Práctica N°4 Control Biológico.

Autor: Tomás Vidal

Notas

- Hay que aclarar que se empleó un punto de referencia arbitrario para los diferentes controladores. Además se emplean mediciones de $\mu(s)$, para lo cual se necesitaria un observador

Preguntas

- ¿Considero S_{in} como un parámetro con incertidumbre?
- ¿Qué tipo de cultivo tengo? Consideré una alimentación continua Fin=Fout entonces $\dot{V}=0$
- ¿En el modelo de $\mu(s)$ considero n es staturación y se cancela?
- En el control linealizante, ¿por qué no se llega a la convergencia?
- El método es simplemente ignorar que existe una función dependiente del sustrato? se podría implementar un observador, pero vale la pena? En este caso el sustrato converge a cero de todas maneras

Índice

Proceso de bioplástico (PHB)

$k_{S1}S + k_N N \rightarrow r_x X + k_{P1}P$

$k_{S2}S \rightarrow r_p P$

El proceso es modelado con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x} = r_x x - Dx$$

$$\dot{s} = -k_{s1}r_x - k_{s2}r_p + D(s_i - s_j)$$

$$\dot{N} = -k_N r_x + D(n_i - n)$$

$$\dot{p} = k_{s2}r_p - Dp$$

En forma vectorial:

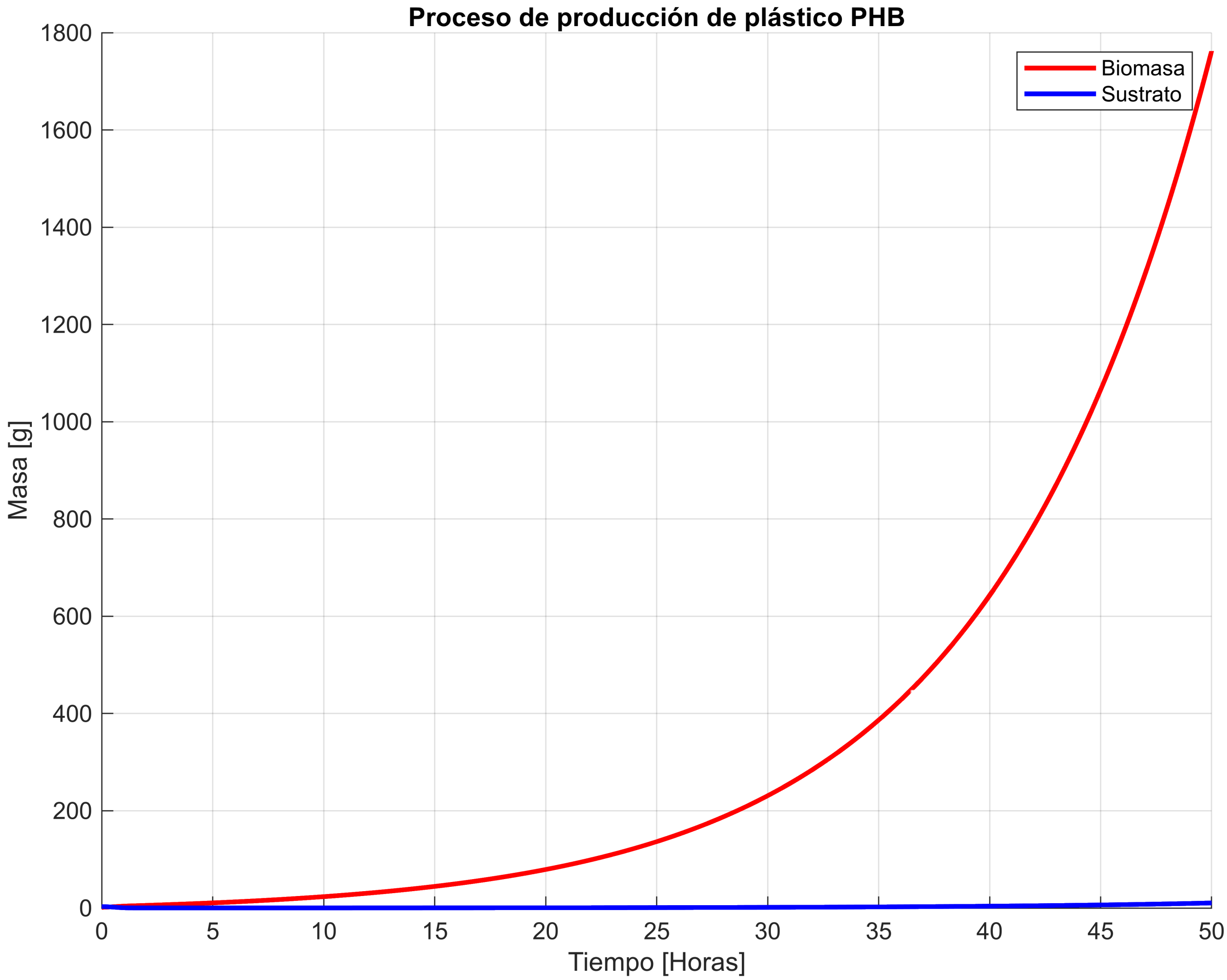
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{s} \\ \dot{n} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -K_{s1} & -K_{s2} \\ -K_N & 0 \\ K_{p1} & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ s \\ n \\ p \end{bmatrix} + D * \begin{bmatrix} -x \\ s_{in} - s \\ n_{in} - n \\ -p \end{bmatrix}$$

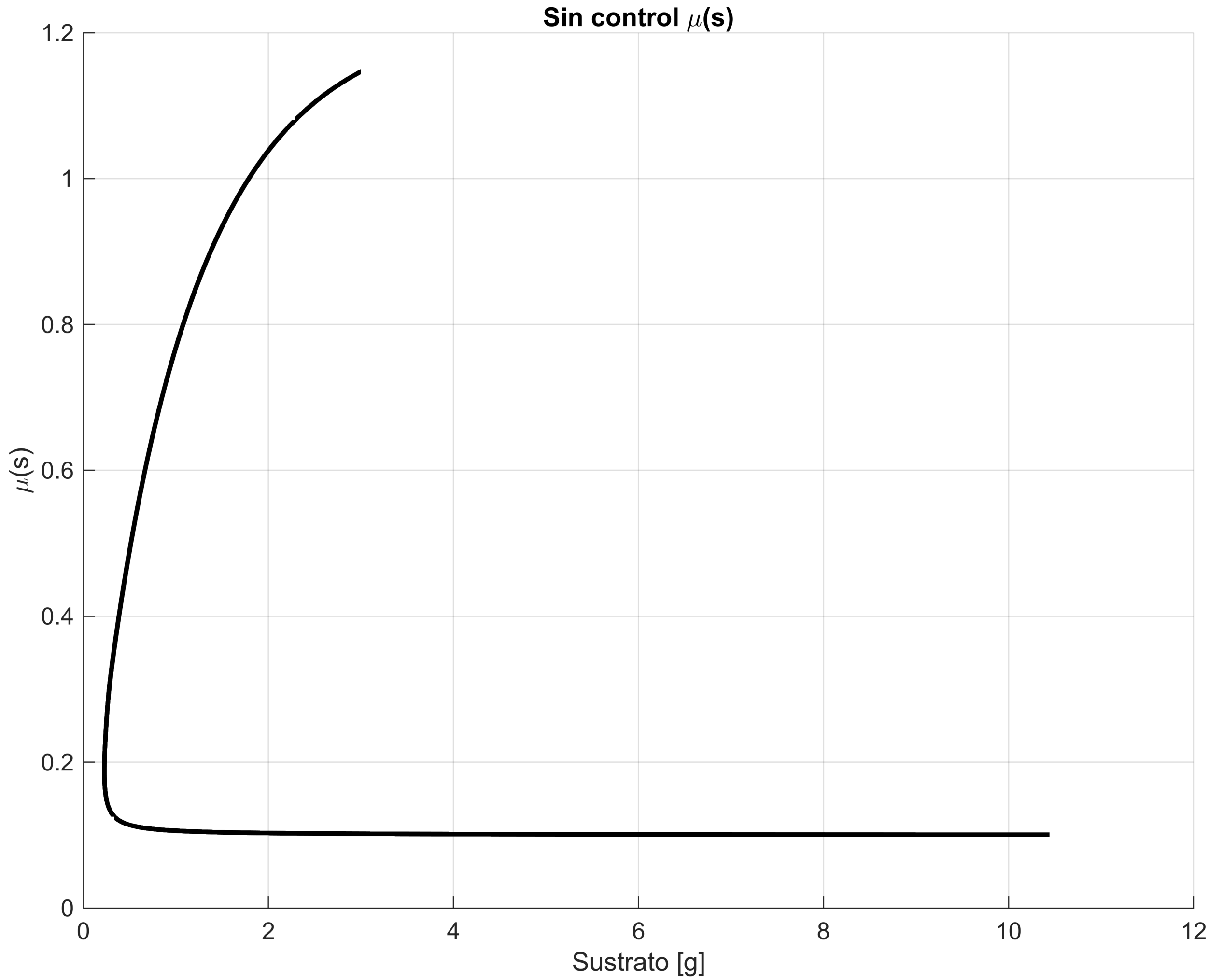
Pero si se considera que solo vamos a simular la fase de producción de microorganismos, podemos descartar la variación en el plástico, porque no hay producción del mismo y además podemos tomar que la cantidad de nitrógeno es tanta que siempre está en saturación, por lo que no varía tampoco. Entonces se tiene el siguiente modelo reducido:

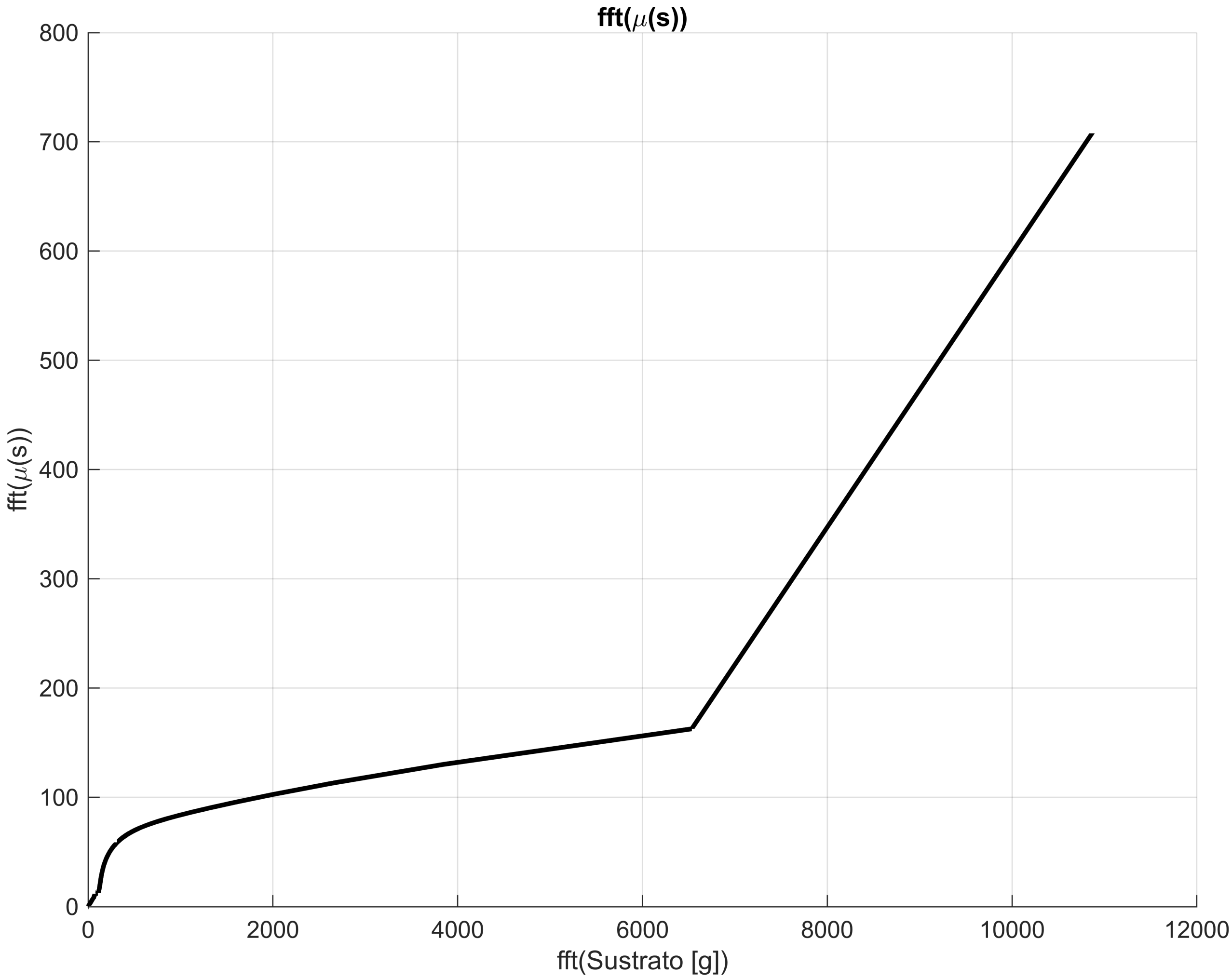
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -K_{s1} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ s \end{bmatrix} - D * \begin{bmatrix} x \\ s \end{bmatrix}$$

Además la matrix K se reduce a 1 columna porque no hay tasa de producción de plástico, por lo explicado anteriormente.

Este modelo reducido de 2x2 es el que se emplea a continuación para todas las simulaciones.


Proceso de producción de plástico PHB
Masa [g]
Tiempo [Horas]
Biomasa
Sustrato
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50

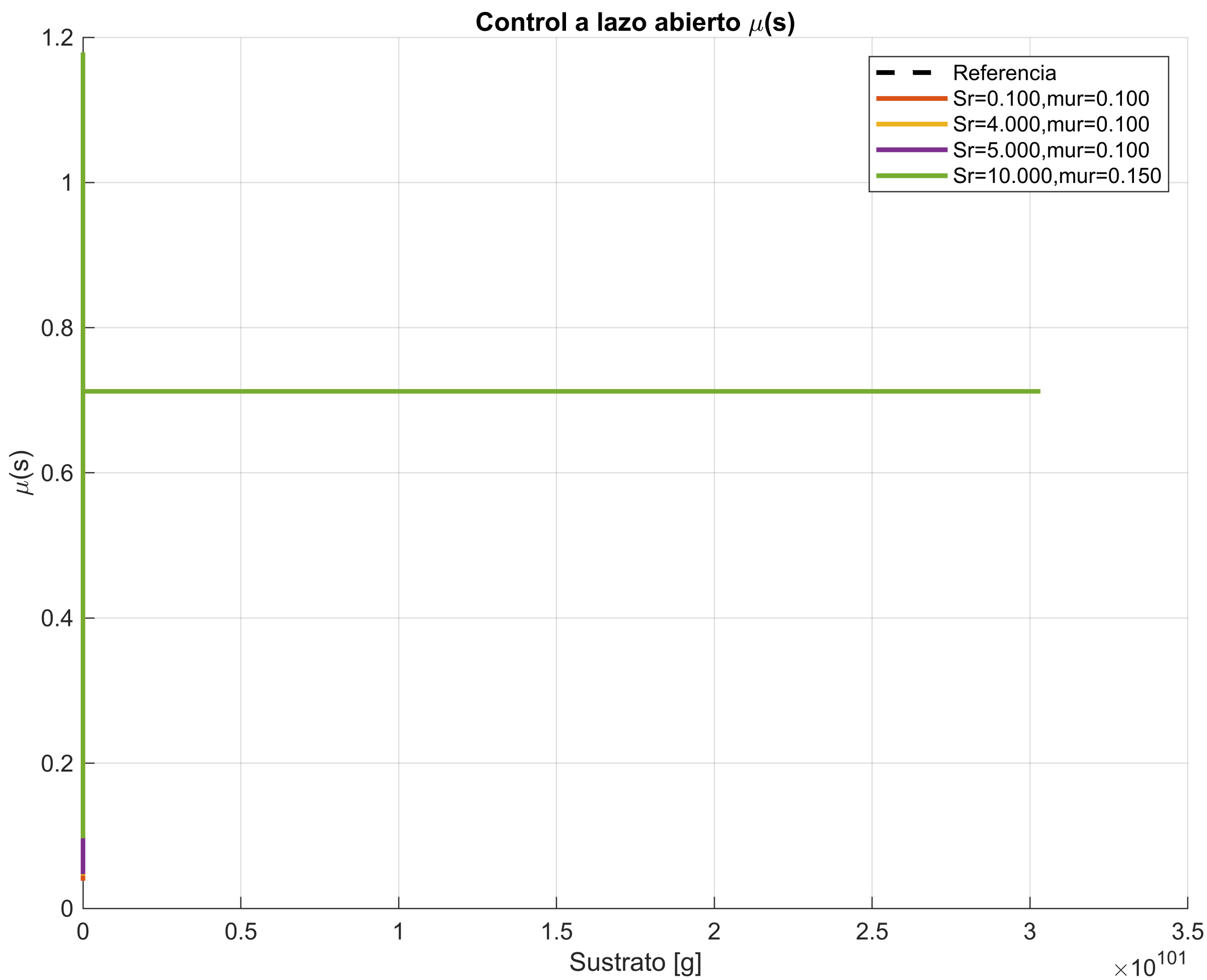

Sin control μ(s)
μ(s)
Sustrato [g]
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
2
4
6
8
10
12



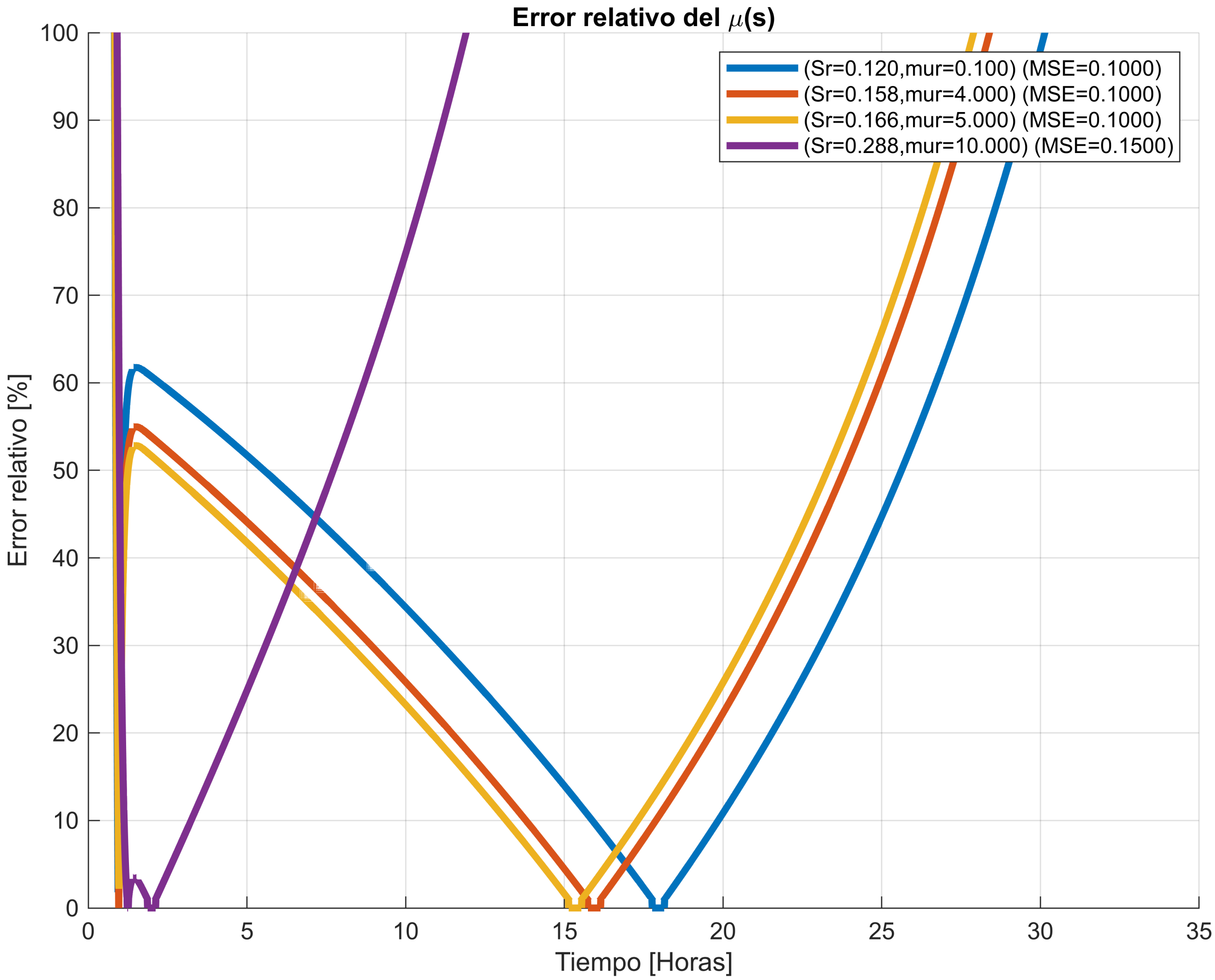
Control exponencial a lazo abierto

Se hace una alimentación exponencial de masa a lazo abierto. Se prueban diferentes puntos de operación.

Resultados



Errores relativos



Conclusiones:

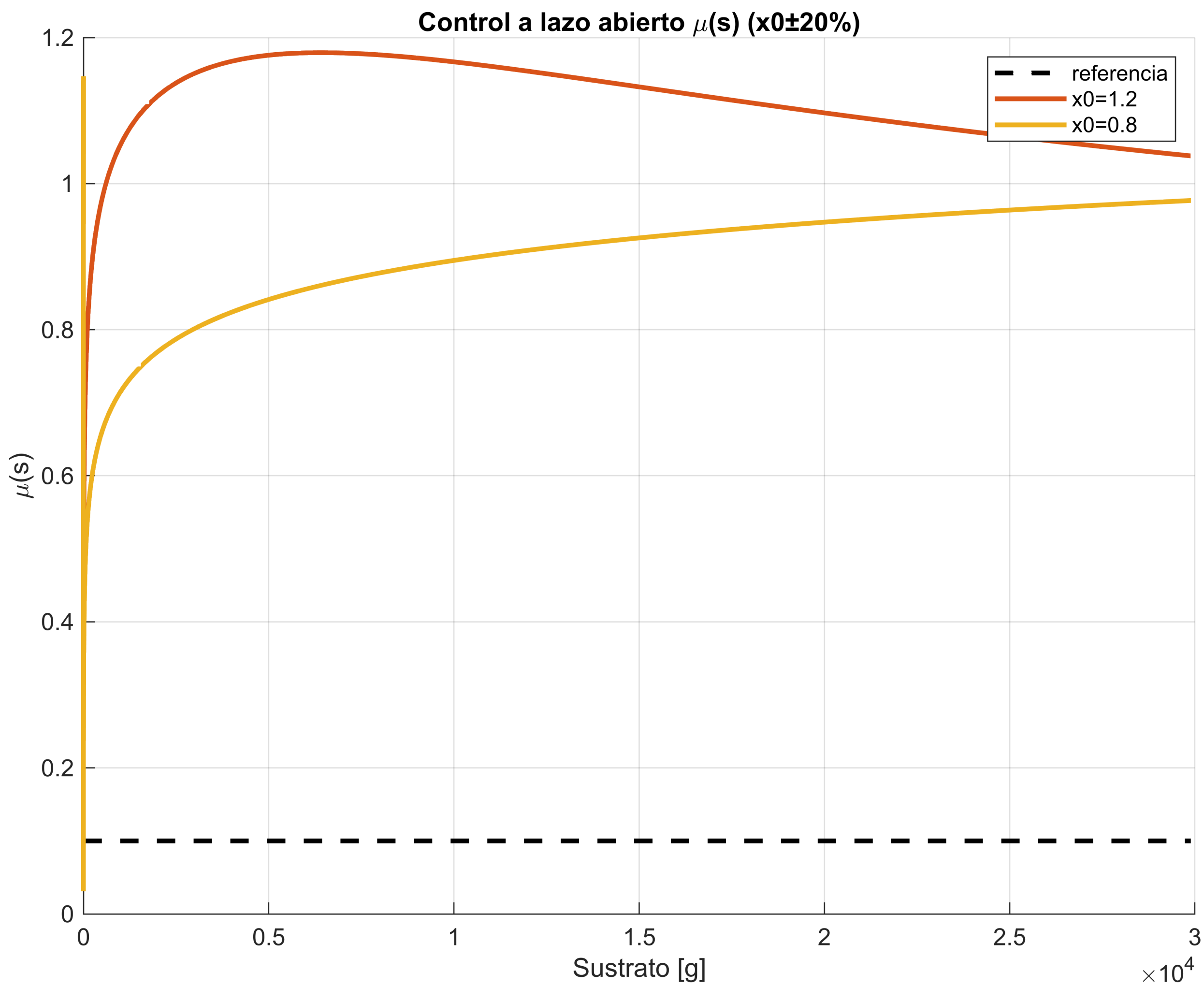
Se tiene mucho error y no hay convergencia al punto de referencia deseado

Variaciones en los parámetros

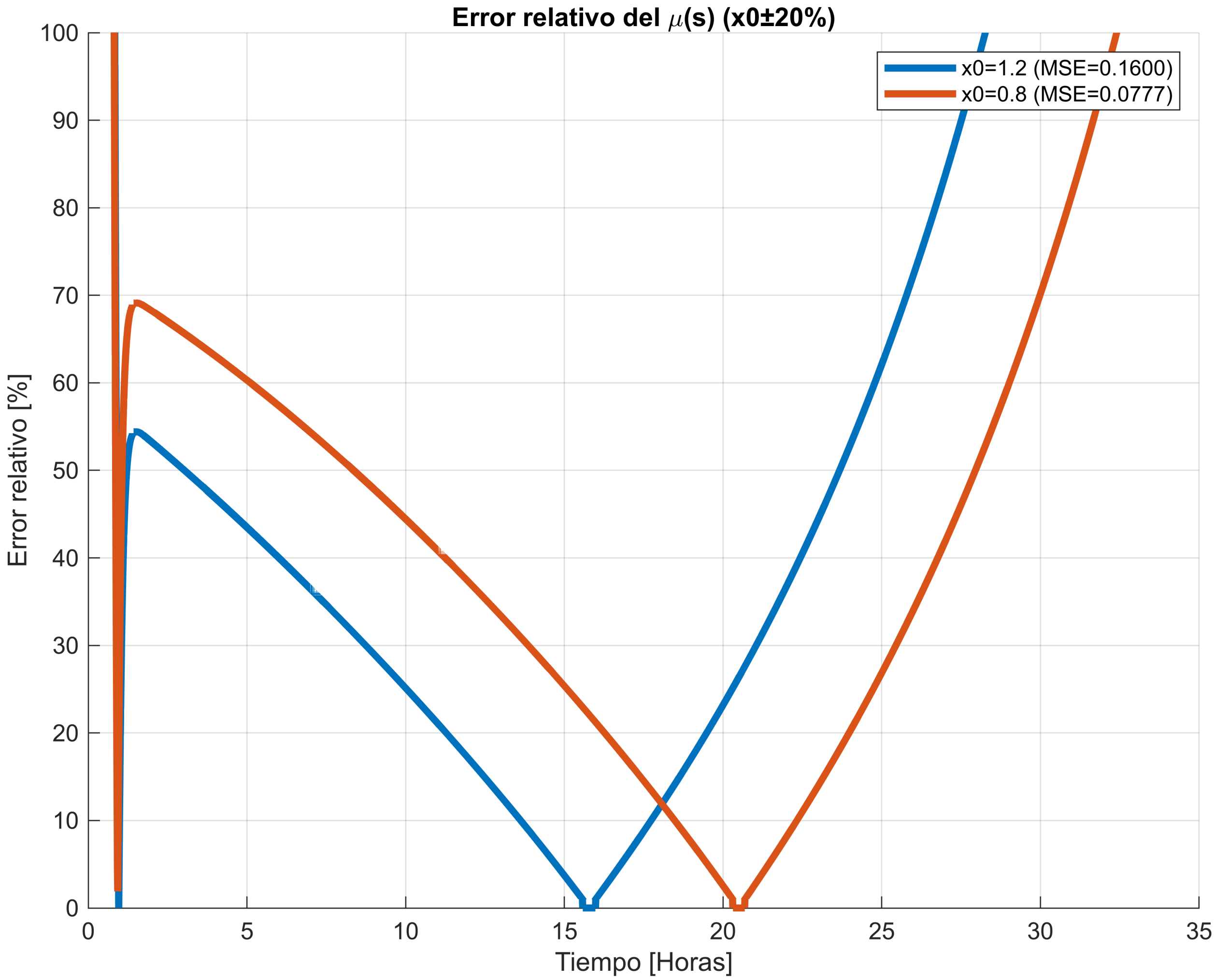
Incertidumbre en x0

Controlado con C(s)=Kp y variaciones en las condiciones iniciales:

Ahora se muestran los resultados, comparando el caso cuando se tiene variaciones en las condiciones iniciales y como los controadores empleados responden a estas variaciones, es decir su robustez.



Errores relativos

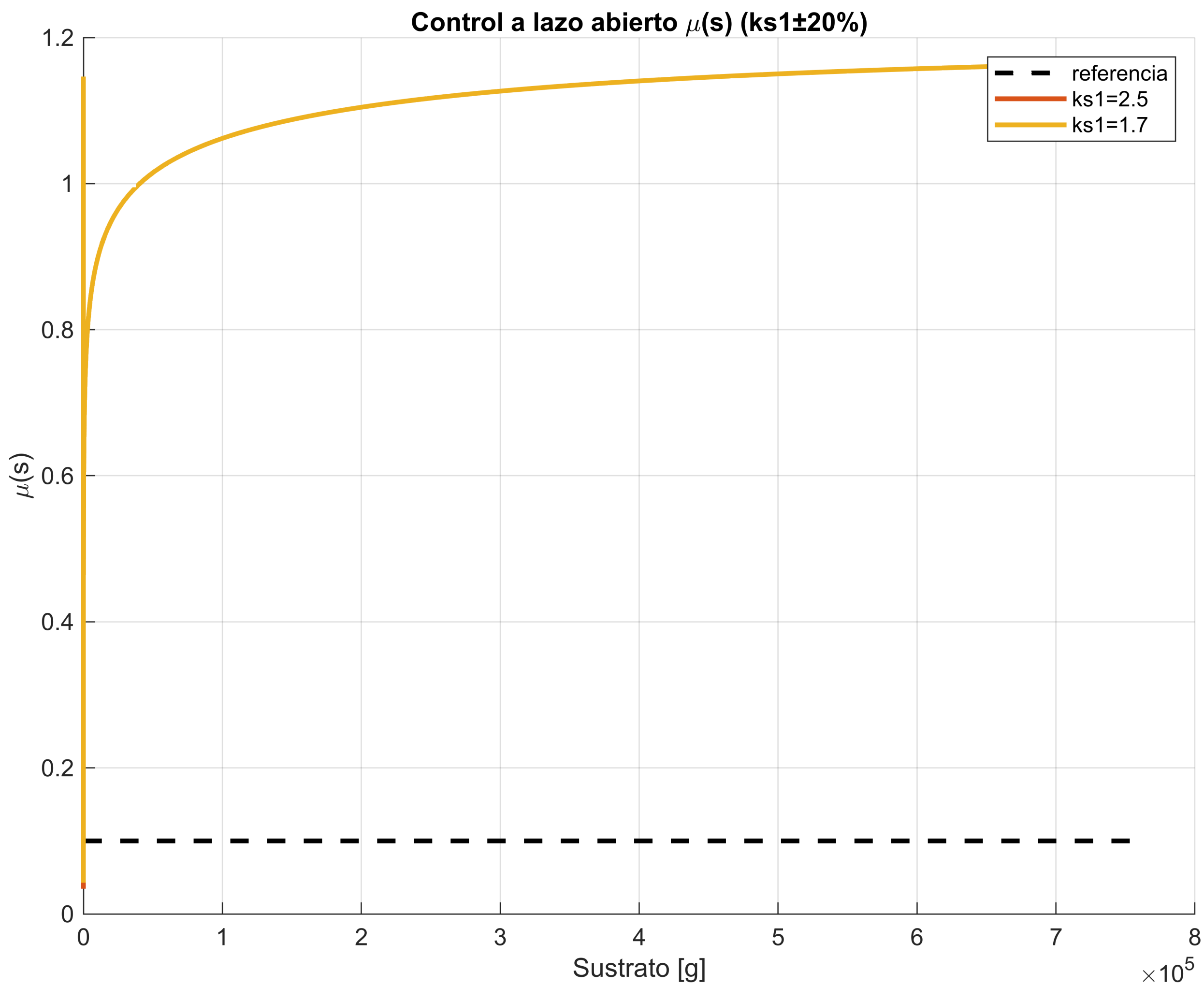


Ambos terminan convergiendo a pesar de tener un error en el valor inicial.

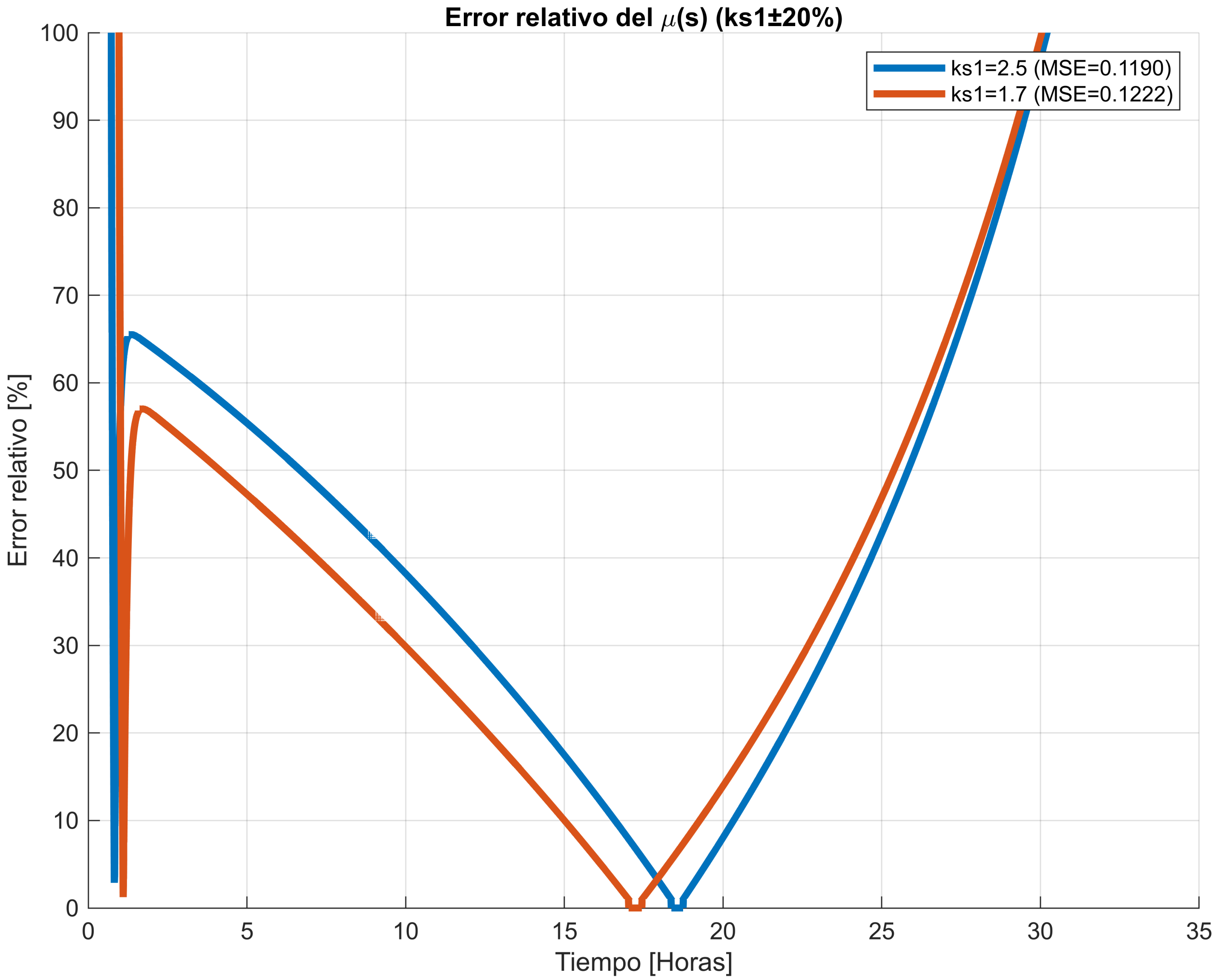
Incertidumbre en ks1

Ahora hago lo mismo que antes pero variando k_{s1}

Ahora se muestran las gráficas



Y las del error relativo son:

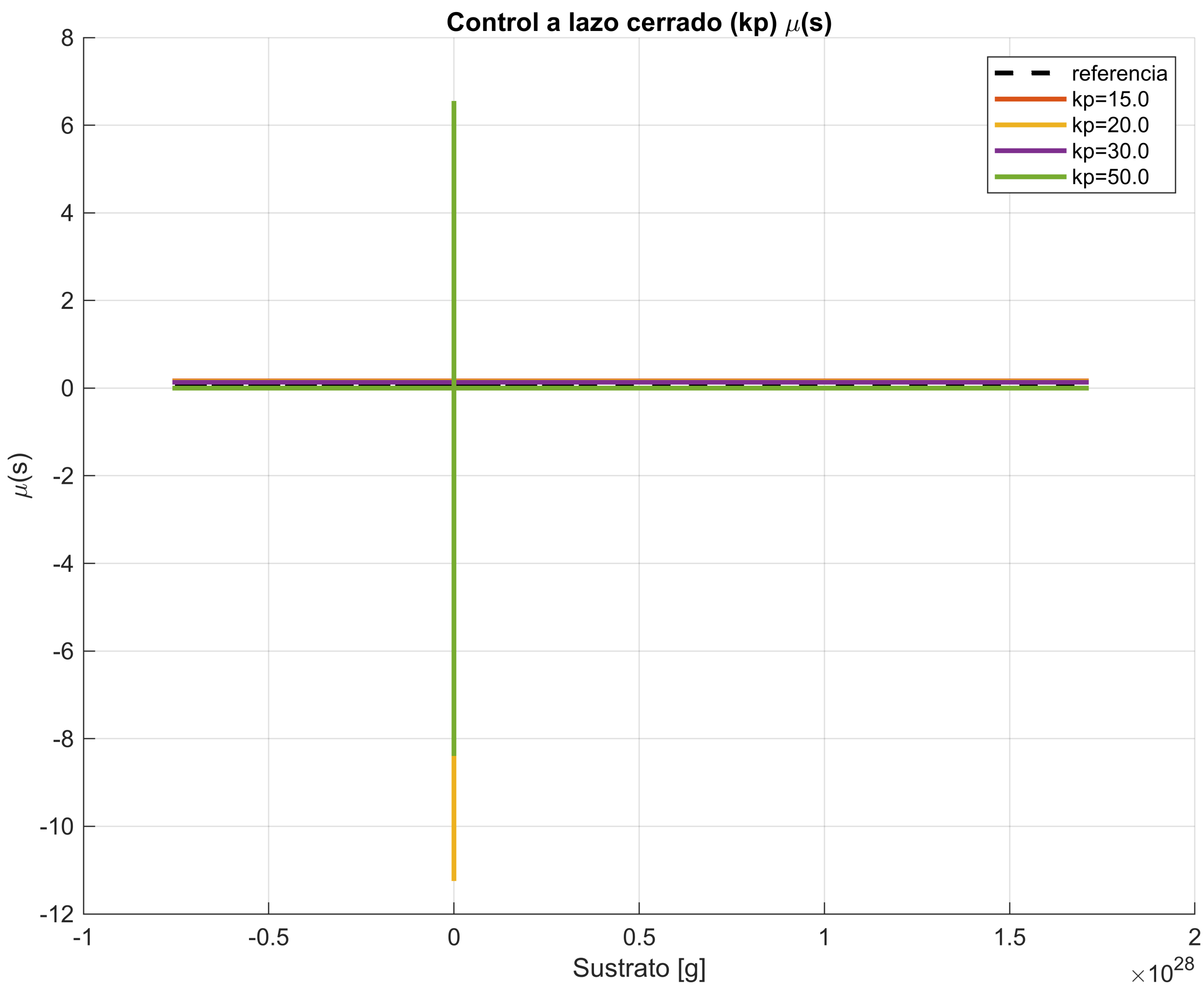


Viendo los resultados, se podría concluir que es más robusto ante variaciones en k_{s1} que de x_0

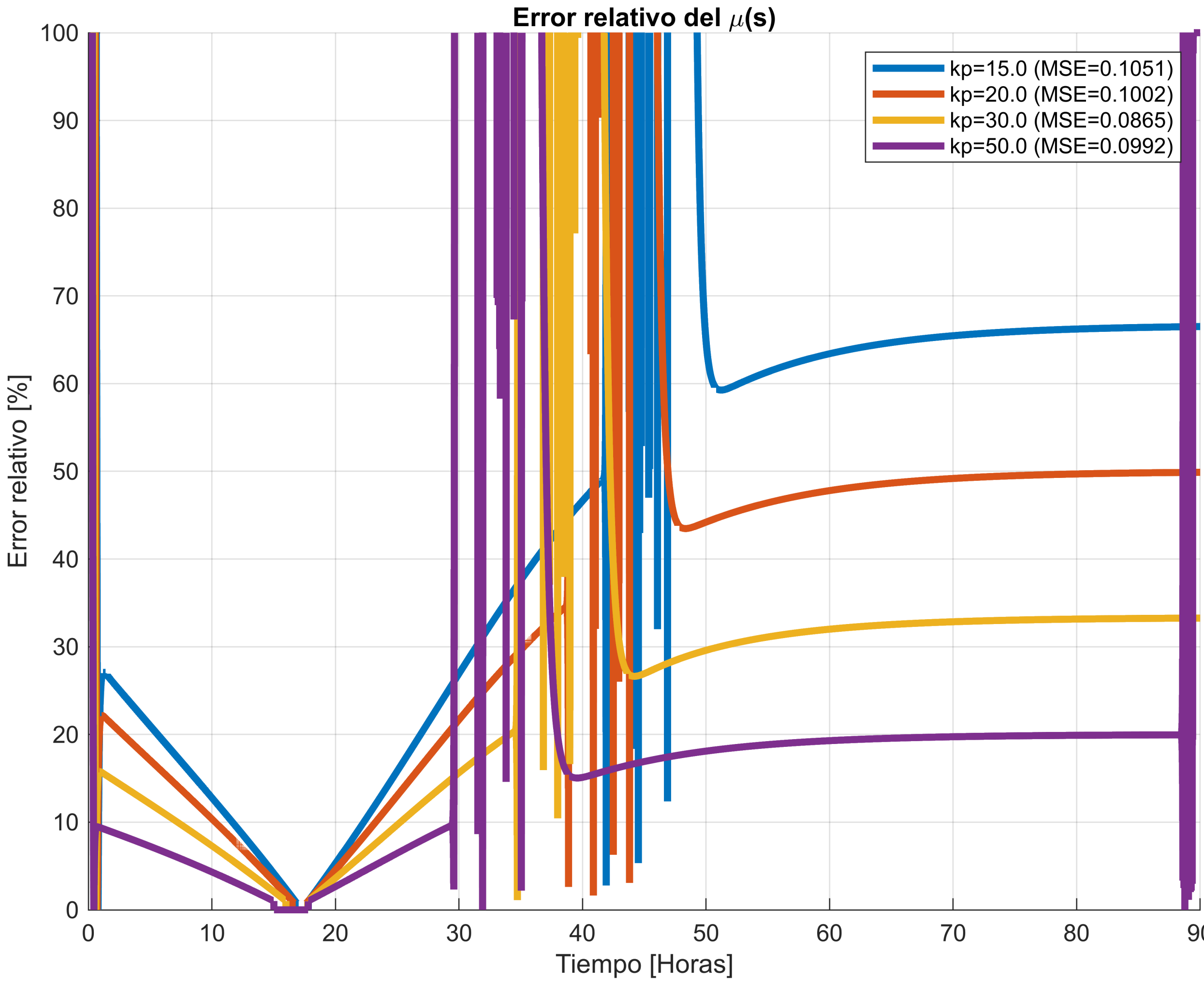
Control a lazo cerrado

Control proporcional al error

Ahora trato de implementar una ley de alimentación exponencial a lazo cerrado



Control a lazo cerrado (kp) μ(s)
referencia
kp=15.0
kp=20.0
kp=30.0
kp=50.0
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
μ(s)
-1
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
Sustrato [g]
$\times 10^{28}$



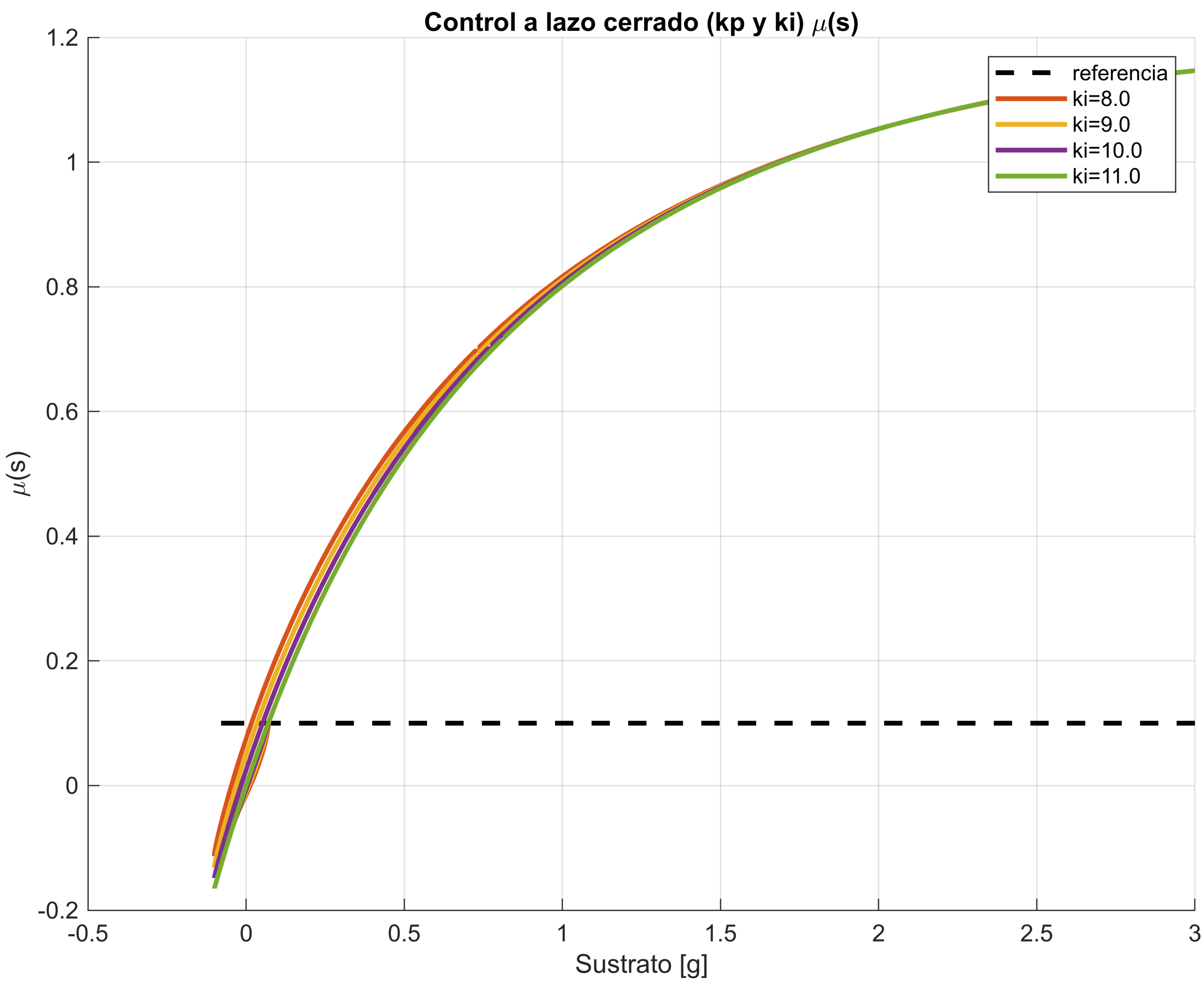
Conclusiones

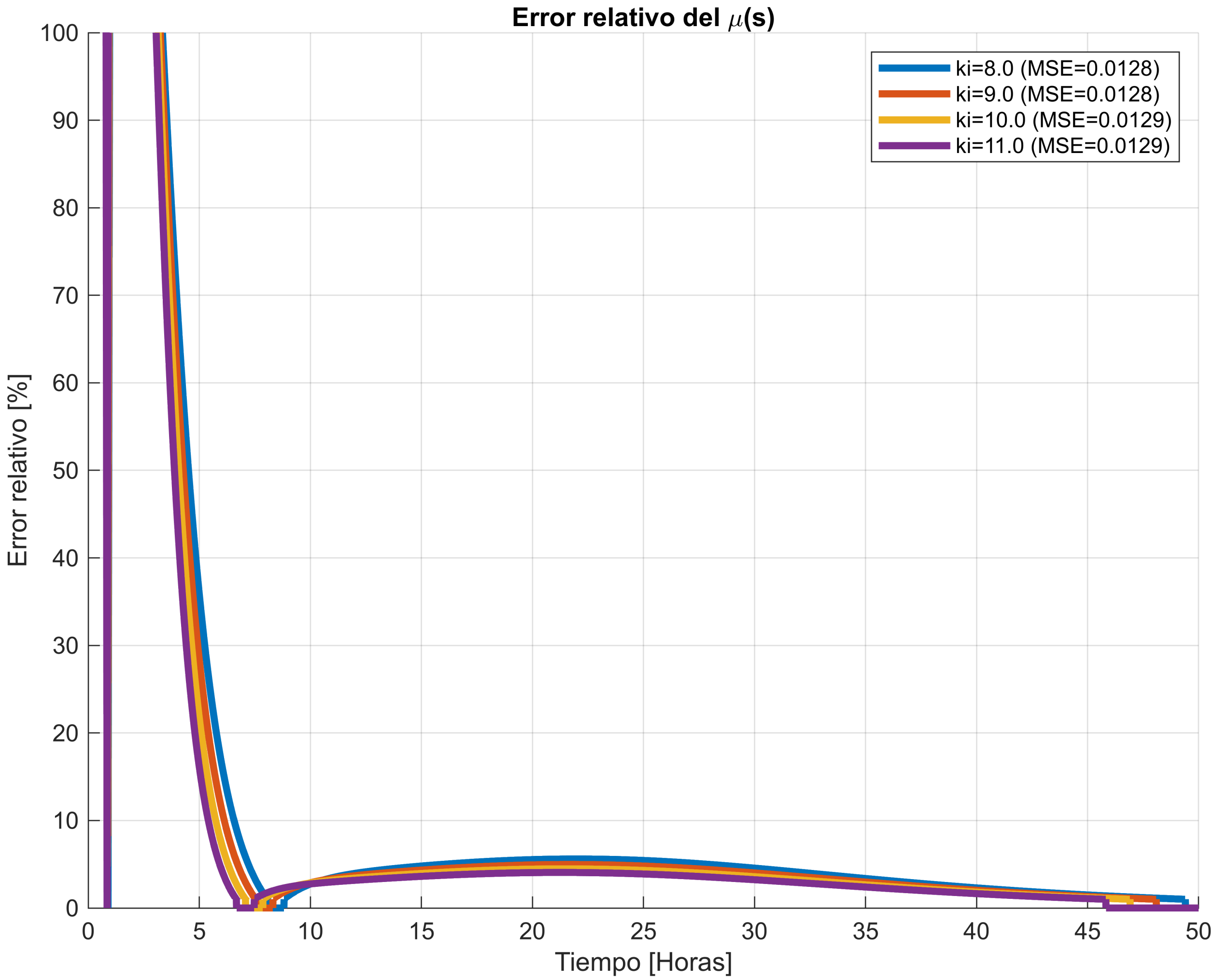
Ahora teniendo esta ganancia proporcional al error se tiene mucho menor error final, a diferencia de antes, además y más importante, se tiene una dinámica que termina convergiendo al valor de referencia, aunque el error de convergencia no es 0, sino que se tiene un error al estado estacionario no nulo que depende de la ganancia k_p, a medida que esta se incrementa se tiene menor error de estado estacionario, además se puede observar que converge a este valor final aproximadamente en las 70hs, lo cual puede ser o no suficiente.

La simulación no se ve muy bien probablemente por el paso elegido, pero con un paso más pequeño la simulación no se puede ejecutar, ya que se requieren 80GB de RAM.

Proporcional integrativo

Ahora agrego un término integrativo


Control a lazo cerrado (kp y ki) μ(s)
referencia
ki=8.0
ki=9.0
ki=10.0
ki=11.0
μ(s)
Sustrato [g]
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3



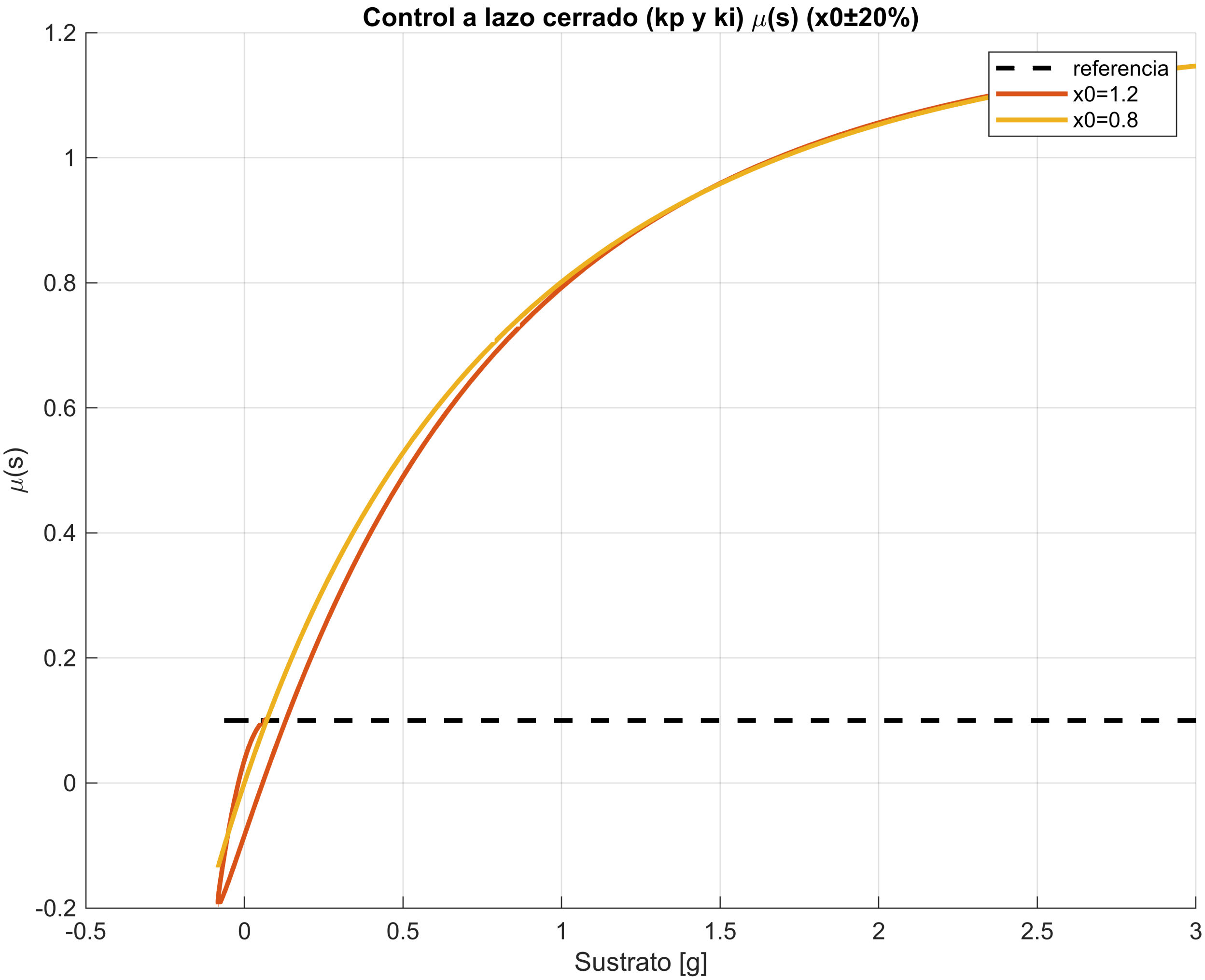
Conclusiones

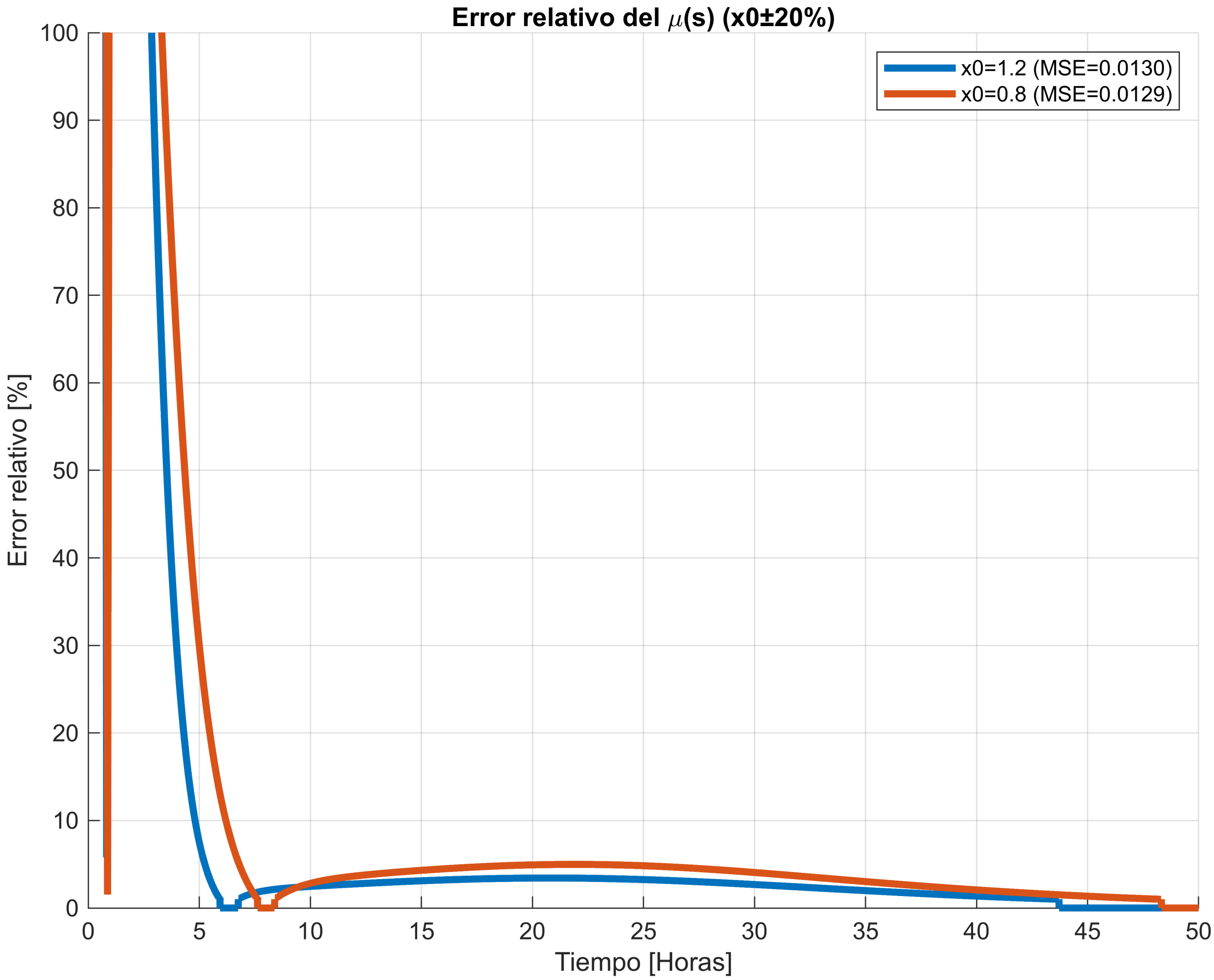
Se puede ver que ahora con el término integrativo del error se elimina el error al estado estacionario, la convergencia a la referencia es eventual, y toma aproximadamente 50 horas, además este tiempo de convergencia es dependiente de la ganancia k_i y k_p, pero estas también afectan la estabilidad y el sobrepico.

Robustez del controlador a lazo cerrado (integrador)

Se comprueba la robustez al igual que antes, pero solo para el caso donde se tiene un integrador

Variaciones en x0

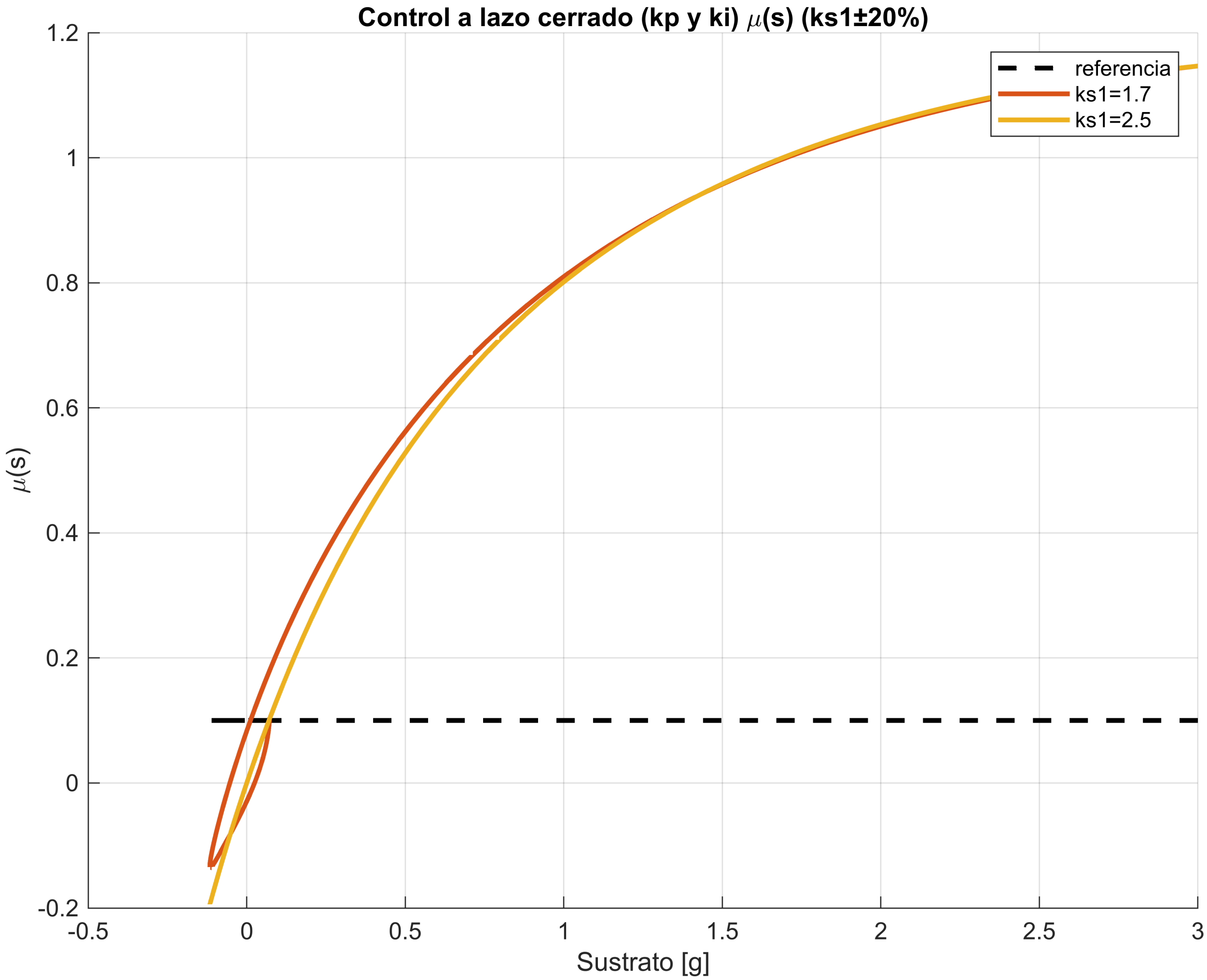

Control a lazo cerrado (kp y ki) μ(s) (x0±20%)
referencia
x0=1.2
x0=0.8
μ(s)
Sustrato [g]
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3

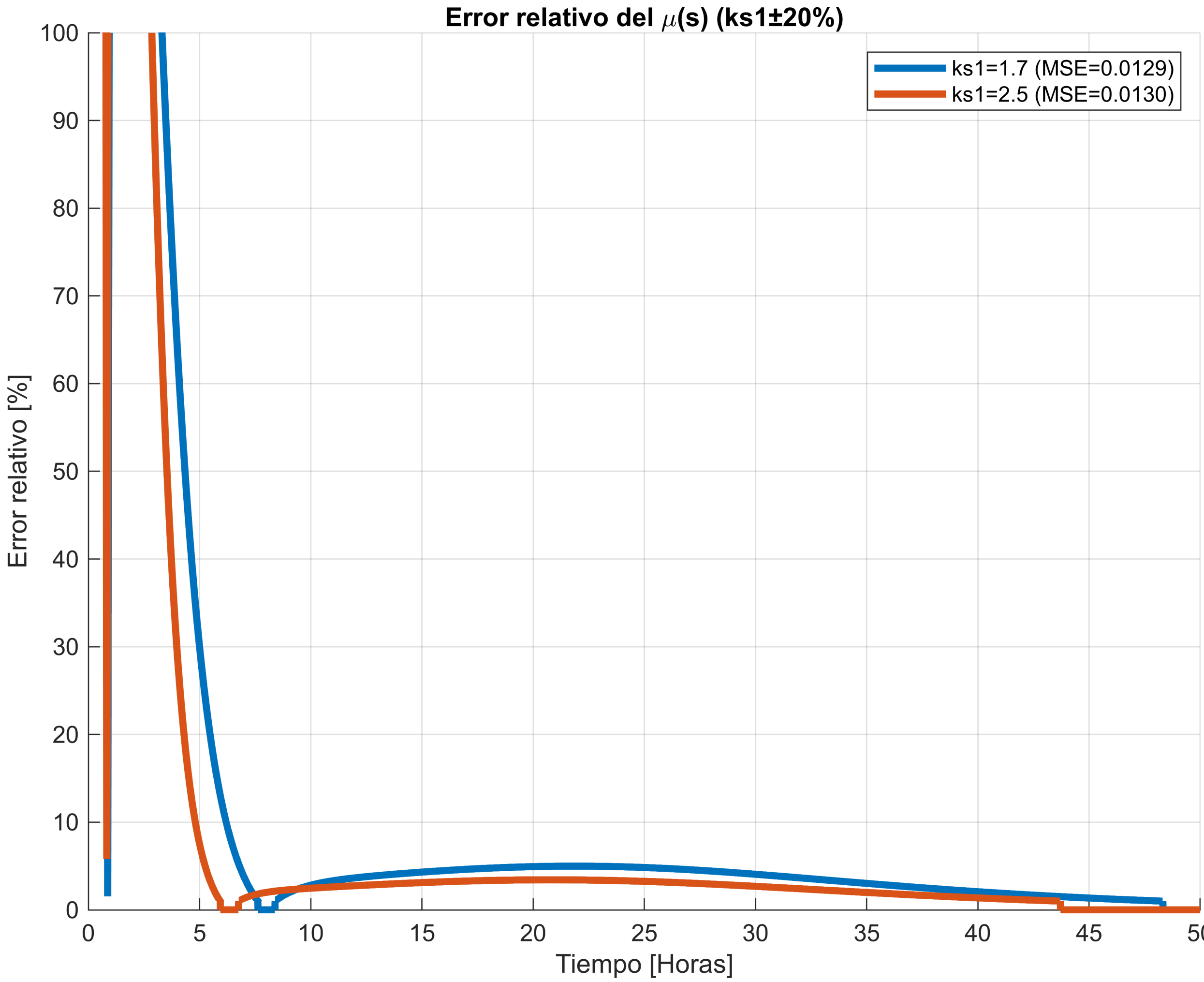


Conclusiones

Se tienen variaciones en el transitorio, pero se tiene convergencia de todas formas en el mismo tiempo que antes, por lo que este controlador es muy robusto a variaciones de x_0

Variaciones en ks1


Control a lazo cerrado (kp y ki) μ(s) (ks1±20%)
referencia
ks1=1.7
ks1=2.5
μ(s)
Sustrato [g]
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3

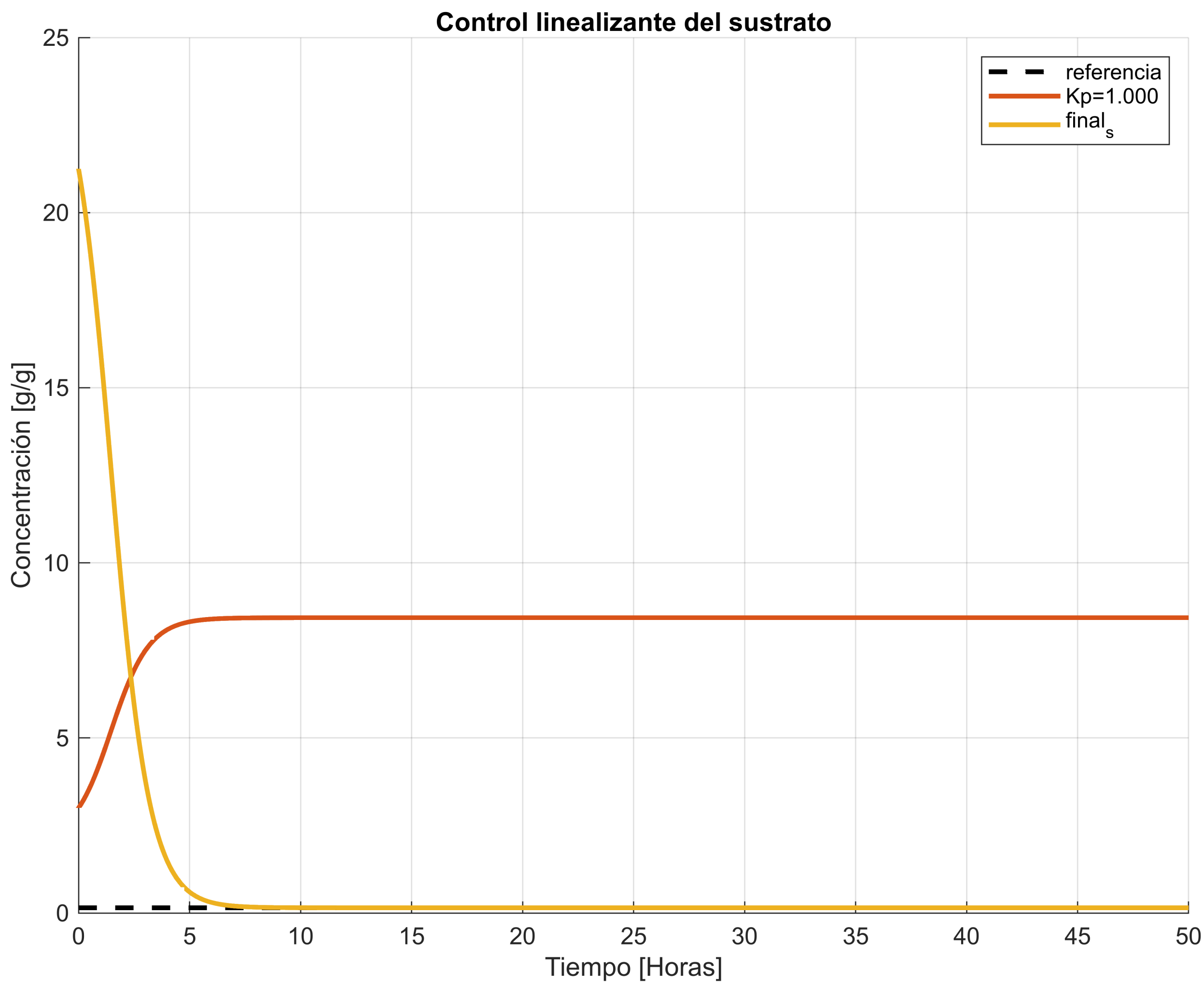


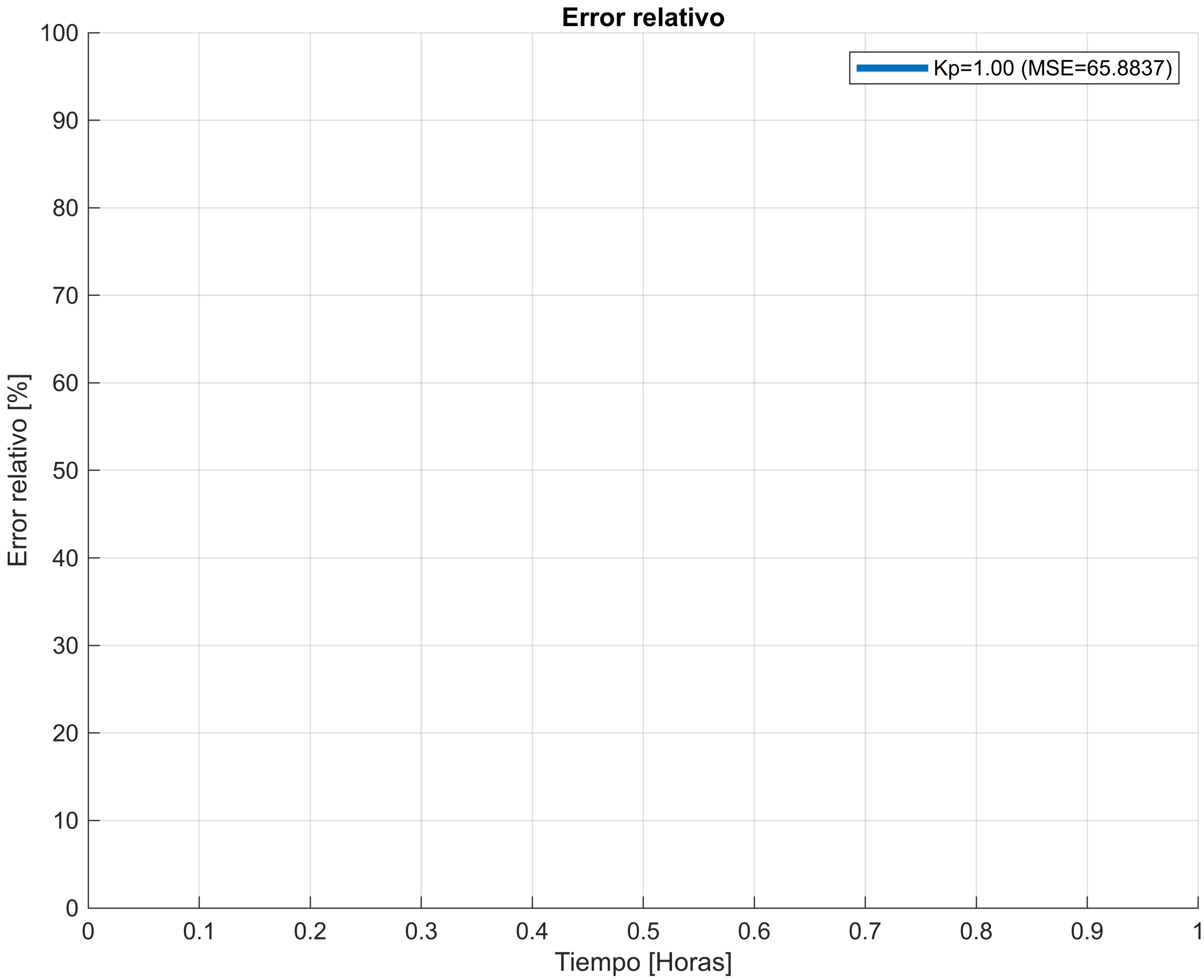
Conclusiones

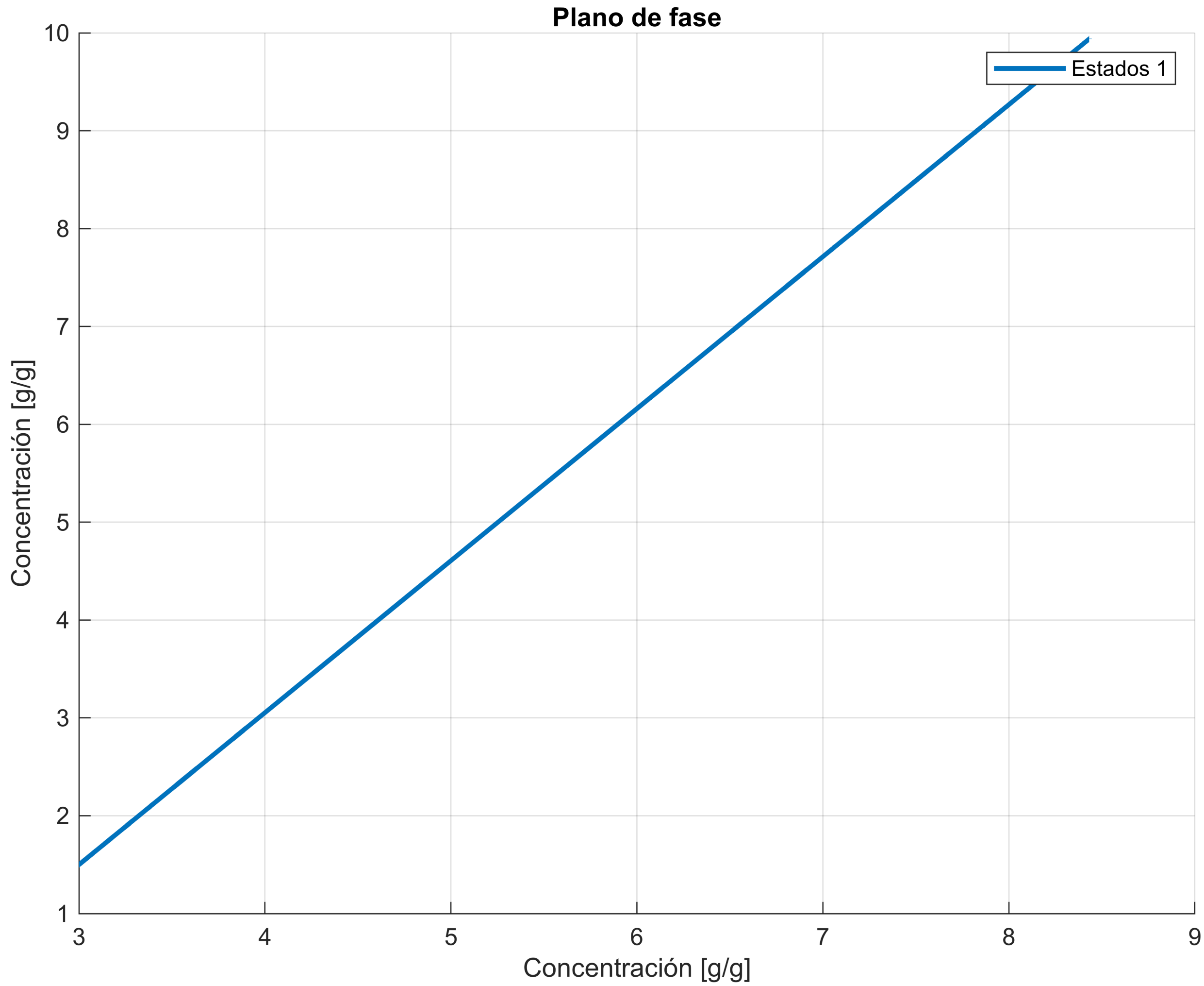
Al igual que antes se tiene robustez ante variaciones de este parámetro, ya que se termina convergiendo al valor en el mismo tiempo que antes.

Control linealizante

Se quiere regular la concentración de sustrato implementando un control linealizante


Control linealizante del sustrato
referencia
Kp=1.000
final_s
Concentración [g/g]
Tiempo [Horas]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50


Error relativo
Kp=1.00 (MSE=65.8837)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Error relativo [%]
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
Tiempo [Horas]

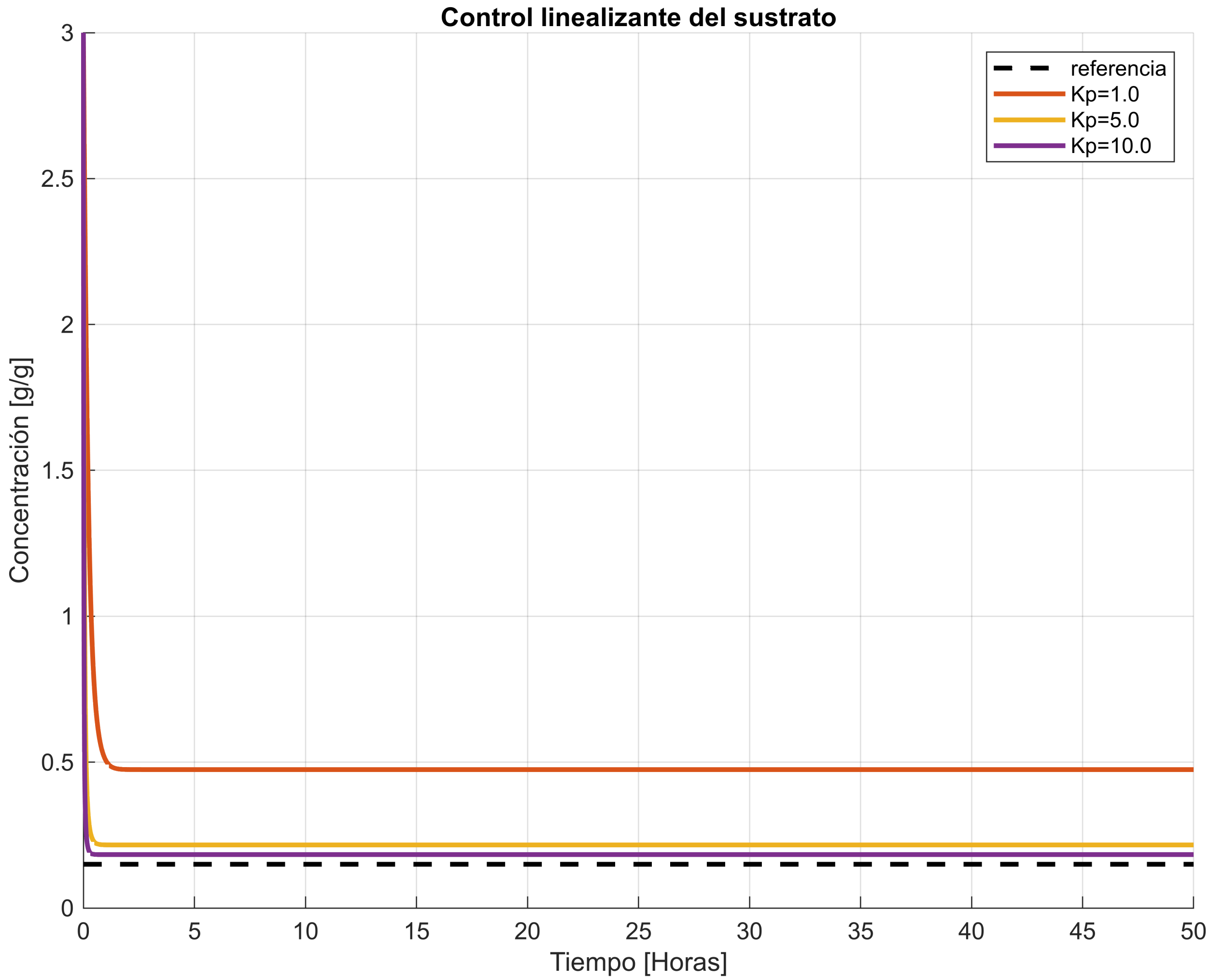


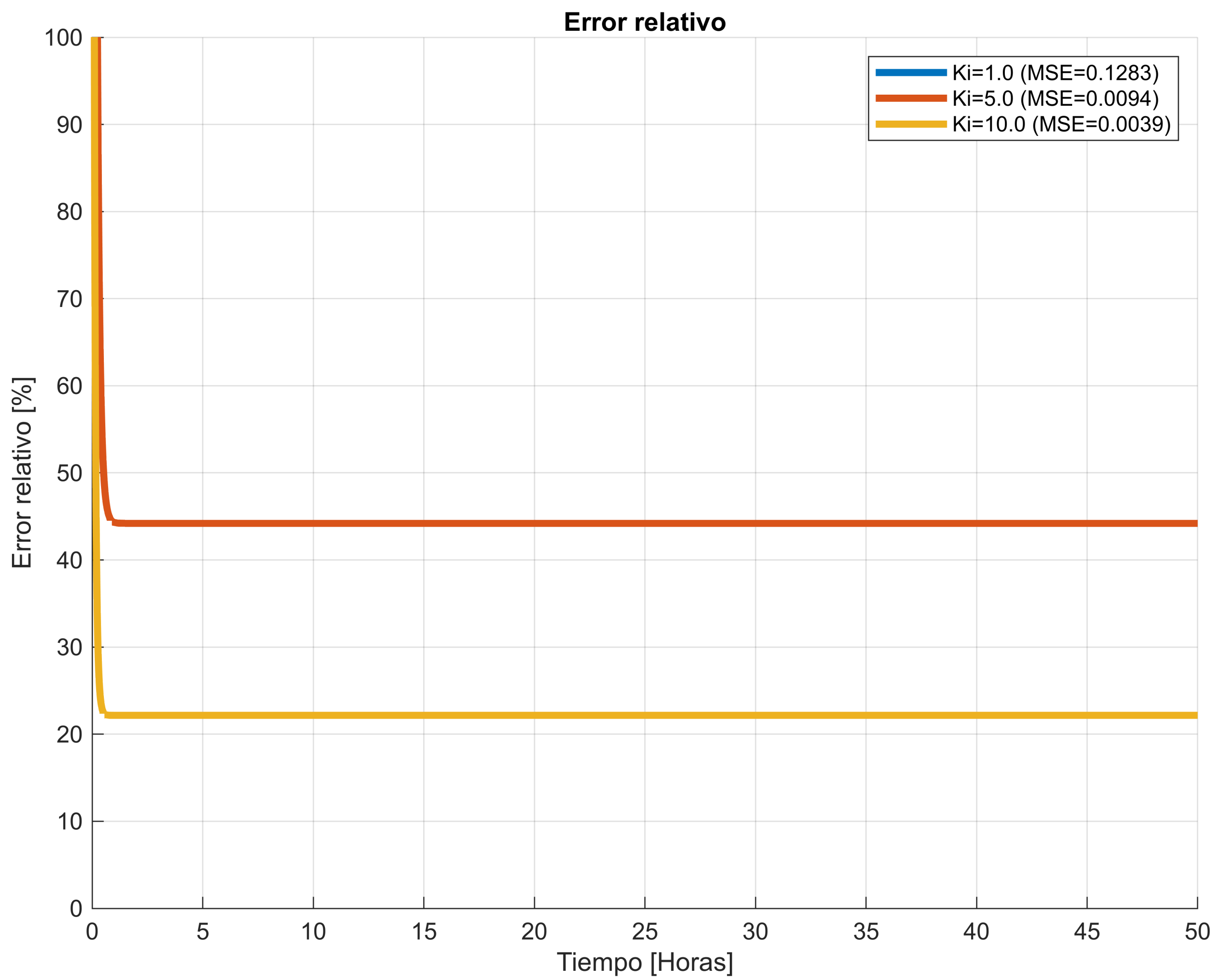
Conclusiones

No entiendo exactamente la razón de la no convergencia, siendo además que se se llega al valor teórico de $s = s_{\text{in}} - x\, k_{s1}$

Control linealizante con kp del error

Se agrega un término proporcional al error


Control linealizante del sustrato
referencia
Kp=1.0
Kp=5.0
Kp=10.0
Concentración [g/g]
Tiempo [Horas]
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50

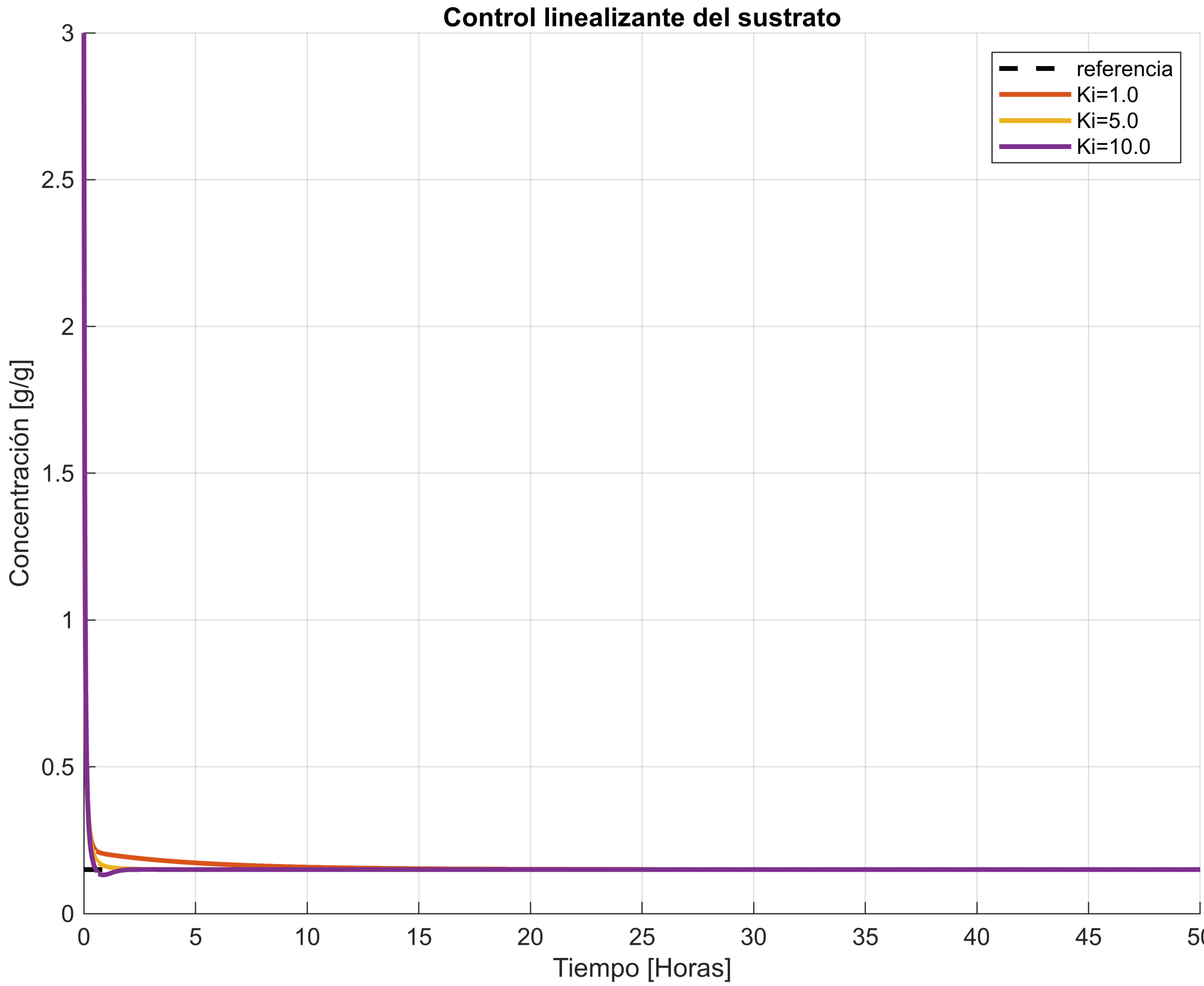


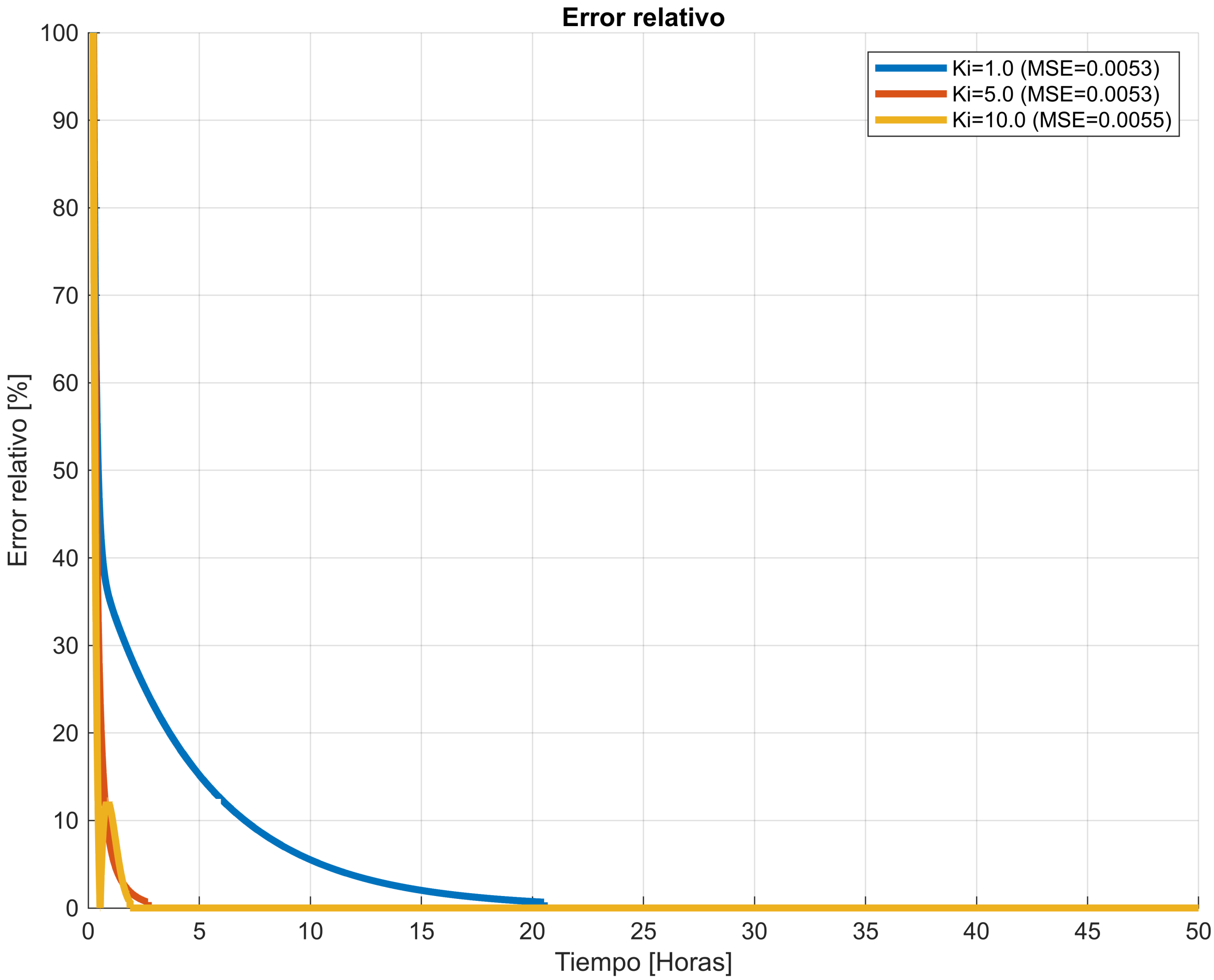
Conclusiones

Ahora se tiene algo que converge a un error menor, pero todavía se tiene un error al estado estacionario.

Control linealizante con kp y ki del error

Se agrega un término proporcional al error


Control linealizante del sustrato
referencia
Ki=1.0
Ki=5.0
Ki=10.0
Concentración [g/g]
Tiempo [Horas]
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50



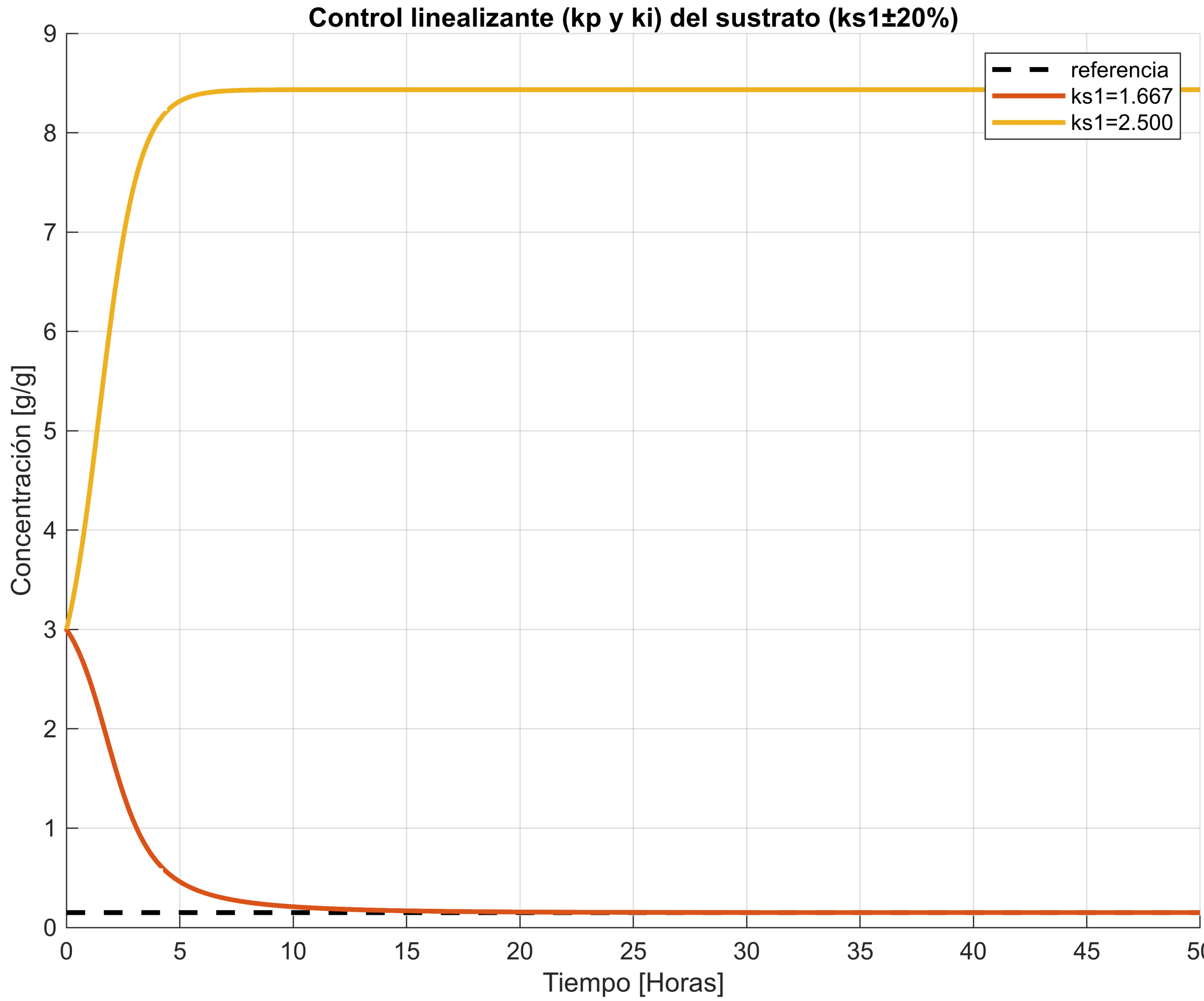
Conclusiones

Converge con error nulo, es el mejor caso posible. Además con una buena gannacia de integración k_i se tiene una convergencia en menos de 5 horas, que es bastante bueno.

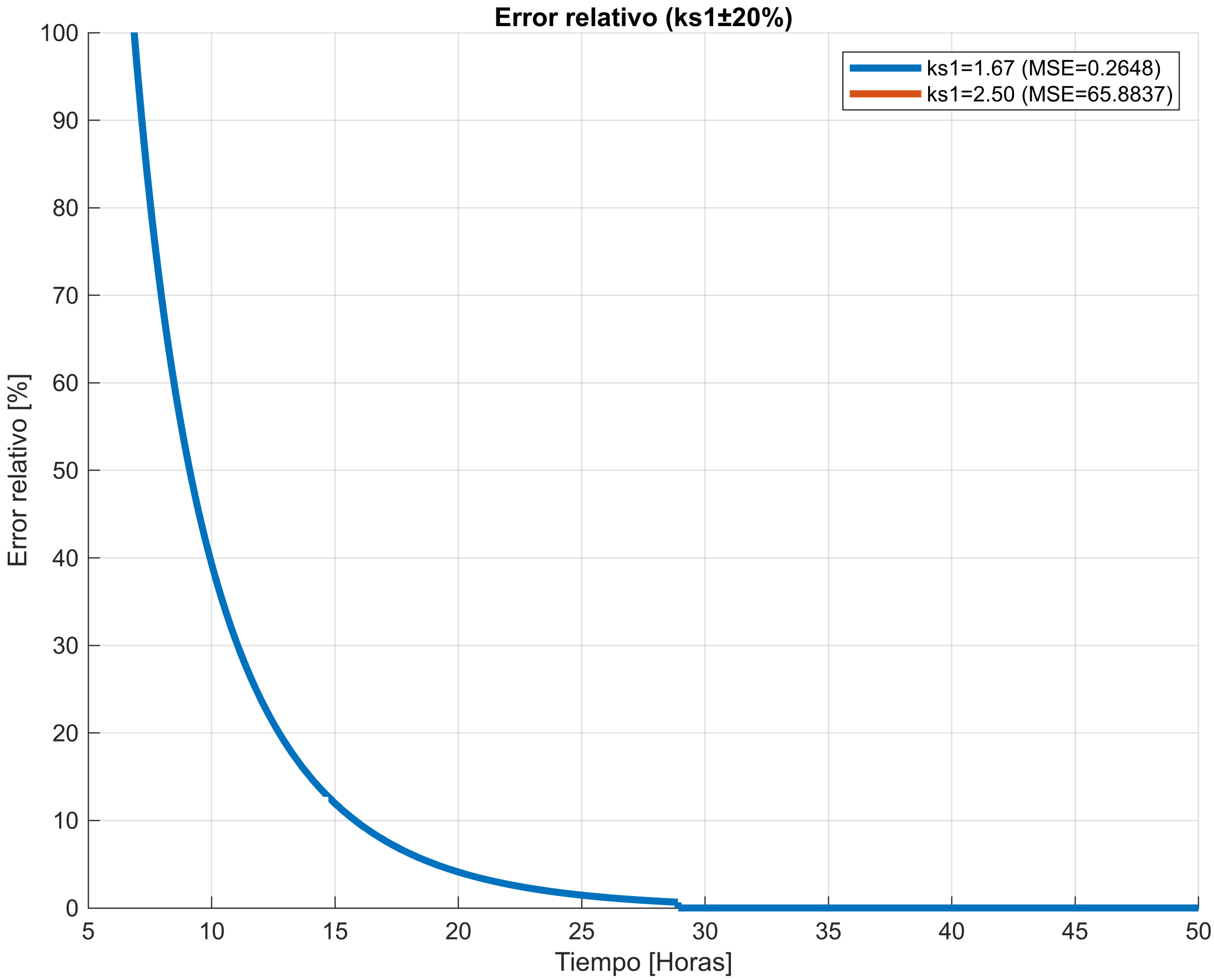
Control linealizante (sin kp ni ki) con variaciones en los parámetros

Que pasa si se tienen variaciones del 20% en los parámetros del controlador (ks1) para el caso sin proporción ni integración del error.

Variaciones en ks1



Control linealizante (kp y ki) del sustrato (ks1±20%)
referencia
ks1=1.667
ks1=2.500
Concentración [g/g]
Tiempo [Horas]
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50

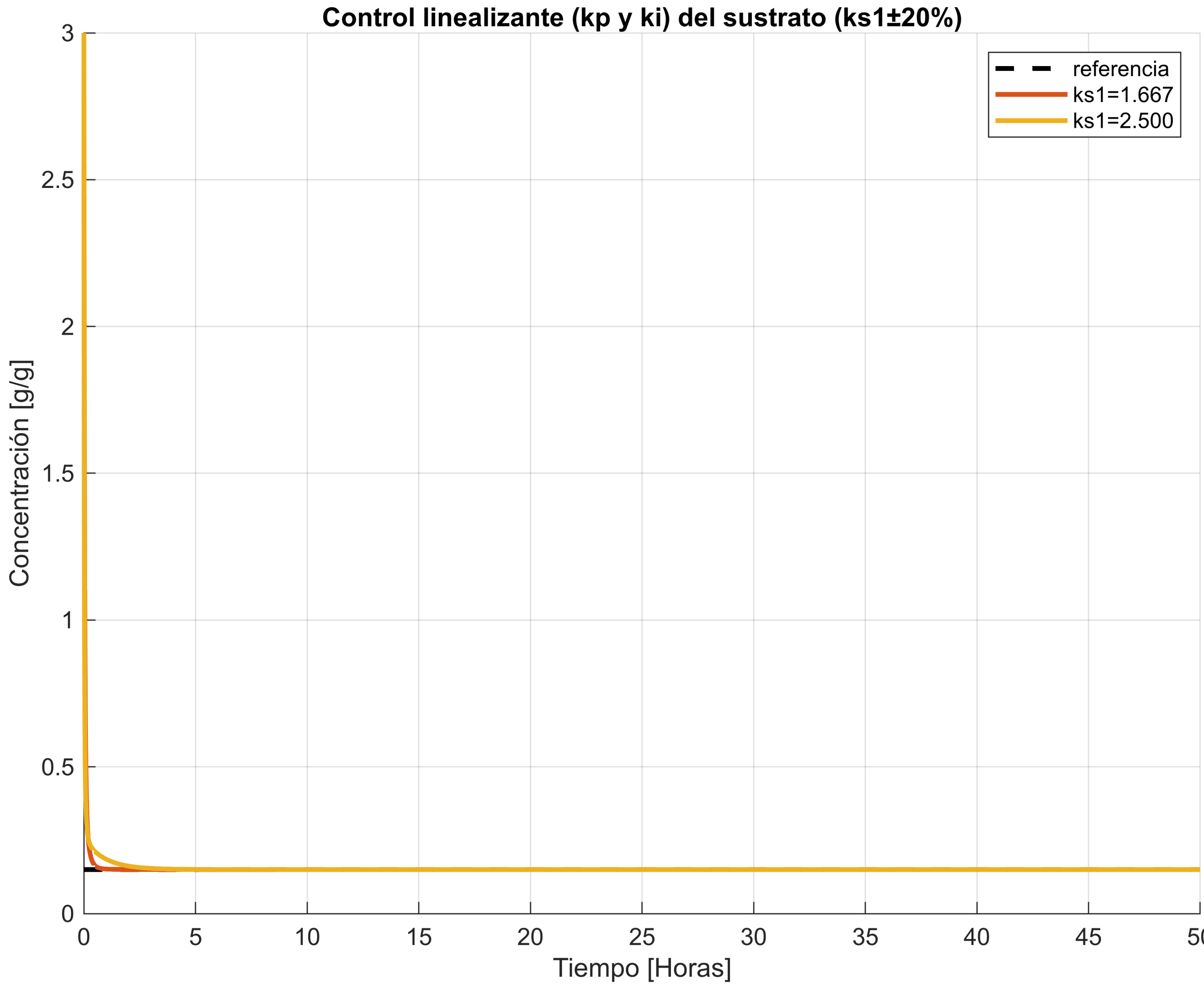


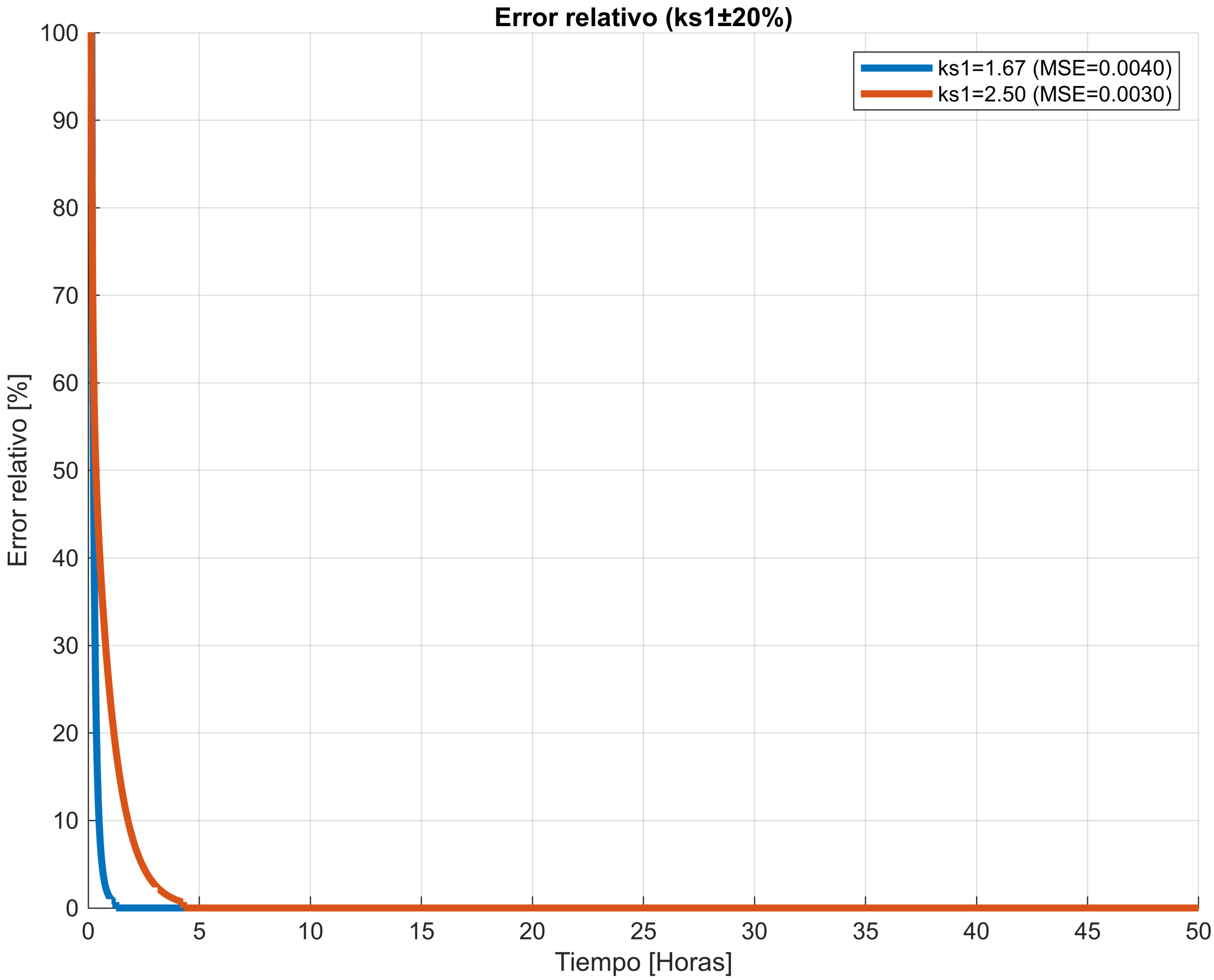
Conclusiones

Es muy dependiente de ks1. Varía demasiado. Si se tiene un ks1-20% el error converge a cero eventualmente (en 30hs), pero si se tiene un ks1+20%, el error diverge y no sirve el control. Por lo que no es para nada robusto ante variaciones de este parámetro.

Control linealizante (kp y ki) con variaciones en los parámetros

Que pasa si se tienen variaciones del 20% en los parámetros del controlador


Control linealizante (kp y ki) del sustrato (ks1±20%)
referencia
ks1=1.667
ks1=2.500
Concentración [g/g]
Tiempo [Horas]
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50



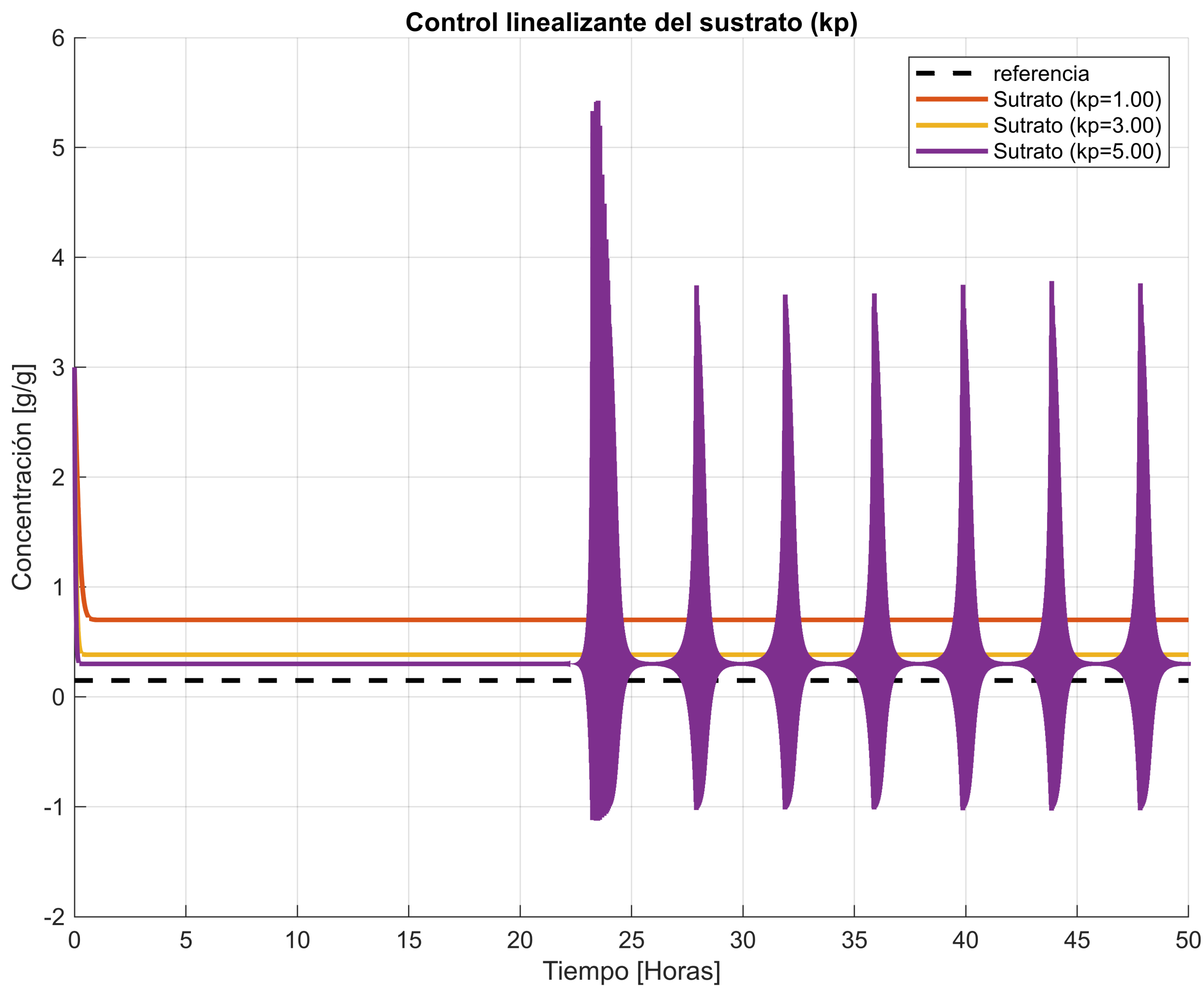
Conclusiones

Ahora el error converge a cero y se tiene un sistema robusto contra variaciones del ks1, el peor caso en cuando se tiene un 20% más en k_{s1}, ya que el sistema converge a error cero para 5 horas, en cambio con 20% menos de error converge a cero en menos de 2 horas.

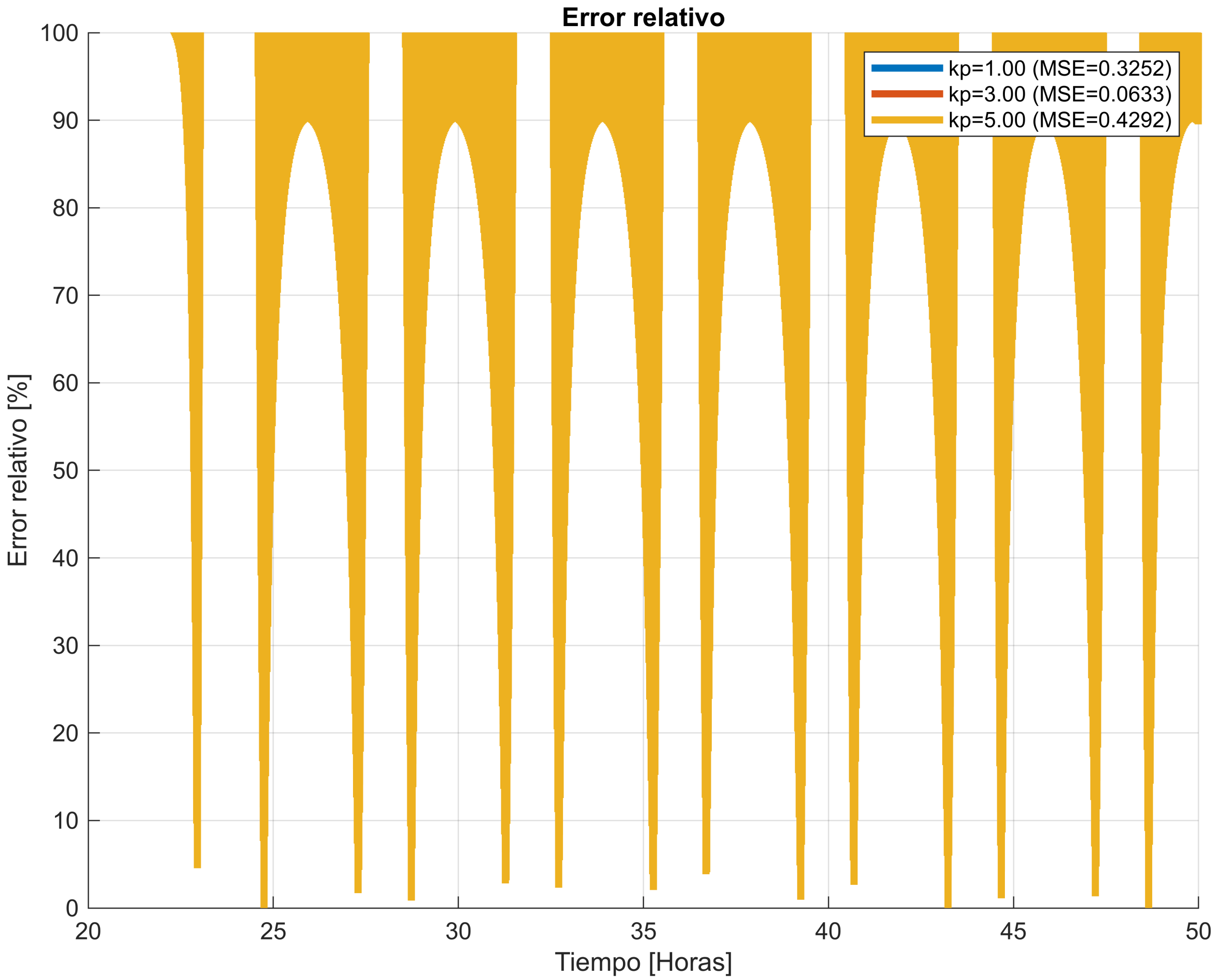
Caso: no se sabe el consumo de sustrato

El consumo de sustrato es $\mu(s)$, y se asume desconocido. Por lo que simplemente lo ignoro del controlador

Solo con término proporcional al error



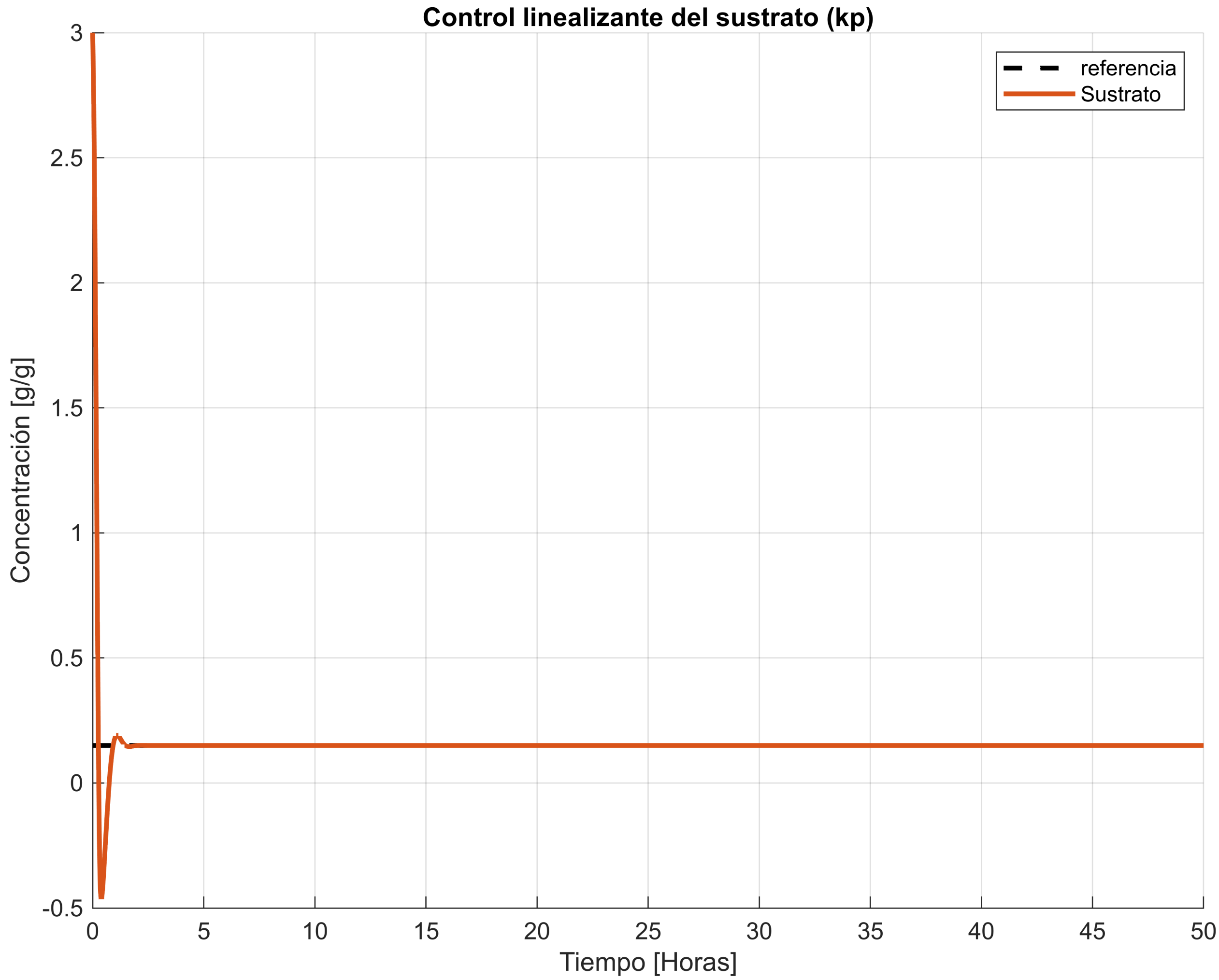
Control linealizante del sustrato (kp)
referencia
Sutrato (kp=1.00)
Sutrato (kp=3.00)
Sutrato (kp=5.00)
Concentración [g/g]
Tiempo [Horas]
6
5
4
3
2
1
0
-1
-2
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50

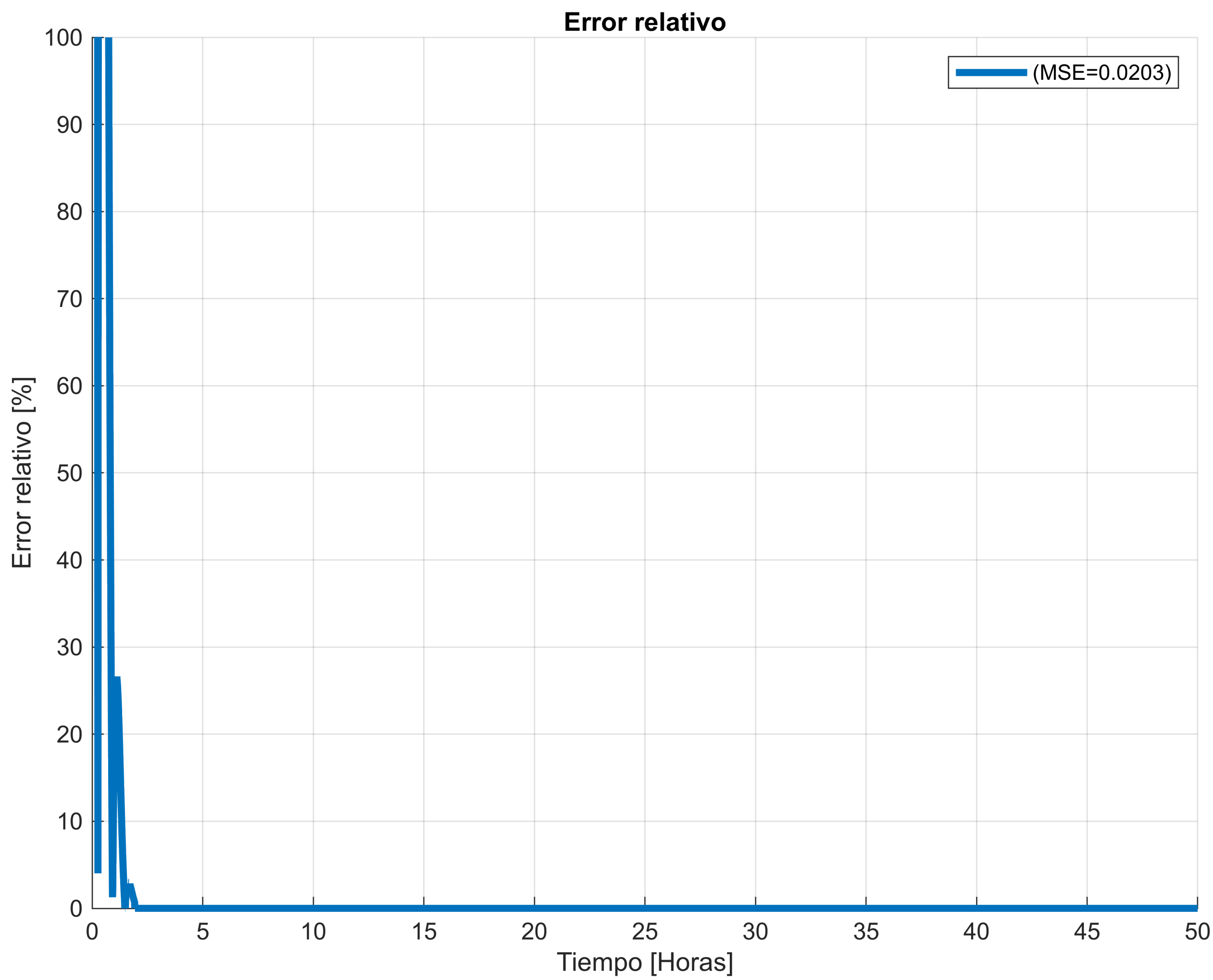


Conclusiones

Converge a un error de estado estacionario que es menor cuanto más grande sea el k_p, pero si se elige un k_p muy grande (mayor a 5 para este caso), el error diverge y se hace inestable el sistema. Por lo que agregando un término integrativo debería eliminar este error al estado estacionario, además lo podría hacer más estable al sistema.

Con término integrativo al error


Control linealizante del sustrato (kp)
referencia
Sustrato
Concentración [g/g]
Tiempo [Horas]
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50

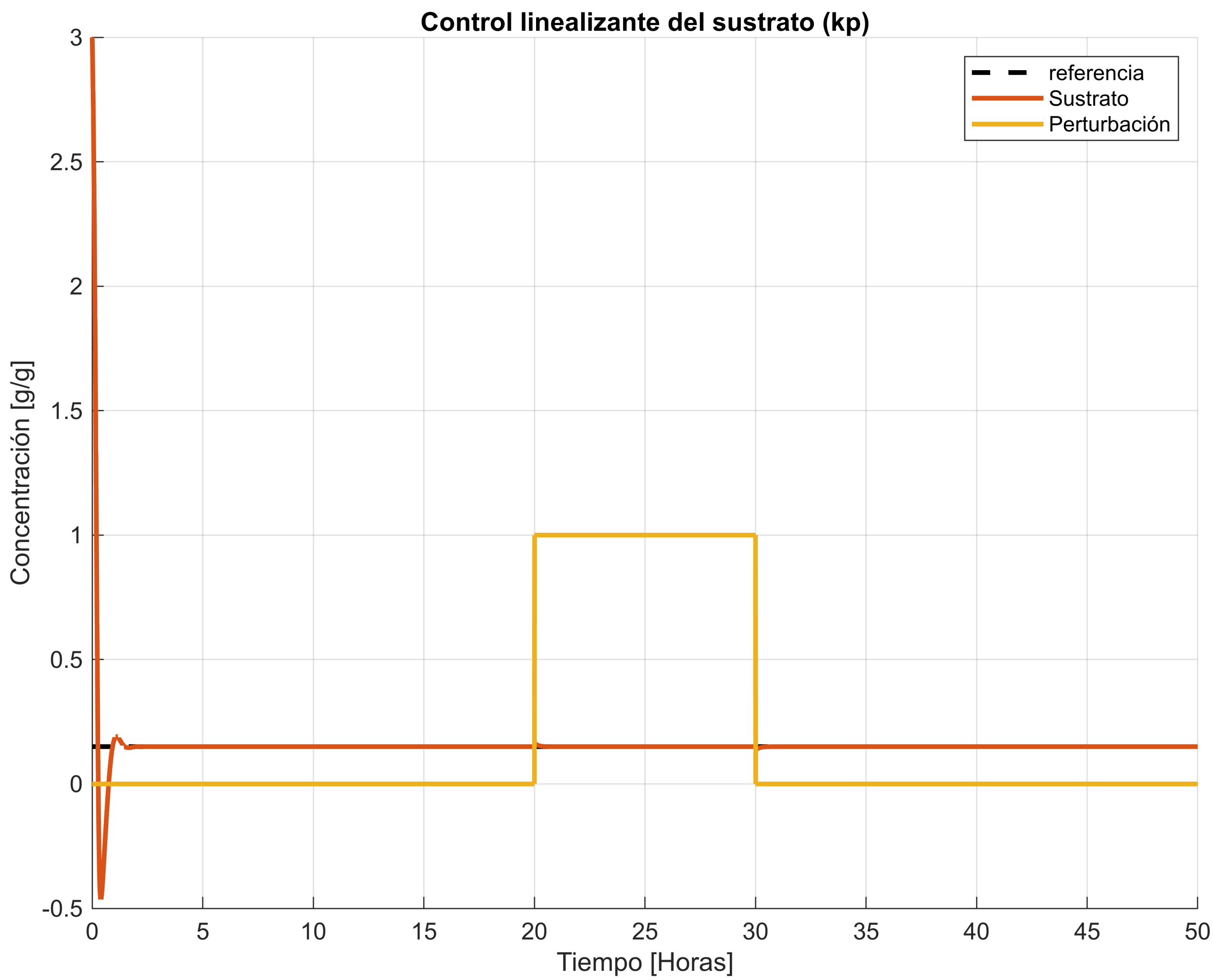


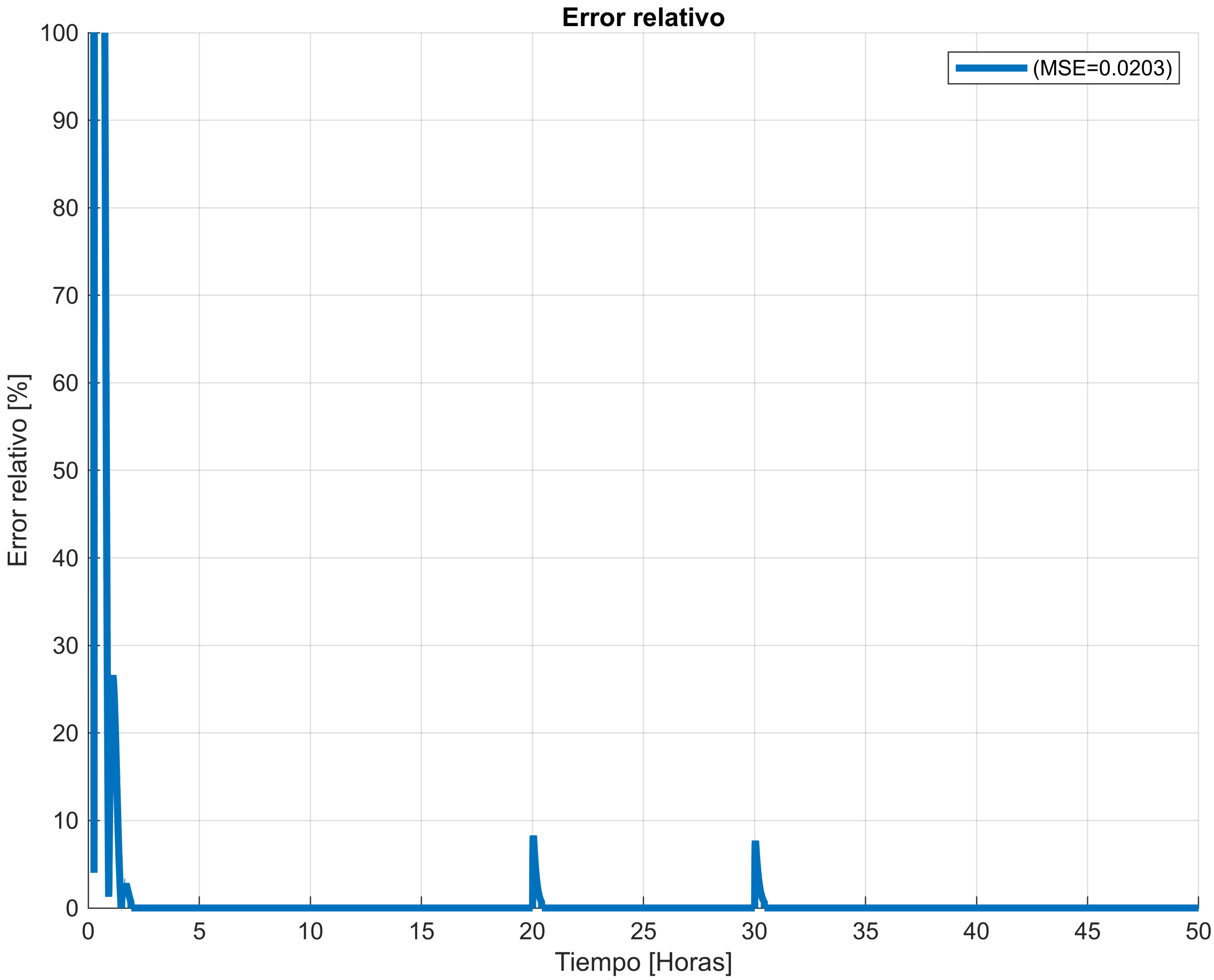
Conclusiones

Como se puede observar el sistema se volvió muy estable y además converge con error al estado estacionario nulo, inclusive la convergencia se da en un tiempo muy bueno (menor a las 5 horas).

Robustez del controlador anterior

Ahora se verifica que tan bueno es este controlador, introduciendo perturbaciones en D del 20%. De esta manera podremos corroborar si el tomar $\mu(s) = 1$ es realmente una solución


Control linealizante del sustrato (kp)
referencia
Sustrato
Perturbación
Concentración [g/g]
Tiempo [Horas]
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50



Conclusiones

Como se puede observar, la perturbación afecta la salida, pero no de una manera muy significativa, por lo que este controlador es muy robusto y con rechazo a perturbaciones muy buenas.