

Sistema Magnético de Flotación: Control de la Flotación y Movimiento Vertical de un Tren que acelera con Levitación Magnética.

Enrique Franco y Laura Rivas

Director: Pedro Teppa

Resumen- En este artículo se buscará hacer un estudio sobre un sistema de control de la levitación de un tren magnético, donde la variable a controlar es la altura del tren con respecto a la base física del sistema. La levitación del tren magnético, depende de un circuito de magnetización, donde los investigadores extrajeron la información para realizar la matriz de estado. En la figura 1 podemos apreciar la naturaleza del sistema, y en la figura dos a continuación podremos ver como es el circuito:

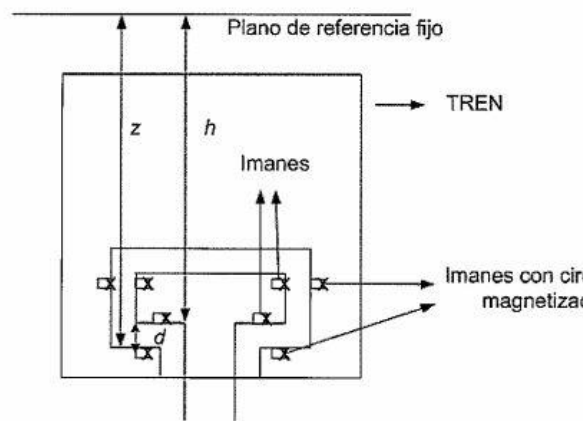


Fig.1 Sección transversal de un tren de flotación magnética

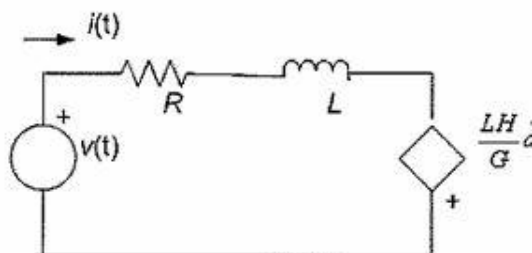


Fig. 2 Modelo de circuito de magnetización

Como podemos apreciar, la intensidad del campo magnético que permite la

levitación del tren está asociada a la corriente que circula por la bobina. Dicha bobina interactúa con unos electroimanes, que permiten controlar la altura del tren magnético.

I. Metodología

Para poder analizar nuestro sistema de control, y poder lograr la controlabilidad del mismo, debemos tener nuestras fases de investigación bien marcadas y puntuales, porque nos proporcionará no sólo una estructura planificada del sistema sino que también nos ayudará con los procedimientos para aplicar los conocimientos sobre los sistemas de control. Para ello, los investigadores del tema, así como lo exigido por los expertos en el área, decidieron que el curso sobre el trabajo asignado, va a ser el siguiente:

1. Se hará una descripción de la planta, basado en la apariencia del problema planteado como las variables proveídas hacia los investigadores.
2. Se plantea el análisis del sistema a lazo abierto. Se visualiza la inestabilidad del sistema bajo este análisis, matemáticamente los investigadores determinan los polos que hacen que estemos ubicados en el semi-plano derecho. Se hacen los cálculos de valores relacionados con el sistema a lazo abierto. Por último se armará la matriz de

controlabilidad, junto con la matriz de observabilidad, para concluir si el sistema es controlable y observable.

3. Cerramos el lazo del sistema, queremos lograr realimentación en el sistema de tal forma que podamos controlar nuestra variable de salida, con error en estado estacionario igual a "0". Estaremos en la etapa de "regulación," donde podremos realimentar nuestro sistema para regular nuestras variables de estado. En este proceso se asignarán polos a lazo cerrado (convenientes para los investigadores) y lograr generar ganancias de realimentación con dichos polos. Esta posición de polos con sus ganancias respectivas le permitirán a los investigadores concluir y anotar sobre la respuesta del sistema.
4. Al proceso de regulación le añadimos un "observador," ya que en situaciones puede ser difícil medir las variables de estado. Todo esto para conseguir una mejor regulación del sistema de control. En esta configuración surge una variable "L" que determinará el comportamiento del observador.
5. Para este paso se le hará seguimiento(DUDA) al sistema de tal forma que se pueda ver la variación nominal, trabajando con el observador.
6. Para después se hace un análisis de robustez.
7. Por último, el sistema debe soportar la perturbación.

2. Descripción de la planta:

Tenemos la descripción de un tren, que mediante la aplicación de los conocimientos sobre los campos magnéticos se logró que el tren esté suspendido en el aire, disminuyendo los costos de construcción y a su vez aumentando las velocidades de un tren normal. A los investigadores se le provee la información sobre la forma en que se controla la altura vertical del tren, que hace que el tren pueda seguir con su curso, que en este caso, sería un circuito de magnetización. Del circuito de magnetización se proporcionaron las variables de estado correspondientes a nuestra planta del sistema. Se ha de tomar en cuenta, que los valores del modelo de variable de estado no son reales, están ahí para ilustrar los conceptos de diseño estudiado.

A continuación, las matrices que definen las variables de estado, relacionadas con el circuito de magnetización:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0.01 & 0 & -0.05 \\ 0 & 0.2 & -0.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} p$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

Siendo "p" la perturbación, y las otras variables son las características a una planta, con su entrada y salida.

Conocidas ya nuestras matrices de variables de estado, procedemos con entrar a nuestra fase de cálculo de lazo abierto del sistema.

3. Análisis a Lazo Abierto:

De la representación de las variables de estado, mostradas anteriormente, se procede a calcular los autovalores de la matriz "A" que facilitan los polos de la función de transferencia. Notamos que existe un polo en el semiplano derecho, haciendo que el sistema sea inestable. Se utilizó la función de matlab denominada eig(A) que arrojó los resultados de dichos polos rápidamente. En la siguiente figura visualizamos la función que nos arrojó los autovalores:

```
eig(A)

ans =

    0.0879
   -0.1347
   -0.2532
```

Figura 3. Autovalores Lazo Abierto

Evaluamos los polos en el sistema simulink y se realiza un sencillo esquema para verificar la inestabilidad de la planta a lazo abierto.

En la siguiente figura podremos visualizar lo antes mencionado:

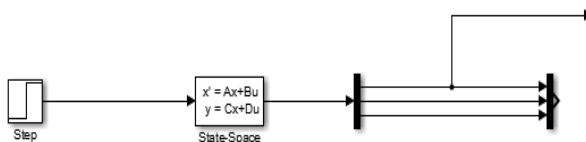


Figura 4: Lazo Abierto Inestable

Donde se elabora el sistema descrito según la función bloque "state-space," y se le insertó las matrices de variables de estado. La respuesta al escalón fue inestable como se ve en la gráfica:

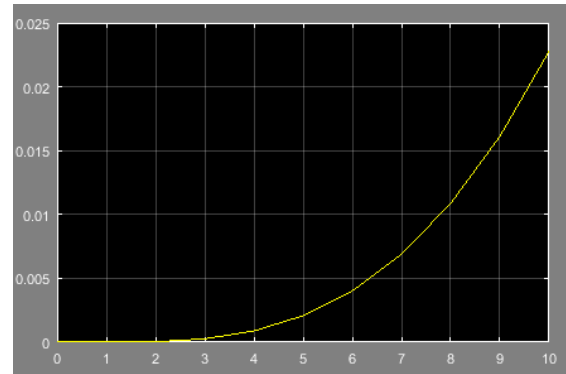


Figura 5: Respuesta Inestable

Seguidamente calculamos la controlabilidad y observabilidad. Decimos que un sistema presenta controlabilidad completa si todos los estados son controlables, es decir, si la matriz de controlabilidad C es de rango completo, es decir, es igual a n; el número de estados. Así mismo, Un sistema es observable si la matriz de observabilidad O es de rango completo, es decir, igual a n; el número de estados.

Para demostrar estos dos conceptos se definieron dos matrices, una llamada Co que mostrará la matriz de controlabilidad del sistema, a través del comando ctrb y utilizando las dos matrices ya definidas A y B, y otra para la observabilidad llamada Ob, que mostrará la matriz de observabilidad del sistema utilizando en comando obv y las matrices A y c. Luego se procedió a calcular el rango de cada una, obteniendo el siguiente resultado:

```

Co =

    0         0   -0.0050
    0   -0.0050   0.0015
    0.1000  -0.0300   0.0080

>> rank(Co)

ans =

    3

>> Ob=obsv(A,c)

Ob =

    1.0000         0         0
         0    1.0000         0
    0.0100         0   -0.0500

>> rank(Ob)

ans =

    3

```

Figura 6: Cálculo Matriz Controlabilidad y Observabilidad.

Se puede observar que ambos rangos serán igual a 3 ($n=3$), por lo tanto podemos concluir que el sistema es controlable y observable.

Por último, la planta dentro de su característica de lazo abierto, tiene un realimentador “K” ligado a sus variables de estado, que buscará darle estabilidad al sistema. Para ello, visualizamos de nuevo el diagrama de bloques, solo que con nuestra nueva realimentación “K” descrita en la siguiente figura:

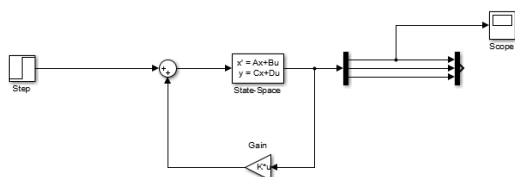


Figura 7: Lazo Abierto Con Planta realimentada “K”.

Para calcular “K” se asignaron los siguientes polos: $(-10 -10i, -10+10i, -20)$, se eligieron dichos polos para que no estuviesen ni tan cercanos al plano jw y tampoco tan lejos. La idea es observar la respuesta al escalón y obtener conclusiones. Una vez establecidos los polos elegidos del sistema, se utiliza la función `place(A,B,poles)` (donde A es la matriz de estado, y B es la matriz de entrada) para calcular “K” e insertar la matriz en la realimentación. Cabe destacar que la matriz calculada como constante debe ser de dimensión 3×1 para poder coincidir con el sistema. Entonces, K tiene valores:

```

poles =

-10.0000 -10.0000i -10.0000 +10.0000i -20.0000 + 0.0000i

>> Ki=place(A,B,poles)

Ki =

    1.0e+05 *
    -8.0008    -1.2000    0.0040

```

Figura 8: Polos y valores K.

Con estos valores, evaluamos el sistema en la figura 7, para visualizar la respuesta:

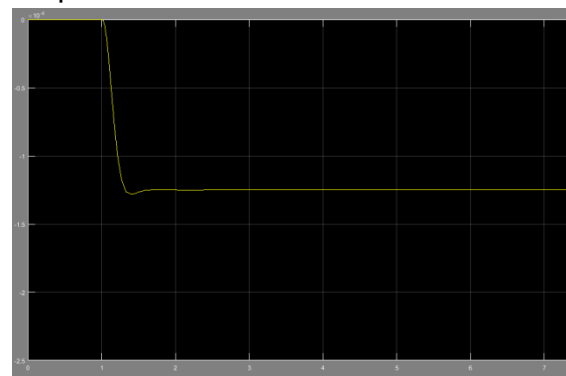


Figura 9: Respuesta de la Planta con “K”

Observamos una respuesta muy lenta, además que tiene un error de estado estacionario muy alto. La idea es hacer

que el sistema permite que el error disminuya a "0". Cabe notar que para esta configuración, es suficiente y realista tomar el escalón como la entrada que se acerca más a la realidad del sistema, porque el tren va a tener dos tipos de estados, levantado o no levantado.

4. Regulación del Sistema:

A continuación se cerrò el lazo del sistema, por lo que nuestra ecuación característica de variables de estado pasa a ser:

$$X'=(A+Bk)x+Br$$

$$Y=Cx$$

$$Xa'=R-Y$$

y modelado por el sistema en diagramas de bloque en simulink:

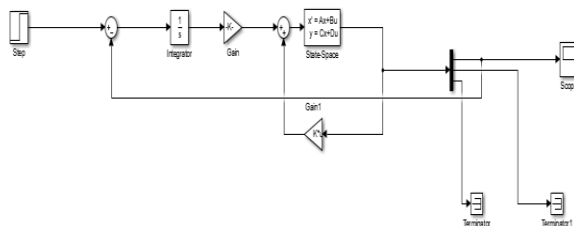


Figura 10: Diagrama de Bloques LC donde se busca regular la respuesta de la planta ante una entrada. Se construye una nueva matriz "A", que vendría siendo producto de nuestra realimentación de salida. Le agregaremos a dicha matriz "Aa," denominación que se diferencia a la "A," y se caracterizarà por tener una fila y una columna nueva dentro de su estructura. La matriz B también sufre una modificación con la realimentación, y con ello le agregaremos una nueva fila con el valor 0. A su vez, debemos

retomar los polos que utilizamos en el lazo abierto (para efectos de comparación, podemos elegir nuevos polos si así se desea) y un nuevo polo, más rápido que el resto. Con estos valores determinados, se procede a calcular la K y la Ka mediante la función Step, donde los primeros 3 valores irán para nuestra K y la cuarta irá para Ka.

```
>> Aa= [0 1 0 0; 0.01 0 -0.05 0; 0 0.2 -0.3 0; -1 0 0 0]

Aa =

    0    1.0000    0    0
  0.0100    0   -0.0500    0
    0    0.2000   -0.3000    0
 -1.0000    0    0    0

>> Ba=[0; 0; 0.1; 0]

Ba =

    0
    0
  0.1000
    0
```

Figura 11: Matrices Nuevas Lazo Cerrado

```
>> newpoles=[-10-10*i -10+10*i -20 -30]

newpoles =

-10.0000 -10.0000i -10.0000 +10.0000i -20.0000 + 0.0000i -30.0000 + 0.0000i

>> Ka=place(Aa,Ba,polos)

Ka =

 1.0e+07 *
-0.2600 -0.0240  0.0001  1.2000
```

Figura 12: Nuevos Polos y Cálculo de Ka y K.

Siendo K los tres primeros valores obtenidos y la Ka el último.

Con estos datos obtenidos, se procede a observar la respuesta en la siguiente figura:



Figura 13: Respuesta del sistema a las constantes "K" y "Ka"

En la gráfica, obtenemos la respuesta de la salida, que si restamos la entrada vs. la salida podemos ver que la respuesta se hace 0.

Los aspectos característicos más importantes de la gráfica anterior (a simple vista, por así decirse) es que posee una magnitud de sobrepico que sobrepasa el error de estado estacionario por aproximadamente 0.2 unidades en aproximadamente 2 unidades de tiempo, y luego logra igualar la entrada con la salida (generando error de estado estacionario). La salida se establece en aproximadamente 3 unidades de tiempo.



Figura 14: Error del Sistema

En la gráfica apreciamos el error de estado estacionario, que vendría siendo "0" para nuestro caso.

5. Seguimiento del Sistema Regulado

En este tramo, se debe evaluar la respuesta de la salida ante entradas del escalón amplificadas, y como se comporta el sistema. A continuación, se implementa una entrada escalón, con 2 unidades:



Figura 14: Respuesta del Sistema ante el escalón 2 unidades.

Observamos cómo el sistema se comporta de igual forma que con el escalón en 1, es decir, cumple con la regulación. A continuación subiremos la entrada a 5 unidades.



Figura 15: Respuesta ante 5 Unidades. el sistema sigue regulando a la perfección. La salida de acomoda en 5 y el error nos da igual a 0. Por último subimos el valor de la entrada a 15 para observar el comportamiento:

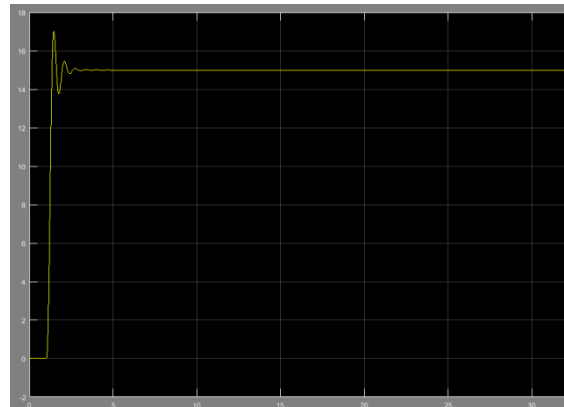


Figura 16: Respuesta ante entrada de 15 unidades.

Se concluye exactamente lo mismo. El sistema responde con solidez.

6. Robustez y Rechazo a Perturbación del Sistema:

En la siguiente fase del proyecto, se evaluará cuán bien responde a perturbaciones, o a modificaciones de la entrada. En este caso sabemos que el sistema responde perfectamente bien ante la respuesta al escalón. Pero

si utilizamos una rampa observamos que es inestable, aunque una fuente de voltaje es muy difícil que logre alcanzar la forma de la rampa:

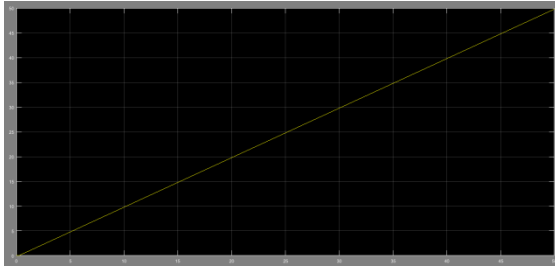


Figura 17: Respuesta ante la Rampa.
A continuación, presentamos la respuesta al coseno:

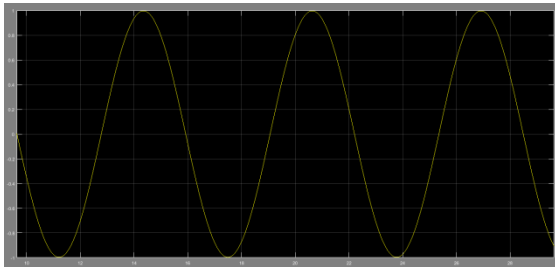


Figura 18: Respuesta ante entrada Coseno.

Podemos ver que el circuito de magnetización puede ser operado por una entrada alterna porque queda acotado entre -1 y 1, aunque debe ser a una frecuencia muy alta para que no sea perceptible. No se recomienda usar este modelo, es mejor usar el escalón.

Se procederá a analizar la perturbación, para ello dejaremos de utilizar el bloque state-space, que facilitaba más las operaciones y utilizaremos el modelo con sus variables singulares para poder introducir las perturbaciones. El

diagrama queda de la siguiente forma:

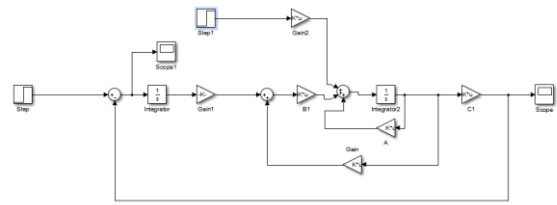


Figura 19: Sistema con Perturbación.
Donde la perturbación entra en suma con las ecuaciones de variables de estado descritas en el diagrama de bloques. Para ello se considera “p” dada en las ecuaciones de variables de estado, y se debe multiplicar por un escalón. La respuesta ante la perturbación vendría siendo de la gráfica a continuación:

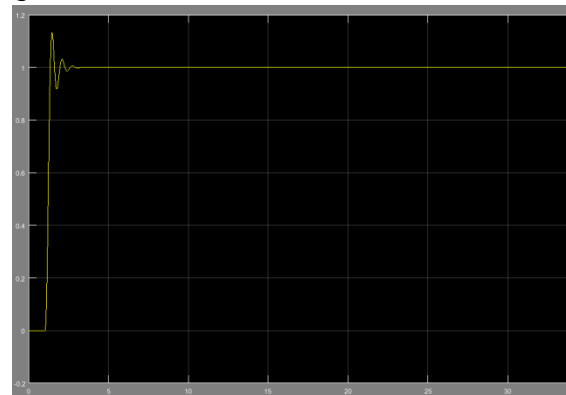


Figura 20: Respuesta perturbación con escalón.

En esta respuesta se puede observar que la perturbación no hizo absolutamente nada que se pudiese notar. Para poder notar algo y exagerar un poco la respuesta, se procede a darle un valor al escalón de 100 unidades, y observamos el comportamiento:

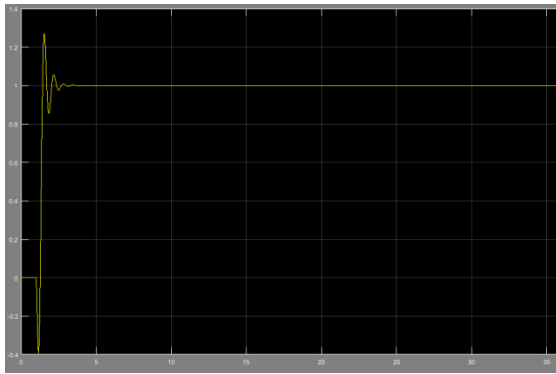


Figura 21: Respuesta perturbación escalón de 100 unidades.

Con 100 unidades de perturbación, se logra apreciar el comportamiento del sistema ante la perturbación. Podemos observar como la gráfica, al entrar en acción el escalón, se dirige a una magnitud negativa, aumenta el sobrepico considerablemente, y aumenta el tiempo de establecimiento.

Para continuar con el análisis de rechazo a perturbaciones, por último se le agregará una rampa y un coseno, para complementar y justificar el estudio.

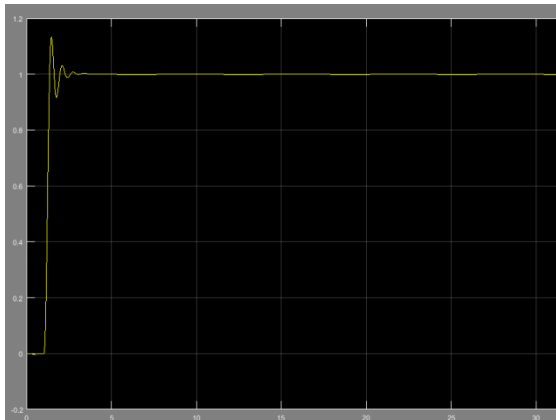


Figura 22: Respuesta ante el coseno Amplitud 1.

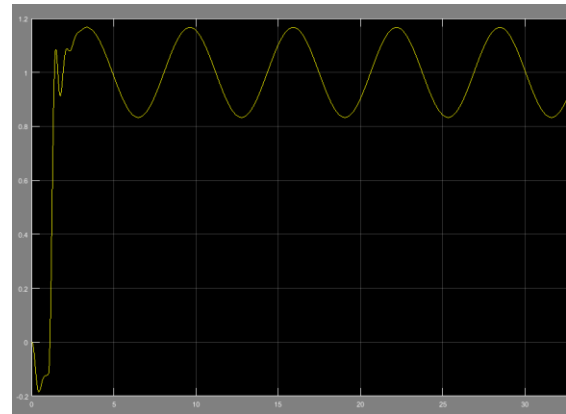


Figura 23: Respuesta ante el Coseno amplitud 100

Ante el coseno vemos que aguanta amplitudes de 1 unidad, pero ante amplitudes de mayor envergadura podemos ver que no puede mantener el error, sino que permite oscilaciones. Controlar las perturbaciones grandes son difíciles, pero por lo general son muy poco comunes.

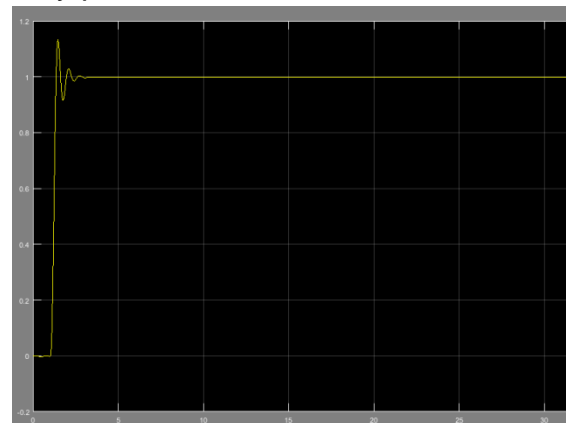


Figura 24: Respuesta ante la perturbación de la rampa.

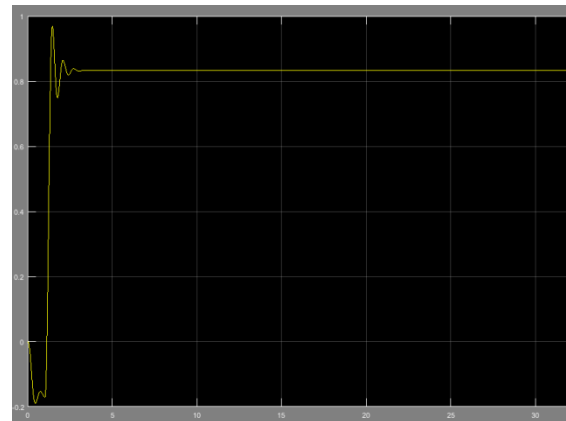


Figura 25: Respuesta ante la rampa con 100 unidades de pendiente.

En este caso, el sistema aguanta muy bien las dos rampas. Sin embargo, cuando se le introduce una rampa con pendientes altas, vemos que al sistema le cuesta recomponerse, y el error de estado estacionario pasa a tener valor, mínimo, pero existe, de 0,2 unidades de error aproximadamente con la pendiente de 100. Se cree que es desproporcionado una perturbacion de pendiente 100, se utilizo para resaltar bien los resultados, al igual que el coseno. Se presenta la grafica del error de la rampa, y se procede a ensamblar el observador.

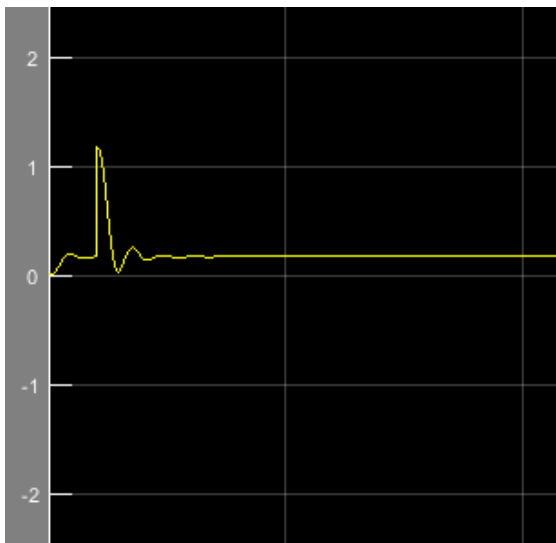


Figura 25: Error en la rampa de 100 de pendiente.

Para hacer análisis de robustez, se procede primero a realizar una superposición de señales, realizadas de la siguiente forma, mediante simulink:

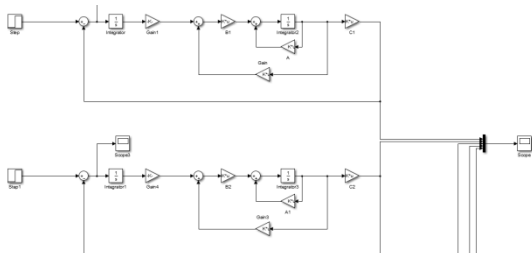


Figura 26: Superposición de Señales
Donde podemos observar que a la graficadora de la simulación "Scope" están

adheridos 5 sistemas iguales pero con sus respectivas K y Ka.

Primero, realizaremos un estudio de las variaciones de K al 20% 10% la señal sin modificar vs -10% -20% para comparar los comportamientos. Luego lo mismo pero para las Ka, regresando las K a su valor original.

El resultado de K es el siguiente:

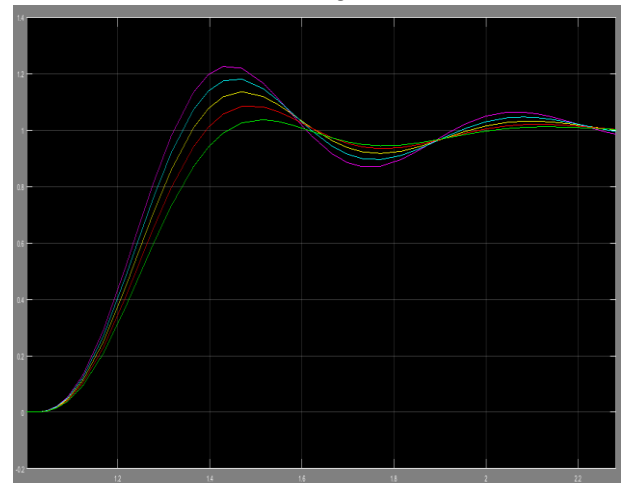


Figura 27: Variación de K para Robustez.
Siendo la línea morada, 20% de aumento, azul clara, 10% aumento, amarilla sin modificar, roja -10% disminución, y la verde -20% de disminución.

Podemos ver que cuando aumentamos los polos, existe una tendencia a aumentar el sobrepico, disminuye levemente el tiempo de reposición aunque el tiempo de establecimiento es prácticamente el mismo. Es decir, que podemos decir que la variación de los polos influye en la variación de la regulación del sistema.

El resultado de variar Ka es el siguiente:

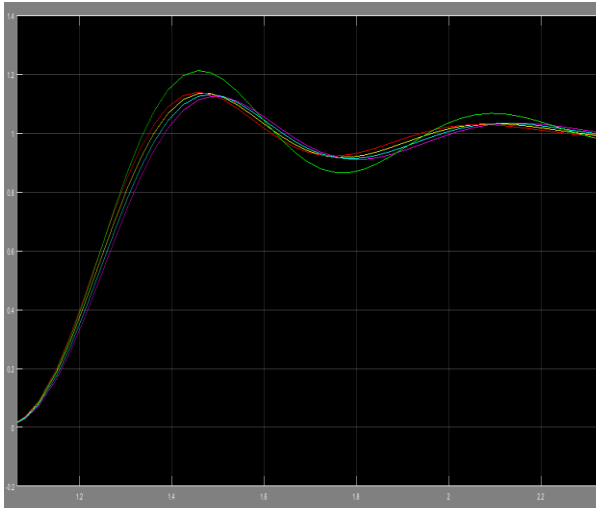


Figura 28: Variación de Ka para Robustez. Se hace variar Ka de la misma forma que se hizo anteriormente, 20% 10% para arriba y para abajo, siendo los mismos colores la variación anterior. Los resultados son contrarios a los anteriores, mientras más disminuimos los polos, el sistema tiene mas sobrepico, menor tiempo de reposición. Aunque notamos que fue mucho más sensible cuando disminuimos el valor del polo que cuando aumento, se ve claramente la sensibilidad en la grafica.

7. Regulación con Observador de Estados.

Existen casos donde las variables de estado son difíciles de medir, por lo que se dificulta la regulación de un sistema real. En el caso investigado se asumen que las variables de estado fueron fáciles de medir y también para el caso no lo fuese, por lo que se procede a ensamblar el observador de estados, de tal forma que se pueda enfrentar esta limitación presentado el caso. En el observador de estados medimos la salida “y” de la planta y la entrada “u” para poder compensar la carencia de regulación del sistema.

El observador de estados entonces, se modela con las ecuaciones parecidas al de modelo de variables de estado,

solo que insertamos en nuestra nueva \underline{X}' la diferencia de la salida del sistema entre la salida del observador, multiplicado a su vez por una constante “L.” Las ecuaciones del observador son las siguientes:

$$\underline{X}' = A\underline{X} + Bu + L(y - \underline{Y})$$

$$\underline{Y} = C\underline{X}$$

Despejando nos queda:

$$\underline{X}' = (A - LC)\underline{X} + Bu + Ly$$

Siendo \underline{X} y \underline{Y} las nuevas variables del observador.

Para este modelo de la planta se decidió poner cada variable por separado, a diferencia del primero, donde por comodidad se utilizó el bloque “state space”. Aunque este bloque resultó cómodo para la regulación sin observador, para la simulación con observador resultó ser más complejo el uso del state space, porque las variables de estado tienden a ser más difíciles de identificar, además el montaje es más detallado y complejo. Entonces para describir la planta y el observador, se basó en el modelo proporcionado por la página de internet denominada “Control Tutorials for Matlab & Simulink,” respaldada por la Universidad de Michigan, Carnegie Mellon University y la Universidad de Detroit. El esquema es el siguiente:

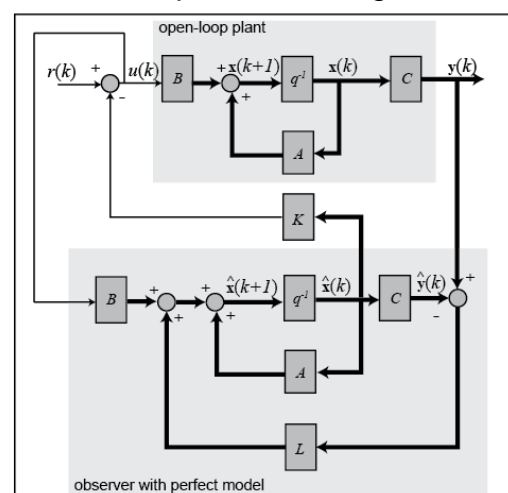


Figura 29: Modelo planta-observador.
Fuente: Control Tutorials for Matlab & Simulink

Donde observamos que claramente se debe adaptarla a las necesidades del esquema propuesto. Cada “letra” que está dentro de un recuadro, representa una función gain en simulink, con su respectivo valor en matriz o valor singular. Elaborando el sistema en simulink, nos queda el siguiente diagrama de bloques:

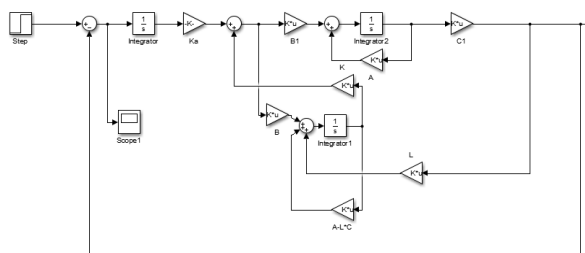


Figura 30: Diagrama de Bloques para regulación de la planta con Observador.

Visualizando el diagrama de bloques, podemos apreciar que el observador toma la salida de la planta, y la multiplica por una ganancia “L,” incorporada a nuestras variables de estado, la entrada de la planta a su vez multiplicada por la matriz B y la matriz de estado (A-LC) que multiplica a \underline{X} va orientado al punto de suma que permite completar nuestra ecuación de variables de estado, que su suma vendría siendo \underline{X}' , y que cuando pasa por el integrador, se convierte en \underline{X} . La variable \underline{X} entonces va a multiplicar la ganancia K, que iría realimentando la planta propuesta. La operación A-LC fue insertada directamente en el recuadro de la función “gain.”

Se debe entonces explicar el cálculo de L (la constante introducida en el observador). Se dice que como el par (A,C) es observable y por dualidad

también se dice que par (A',C') es controlable (controlabilidad y observabilidad demostrada en páginas anteriores, A' y C' son matrices traspuestas), entonces se utilizar la función place de matlab para calcular “L,” donde utilizaremos polos asignados por los investigadores para darle forma a la constante. Sin embargo, los polos que sirven para calcular “L” deben ser a lo menos 4-5 veces más rápidos que los utilizados para encontrar K en análisis anteriores, porque, según la página que proporcionó el diagrama del modelo del observador, puede alterar con el funcionamiento de los sensores que se pongan en disposición. Para K y Ka sus polos permanecen como se analizó anteriormente. Establecido esto, procedemos a calcular en matlab, de la forma siguiente:

```
>> polosObs=[-50-50*i -50+50*i -100]
polosObs =
    1.0e+02 *
   -0.5000 - 0.5000i   -0.5000 + 0.5000i   -1.0000 + 0.0000i
```

Figura 31: Polos para calcular constante “L” del observador.

```
>> L = place(A',C',polosObs)
L =
    1.0e+06 *
    0.0002    0.0149   -9.9103
>> Phi=L'
Phi =
    1.0e+06 *
    0.0002
    0.0149
   -9.9103
```

Figura 32 Cálculo de Constante L

En este caso la constante L se llamó Φ , donde Φ es la matriz traspuesta de la variable L calculada con place. K y K_a se calculo con el mismo método anterior, con los mismos polos.

Como último análisis, veremos la salida, la respuesta al escalón:



Figura 33: Respuesta al escalón. Vemos que la respuesta es igual a 1, igual que el escalón, logrando regular así el sistema, a través del observador.

Vemos también el error de estado estacionario, y nos da lo siguiente:

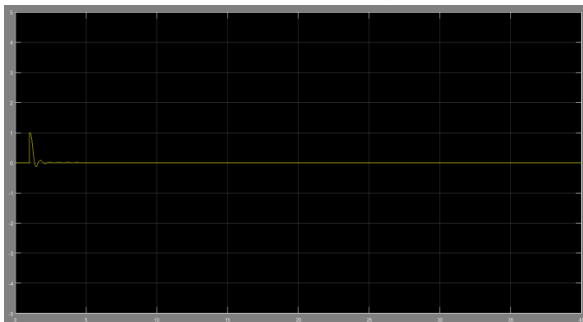


Figura 34: Error del sistema con Observador. Donde podemos ver que nos da un soprepico y un tiempo de reposición similar a la simulación de regulación sin observador.

Ya como sabemos que el sistema hace regulación, procedemos a hacer seguimiento sobre el mismo.

6 Seguimiento del Observador

En esta sección del paper, se evaluará la respuesta del sistema del observador, amplificando la entrada del escalón, por varias veces su valor. Se determina si el sistema regula con normalidad.

Primero lo intentamos con un escalón de 2 unidades:

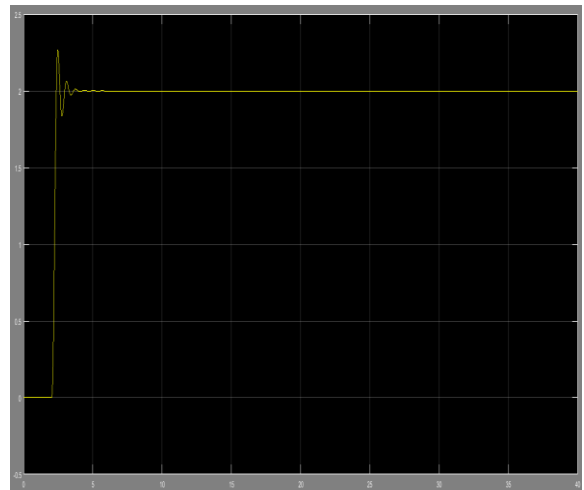


Figura 35: Seguimiento con escalón 2 Unidades.

Luego con 4 unidades:



Figura 36: Seguimiento 4 Unidades. Por último intentamos con 15 unidades:

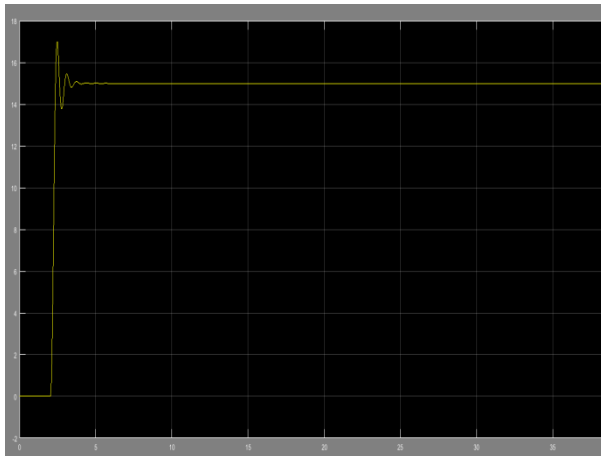


Figura 37: Seguimiento 15 Unidades
Podemos observar que el sistema regula con completa normalidad ante entradas más grandes. Cabe notar que cuando el sistema es más grande, el sobrepico aumenta proporcionalmente, ya con quince notamos que sobrepasa la amplitud de 1 unidad. Es decir, que mientras más aumentemos la entrada, el sobrepico aumenta, y el tiempo de establecimiento también aumenta (muy levemente), proporcionalmente, y muy levemente. No se puede hacer una comparación clara con el tiempo de reposición, muy difícil de medir visualmente. El error de estado estacionario permanece nulo, es decir nuestro control PI funciona perfectamente.

7. Robustez y Rechazo a Perturbación para el Observador:

Dentro de la matriz de variables de estado, sumamos la perturbación "p", de tal forma que se pueda realizar el análisis con la perturbación. En el diagrama de bloques a continuación, insertamos nuestra perturbación en la suma de nuestra planta junto a las demás variables de estado:

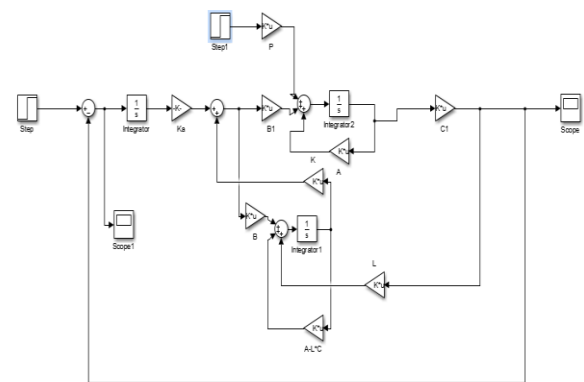


Figura 38: Diagrama de Bloques Perturbación junto con Observador.

Vemos que está ubicado en la parte más arriba del diagrama, sumando junto con las otras variables de la planta. Cabe destacar que para darle el carácter de perturbación a la entrada de la planta se tuvo que multiplicar un escalon por un gain, que viene asociado a la matriz de P.

Ejecutamos la simulación, y analizamos la gráfica en cuestión:

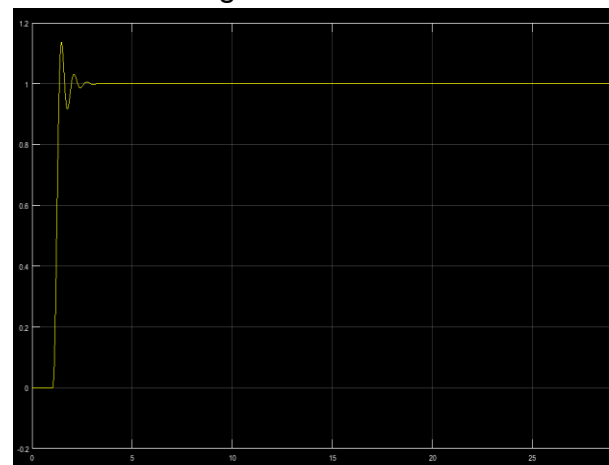


Figura 39: Respuesta Con perturbación
En la gráfica anterior, difícilmente se puede apreciar la perturbación, aunque significa un buen funcionamiento de que se regula correctamente el sistema. Para poder apreciar un poco más la perturbación, el escalón lo elevamos a 100, en la siguiente gráfica, su respuesta:

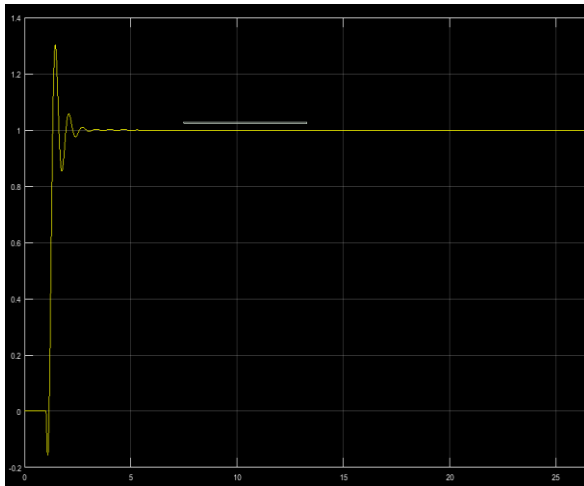


Figura 40: Respuesta al Escalón de 100 unidades.

Bajo esta gráfica si se puede apreciar mejor el comportamiento de la perturbación en el sistema, desviando negativamente al principio y aumentando el sobrepico. El sistema sigue respondiendo en buenas condiciones.

A continuación, para analizar mejor las respuestas, introducimos diferentes funciones en la perturbación, en vez de escalón, y observamos la respuesta:

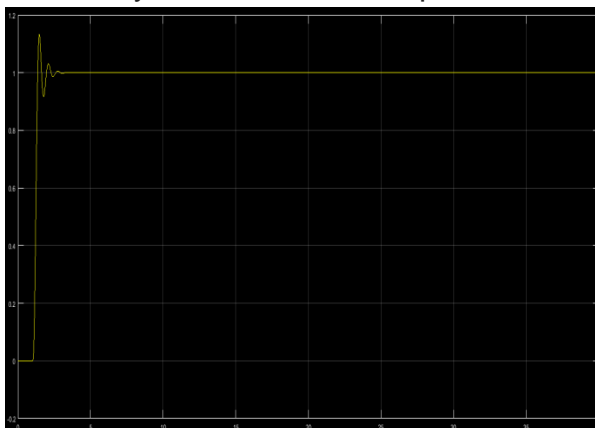


Figura 41: Respuesta a la Perturbación Rampa

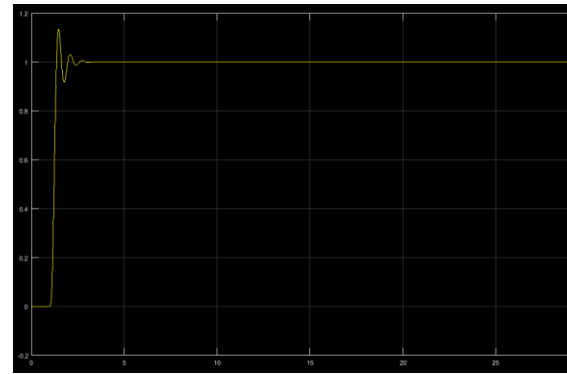


Figura 42: Respuesta a perturbación Coseno

Como podemos observar, el sistema logra estabilizarse sin ningún tipo de inconveniencia. Las perturbaciones se empiezan a notar ya cuando es muy amplificada la perturbación, como se demostró en el primer sistema, pero aun así el sistema responde con total autonomía. Salvo fuerzas mayores, se puede decir que el sistema está apto para ser utilizado.

Por último se coloca una entrada de tipo coseno, y la salida también tiene una respuesta de tipo acotada, es decir presenta estabilidad pero con oscilaciones. A menos de que sea a una frecuencia bastante rápida de tal forma que no sea perceptible, el sistema no puede ser suministrado con corriente alterna, nada más con corriente directa. Aquí la respuesta:

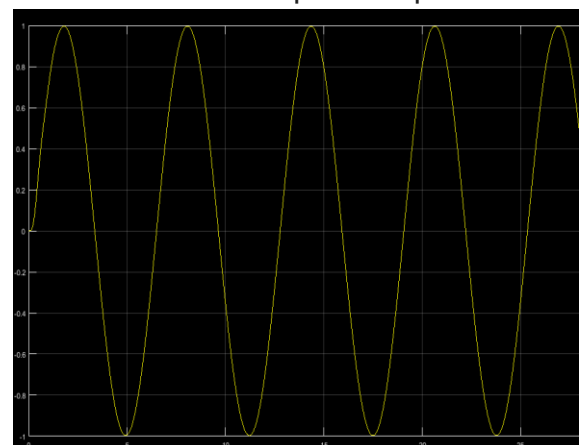


Figura 43: Respuesta a entrada coseno.

Por último, se procede a analizar la robustez del sistema. Para ello, se hace una superposición de señales en la herramienta scope de simulink, como se demostró en diagramas anteriores. Se hace variar la K y la K_a , como en el sistema anterior, 20% 10% superior e inferior, y se hace comparación con la señal sin modificar. Aquí la grafica de “ K ”:

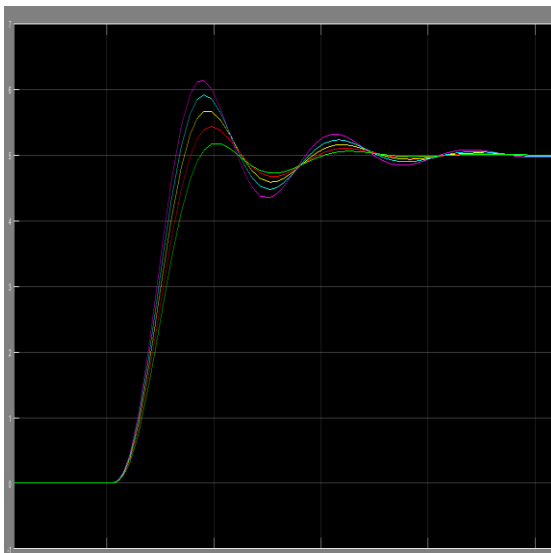


Figura 44: Variación de K_a para el observador.

Las líneas de la grafica representan, aumento del 20% morada, aumento del 10% azul clara, amarilla señal del polo sin modificar, señal roja el polo disminuido al 10% y por último la verde disminuido al 20%. Podemos observar un resultado similar al primer sistema, cuando aumentamos los polos, aumentan los sobrepicos, el tiempo de reposición disminuye levemente, y en esta grafica si se aprecia el tiempo de establecimiento con más claridad. Si aumentamos los polos, el tiempo de establecimiento aumenta, si los disminuimos, disminuye el tiempo de establecimiento. Existe una sensibilidad en los polos evidente.

Procedemos a superponer K :

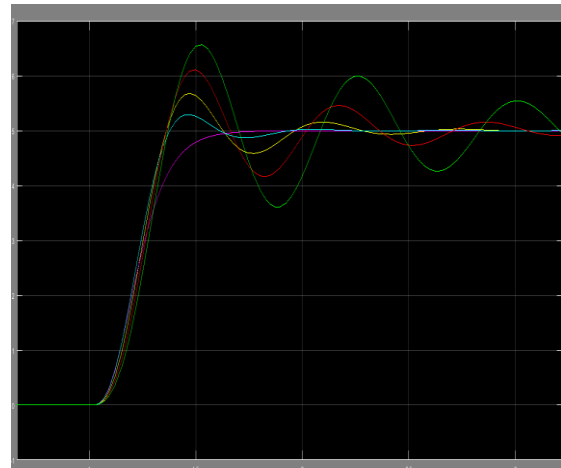


Figura 45: Variación de K .

Se considera que esta grafica es la más interesante de todo el paper, ya que existen diferencias notables en cada grafica con la misma variación de los polos. En este caso, si disminuimos el valor de los polos (la convención de los colores es la misma que la anterior) vemos como aumenta el sobrepico (justo lo contrario) aumenta el tiempo de reposición (contrario a lo antes expuesto, a medida que aumentábamos el sobrepico, el tiempo de reposición disminuía) y aumenta el tiempo de establecimiento de la grafica. Mientras que cuando aumentamos el valor de los polos de K_a , observamos como el sobrepico disminuye considerablemente, hasta tal punto que observamos una respuesta subamortiguada, algo que no se había visto en el paper. A medida de que aumentamos K_a , el tiempo de reposición disminuye, así como disminuye el tiempo de establecimiento.

Conclusiones:

El sistema de control propuesto en diagrama de bloques, es sólido y presenta una gran capacidad para

controlar la altura del tren. Responde rápido ante perturbaciones, pequeñas y grandes, y por esto para descontrolar el tren necesitaría una situación muy impredecible. El sistema además es robusto, es difícil que se salga de su respuesta habitual. Como se preveo que puede ser difícil medir las variables de estado, se construyó también el observador. Es más sencillo construir el primer sistema lazo cerrado, por simple hecho que puedes medir las variables con mejor criterio y los sensores actúan cómodamente, aunque con un observador de estados el sistema también responde a la perfección. No existe recomendación para instalar el controlador, sino dependiendo de la dificultad de medir las variables de estado.

titulo obtenido de University of Manchester, UK youtube video: <https://www.youtube.com/watch?v=CsB0TGRYq08>

Referencias Bibliográficas:

- Ogata K. (2003) Ingeniería de Control Moderna.
- University of Carnegie Mellon, Detroit & Michigan: Control Tutorials for Simulink & Matlab (2015). Extraído de: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=InvertedPendulum§ion=ControlDigital>
- Apuntes de clases.
- Professor Essam Hamdi, University of Teesside, Cleveland, United Kingdom, titulo obtenido de University of Manchester, UK youtube videos: <https://www.youtube.com/watch?v=NHt7PhPmN4g&list=PLltn0Tv0khQgeMsLGymQtifnTWb51lQqh&index=2>
- Professor Essam Hadi, University of Teesside, Cleveland, United Kingdom,