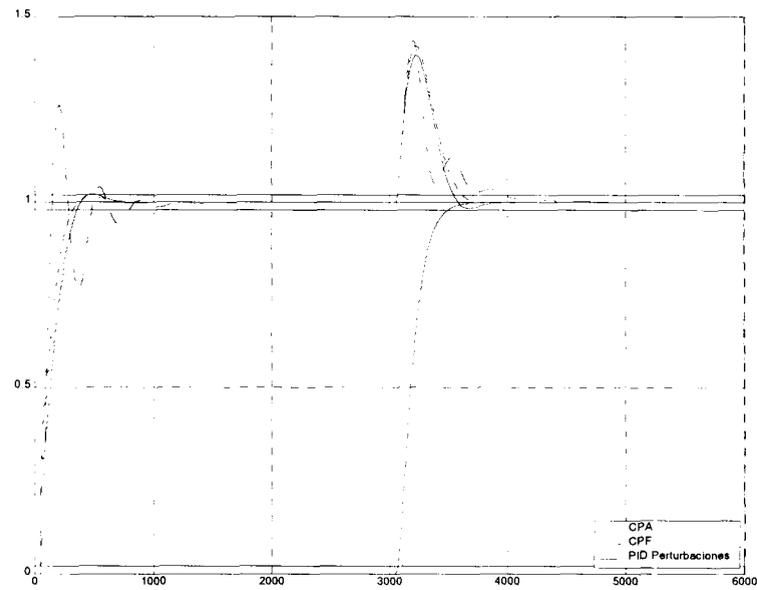


Figura B.15 Respuesta del proceso 2 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{\text{lider}} - 25\%$

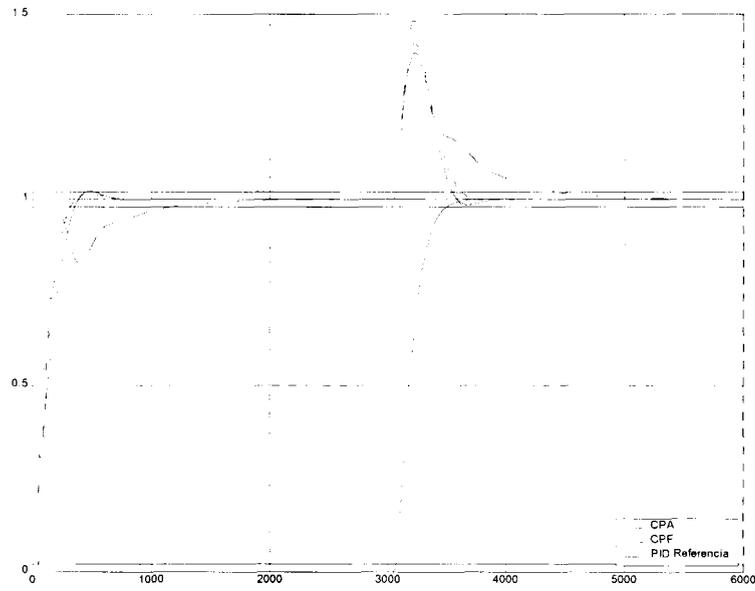


Figura B.16 Respuesta del proceso 2 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{\text{líder}} - 25\%$

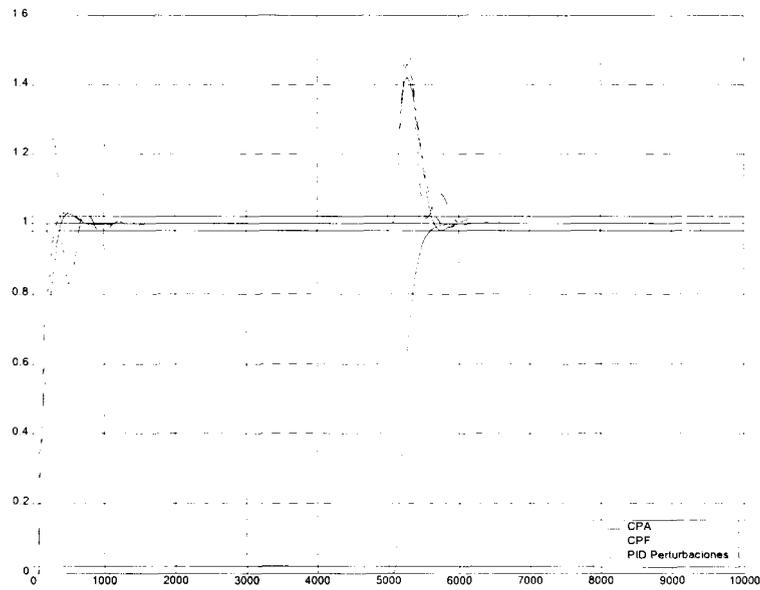


Figura B.17 Respuesta del proceso 3 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

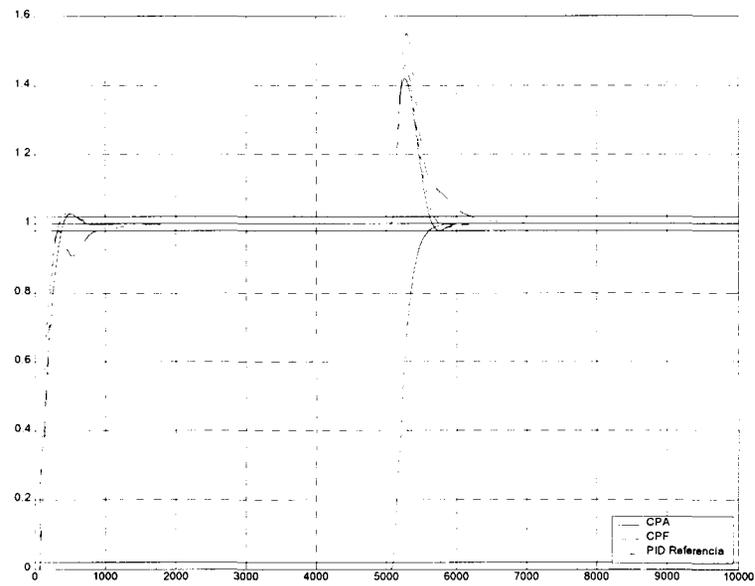


Figura B.18 Respuesta del proceso 3 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

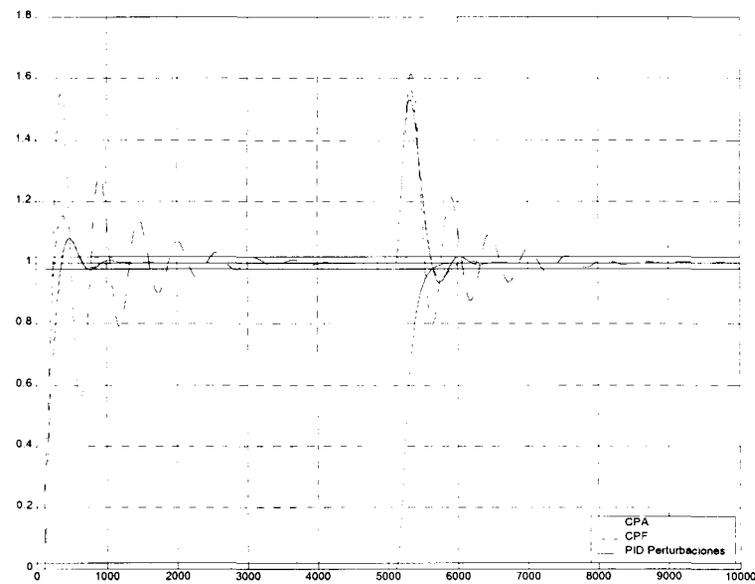


Figura B.19 Respuesta del proceso 3 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50%

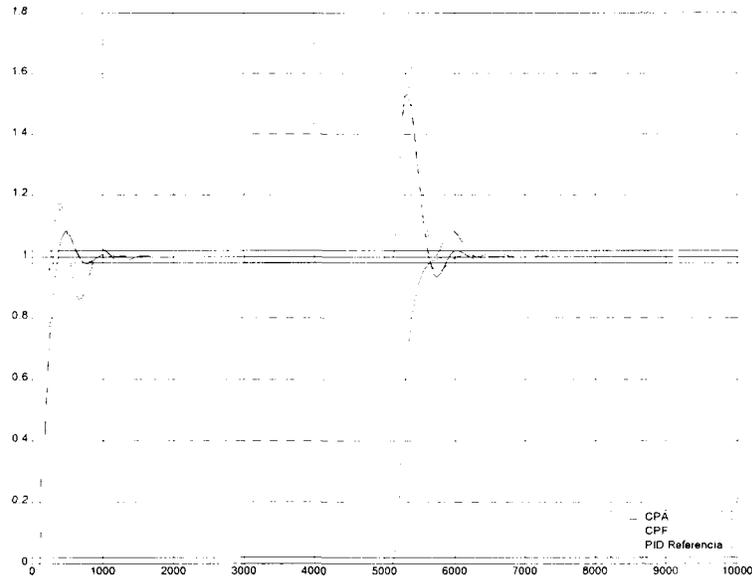


Figura B.20 Respuesta del proceso 3 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50%

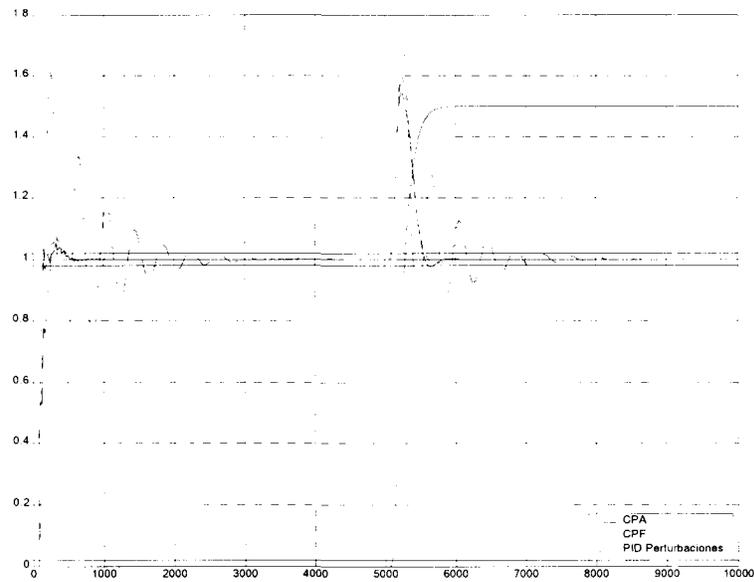


Figura B.21 Respuesta del proceso 3 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

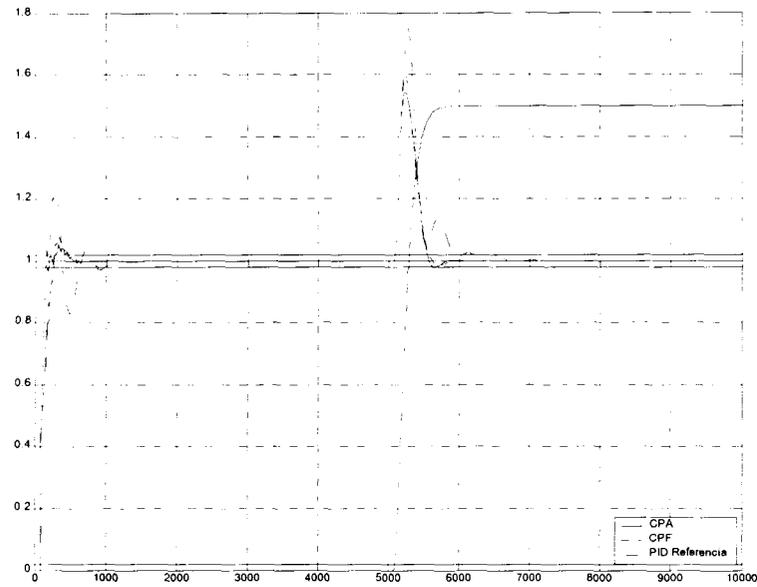


Figura B.22 Respuesta del proceso 3 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

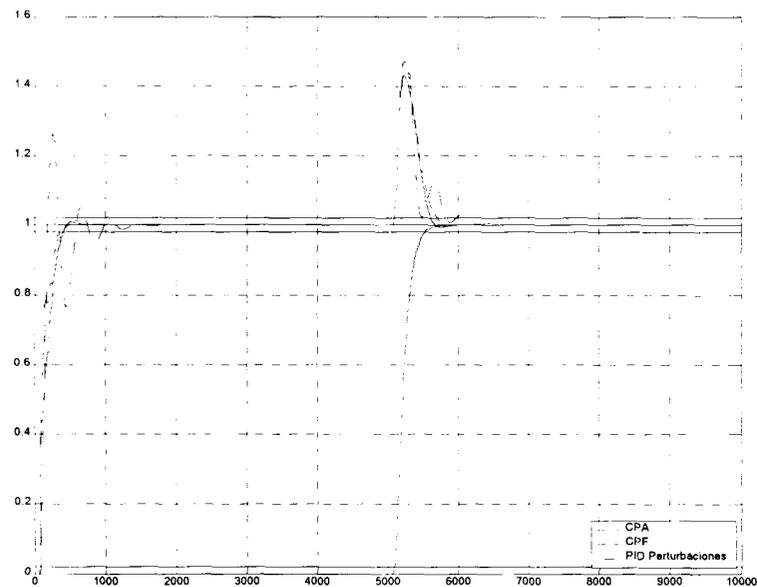


Figura B.23 Respuesta del proceso 3 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{lider} - 25\%$

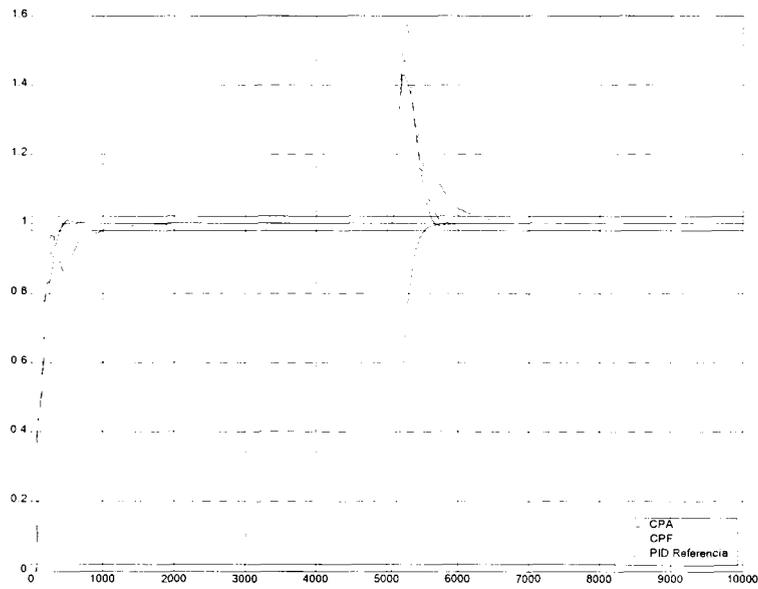


Figura B.24 Respuesta del proceso 3 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{lider} - 25\%$

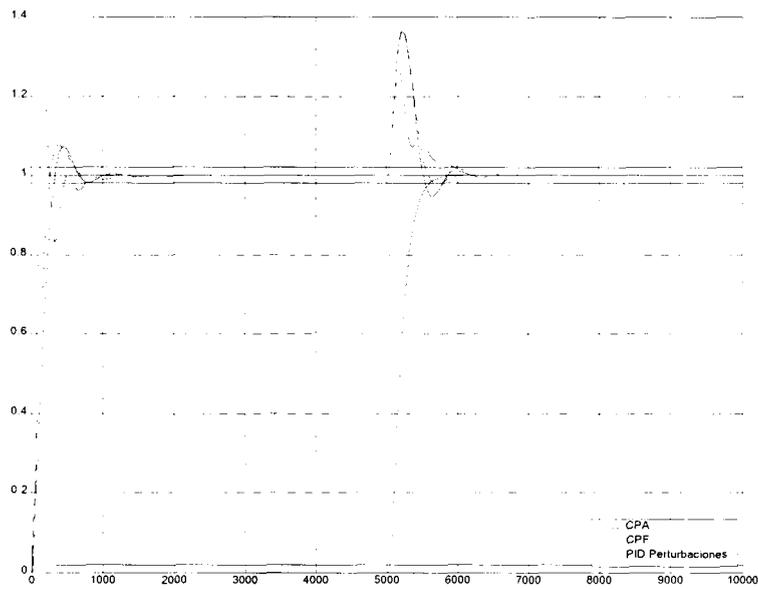


Figura B.25 Respuesta del proceso 4 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

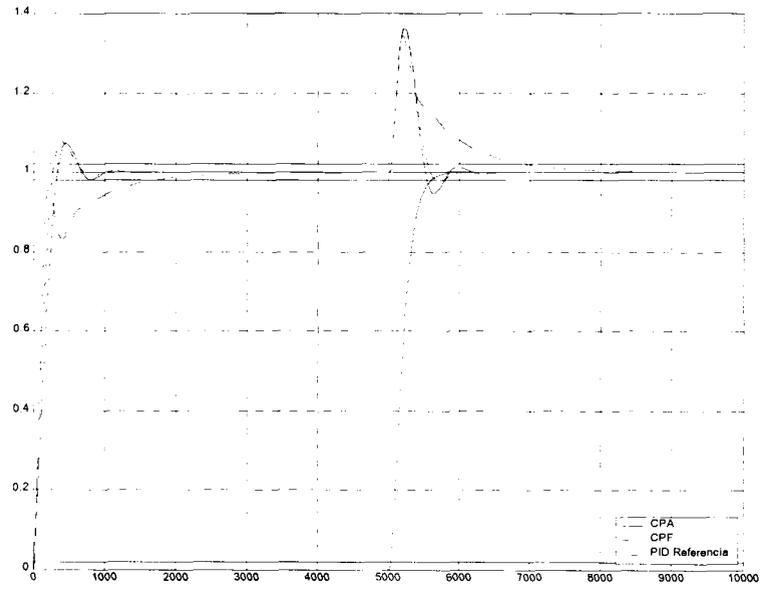


Figura B.26 Respuesta del proceso 4 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

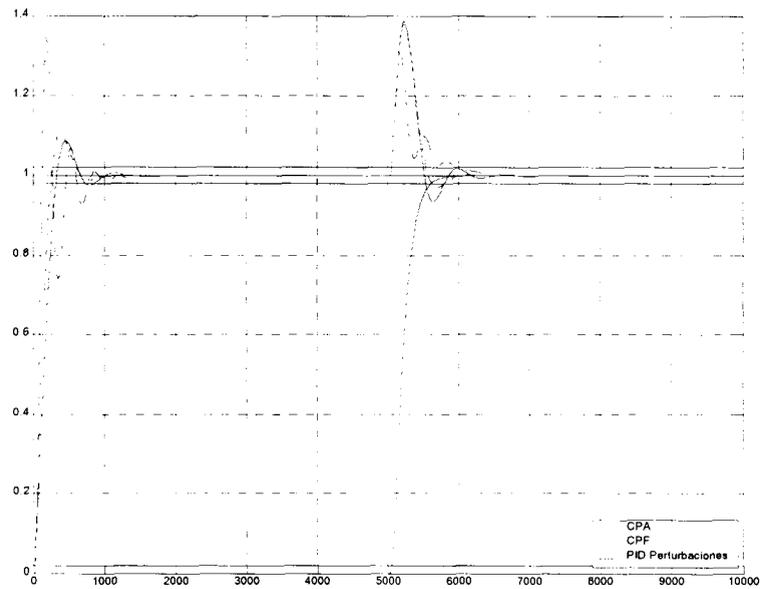


Figura B.27 Respuesta del proceso 4 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50%

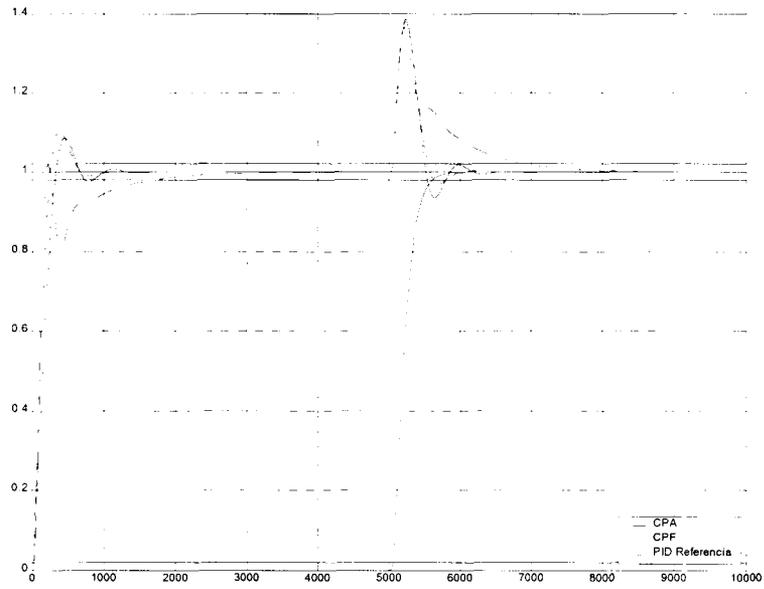


Figura B.28 Respuesta del proceso 4 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50%

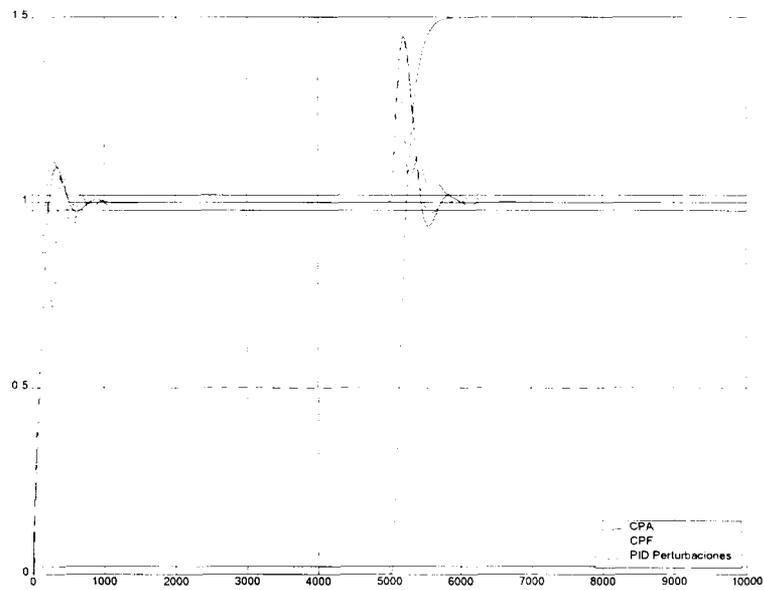


Figura B.29 Respuesta del proceso 4 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

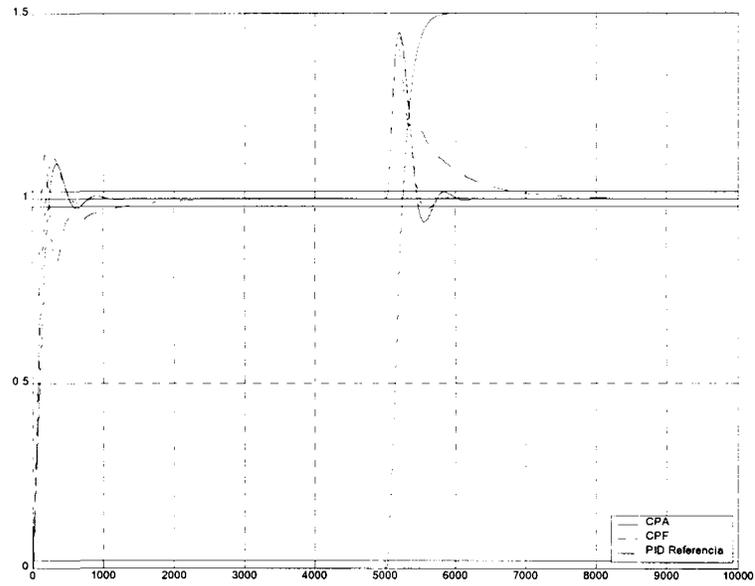


Figura B.30 Respuesta del proceso 4 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

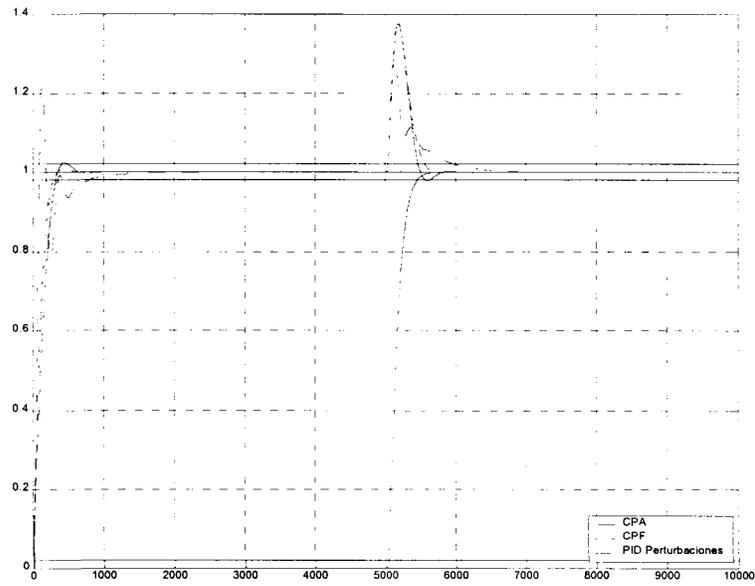


Figura B.31 Respuesta del proceso 4 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{lider} - 25\%$

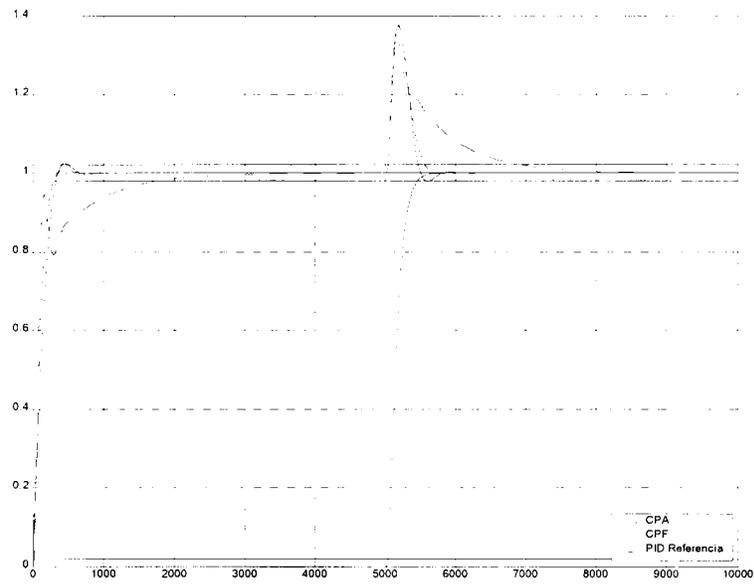


Figura B.32 Respuesta del proceso 4 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{líder} - 25\%$

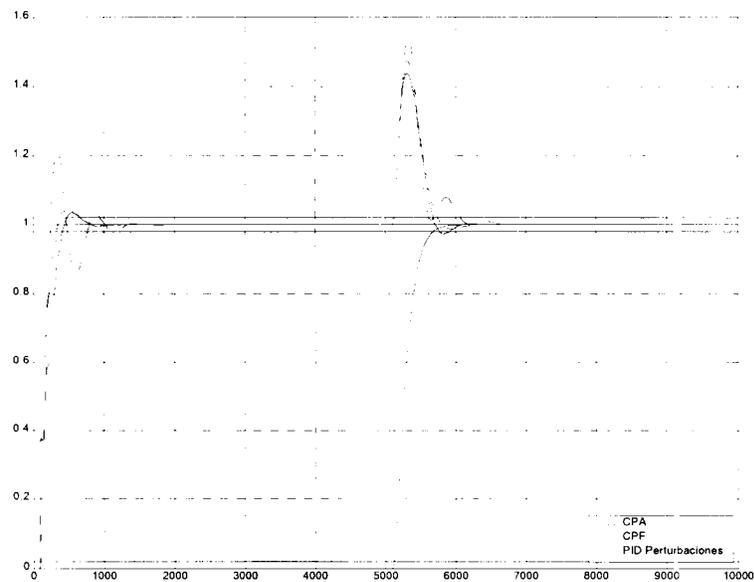


Figura B.33 Respuesta del proceso 5 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

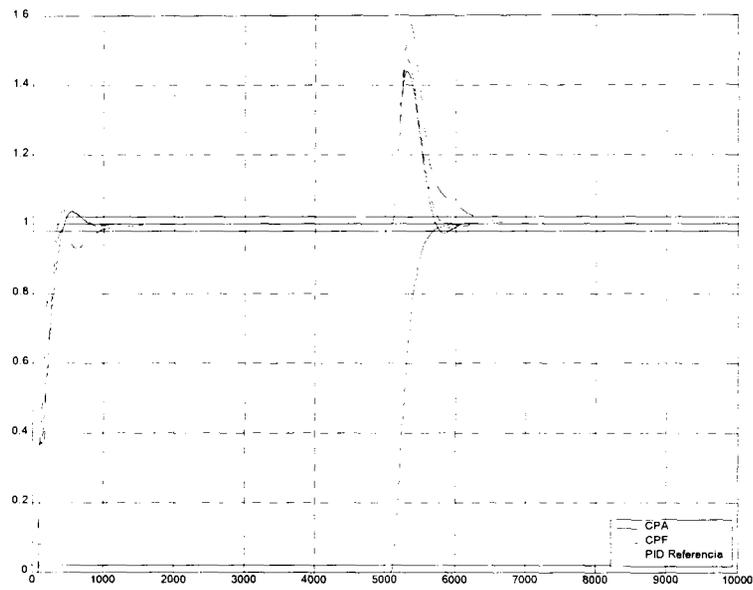


Figura B.34 Respuesta del proceso 5 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

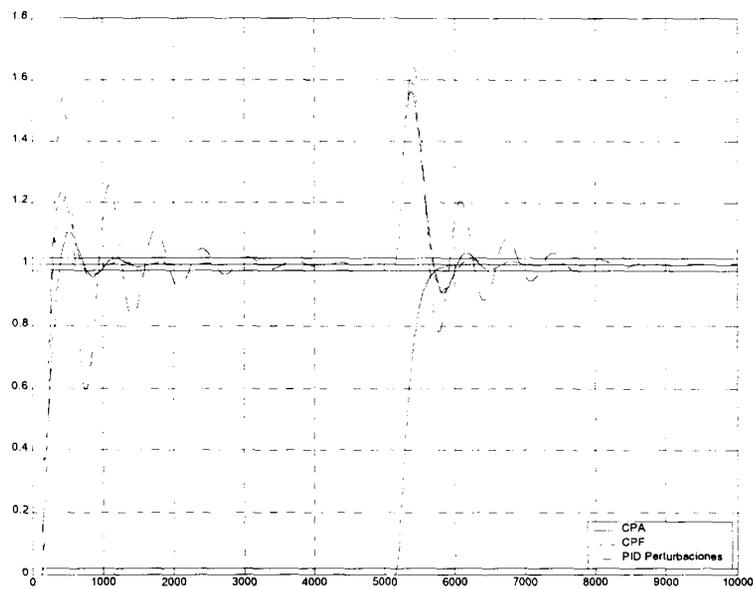


Figura B.35 Respuesta del proceso 5 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50%

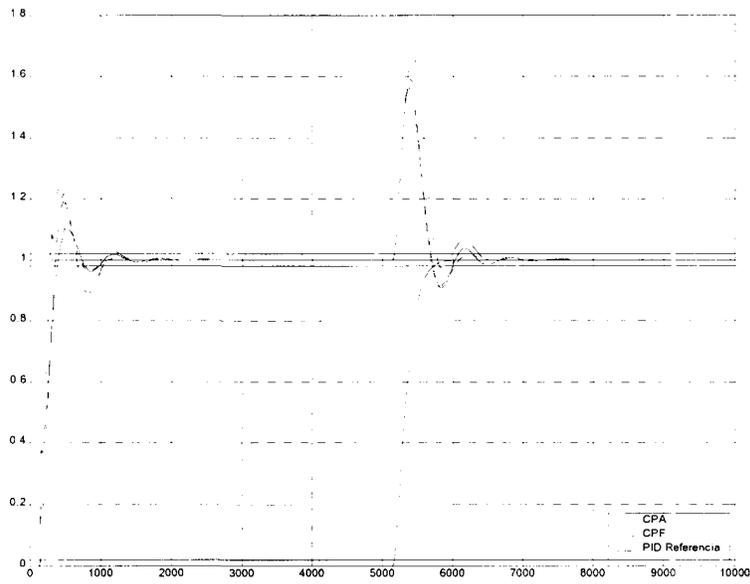


Figura B.36 Respuesta del proceso 5 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50%

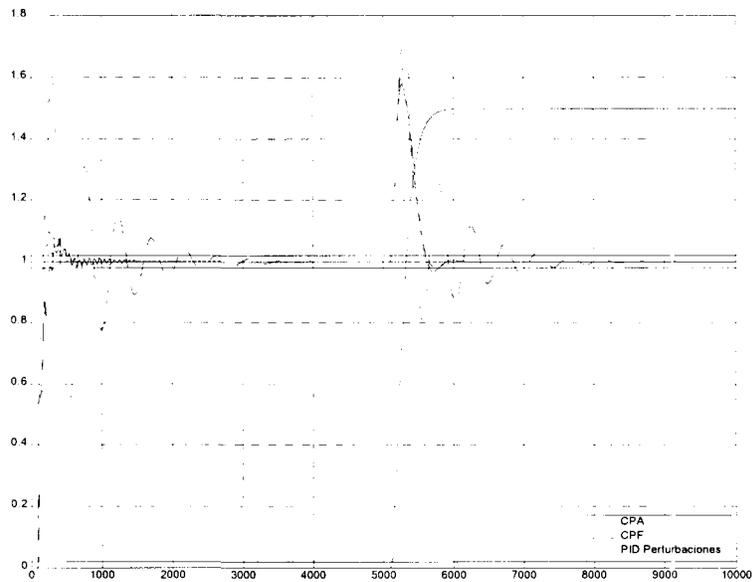


Figura B.37 Respuesta del proceso 5 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

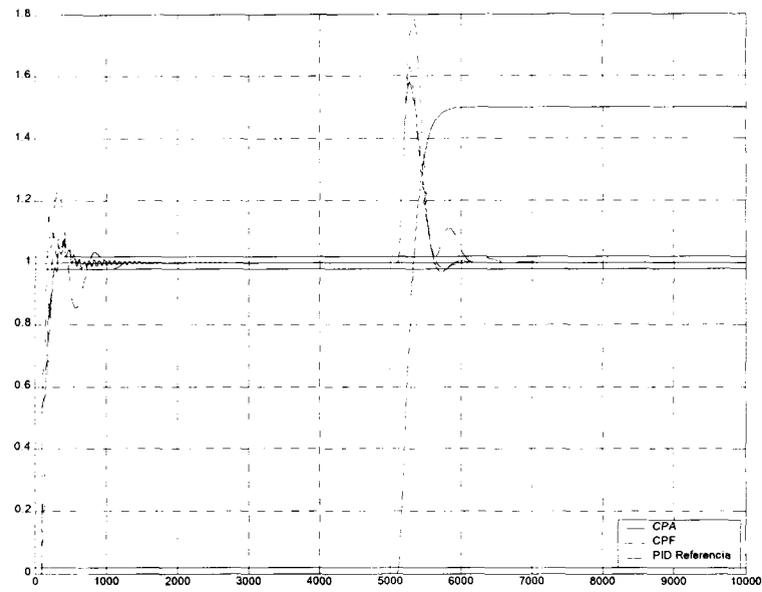


Figura B.38 Respuesta del proceso 5 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

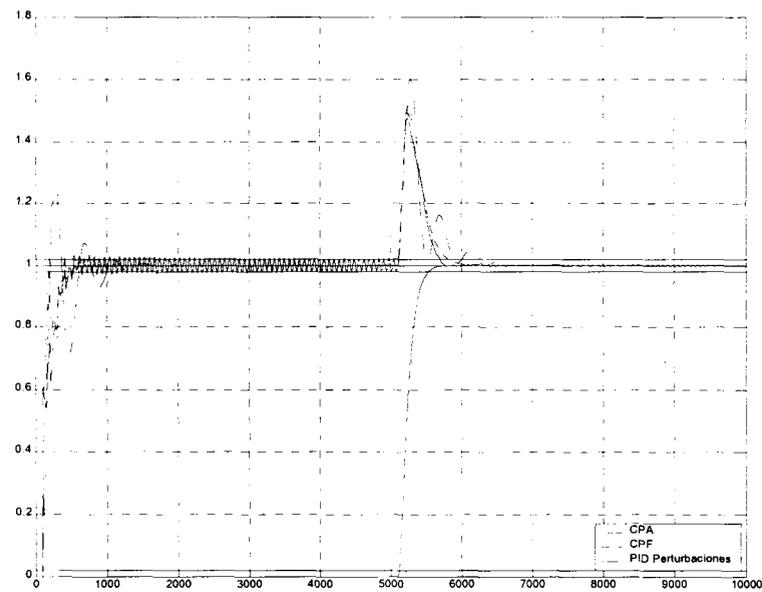


Figura B.39 Respuesta del proceso 5 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{líder} - 25\%$

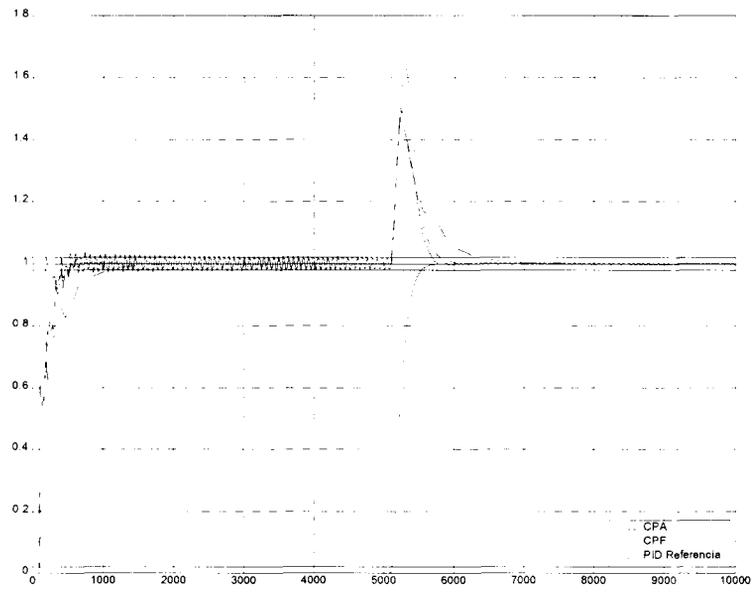


Figura B.40 Respuesta del proceso 5 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{\text{líder}} - 25\%$

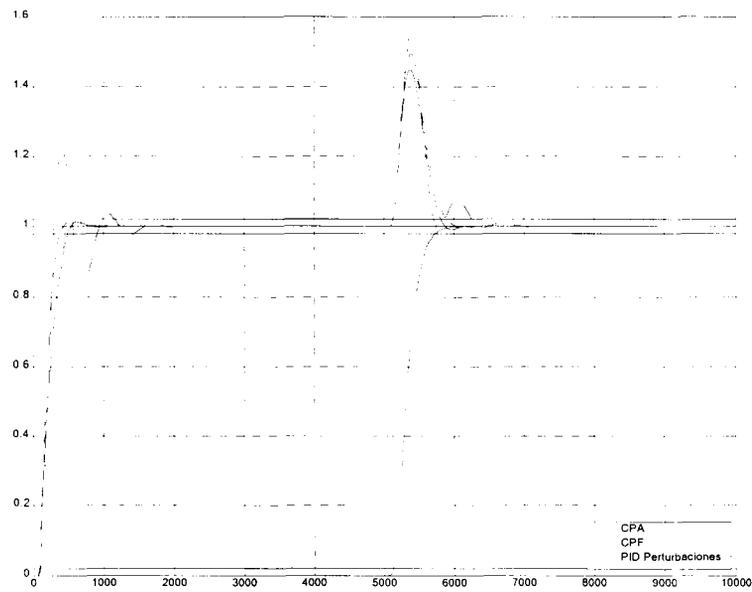


Figura B.41 Respuesta del proceso 6 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

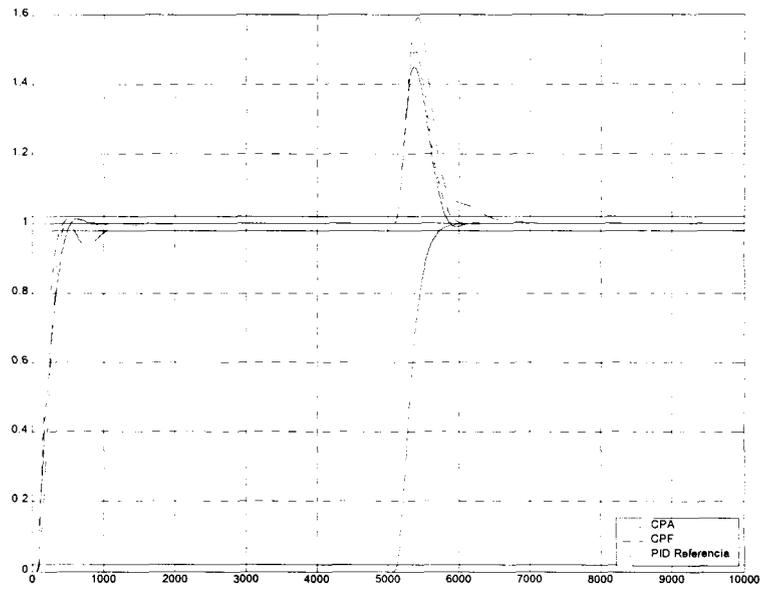


Figura B.42 Respuesta del proceso 6 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

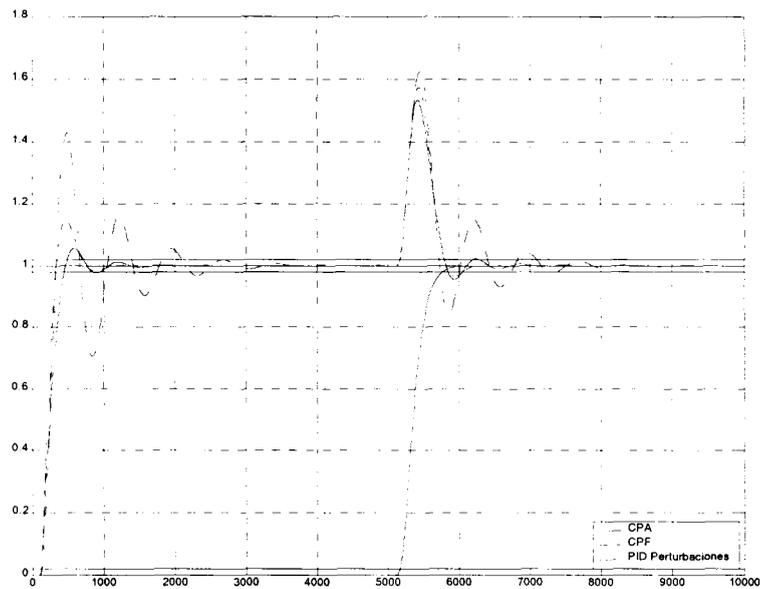


Figura B.43 Respuesta del proceso 6 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50%

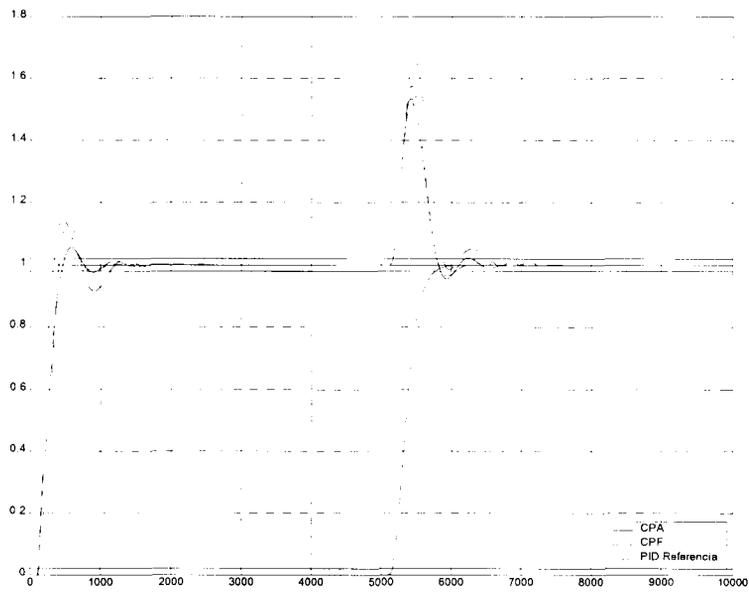


Figura B.44 Respuesta del proceso 6 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50%

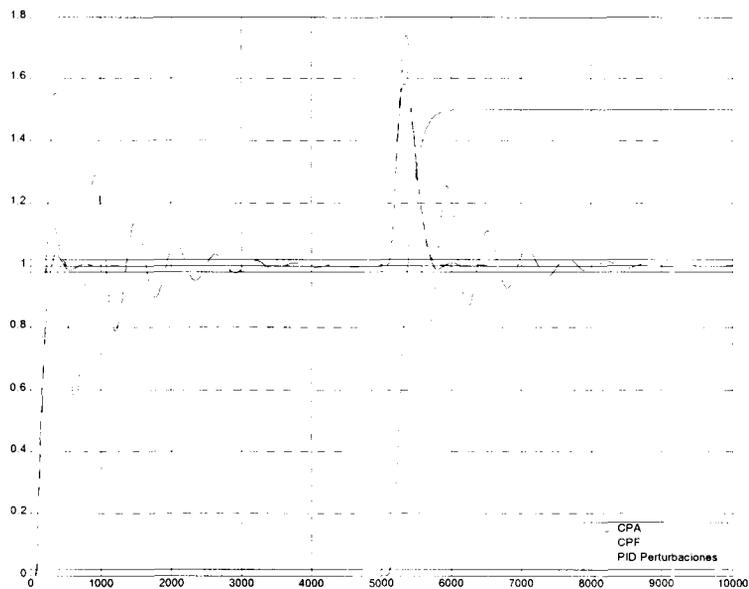


Figura B.45 Respuesta del proceso 6 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

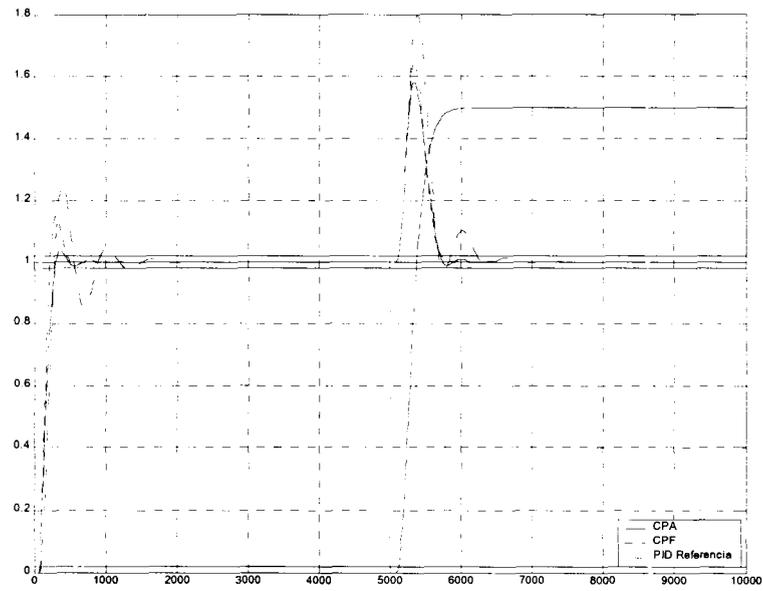


Figura B.46 Respuesta del proceso 6 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

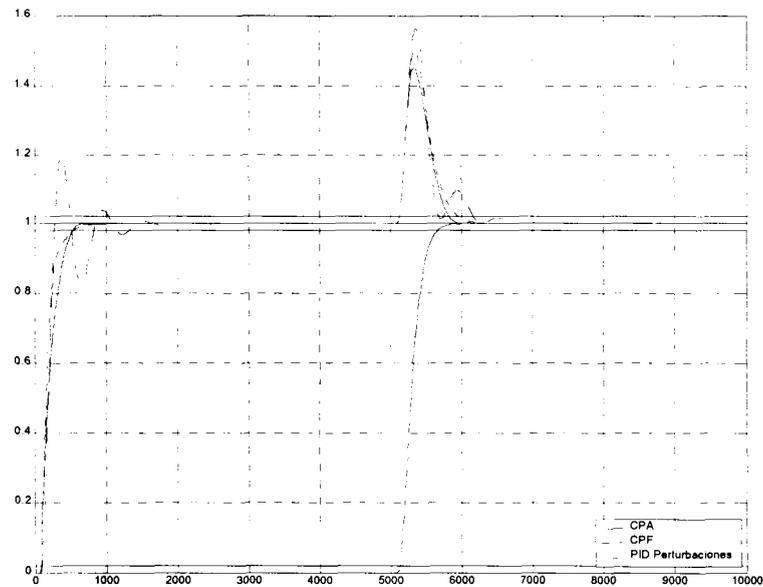


Figura B.47 Respuesta del proceso 6 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{\text{lider}} - 25\%$

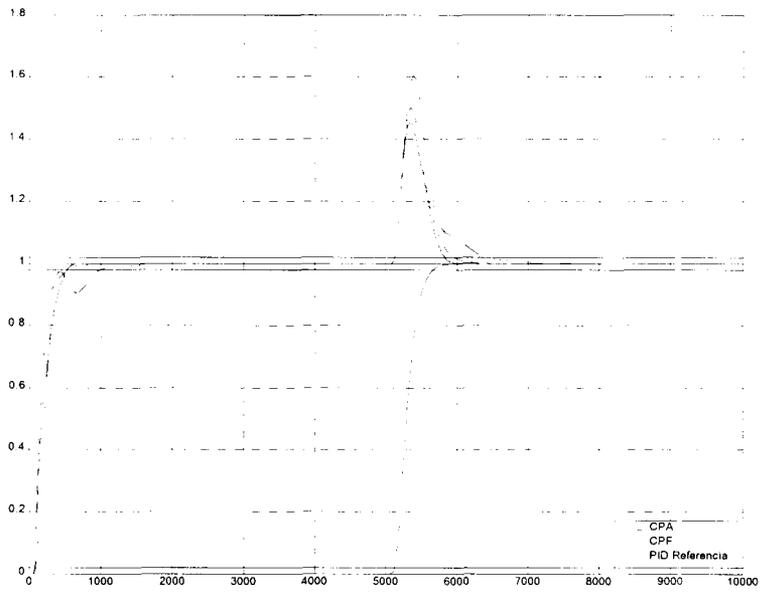


Figura B.48 Respuesta del proceso 6 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{\text{líder}} - 25\%$

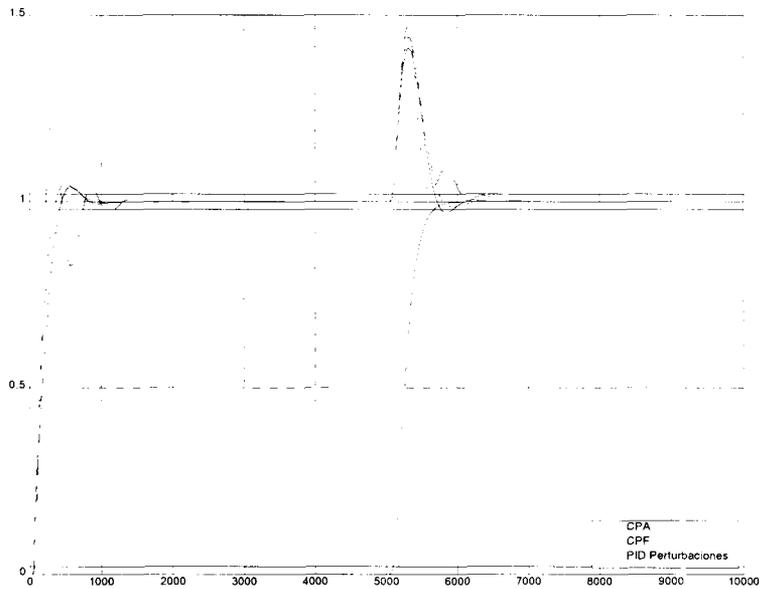


Figura B.49 Respuesta del proceso 7 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

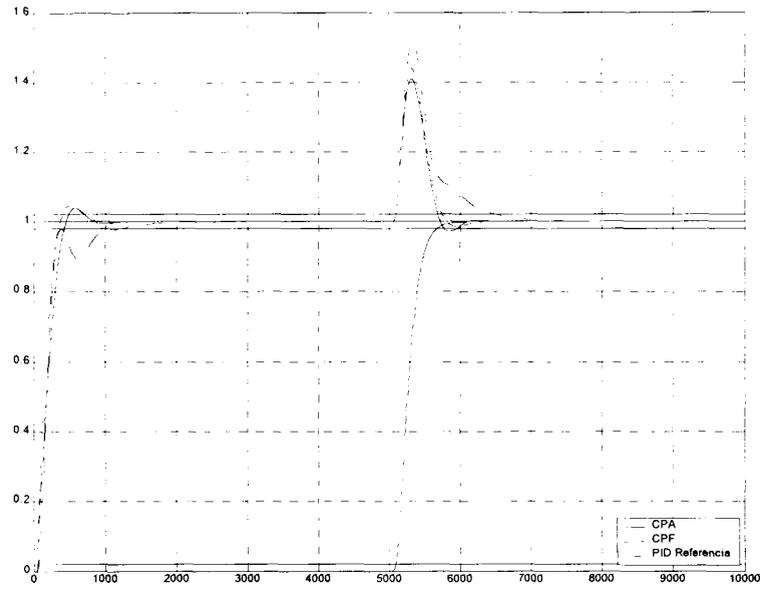


Figura B.50 Respuesta del proceso 7 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

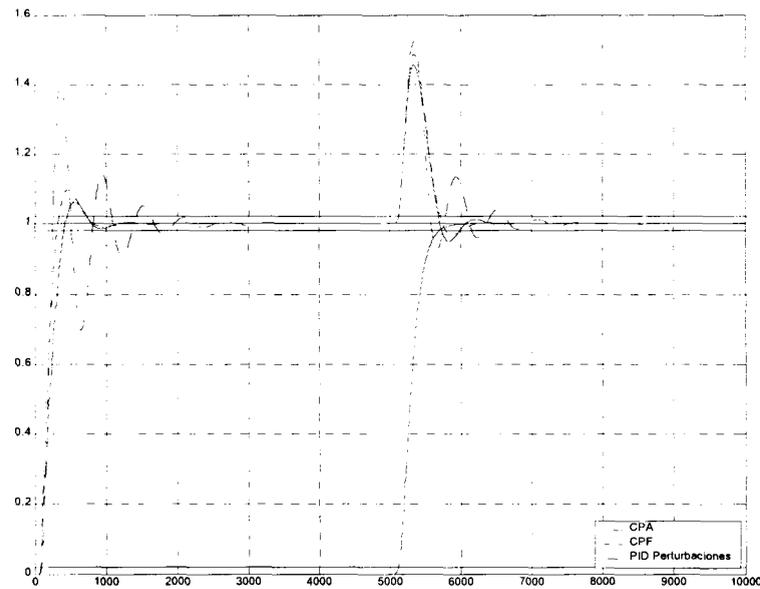


Figura 5.51 Respuesta del proceso 7 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50%

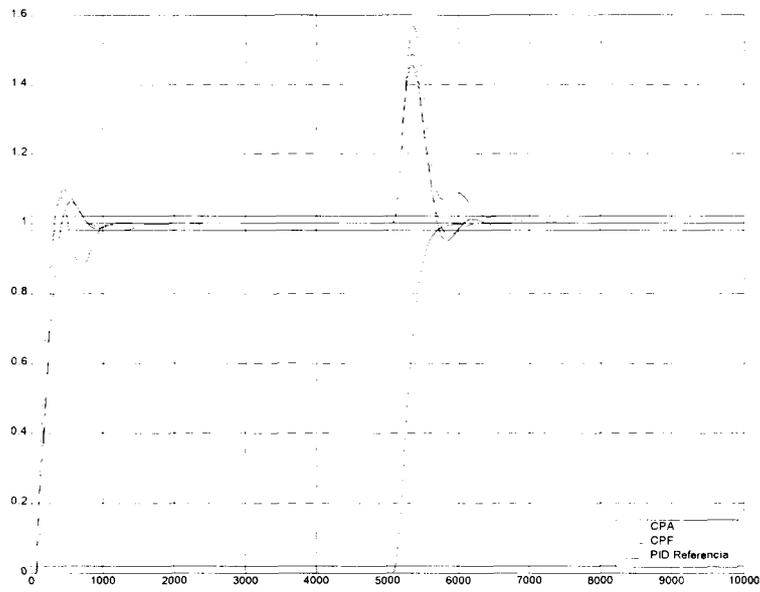


Figura B.52 Respuesta del proceso 7 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50%

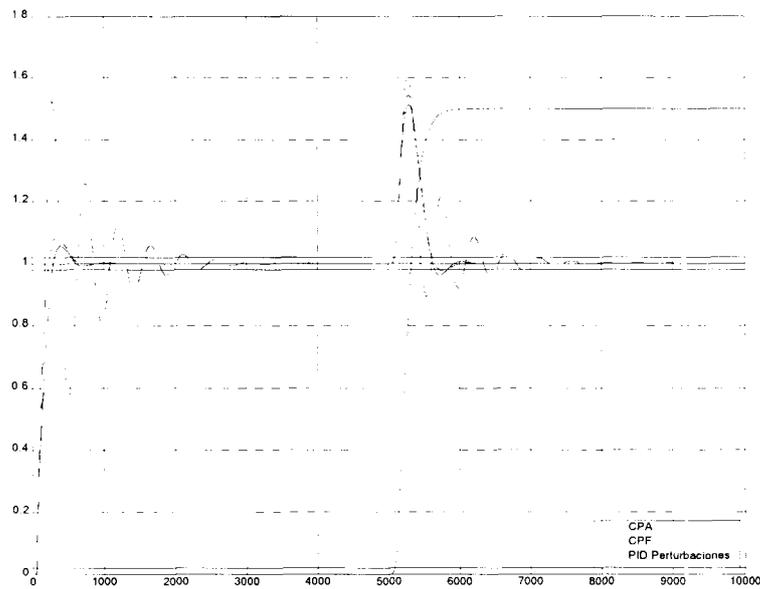


Figura B.53 Respuesta del proceso 7 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

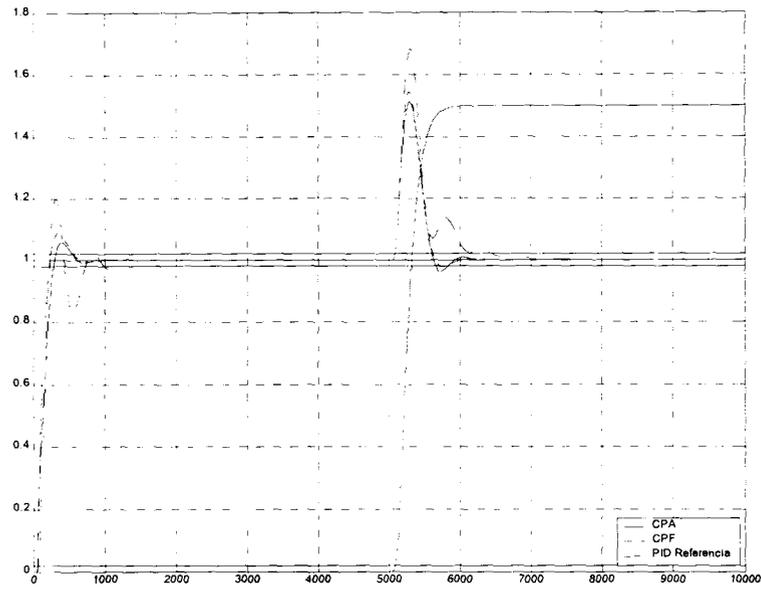


Figura B.54 Respuesta del proceso 7 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

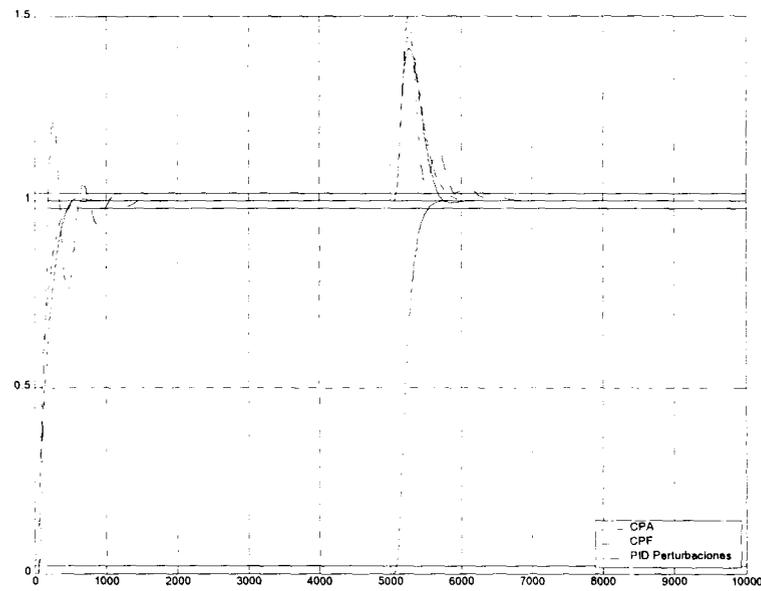


Figura B.55 Respuesta del proceso 7 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{líder} - 25\%$

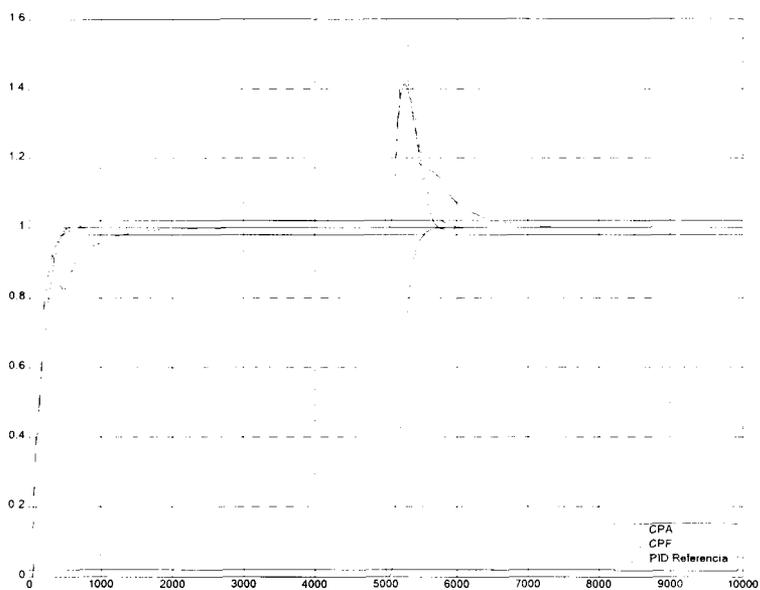


Figura B.56 Respuesta del proceso 7 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{\text{líder}} - 25\%$

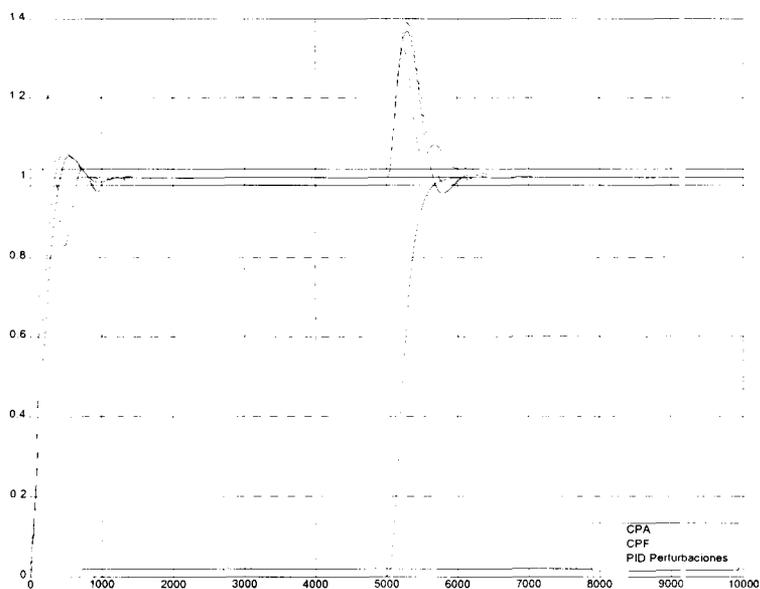


Figura 5.57 Respuesta del proceso 8 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

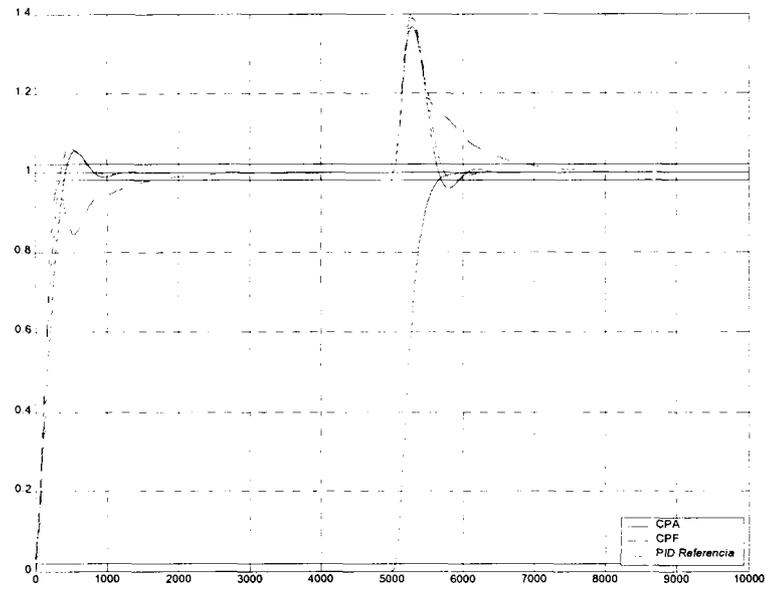


Figura 5.58 Respuesta del proceso 8 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

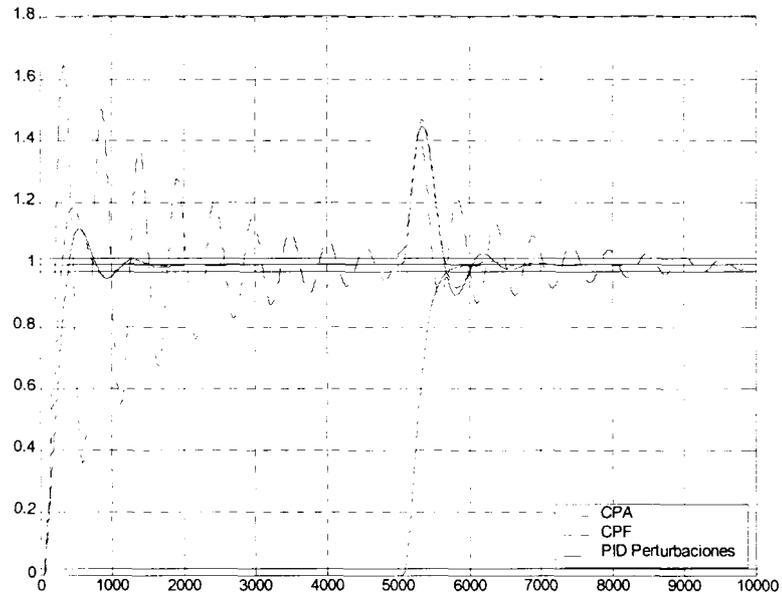


Figura 5.59 Respuesta del proceso 8 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50% de la τ_{lider}

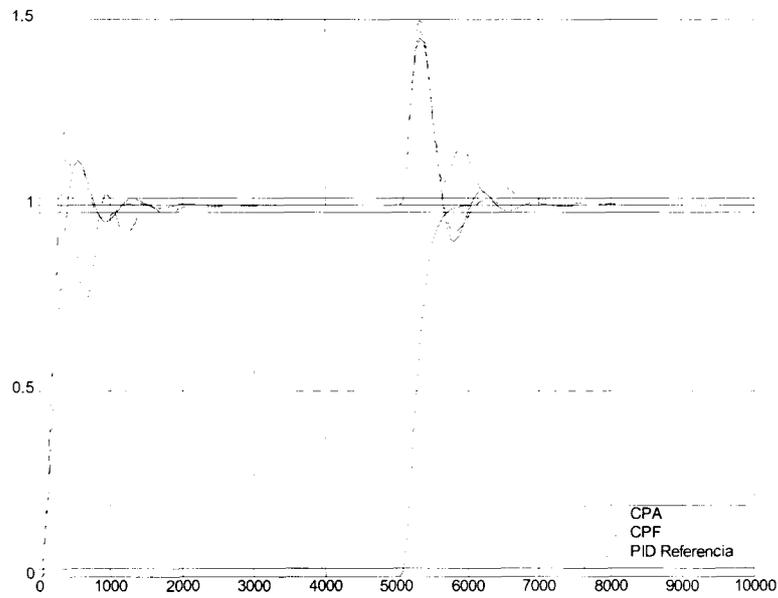


Figura B.60 Respuesta del proceso 8 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50% de la τ_{lider}

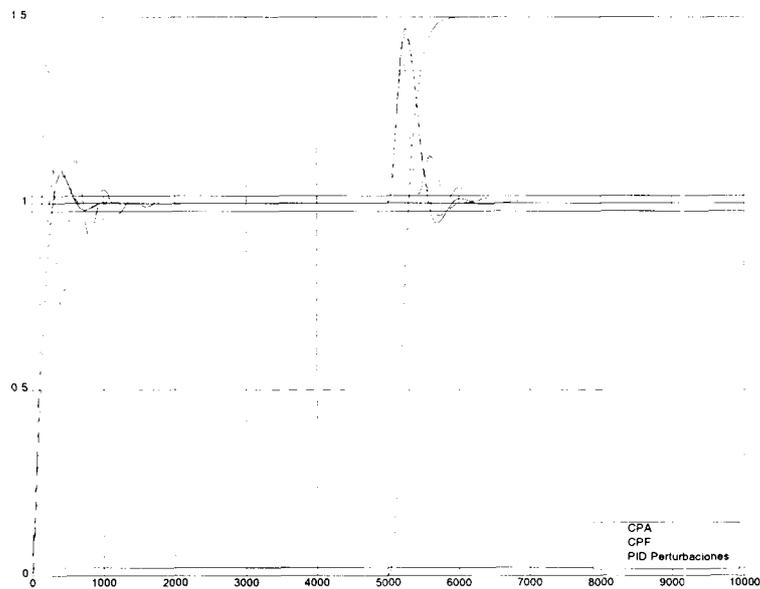


Figura B.61 Respuesta del proceso 8 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

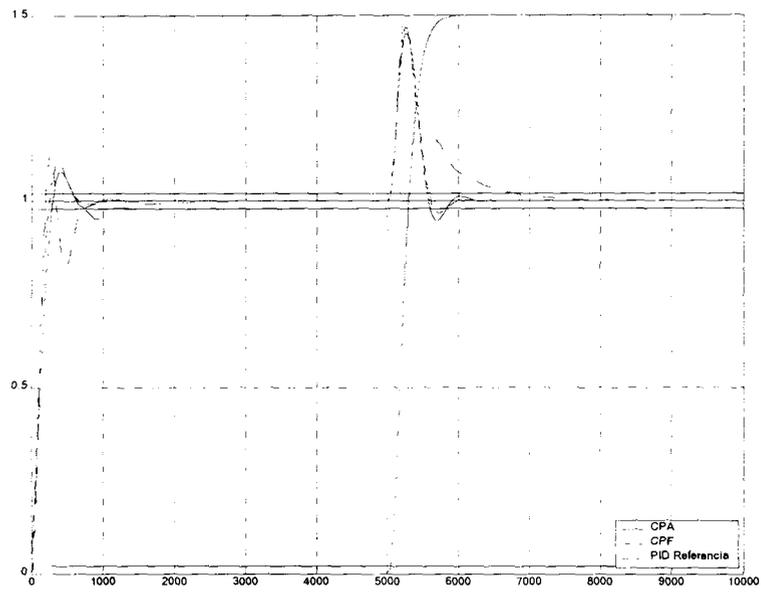


Figura B.62 Respuesta del proceso 8 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

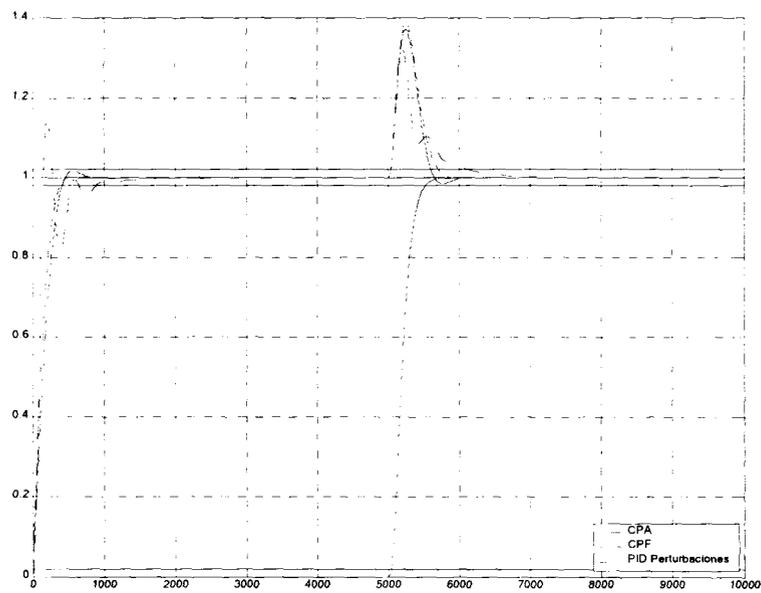


Figura B.63 Respuesta del proceso 8 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{\text{lider}} - 25\%$

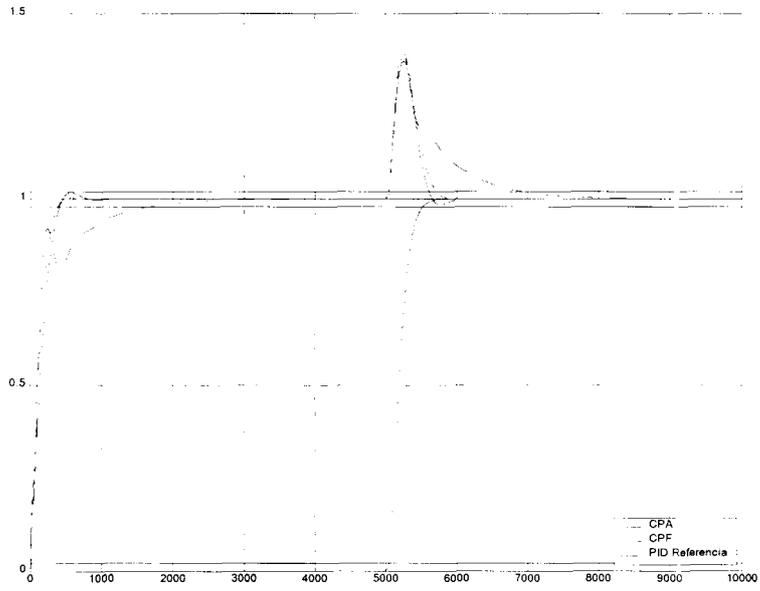


Figura B.64 Respuesta del proceso 8 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{\text{líder}} - 25\%$

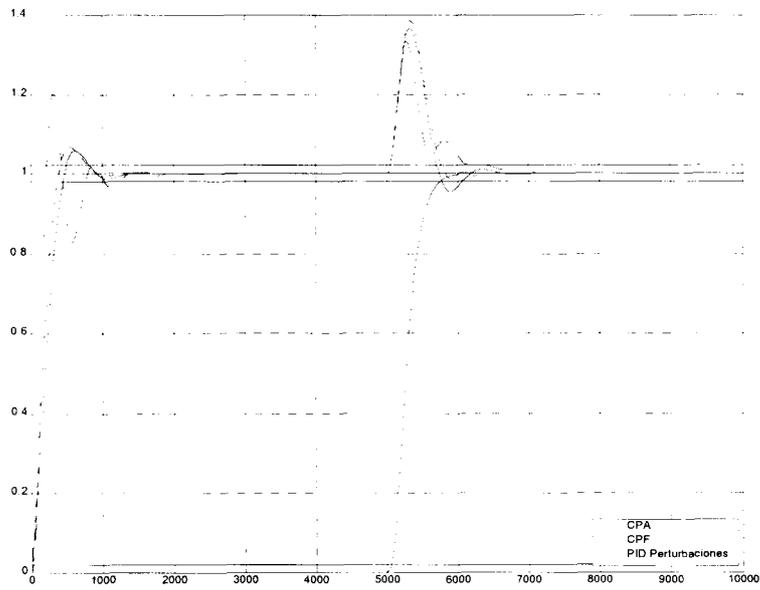


Figura B.65 Respuesta del proceso 9 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

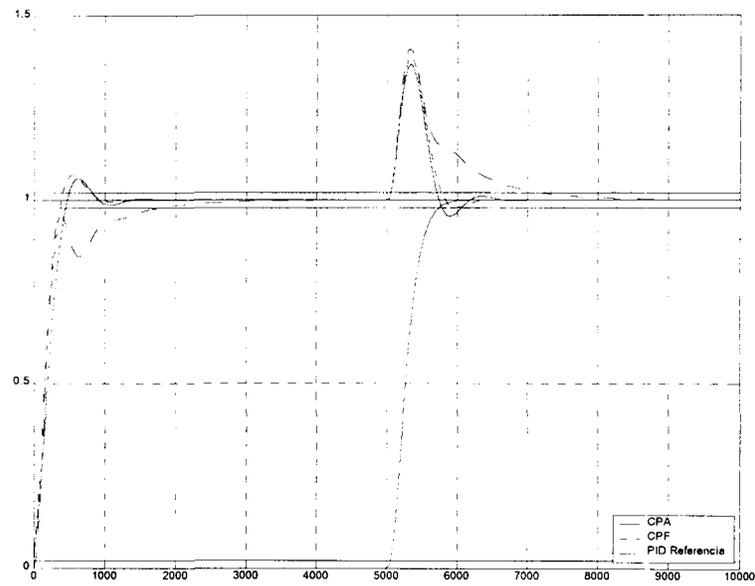


Figura B.66 Respuesta del proceso 9 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

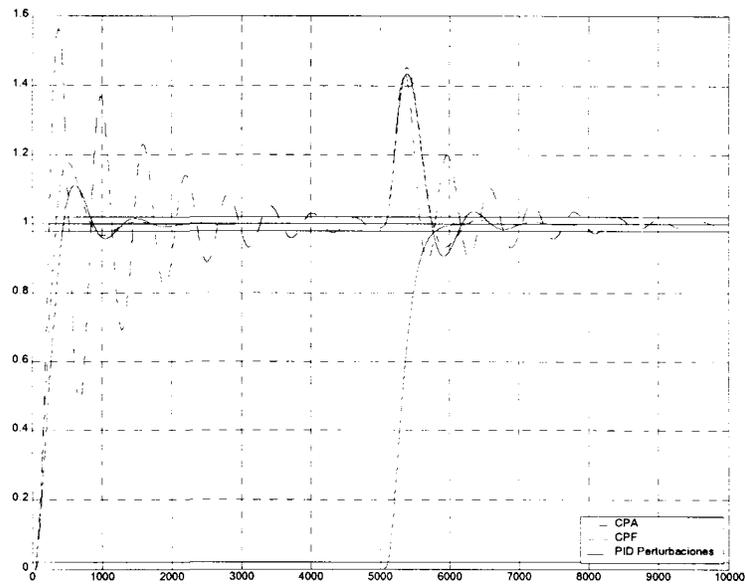


Figura B.67 Respuesta del proceso 9 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50% de la τ_{lider}

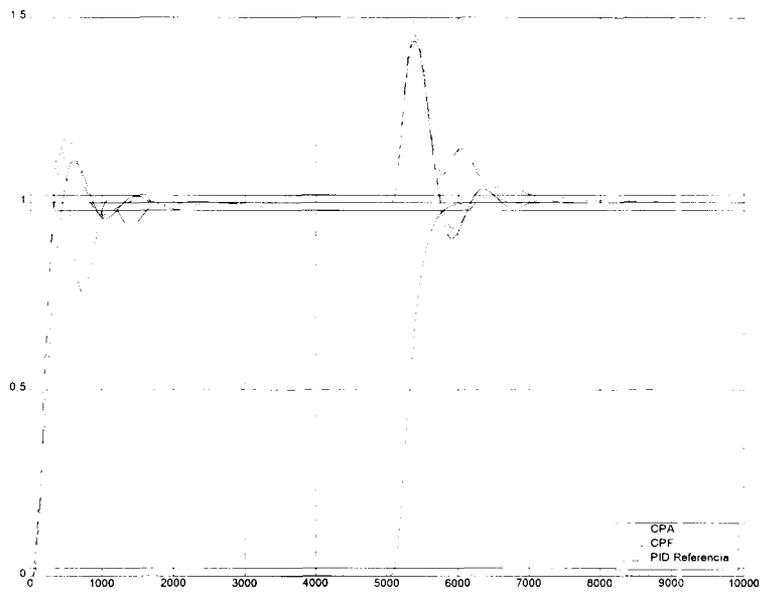


Figura B.68 Respuesta del proceso 9 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50% de la τ_{lider}

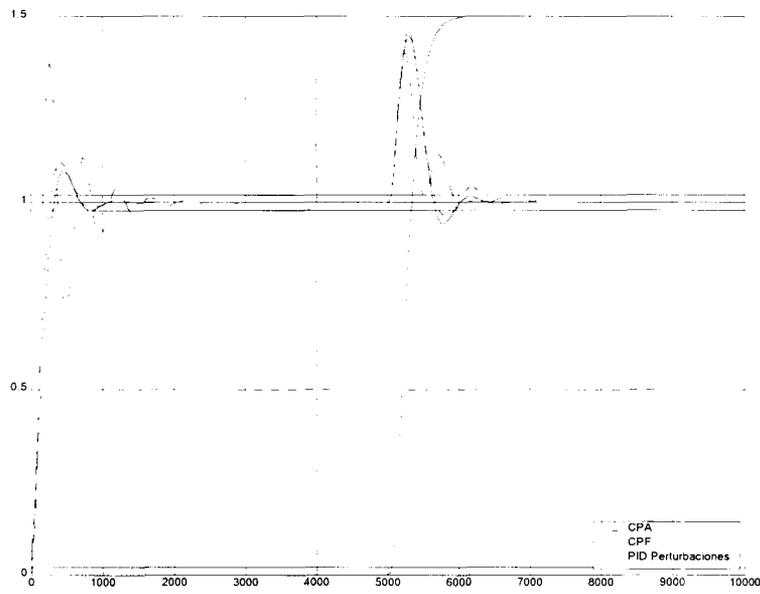


Figura B.69 Respuesta del proceso 9 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

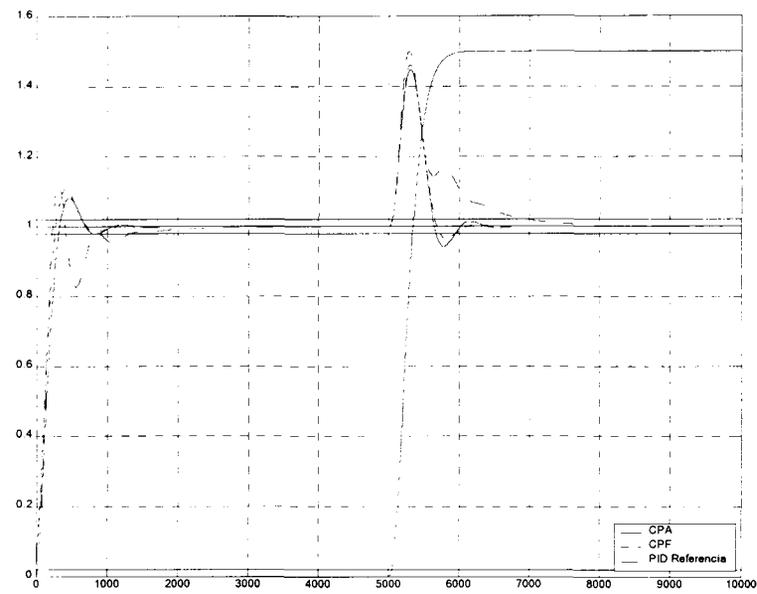


Figura B.70 Respuesta del proceso 9 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

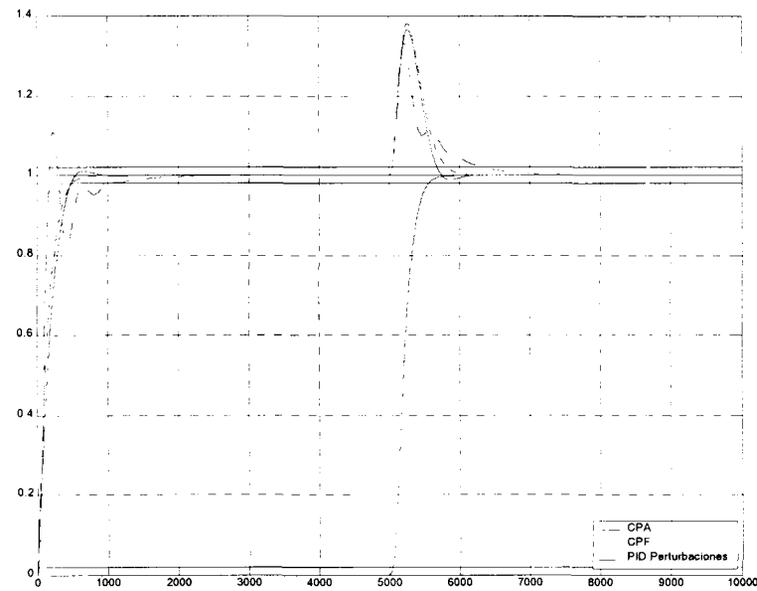


Figura B.71 Respuesta del proceso 9 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{lider} - 25\%$

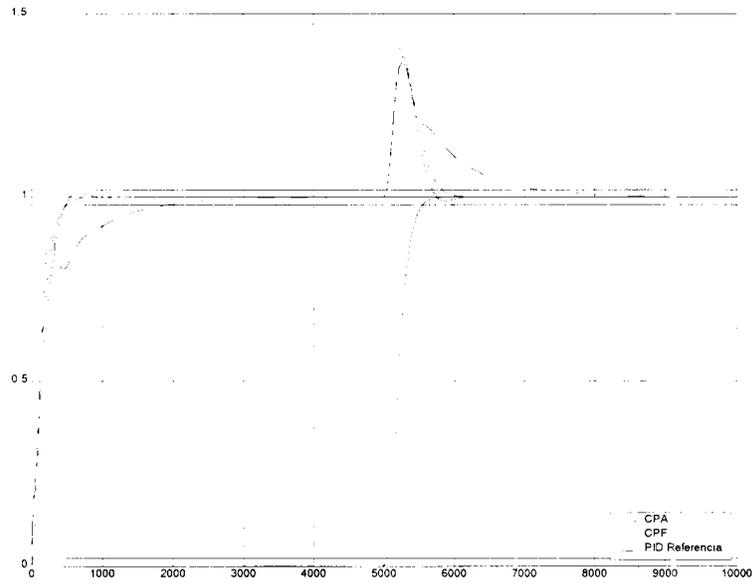


Figura B.72 Respuesta del proceso 9 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{\text{lider}} - 25\%$

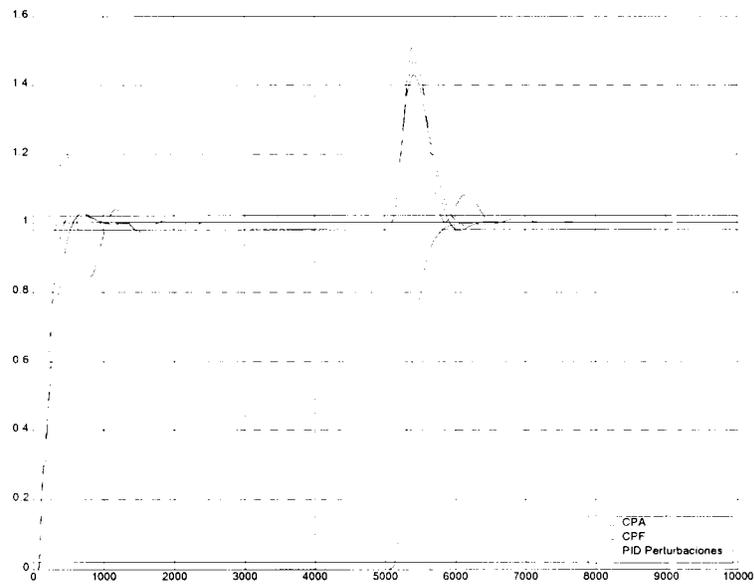


Figura B.73 Respuesta del proceso 10 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

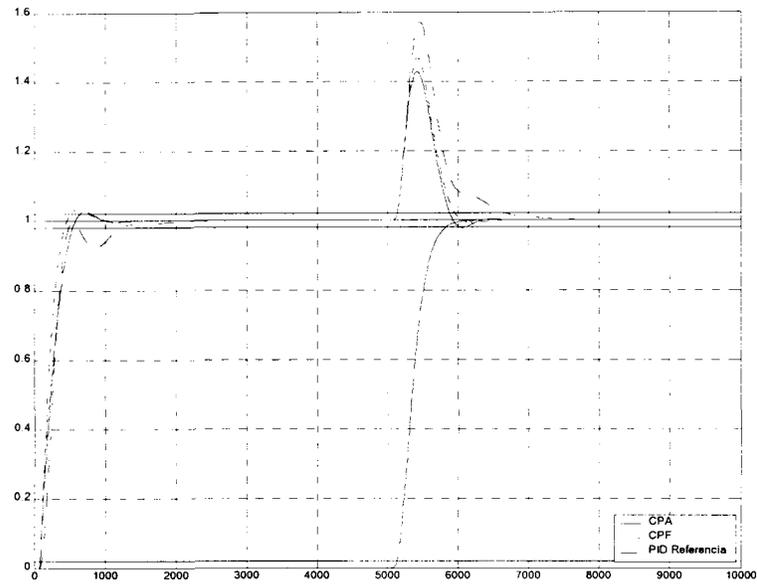


Figura B.74 Respuesta del proceso 10 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia

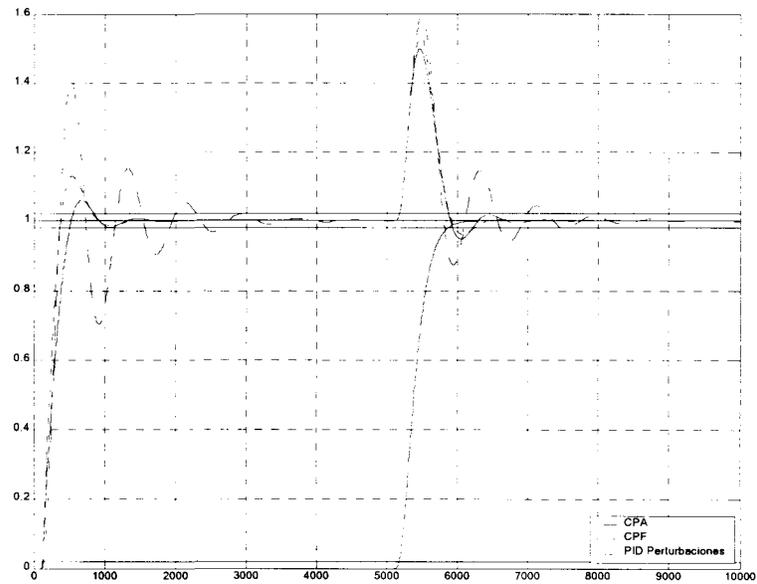


Figura B.75 Respuesta del proceso 10 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y el tiempo muerto + 50%

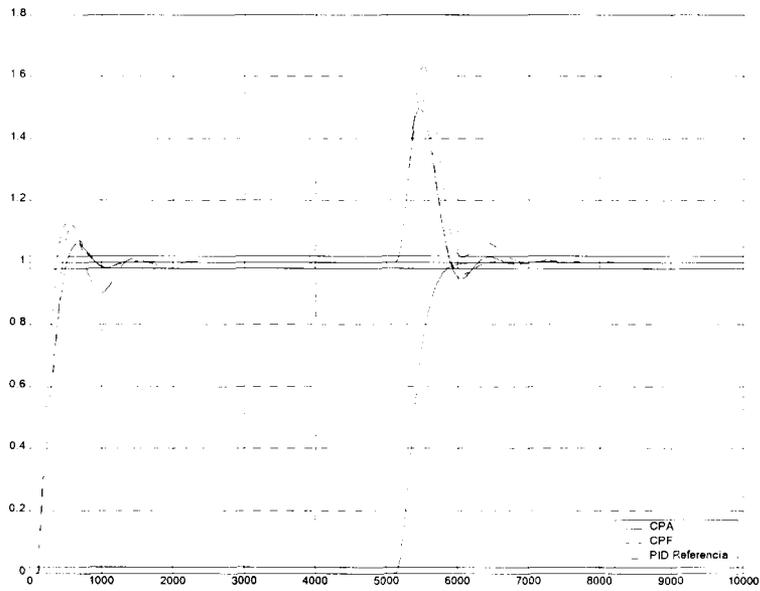


Figura B.76 Respuesta del proceso 10 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y el tiempo muerto + 50%

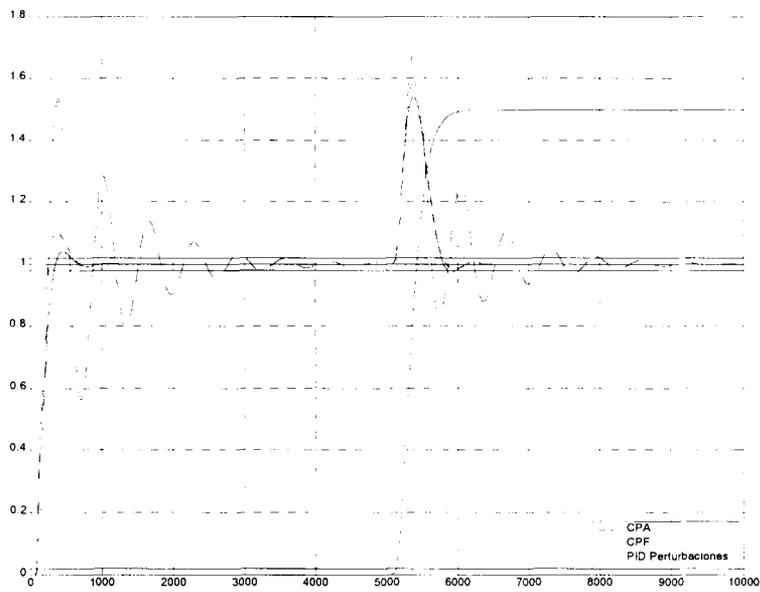


Figura B.77 Respuesta del proceso 10 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la ganancia + 50%

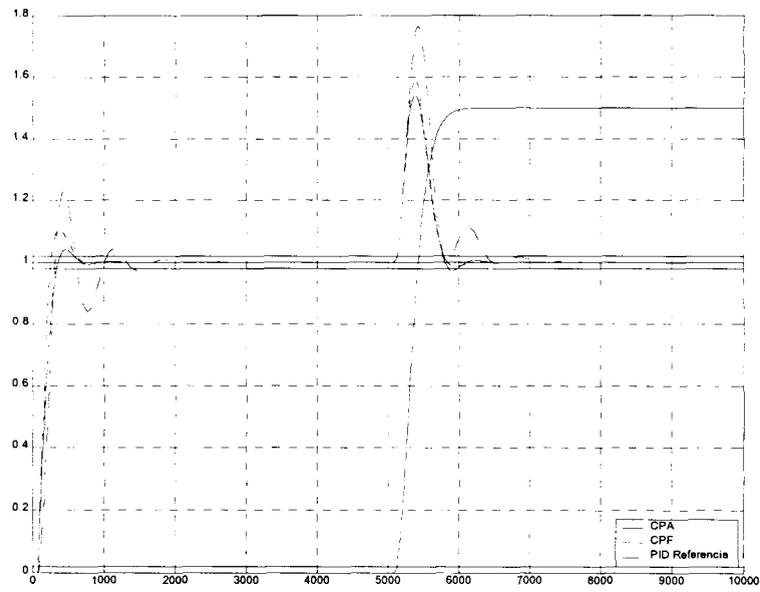


Figura B.78 Respuesta del proceso 10 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la ganancia + 50%

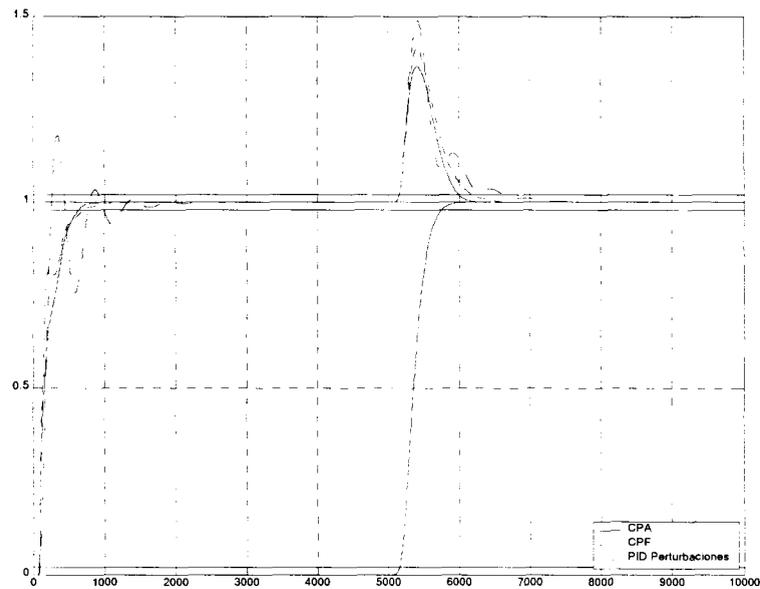


Figura B.79 Respuesta del proceso 10 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones y la $\tau_{\text{lider}} - 25\%$

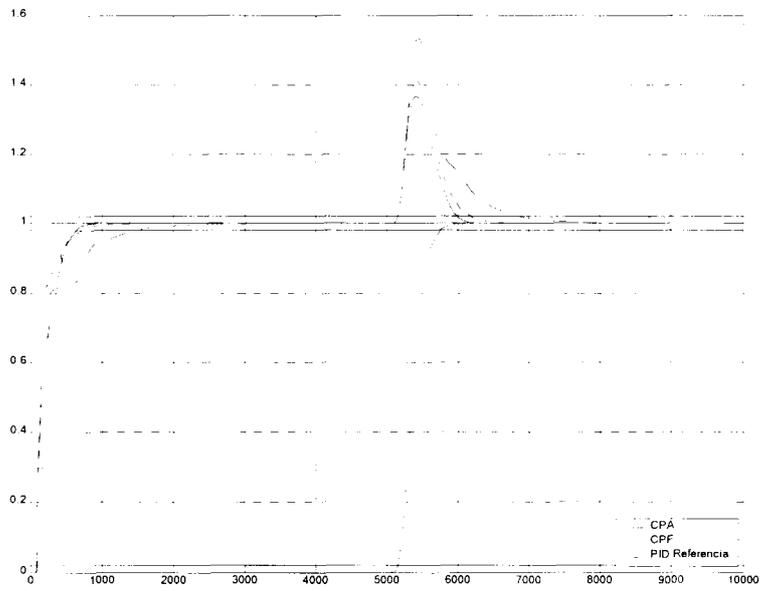


Figura B.80 Respuesta del proceso 10 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante referencia y la $\tau_{\text{lider}} - 25\%$

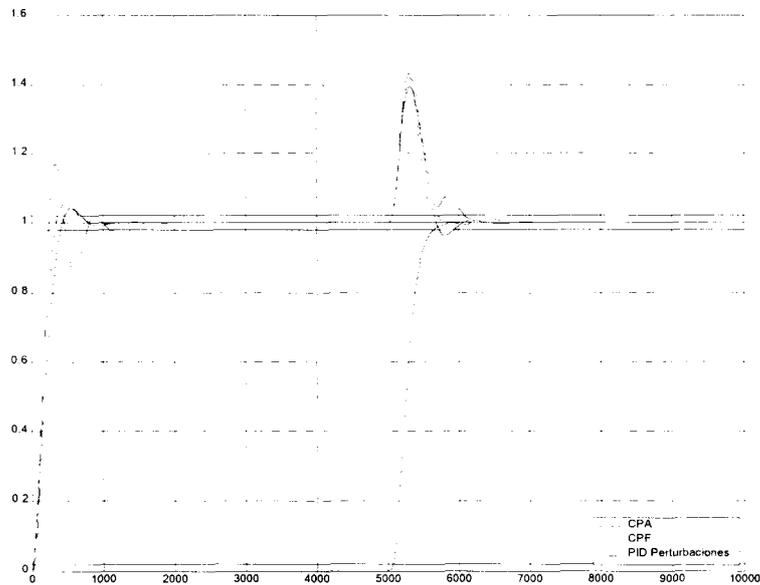


Figura B.81 Respuesta del proceso 11 con el CPA contra el CPF y un PID sintonizado ante perturbaciones

APÉNDICE C. Código de programación en Lab Windows CVI

En este apéndice se muestra el código programado en Lab Windows CVI

case 10:

```
{ // Se realiza el control con el controlador adaptable para la tesis
  double T,pondera=100;
  int c;

  reftesis[0]=ref;
  temptesis[0]=temp;
  errortesis[0]=ref-temp;
  T=ts;
  if((reftesis[1]-reftesis[0])==0)
  {

  ak=c1_ak*fabs(errortesis[0]/pondera)+c2_ak;

  af=c1_af*fabs(errortesis[0]/pondera)+c2_af;

  av=c1_av*fabs(errortesis[0]/pondera)+c2_av;
  }
  else
  {

  ak=c1_ak*fabs(errortesis[0]/(reftesis[1]-reftesis[0]))+c2_ak;

  af=c1_af*fabs(errortesis[0]/(reftesis[1]-reftesis[0]))+c2_af;

  av=c1_av*fabs(errortesis[0]/(reftesis[1]-reftesis[0]))+c2_av;
  }

  AK[0]=ak;
  AF[0]=af;
  AV[0]=av;
  SetCtrlVal (panelhandle, PANEL1_AK, ak);
  SetCtrlVal (panelhandle, PANEL1_AF, af);
  SetCtrlVal (panelhandle, PANEL1_AV, av);
  SetCtrlVal (panelhandle, PANEL1_e, errortesis[0]);

  for (c=0;c<5;c++)
  {

  P1[c]=((tao1_tesis+tao2_tesis)/(ganancia_tesis*((0.7*AK[c]+0.3)*
    (tao1_tesis+(tao2_tesis/2))+tmuerto_tesis)));
  Q1[c]=(0.5*1+0.12)*tao1_tesis;
```

```

Q2[c]=(0.5*1+0.12)*tao2_tesis;
Q3[c]=(0.5*AF[c]+0.12)*(tao1_tesis+tao2_tesis);

R1[c]=(AV[c]+0.13)*(AV[c]+0.13)*(tmuerto_tesis*tmuerto_tesis/4);
R2a[c]=(AV[c]+0.13)*tmuerto_tesis;
R3[c]=(tmuerto_tesis*tmuerto_tesis)/64;
R4[c]=tmuerto_tesis/4;

L[c]=Q1[c]*Q2[c]+T*(Q1[c]+Q2[c])+T*T;
M[c]=2*Q1[c]*Q2[c]+T*(Q1[c]+Q2[c]);
N1[c]=Q1[c]*Q2[c];
K[c]=Q3[c]*T;

AA[c]=R1[c]+T*R2a[c]+T*T;
BB[c]=2*R1[c]+T*R2a[c];
CC[c]=R1[c];

DD[c]=R3[c]+T*R4[c]+T*T;
EE[c]=2*R3[c]+T*R4[c];
FF[c]=R3[c];
}

mantesis[0]=((EE[1]+DD[1])/DD[1])*mantesis[1]
-((EE[2]+FF[2])/DD[2])*mantesis[2]+(FF[3]/DD[3])*mantesis[3]
+((P1[0]*L[0]*AA[0])/(K[0]*DD[0]))*errortesis[0]
-(P1[1]*((L[1]*BB[1]+M[1]*AA[1]))/(K[1]*DD[1]))*errortesis[1]
+(P1[2]*(L[2]*CC[2]+M[2]*BB[2]+N1[2]*AA[2])/(K[2]*DD[2]))*errortesis[2]
-(P1[3]*(M[3]*CC[3]+N1[3]*BB[3])/(K[3]*DD[3]))*errortesis[3]
+(P1[4]*N1[4]*CC[4]/(K[4]*DD[4]))*errortesis[4];

man=mantesis[0];

if (satura==1)
{
    if (man<0) {man=mantesis[0]=0;}
    if (man>100) {man=mantesis[0]=100;}
}
Enviarman(man);

```

```
for(j=4;j>0;j--)
{
    AK[j]=AK[j-1];
    AF[j]=AF[j-1];
    AV[j]=AV[j-1];

    P1[j]=P1[j-1];

    Q1[j]=Q1[j-1];
    Q2[j]=Q2[j-1];
    Q3[j]=Q3[j-1];

    R1[j]=R1[j-1];
    R2a[j]=R2a[j-1];
    R3[j]=R3[j-1];
    R4[j]=R4[j-1];

    L[j]=L[j-1];
    M[j]=M[j-1];
    N1[j]=N1[j-1];
    K[j]=K[j-1];

    AA[j]=AA[j-1];
    BB[j]=BB[j-1];
    CC[j]=CC[j-1];

    DD[j]=DD[j-1];
    EE[j]=EE[j-1];
    FF[j]=FF[j-1];

    mantesis[j]=mantesis[j-1];
    errortesis[j]=errortesis[j-1];
    reftesis[j]=reftesis[j-1];

}

}
break;
```

APÉNDICE D. Gráficas obtenidas en el proceso físico

En este apéndice se muestran las gráficas de la respuesta del controlador propuesto ante los veinte diferentes procesos de diferentes órdenes (segundo, tercer, cuarto y quinto) con variaciones paramétricas de la planta nominal.

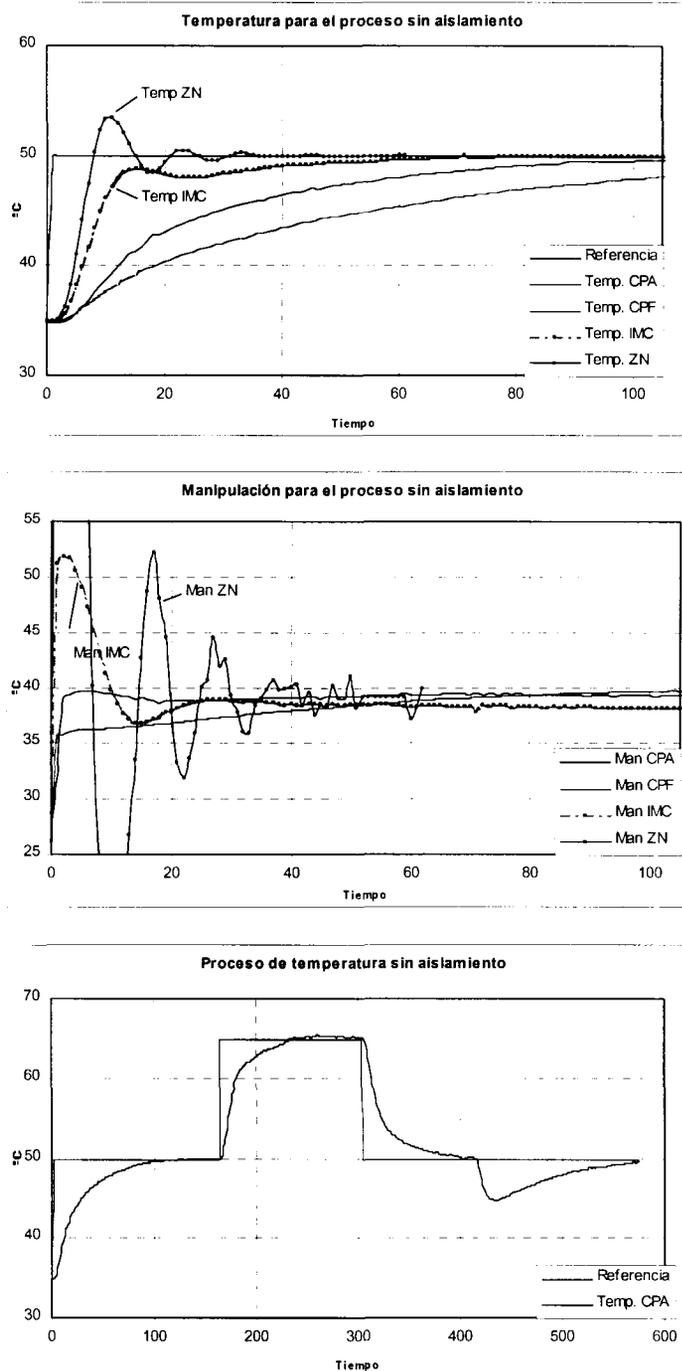


Figura D.1 Gráficas del proceso sin aislamiento

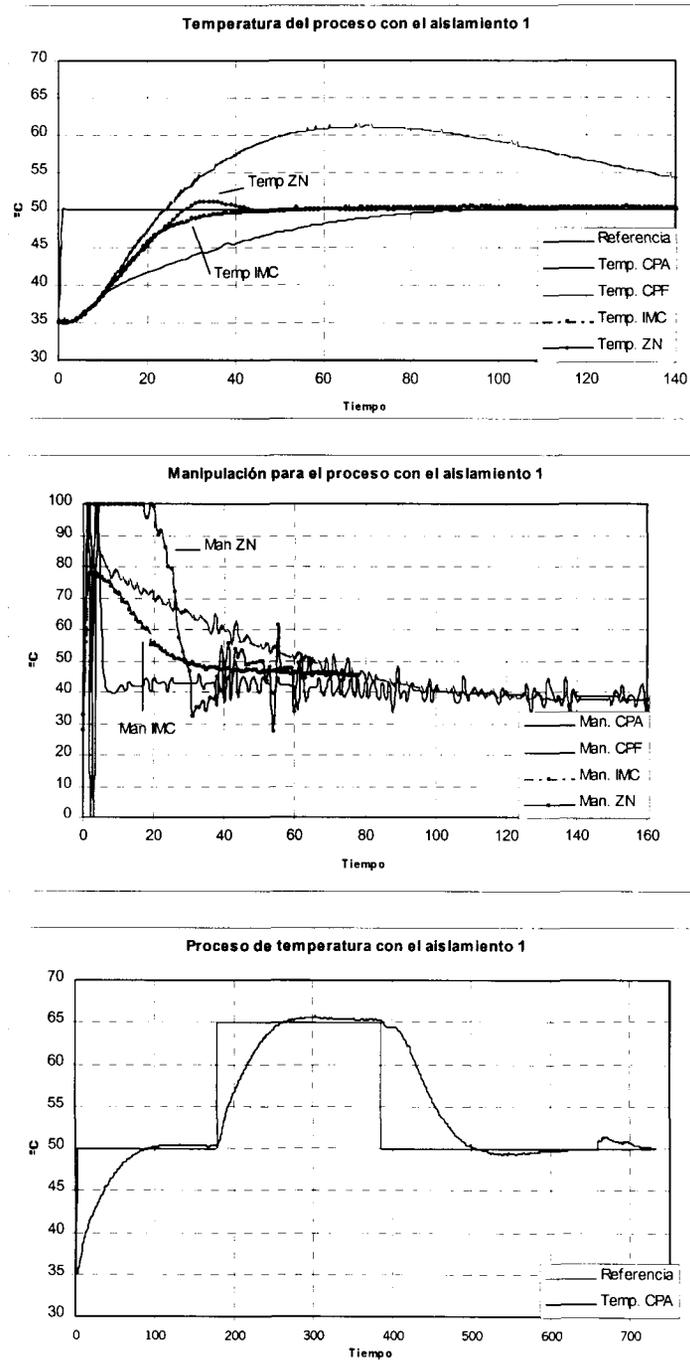


Figura D.2 Gráficas del proceso con el aislamiento 1

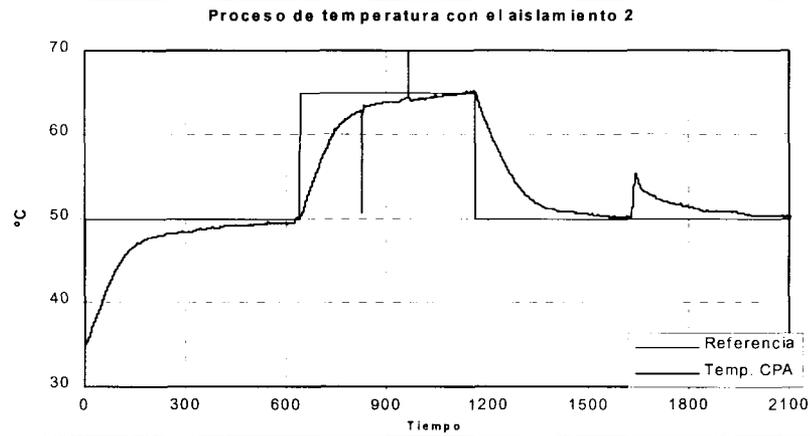
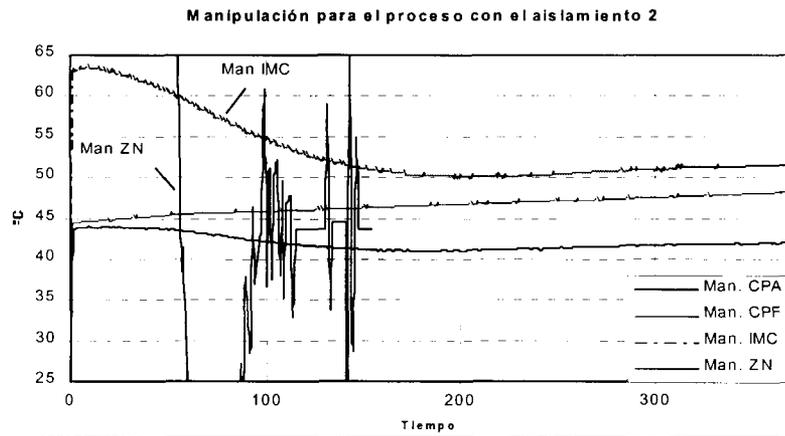
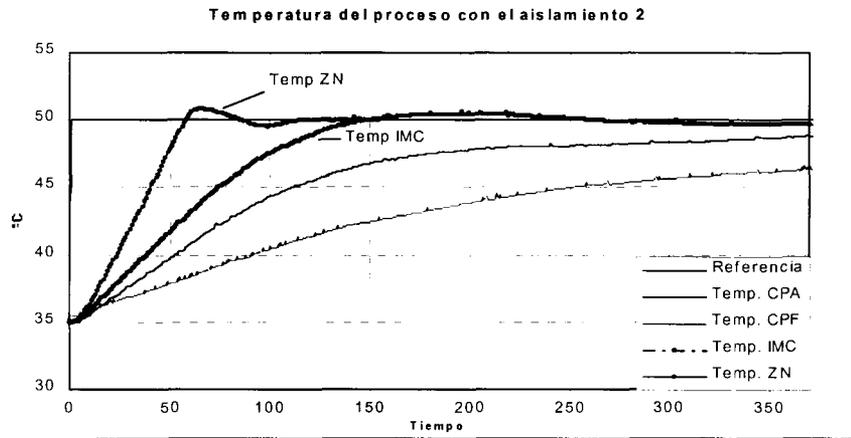


Figura D.3 Gráficas del proceso con el aislamiento 2

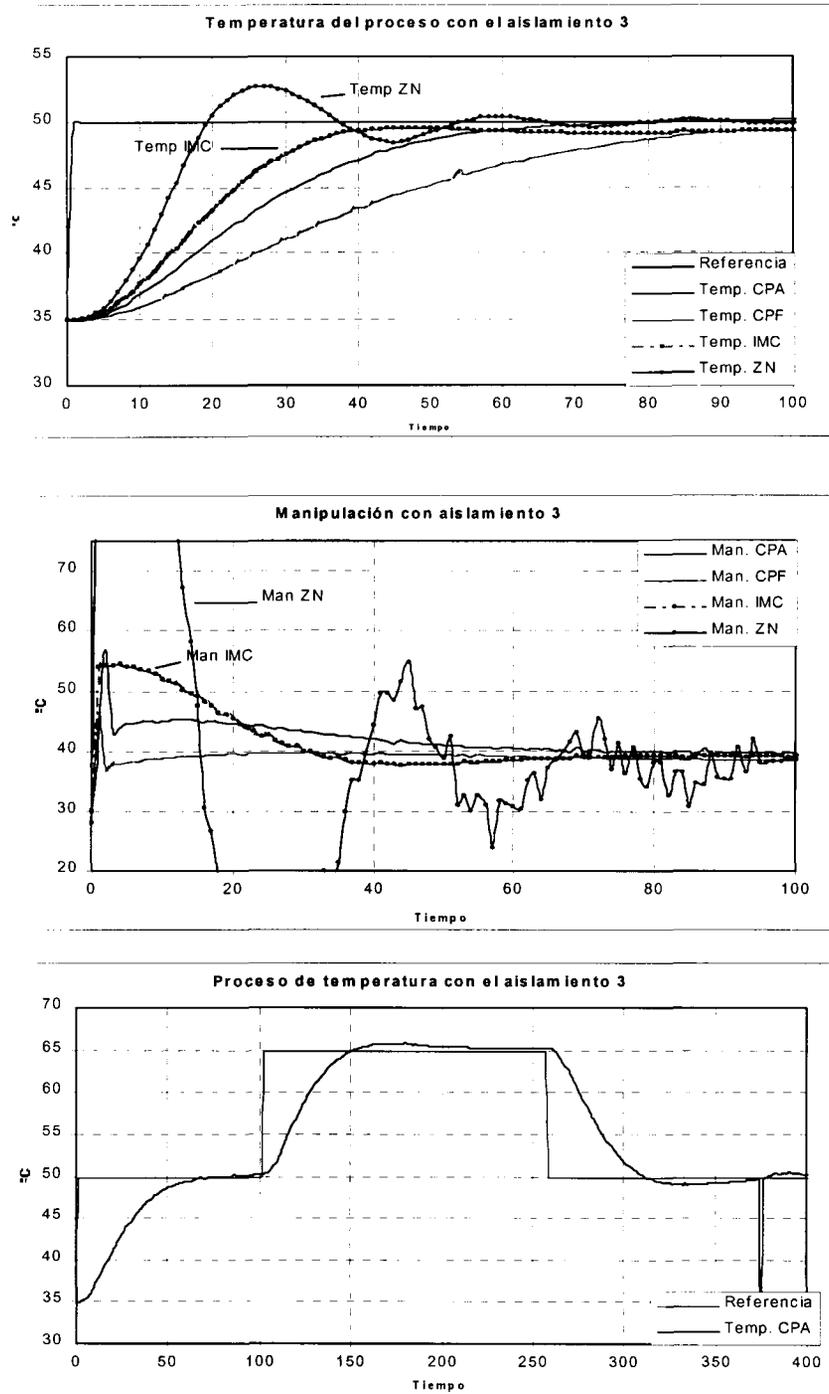


Figura D.4 Gráficas del proceso con el aislamiento 3

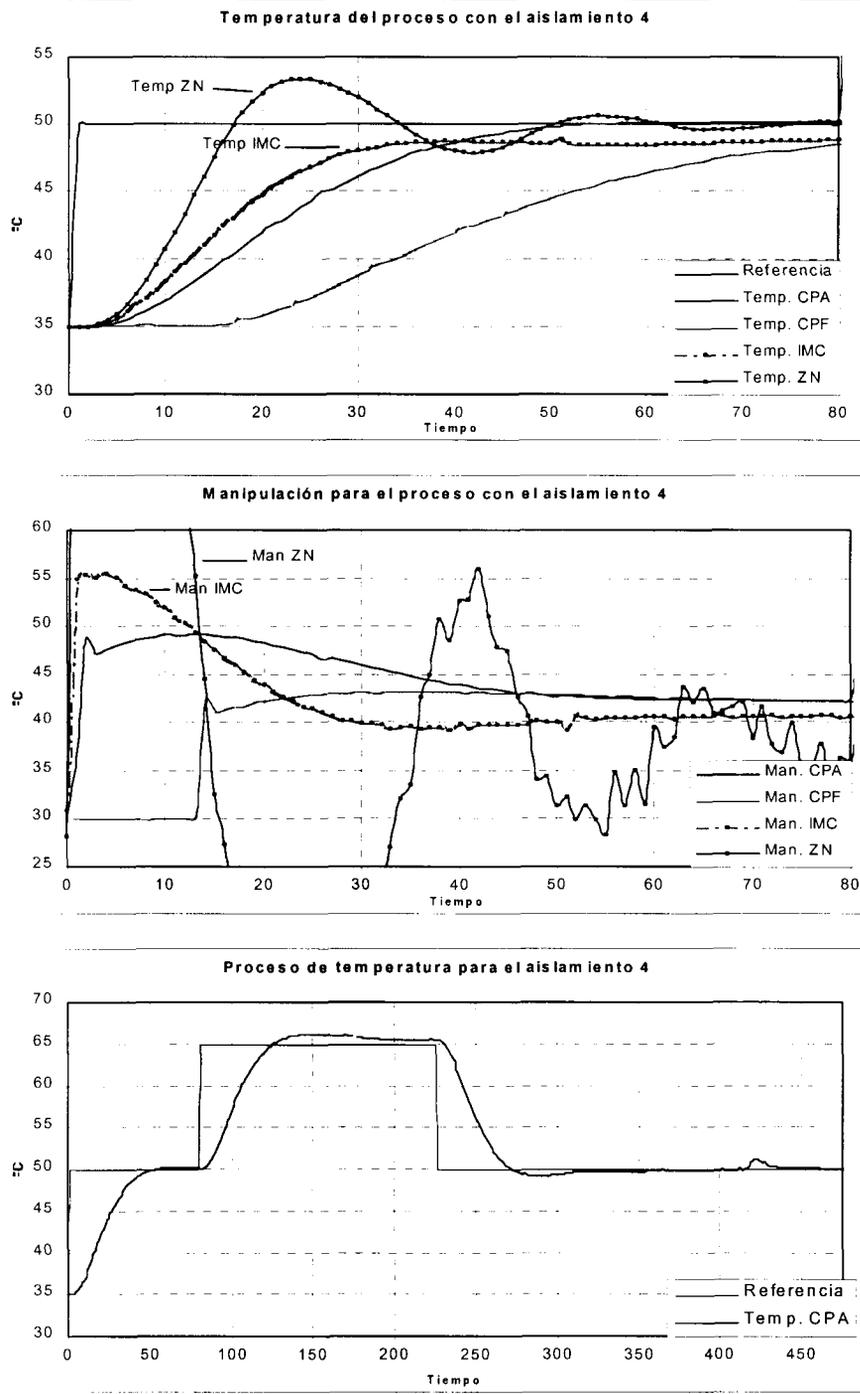


Figura D.5 Gráficas del proceso con el aislamiento 4

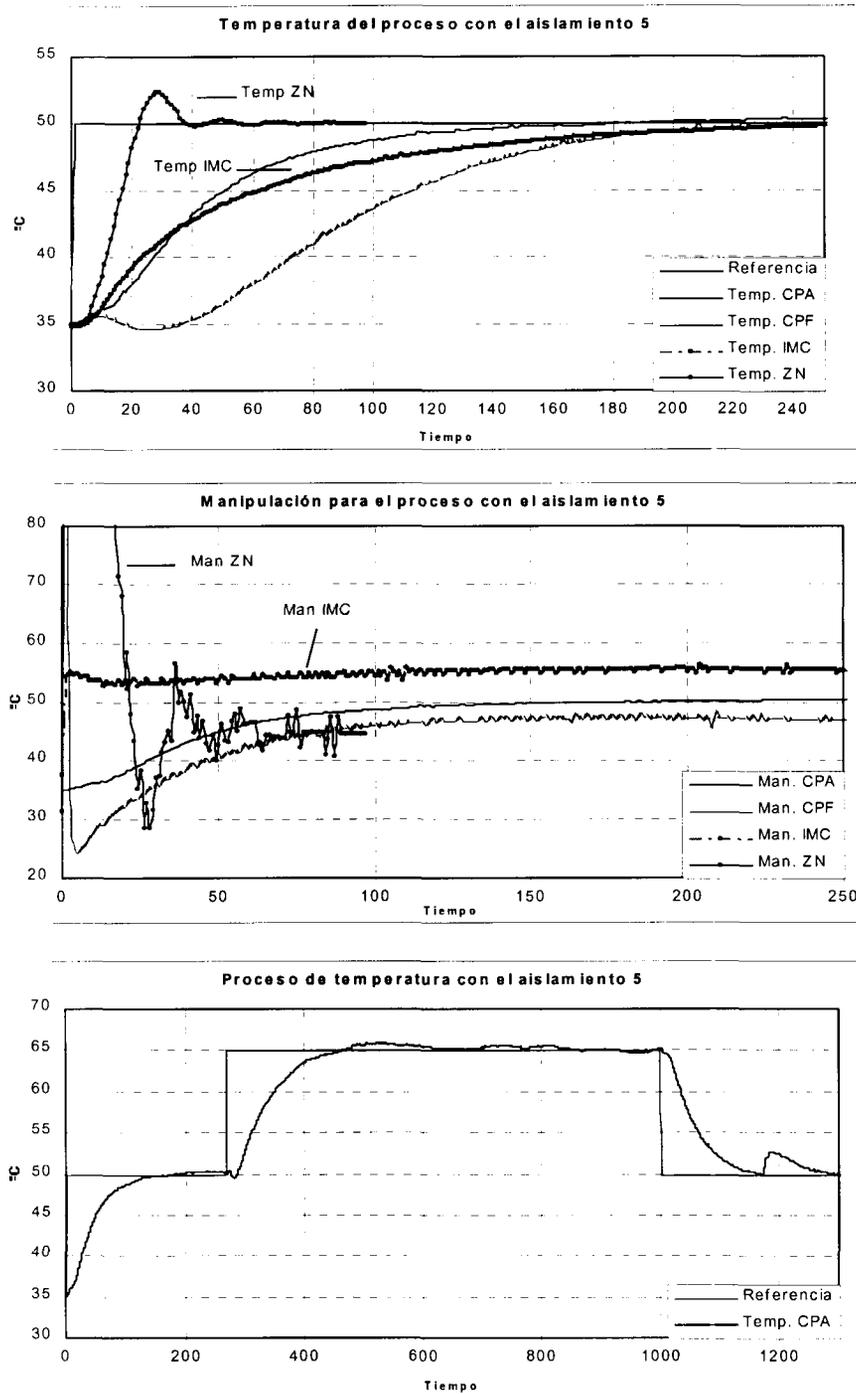


Figura D.6 Gráficas del proceso con el aislamiento 5

APÉNDICE E. Comportamiento en el tiempo de los parámetros adaptados

En este apéndice se muestran las gráficas del comportamiento de los parámetros adaptados con respecto al tiempo.

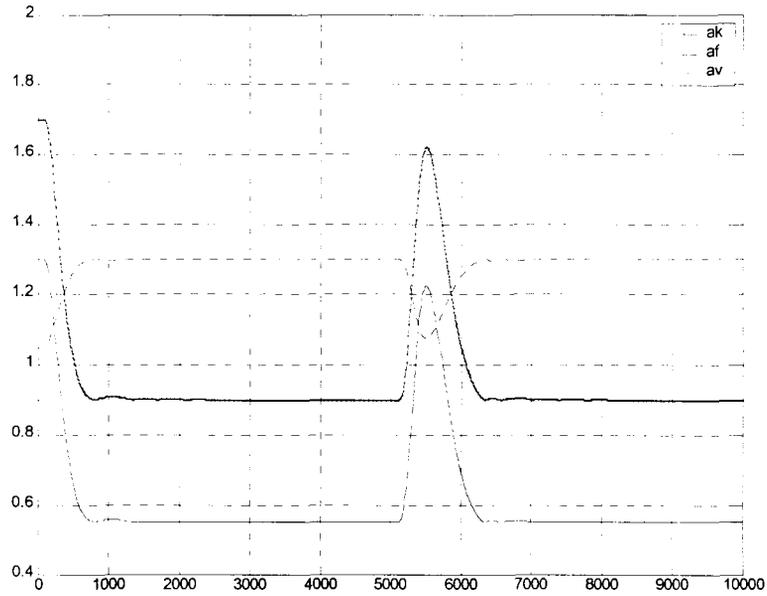


Figura E.1 Comportamiento de los parámetros adaptados para LLL

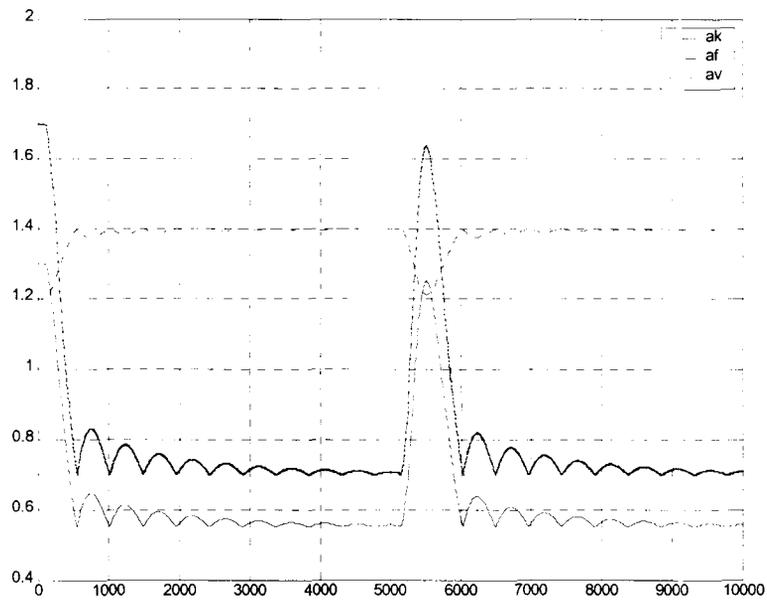


Figura E.2 Comportamiento de los parámetros adaptados para LLE

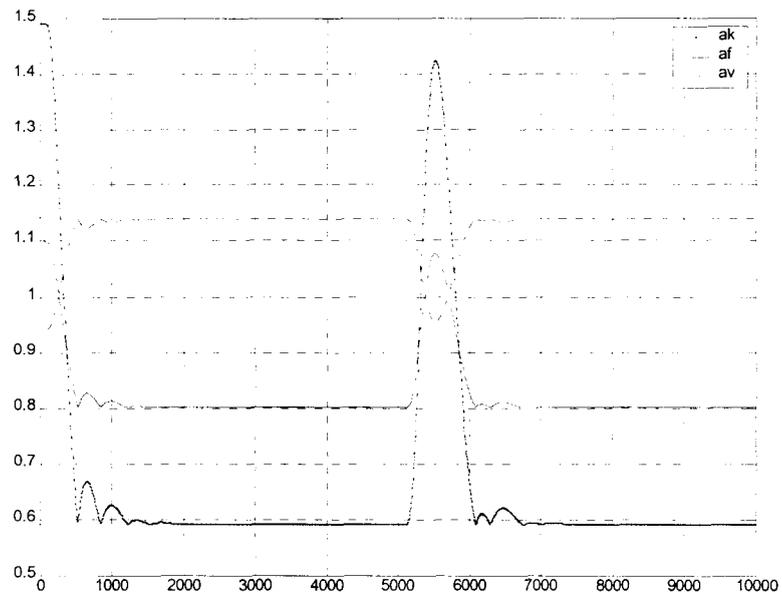


Figura E.3 Comportamiento de los parámetros adaptados para LEL

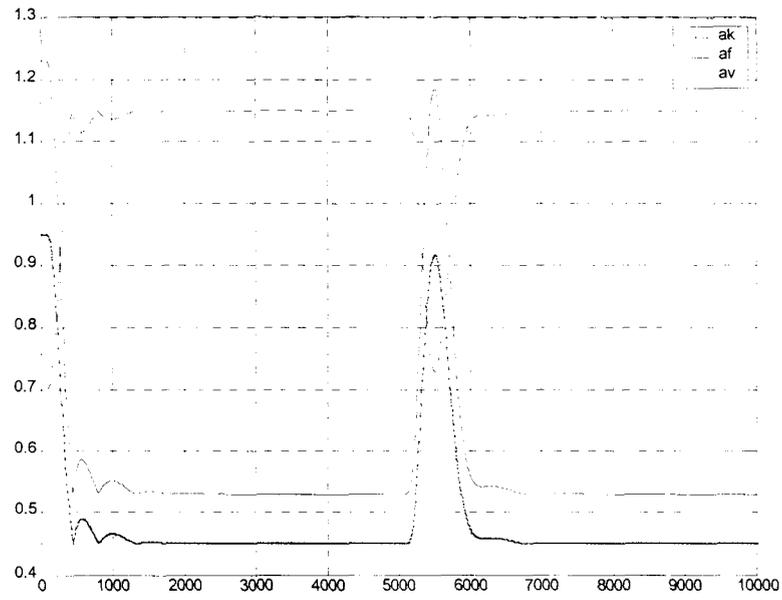


Figura E.4 Comportamiento de los parámetros adaptados para LEE

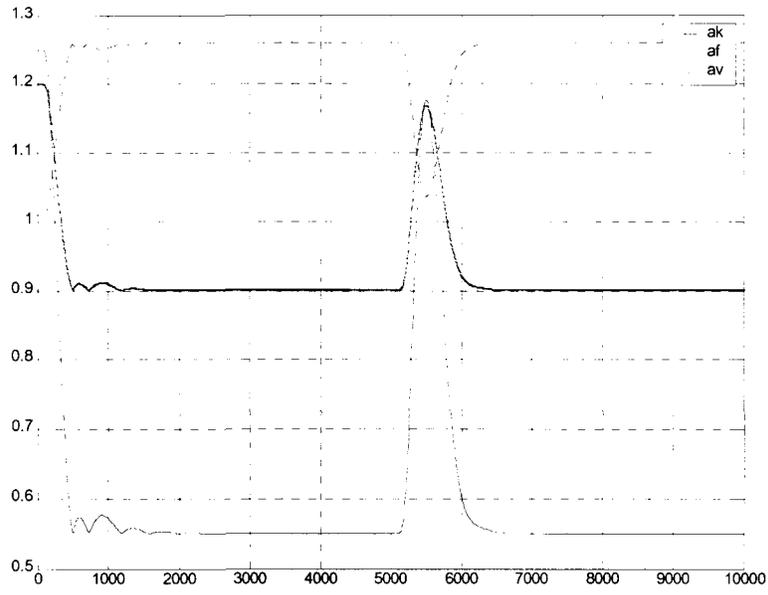


Figura E.5 Comportamiento de los parámetros adaptados para ELL

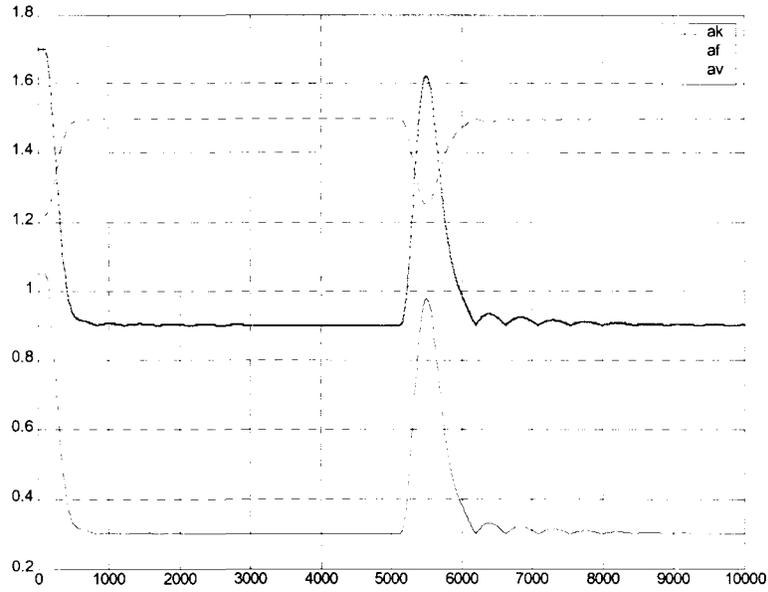


Figura E.6 Comportamiento de los parámetros adaptados para ELE

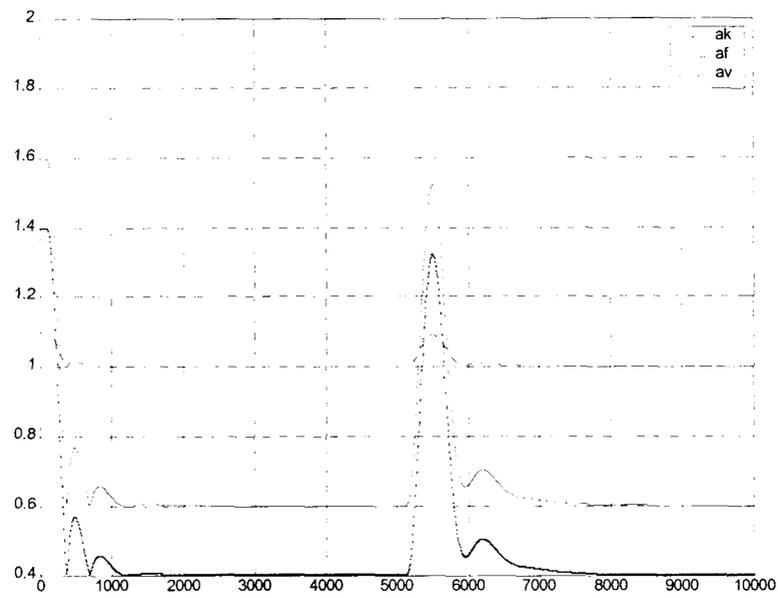


Figura E.7 Comportamiento de los parámetros adaptados para EEL

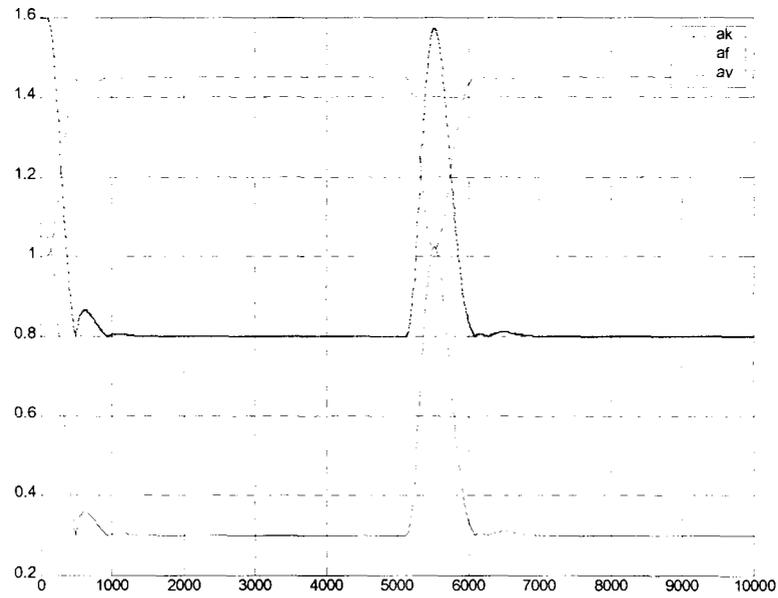
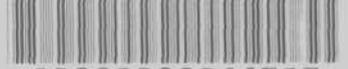


Figura E.8 Comportamiento de los parámetros adaptados para EEE

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ramírez Brambila, Salvador. Diseño e implementación de un nuevo controlador de tres parámetros usando modelos de alto orden. Tesis de Maestría. ITESM. Mayo, 2002.
- [2] Trujillo Viramontes, Roberto. Desarrollo de un algoritmo de supervisión de ganancia para un controlador PID convencional. Tesis de Maestría. ITESM. Agosto, 1997.
- [3] Narváez, Carlos y Sánchez, Francisco. High order modeling of overdamped continuous processes. ISA 2001
- [4] Narváez, Carlos y Jasso, Fausto. PID tuning and feedforward compensator design a new minimum-phase model. ISA 2001
- [5] Landau, I.D., Cyrot, Ch., et al. Robust digital control of flexible structures using the combined pole placement/sensitivity function shaping. Proceedings of the American Control Conference. Junio 1994
- [6] Coughanowr, D.R., Process systems analysis and control. McGraw Hill. Segunda edición. 1991

Centro de Información-Biblioteca



30002006244537