

Universidad Nacional de Rosario

TRABAJO PRÁCTICO 1

Diseño de Controladores en el Dominio Temporal

Integrantes:

Luciano Raffagnini, Sebastián I. Rodríguez

29/09/2023

Resumen

En este trabajo se aplicarán distintos esquemas de control de un reactor agitado utilizado para la producción de Biodiesel. Se analizarán los resultados de aplicar cada esquema de control y las diferencias o similitudes entre los mismos, siempre teniendo en cuenta la función para la cual está pensado cada uno.

1. Controladores Feedback

Se propone un esquema de control feedback, para poder estabilizar al sistema alrededor de determinado Set Point de la variable manipulada C_E .

1.1. Estimación de Gp

Como primer paso se debe obtener una función transferencia de la planta, que relacione la variable manipulada F_h y la variable controlada C_E . Para esto se aplicó un salto escalón de +4 % en F_h . Luego se tomaron los datos de la respuesta y se utilizó el script "Cohen_Coon.m" para estimar los parámetros de la transferencia. Una vez obtenidos estos parámetros, se realizó un ajuste manual de los mismos para intentar que la respuesta del modelo se aproxime lo más posible a la de la planta. Este proceso y sus resultados se muestran en la tabla 1 y en la figura 1. Se ve que los parámetros obtenidos son más que aceptables.

	Parámetros Cohen Coon	Parámetros Ajustados
K	0.2081	0.2081
τ	141.1618	100
Tiempo Muerto	18.75	21.80

Cuadro 1: Comparación de parámetros.

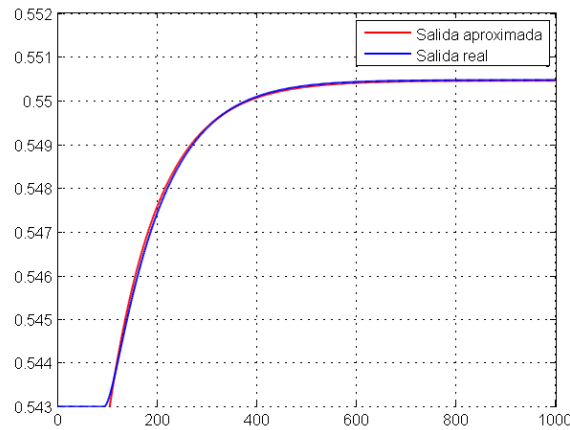


Figura 1: Comparación entre la respuesta de la planta real y su modelo

1.2. Diseño de Controladores

Para esto se diseñan controladores basados en los métodos de Cohen-Coon, Ziegler-Nichols e IMC. En las figuras 3, 4 y 5 se muestra la respuesta del sistema utilizando los diferentes controladores diseñados frente a un cambio en el Set Point de +2 %.

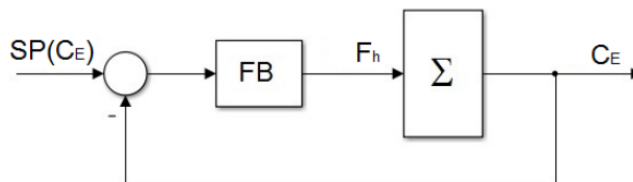


Figura 2: Esquema Controlador Feedback

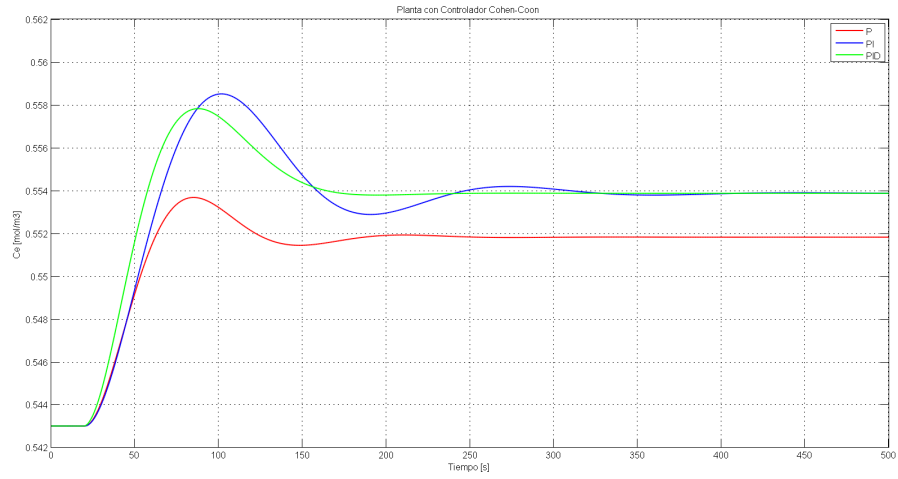


Figura 3: Esquema feedback implementado utilizando el método de Cohen-Coon

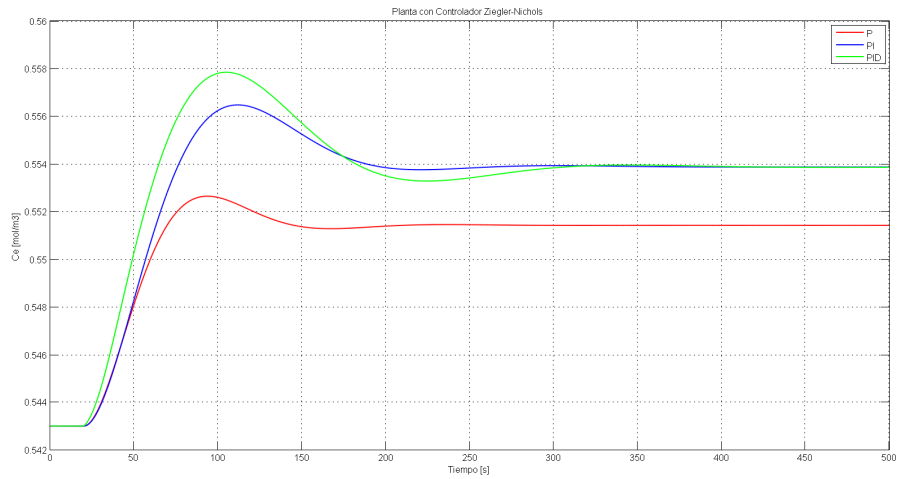


Figura 4: Esquema feedback implementado utilizando el método de Ziegler-Nichols

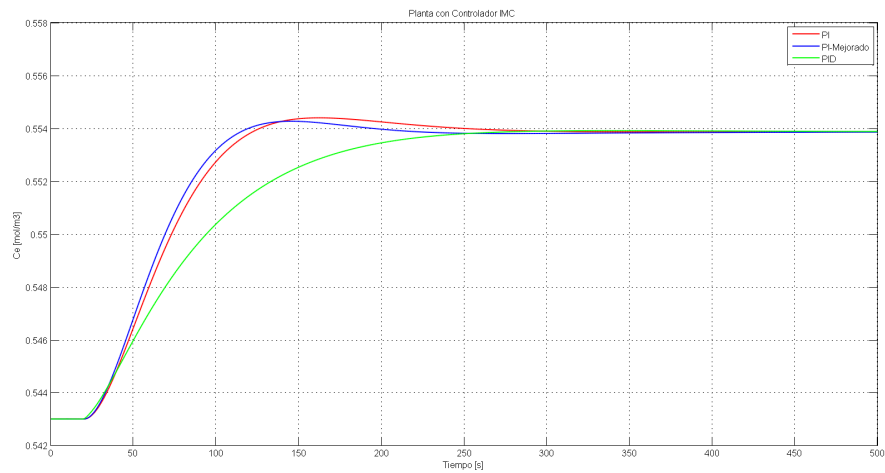


Figura 5: Esquema feedback implementado utilizando el método IMC

	Cohen-Coon		
	P	PI	PID
K_c	20.8233	17.6998	26.8300
τ_i	-	54.9107	55.8333
τ_d	-	-	8.6957
	Ziegler-Nichols		
	P	PI	PID
K_c	16.6250	14.9625	19.9500
τ_i	-	76.2500	45.7500
τ_d	-	-	11.4375
	IMC		
	PI	PI-"Mejorado"	PID
K_c	9.6108	10.8121	7.2081
τ_i	100	112.5000	112.5000
τ_d	-	-	11.1111

Cuadro 2: Parámetros utilizados en los controladores

	IAE		IAE
CC-P	1.6440	IMC-PI	0.6472
CC-PI	0.7334	IMC-PI "Mejorado"	0.5991
CC-PID	0.5698	IMC-PID	0.8400
ZN-P	1.9441		
ZN-PI	0.6214		
ZN-PID	0.6971		

Cuadro 3: Comparación de IAE obtenido utilizando los distintos métodos

1.3. Conclusiones del Esquema de Control

Comparando los distintos métodos, vemos que el mejor controlador, en cuanto a IAE, corresponde al PID diseñado utilizando el método de Cohen-Coon. Este controlador logra un error estático nulo, al incluir un comportamiento integrador. Por otro lado, logra una respuesta rápida sin incurrir en un sobrevalor muy grande.

2. Control Feedforward

Se propone complementar el control Feedback comentado en la sección anterior, adicionando un control Feedforward. Esto se hace con el propósito agregar la posibilidad rechazo a perturbaciones medibles, en particular, a cambios del flujo de reactivo entrante (F_i). El esquema de control se puede observar en la Figura 6:

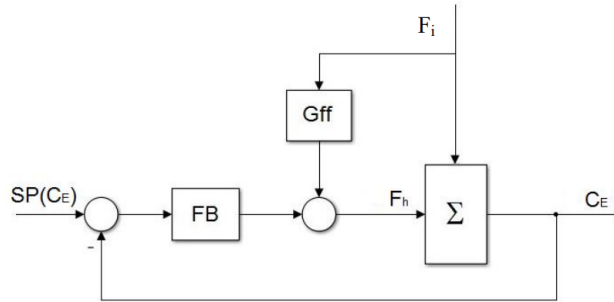


Figura 6: Esquema Feedforward

2.1. Transferencia Gd

Como primer paso se debe obtener la función transferencia que vincula F_i con la variable manipulada C_E . Para esto se aplicó un escalón en F_i , con un salto del +4 %. En base a la respuesta obtenida se utilizó el script **Cohen_Coon.m** para obtener los valores de k , τ y α . Posteriormente se realizó un ajuste de los parámetros obtenidos para que la respuesta modelada se aproxime lo más posible a la real.

	Parámetros Cohen Coon	Parámetros Ajustados
K	-0.6107	-0.6109
τ	73.5999	90
α	10.1324	10.1324

Cuadro 4: Comparación de parámetros.

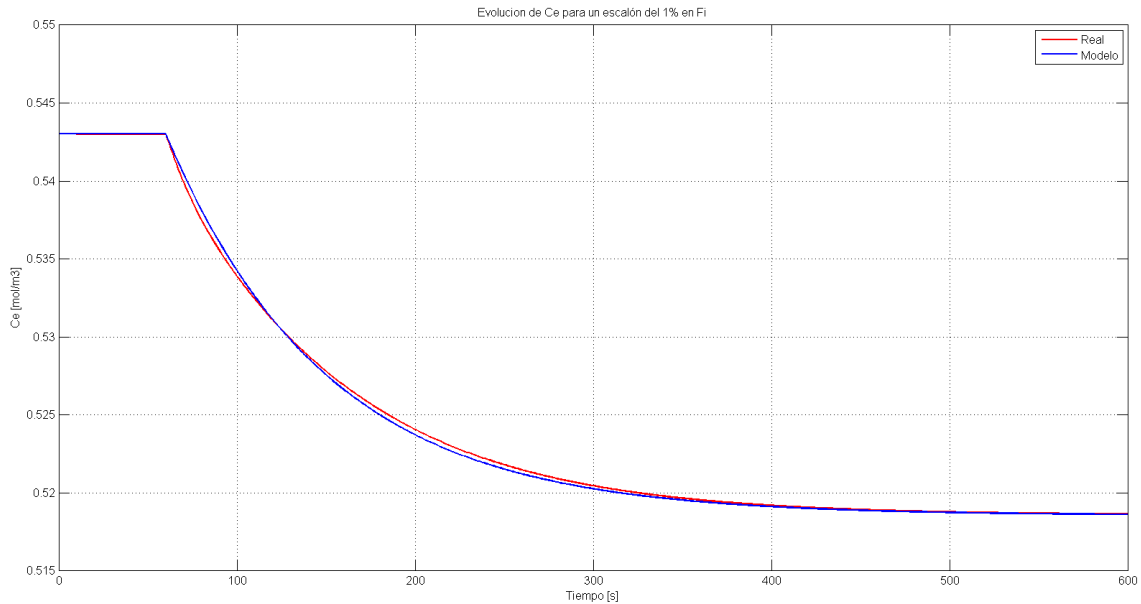


Figura 7: Comparación entre la respuesta de la planta real y su modelo

2.2. Transferencia Gff

A partir de las transferencias G_p y G_d se puede obtener la expresión de G_{ff} , presentada anteriormente en el esquema de realimentación de la figura 6 :

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} = -K_{ff} \frac{\tau_p s + 1}{\tau_d s + 1} e^{\gamma s} = 2,9356 \frac{100s + 1}{90s + 1} e^{11,6676s}$$

Es importante mencionar que al implementar G_{ff} en el controlador, no se incluirá el término exponencial, al ser este un adelanto y por lo tanto, no implementable.

2.3. Resultados

Una vez terminado el diseño del esquema de control, se realizó una comparación del rendimiento del mismo con respecto a un esquema feedback, para una perturbación de +1 % en F_i , tal como se muestra en la figura 8. En el cuadro 5 se muestra el IAE resultante en ambos casos.

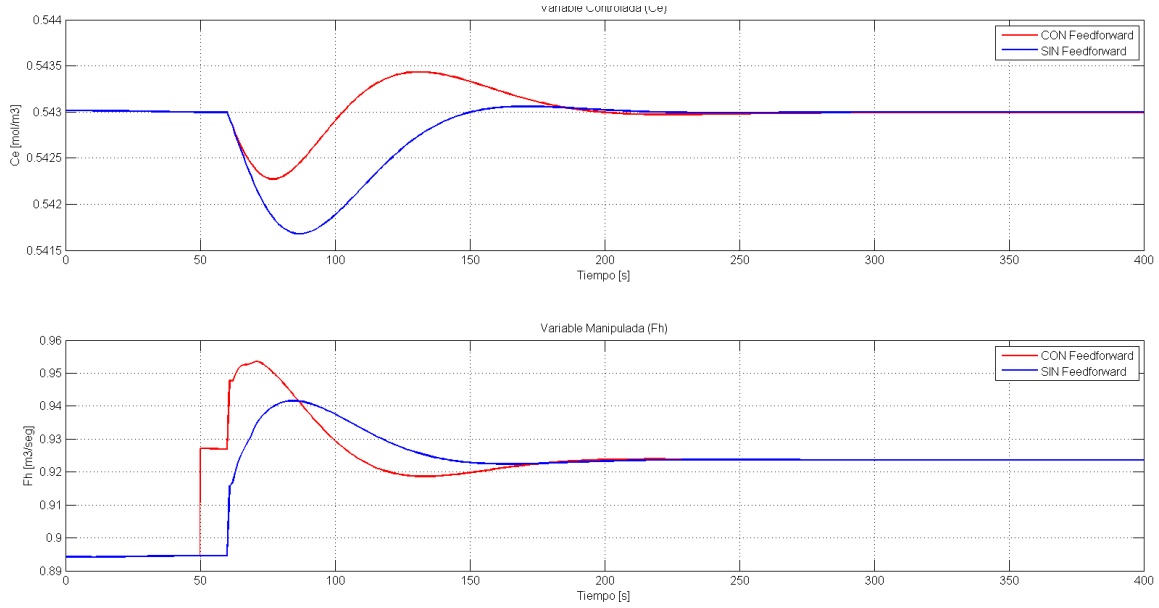


Figura 8: Comparación de resultados entre esquema con y sin feedforward (solo feedback)

	Feedforward	Feedback
IAE	0.0443	0.06587

Cuadro 5: Comparación de IAE en ambos esquemas

2.4. Conclusiones del Esquema de Control

De la tabla 5 se ve que al utilizar el esquema Feedforward, disminuye el IAE. Por otro lado, en la figura 8 se aprecia que el Feedforward presenta una respuesta mucho más suave que con el feedback. De estas 2 observaciones, se puede concluir que el rechazo a perturbaciones en F_i mejoró al utilizar el esquema Feedforward.

3. Predictor de Smith

Se propone ahora diseñar un esquema de control como se muestra en la figura 9. Esto permitirá realizar una compensación del tiempo muerto de la planta.

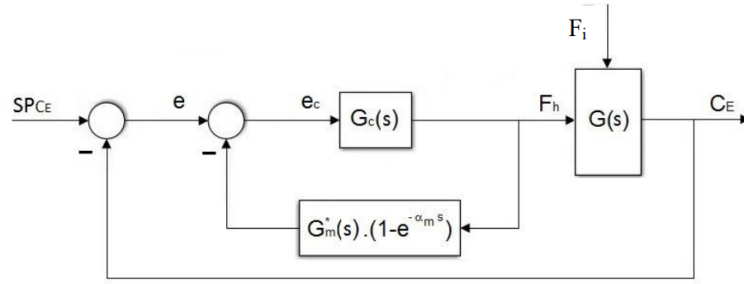


Figura 9: Esquema Predictor de Smith

Para G_c , se propone un controlador del tipo PI, utilizando el método IMC con un ajuste agresivo, a partir de la transferencia G_p obtenida anteriormente. Para el diseño de G_c , no se tendrá en cuenta el tiempo muerto modelado en G_p . A partir del método mencionado se obtienen los siguientes parámetros para el control:

$$\begin{cases} P = 24,0269 \\ I = 0,2403 \end{cases}$$

Una vez obtenido el controlador se realiza una comparación con un esquema Feedback sin compensación para analizar el efecto del Predictor de Smith.

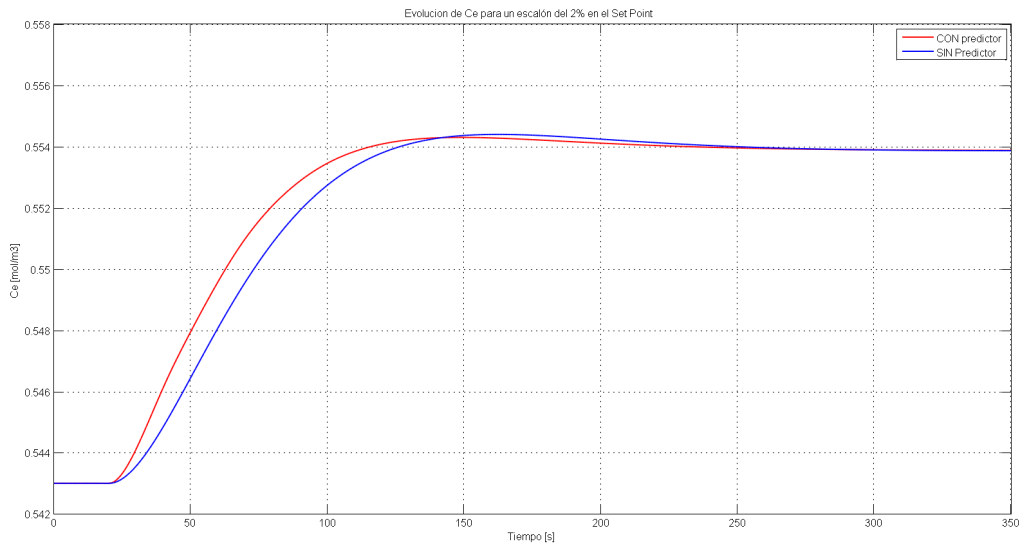


Figura 10: Comparación de respuesta con y sin compensación de tiempo muerto, para un aumento del 2% en el Set Point

Por ultimo, se compara como responden ambos esquemas frente a un aumento de la ganancia del controlador PI. Esto se puede observar en las figuras 11 y 12.

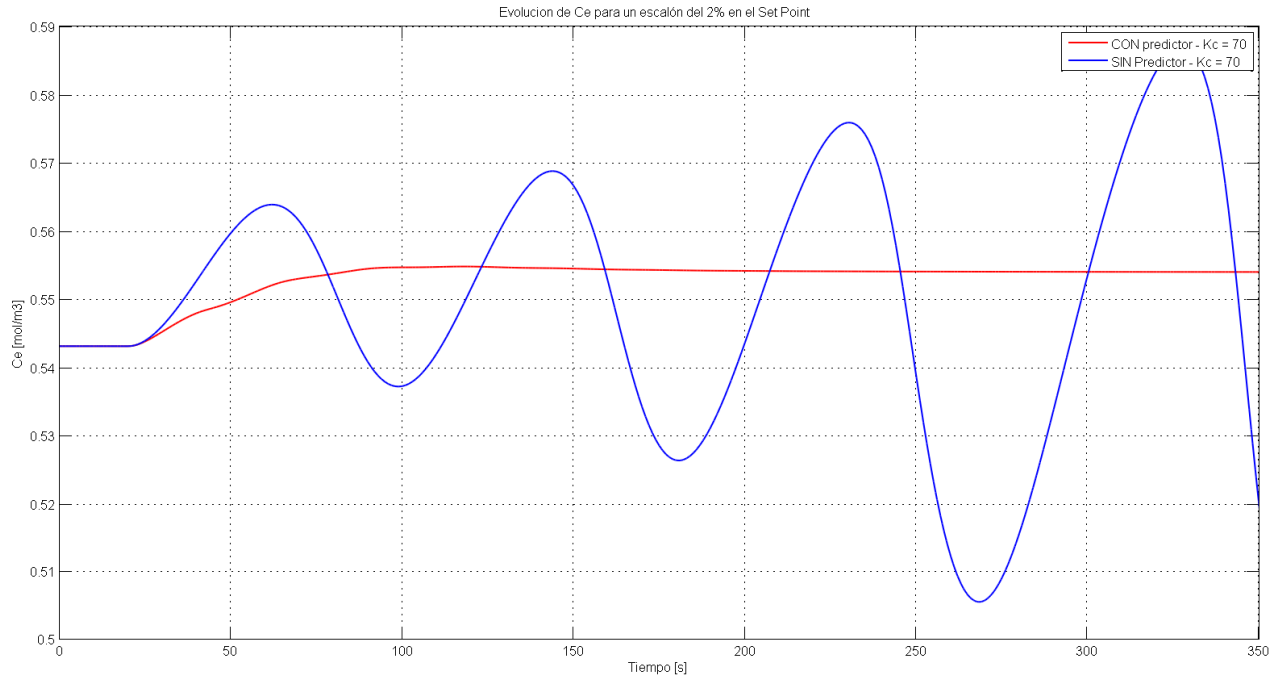


Figura 11: Comparación de ambos esquemas frente a aumento de la ganancia del PI

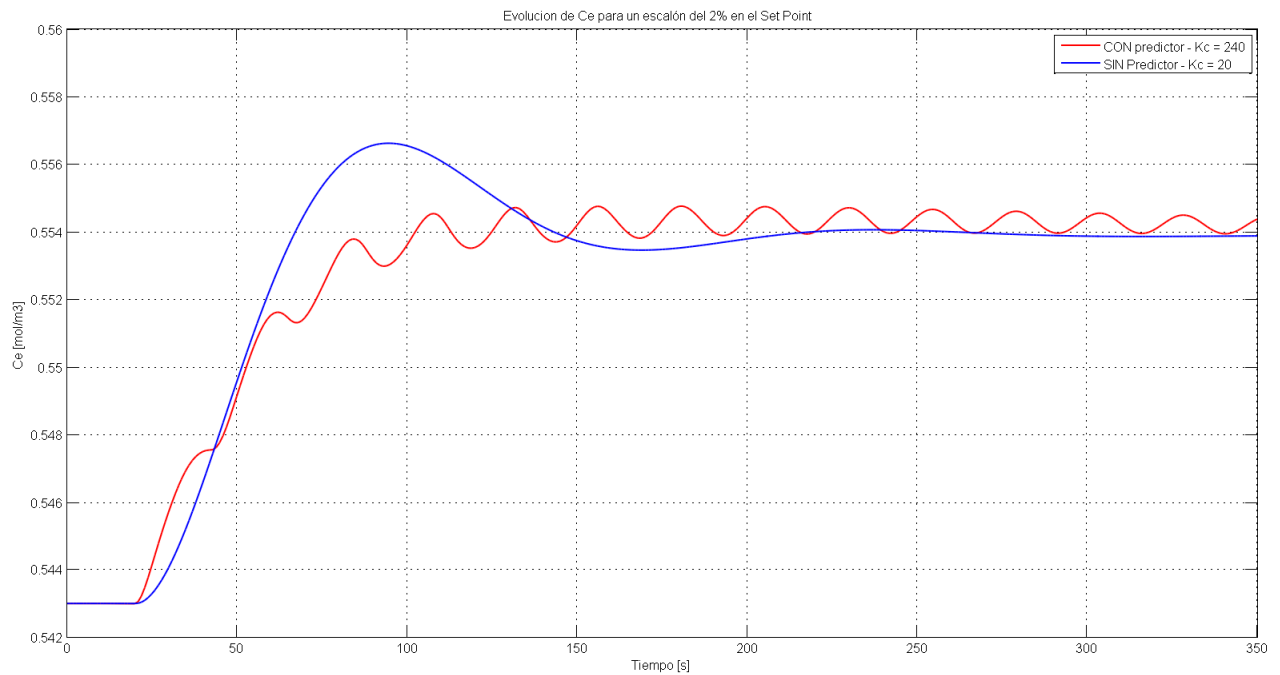


Figura 12: Comparación de ambos esquemas frente a aumento de la ganancia del PI

3.1. Conclusiones del Esquema de Control

En la figura 10 se puede observar que al utilizar la compensación de tiempo muerto, si bien este no se pudo eliminar, si se pudo obtener una evolución más rápida que con el esquema feedback. Esto se debe principalmente a que, como se observa en las figuras 11 y 12, la compensación de tiempo muerto permite utilizar ganancias mucho más grandes sin inestabilizar al sistema.

4. Control en Cascada

En este enunciado ahora se considera a la válvula como un subsistema que tiene su propia dinámica. De esta forma, se propone comparar la calidad del control efectuado, por un lado, considerando a la Válvula + Planta como un solo sistema y utilizando un esquema Feedback (caso al que se le denominará Lazo Simple) y por el otro, modelando según el esquema de Control en Cascada.

4.1. Diseño del PID de lazo simple (Feedback)

En este punto se excitó al sistema Válvula-Planta a lazo abierto con un escalón de +4% en el SP con el objetivo de obtener la curva de evolución y con ella la transferencia de $C_E/\%A_p$. Para obtener la transferencia se hizo uso del script "Cohen_Coon.m" con el que se obtuvieron los valores preliminares de k , τ y α . Luego del ajuste, obtuvimos resultados que consideramos satisfactorios:

	Parámetros Cohen Coon	Parámetros Ajustados
K	0.0037	0.003731
τ	141.9059	100
α	23.0783	30

Cuadro 6: Comparación de parámetros de sistema válvula+planta.

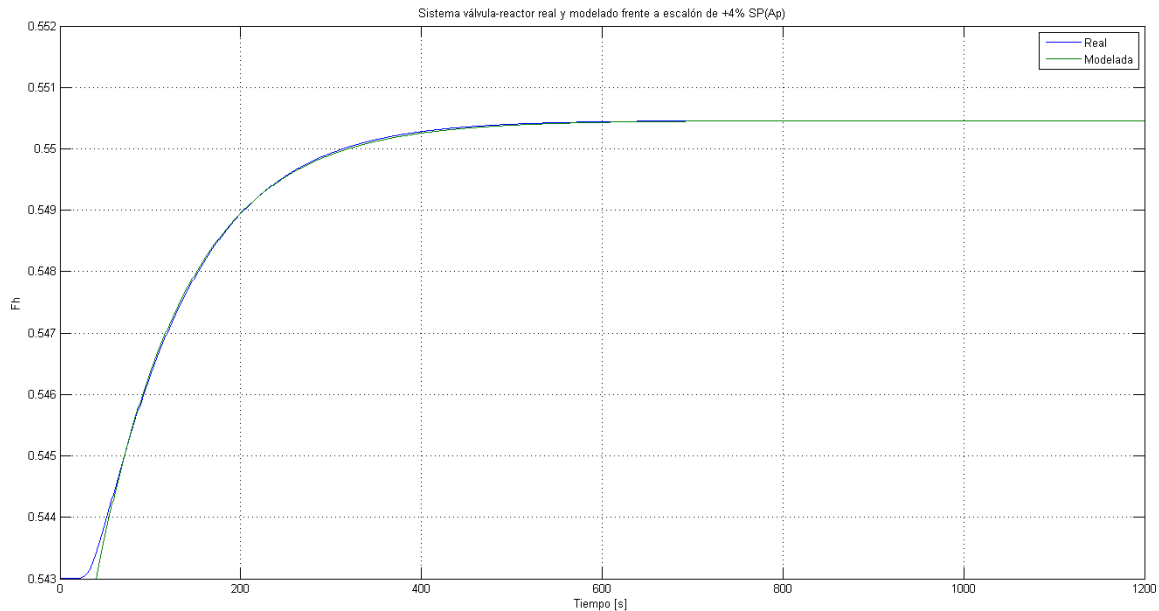


Figura 13: Comparación entre la respuesta de la planta real y su modelo

Finalmente, se usó la función "CC_Controladores.m" para obtener los parámetros necesarios para la construcción del controlador PID. Los resultados se muestran en la sección 4.4.

Los parámetros obtenidos fueron: $k_c = 1258$, $\tau_i = 65.84$, y $\tau_c = 10.34$.

4.2. Diseño de control en cascada

A fin de apreciar la diferencia entre los esquemas de control, se diseñó un controlador en cascada. Para ello se comenzó realizando el control del lazo interno (válvula) y una vez calibrado se diseñó el controlador del sistema completo.

4.2.1. Modelado de la válvula

Para comenzar, dejando la válvula a lazo abierto se la excita con un escalón de +4% en $\%A_p$ con el objetivo de obtener la transferencia $F_h/\%A_p$. Para ello, al igual que antes, se utilizó la función "Cohen_Coon.m" y se ajustaron sus parámetros.

	Parámetros Cohen Coon	Parámetros Ajustados
K	0.0179	0.0179
τ	4.0244	3.5
α	0.9993	0.9993

Cuadro 7: Comparación de parámetros del modelo de válvula.

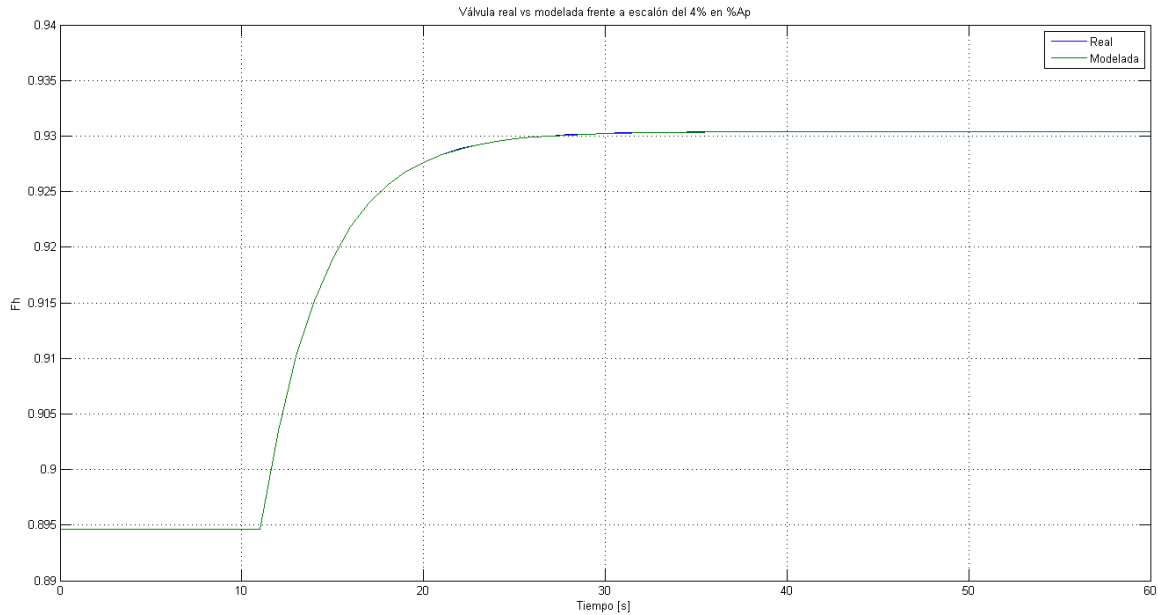


Figura 14: Comparación entre la respuesta de la planta real y su modelo

4.2.2. Controlador para la válvula

Teniendo ya la transferencia de la válvula, procedemos a diseñar un controlador PI que nos permita crear el lazo interno. Con el objetivo de obtener el mejor controlador, se diseñó uno con cada método disponible (Cohen-Coon, Ziegler-Nichols, IMC e IMC "mejorado") para luego comparar sus funcionamientos y de esa forma, elegir el de mejores prestaciones.

	Cohen-Coon	Ziegler-Nichols	IMC	IMC "Mejorado"
IAE - Escalón SetPoint	0.6622	0.0437	0.03772	0.03769
IAE - Escalón DF_h	0.0331	0.0218	0.01886	0.01885

Cuadro 8: Comparación de IAE obtenidos utilizando distintos controladores PI para el lazo interno

Como se puede ver en la tabla, el control que registra el menor IAE es el denominado "IMC mejorado", a su vez puede apreciarse en su evolución temporal que brinda prestaciones superiores frente al Cohen-Coon y Ziegler-Nichols, quedando muy similar al IMC común.

Los parámetros del controlador resultaron: $k_c = 127.68$, $\tau_i = 3.9996$, y $\tau_c = 0$.

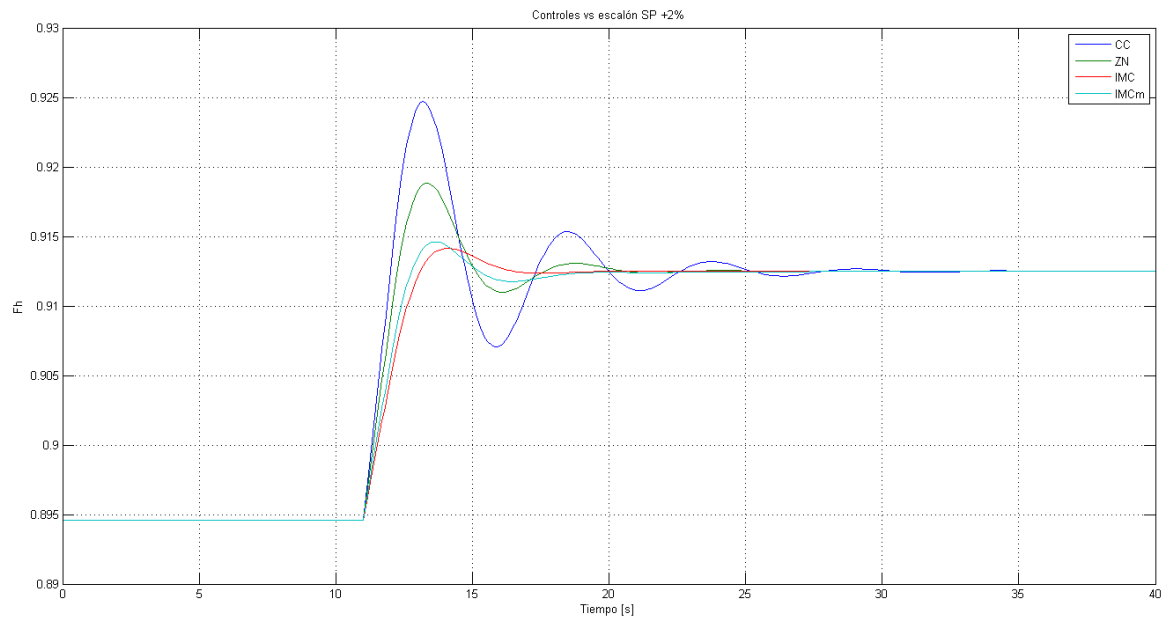


Figura 15: Respuesta de los controladores frente a un escalón de +2% en SP

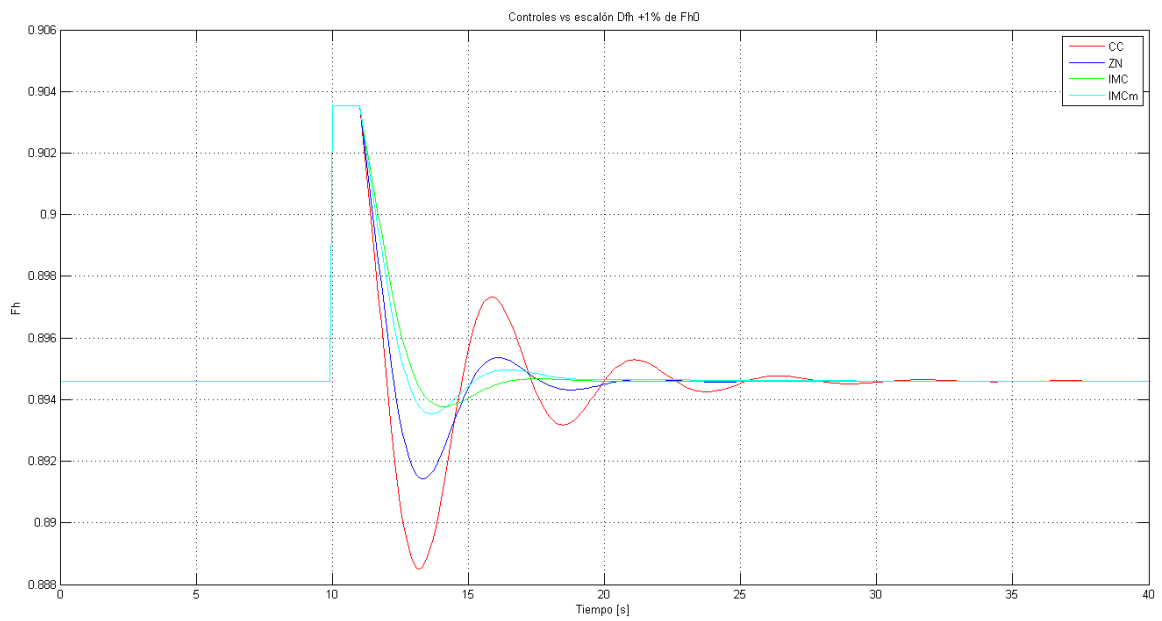


Figura 16: Respuesta de los controladores frente a un escalón de +1% en D_{Fh}

4.2.3. Diseño del controlador del lazo externo

En esta etapa colocamos el lazo interno (sistema válvula+controlador PI) en cascada con la planta y se excitó a ese conjunto a lazo abierto con un escalón de +4 % en F_h . Al igual que en los puntos anteriores, usando la respuesta a este escalón y la función "Cohen-Coon.m" obtenemos una primer aproximación de la transferencia C_E/F_h y luego ajustamos los parámetros.

	Parámetros Cohen Coon	Parámetros Ajustados
K	0.2081	0.2084
τ	30.4956	100
α	35.7784	28

Cuadro 9: Comparación de parámetros del modelo de válvula.

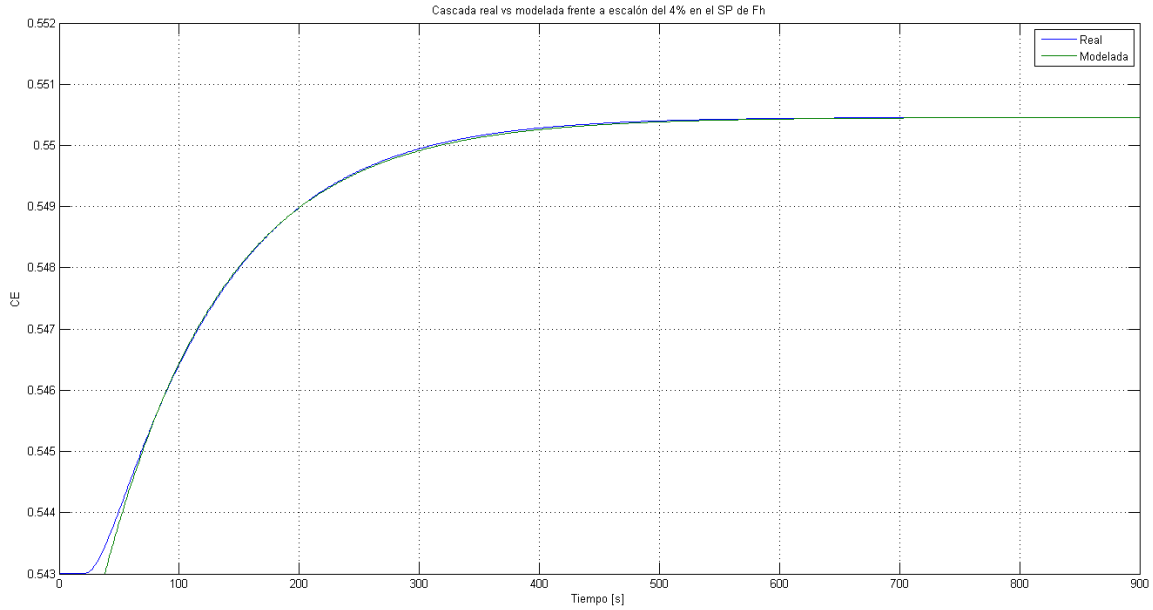


Figura 17: Comparación entre la respuesta del sistema real y su modelo

Con el modelo del sistema en cascada, se utilizó la función "CC_Controladores.mat" para obtener los parámetros del controlador PID a utilizar.

Los parámetros del controlador resultaron: $k_c = 26.791$, $\tau_i = 55.833$, y $\tau_c = 8.6957$.

4.3. Comparación de los esquemas de control

En esta instancia, se sometió a ambos esquemas, control de lazo simple y control en cascada, a los mismos estímulos y se estudiaron sus respuestas para determinar cual ofrecía un control de mayor jerarquía.

Nos resultaba interesante transmitir que, debido a la inexactitud de los parámetros del punto de equilibrio del sistema, ambos esquemas presentan una pequeña evolución al inicio de la simulación, como se ve en la figura 20.

Calculamos el índice IAE para cuantificar las diferencias entre los controladores:

Perturbación	IAE de lazo simple	IAE de cascada
Escalón SP	0.669	0.6196
Escalón D_{F_h}	0.02693	0.01867

Cuadro 10: Comparación de índice IAE de ambos esquemas para cada perturbación

4.4. Conclusiones del Esquema de Control

Vemos que el hecho de realizar un control en cascada puede requerir más esfuerzo, sin embargo las mejoras son evidentes principalmente en el rechazo a perturbaciones no medibles. Podemos verlo materializado tanto en la figura 19, donde el rango de variación de la respuesta es notablemente menor para el sistema en cascada, como en la tabla 10, donde su IAE resulta más de un 30 % menor con respecto al lazo simple.

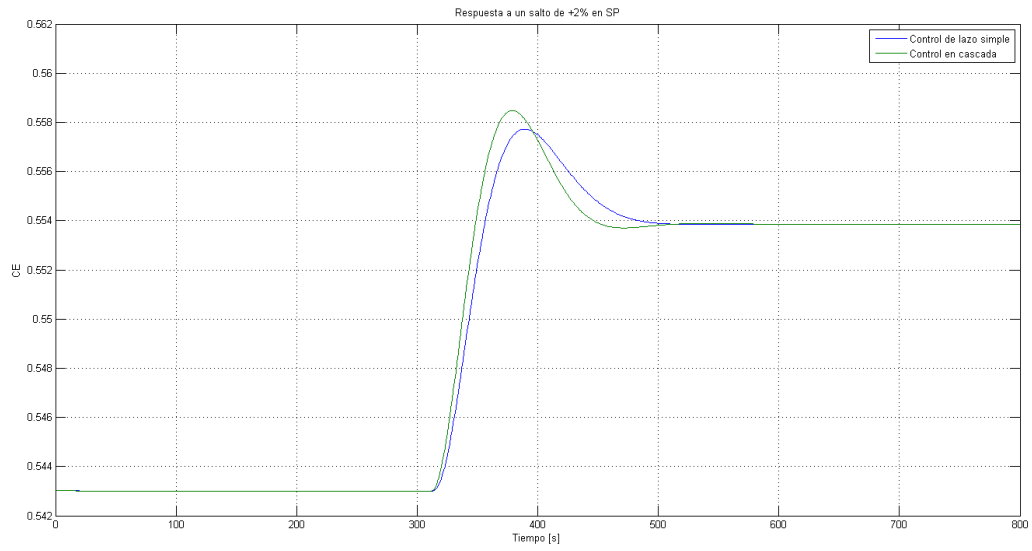


Figura 18: Respuesta a un escalón de +2% SP en $t=300s$ de ambos esquemas

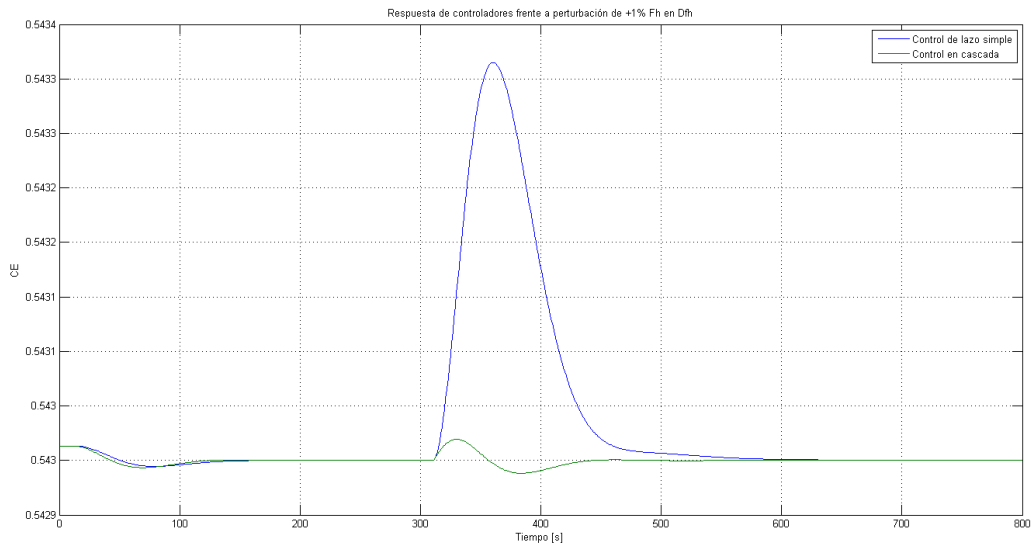


Figura 19: Respuesta a un escalón de +1% D_{Fh} en $t=300s$ de ambos esquemas

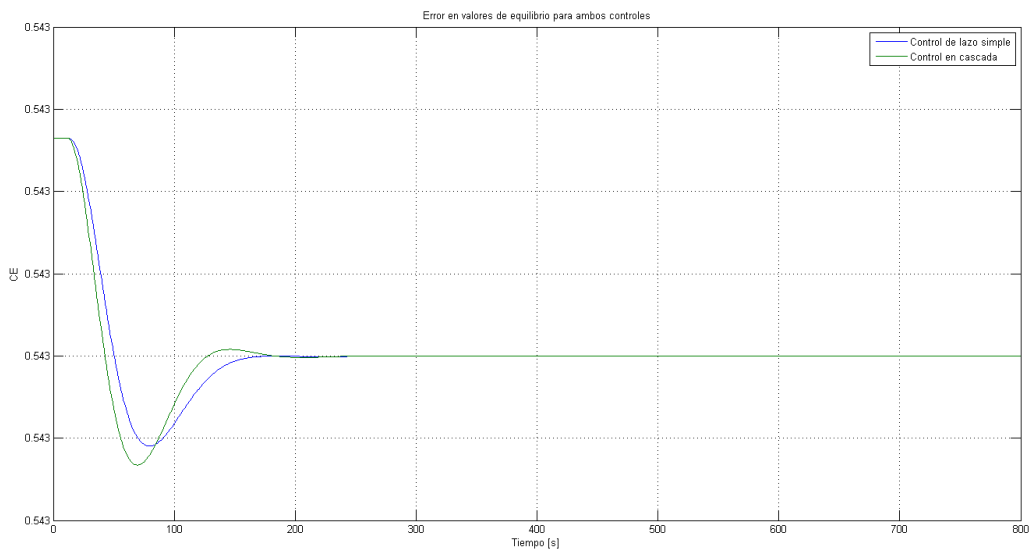


Figura 20: Evolución a lazo cerrado de ambos esquemas sin perturbaciones

5. Conclusiones Generales del TP

Como primer comentario, consideramos que este trabajo nos permitió obtener un entendimiento de los distintos esquemas de control y las situaciones en las que es conveniente utilizar cada uno. Por otro lado pudimos también entender y practicar como modelar funciones transferencias que aproximen el comportamiento de un sistema real.

Ahora en cuanto a nuestra experiencia personal de la realización del TP. Por un lado, en algunos puntos quizás tuvimos algunas dificultades para comprender como trasladar el esquema de control, de la teoría a la implementación en Simulink. También nos permitió reconocer algunas concepciones erróneas que teníamos sobre el funcionamiento de algunos esquemas. En cuanto al uso de las herramientas de software, profundizamos nuestro manejo de MATLAB (y renegamos un poco en el proceso).

Por último, aprovechamos este Trabajo Práctico para realizar nuestro primer informe en la herramienta Latex. Tuvimos algunas dificultades, resultado de nuestra falta de experiencia (sobretudo para ubicar las imágenes). Aun así consideramos que el esfuerzo valió la pena.