



**TECNOLOGICO  
DE MONTERREY®**

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de  
Monterrey Campus Querétaro

Laboratorio integral de control automático

Agosto- Diciembre 2018

Profesor: Ulises Moreno Yépes

Equipo 2

Práctica #6: Tuning

Integrantes:

Claudia Haydee Sánchez Robles A01209708

Erik Padron Trujillo A01152220

Roberto Figueroa Saavedra, A01209689

Gerardo Daniel Naranjo Gallegos, A01209499

**Resumen**

En la presente se da a conocer un reporte donde se muestra la realización de un código en Arduino en el cual es posible determinar los parámetros que definen el comportamiento de la respuesta de los controladores. Es decir, modificar el rango de ventana para el controlador ON/OFF con histéresis, el valor  $K_p$  para el controlador P y los valores  $K_p$  y  $K_i$  controlador PI. Complementando con el código que anteriormente se seleccionan el valor de las RPM'S y con qué controlador se deseaba trabajar.

Como primer punto se realizan los cálculos en los que se basa la selección de los valores  $K_p$  y  $K_i$  empíricos para probar la estabilidad de la respuesta de salida y como parte final las respuestas gráficas de cada uno de los controladores cuando se tienen valor fijo de  $K_p$  con  $K_i$  variable y cuando se tiene  $K_i$  fijo con  $K_p$  variable.

## Contenido

Introducción .....	3
Desarrollo .....	4
Tuning del controlador P .....	4
Tuning del controlador PI .....	7
Gráficas con $K_P$ fijos.....	8
Tuning ON/OFF Histéresis .....	17
Conclusiones .....	18
Referencias.....	18

# Introducción

Se describe cómo "Tuning" a la puesta a punto o a la sintonización de un sistema, el cual se logra mediante el ajuste de condiciones óptimas a las cuales tiende a funcionar dicho sistema con el fin de obtener una respuesta específica. En la mayoría de los casos se espera obtener una respuesta que mantenga estable al sistema que se está controlando, ya que esto indicará que los parámetros bajo los que está funcionando son los correctos y existen buenas condiciones para ser implementados. Por otra parte, en condiciones no óptimas el sistema se convierte en inestable por lo que su respuesta de salida no es la esperada, ya que esta presenta una gran cantidad de perturbaciones y no es para nada una señal referenciada a la entrada. Una respuesta inestable se obtiene cuando no hay un valor de asentamiento, es decir que para un tiempo infinito el valor de la respuesta sigue cambiando. Este comportamiento se percibe en la fig. 1.1

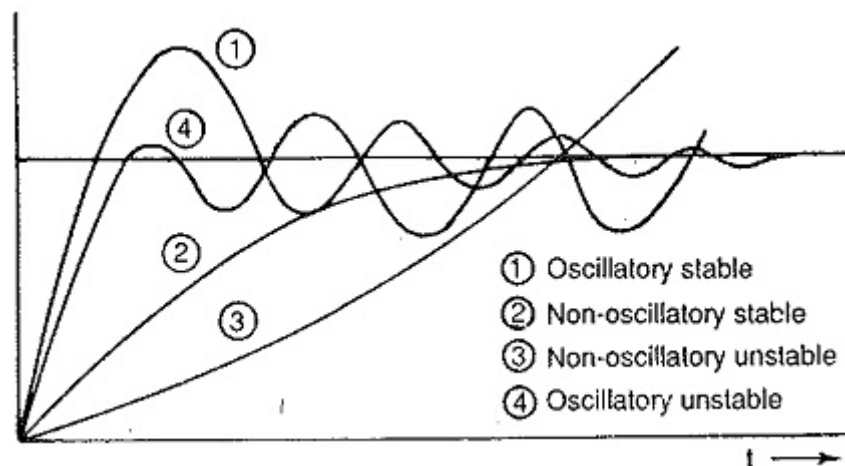


Fig. 1.1 Tipos de Respuesta estable e inestable

Para obtener la sintonización de los diferentes tipos de controladores se utilizó mayormente el método de ROUTH-HURWITZ, el cual se define como un criterio que es usado en sistemas de tiempo continuo para determinar si el denominador de la función de transferencia tiene raíces en el semiplano derecho del plano  $s$ . Utilizándolo principalmente en los controladores P y PI, ya que este como resultado final muestra un valor numérico a partir del cual los valores mayores a dicho valor y que son propuestos para  $K_P$  o  $K_I$  mantendrán un sistema estable y por el contrario los de menor valor harán inestable el sistema. Para el controlador ON/OFF los porcentajes de la ventana de rangos se obtuvieron de manera empírica.

A continuación, se desarrollan los cálculos matemáticos empleados para elegir cada uno de los valores aleatorios de  $K_P$  y  $K_I$  probado de manera estable e inestable, así como los porcentajes del controlador ON/OFF. Además, que se muestran las respuestas obtenidas en cada uno de ellos de manera gráfica.

# Desarrollo

## Tuning del controlador P

Para este controlador se realizaron 5 muestras de cómo responde el sistema según ciertos valores de  $K_P$ , los cuales fueron propuestos de manera aleatoria basados en los cálculos previamente hechos mediante el método de Routh Hurwitz, cuatro de ellos en el rango de estabilidad y uno más en el lado inestable.

A continuación, se muestra el cálculo para conocer a partir de que valores el sistema mostrará estabilidad.

$$HYR(s) = \frac{G_c(s) * G_p(s)}{1 + G_c(s) * G_p(s)}$$

$$P(s) = 1 + G_c(s).G_p(s) = 0$$

$$= 1 + \frac{0,9633 K_p}{0.1387 s + 1}$$

$$= 0.1387 s + 1 + 0.9633 K_p$$

$$s^1 \quad 0.1387$$

$$s^0 \quad 0.9633 K_p + 1$$

$$K_p = -\frac{1}{0.9633}$$

$$K_p > -7.2$$

Por lo tanto, todos los valores mayores a -7.2 que se le quieran dar a  $K_P$  generarán que el sistema se mantenga estable y por el contrario los valores menores a este resultado harán que el sistema se muestre inestable. Dado esto se eligieron 4 valores para  $K_P$  en el rango estable que fueron 2,4,6 y 8 y 1 el inestable que fue -8 gracias a los cuales se realizan las siguientes gráficas. Figura 1.2

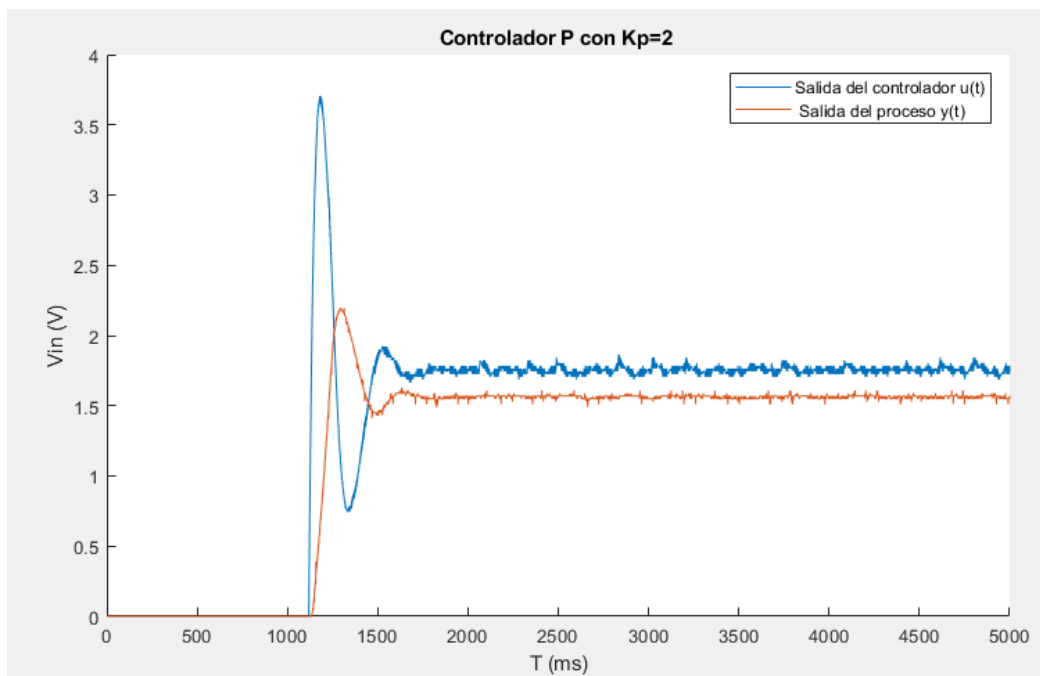


Figura 1.2: Controlador P con  $K_p=2$

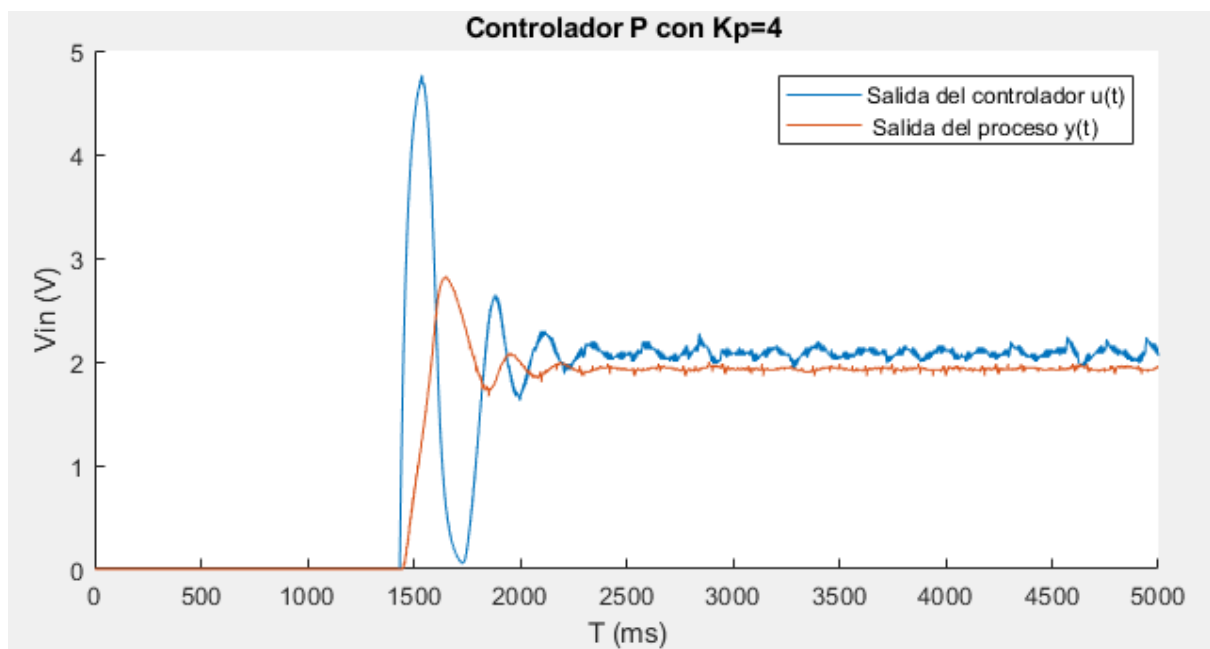


Figura 1.3: Controlador P con  $K_p=4$

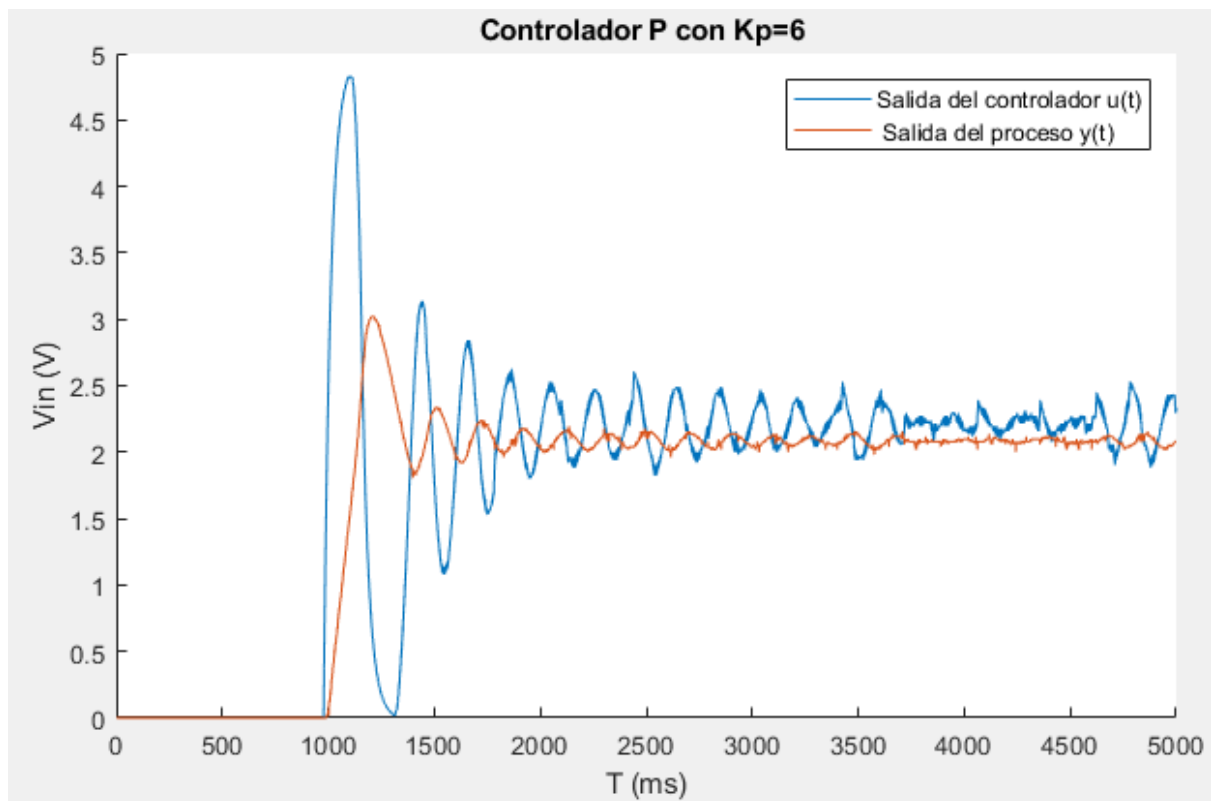


Figura 1.4: Controlador P con  $K_p=6$

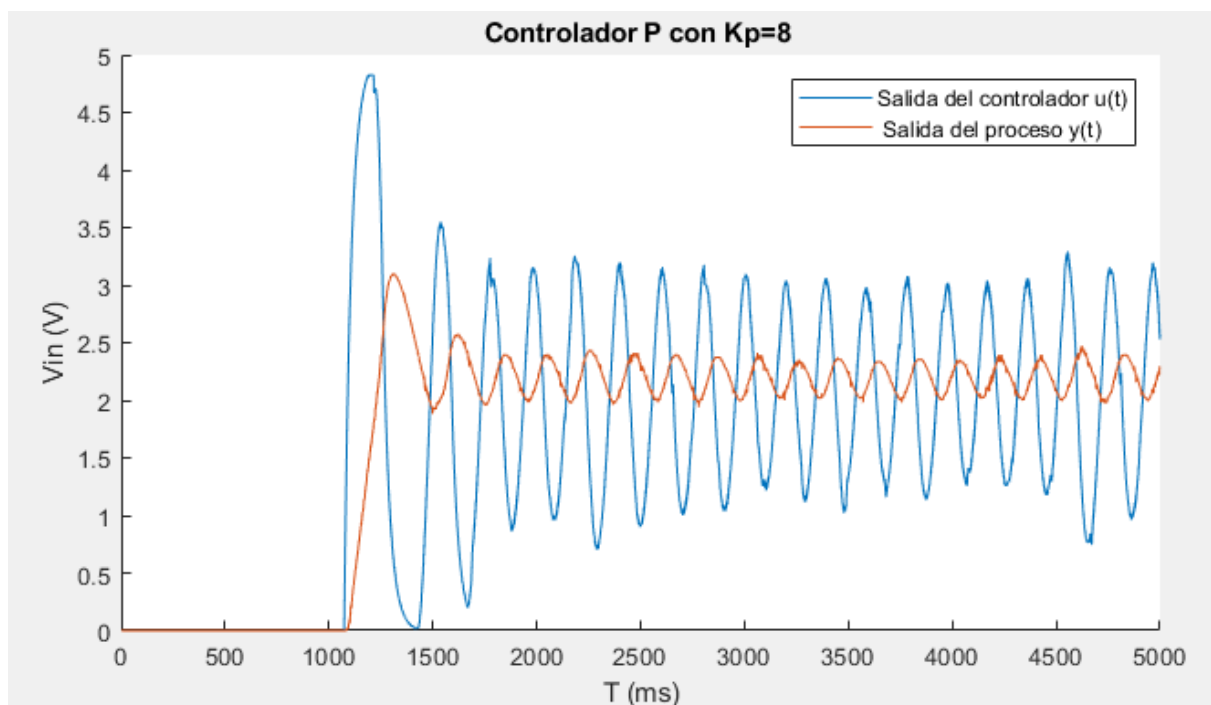


Figura 1.5: Controlador P con  $K_p=8$

Cómo se logra observar en la fig 1.2, conforme el valor de  $K_p$  es menor la respuesta tiende a ser más estable en un lapso de tiempo más corto. En este caso con un valor de  $K_p=8$  se muestra una respuesta estable oscilatoria, por otro lado, con un valor  $K_p=3$  la respuesta es estable sin presentar oscilación.

# Tuning del controlador PI

Para este controlador se realiza un aproximado de 12 muestras para saber cómo responde el sistema de acuerdo a ciertos valores de  $K_P$  y  $K_I$ , los cuales fueron propuestos de manera aleatoria basados en los cálculos previamente hechos mediante el método de Routh Hurwitz, algunos de ellos en el rango de estabilidad y otros más en el lado inestable, en ciertos casos se cambiaron solo el valor de  $k_p$  y  $k_i$  se mantenía constante y en otros fue viceversa, además de un par de ejemplos más donde ambos valores son variables.

A continuación, se muestra el cálculo para conocer a partir de que valores el sistema mostrará estabilidad.

$$HYR(s) = \frac{G_c(s) * G_p(s)}{1 + G_c(s) * G_p(s)}$$

$$P(s) = 1 + G_c(s) * G_p(s) = 0$$

$$= 1 + (K_p + \frac{K_i}{s}) + (\frac{0.9633 K_p}{0.1387 s + 1})$$

$$= 1 + (\frac{0.9633 K_p}{0.1387 s + 1}) + \frac{0.9633 K_i}{s(0.1387 + 1)}$$

$$= 1 + \frac{0.9633 K_p s + 0.9633 K_i}{s(0.1387 s + 1)}$$

$$= s(0.1387s+1)+0.9633 K_p s+0.9633 K_i$$

$$= 0.1387 s^2 + s(0.96633 K_p + 1) + 0.9633 K_i$$

$$\begin{array}{l} s^2 \quad 0.1387 \\ s^1 \quad 0.9633 K_p + 1 \\ s^0 \quad 0.9633 K_i \end{array}$$

$$K_p = -\frac{1}{0.9633}$$

$$K_i > 0$$

$$K_p > -7.2$$

$$K_i > 0$$

Posteriormente se pueden ver las gráficas obtenidas de acuerdo con los valores de  $K_P$  y  $K_I$ , ya sea que los valores de  $K_P$  se mantengan fijos y los de  $K_I$  cambien o viceversa. Como primera parte se pueden ver las gráficas con un valor de  $K_P$  fijo=9 y valores de  $K_I$  variables donde 4 son estables y 1 inestable.

## Gráficas con $K_P$ fijos

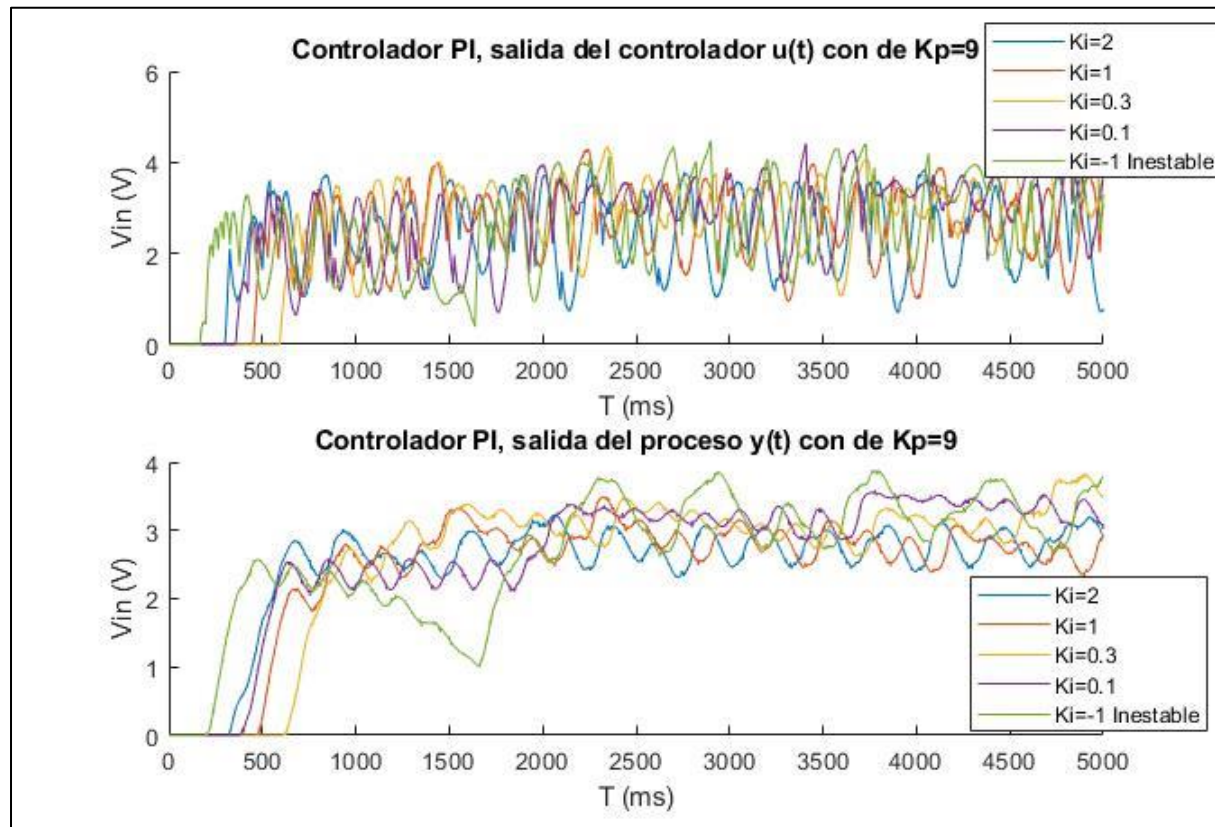


Fig. 1.6 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_P=9$  fijo y  $K_I$  variable

Posteriormente fijamos un nuevo valor de  $k_p$ , en el caso de la Fig. 1.4 usamos un valor de 7 y podemos ver a diferencia de la Fig. 1.3 tenemos un valor más aproximado al de referencia.



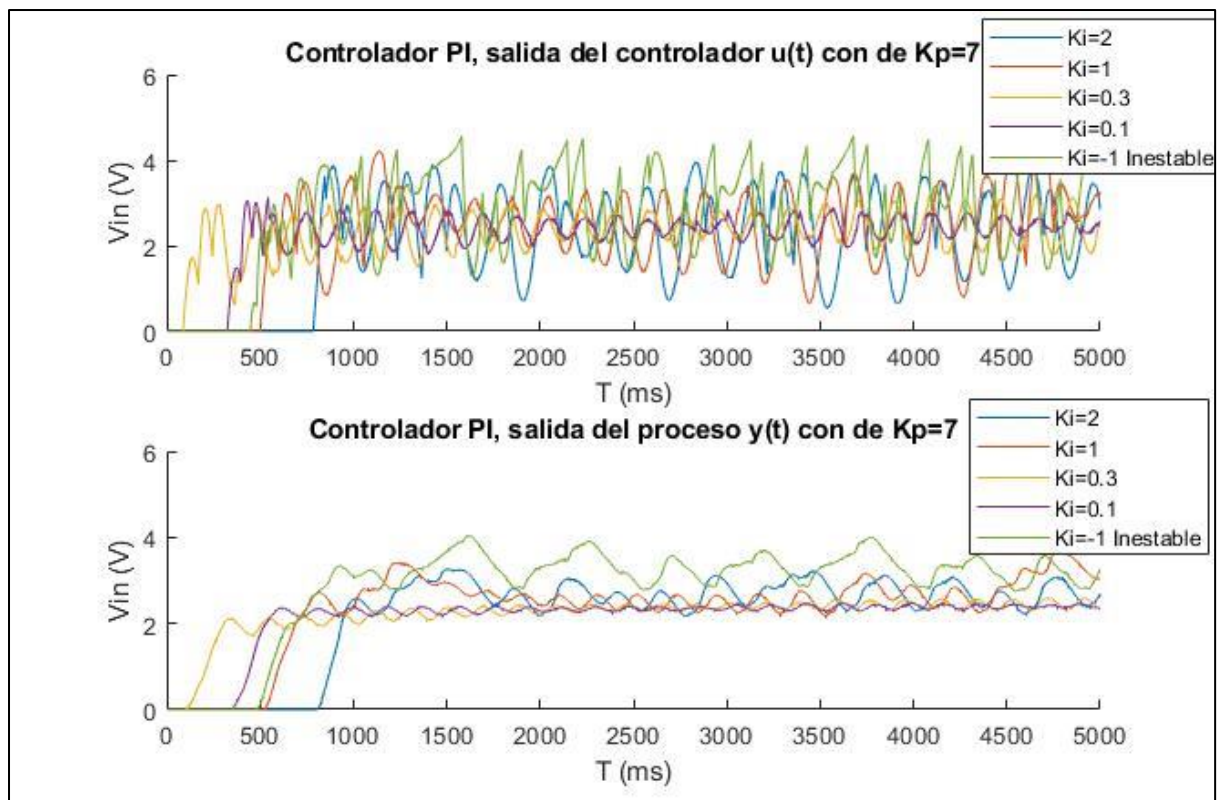


Fig. 1.7 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_p=7$  fijo y  $K_i$  variable

Después decidimos usar un  $k_p$  todavía más pequeño, por lo que pusimos un valor de 5, con lo cual observamos que se acerca aún más a nuestro valor de referencia.

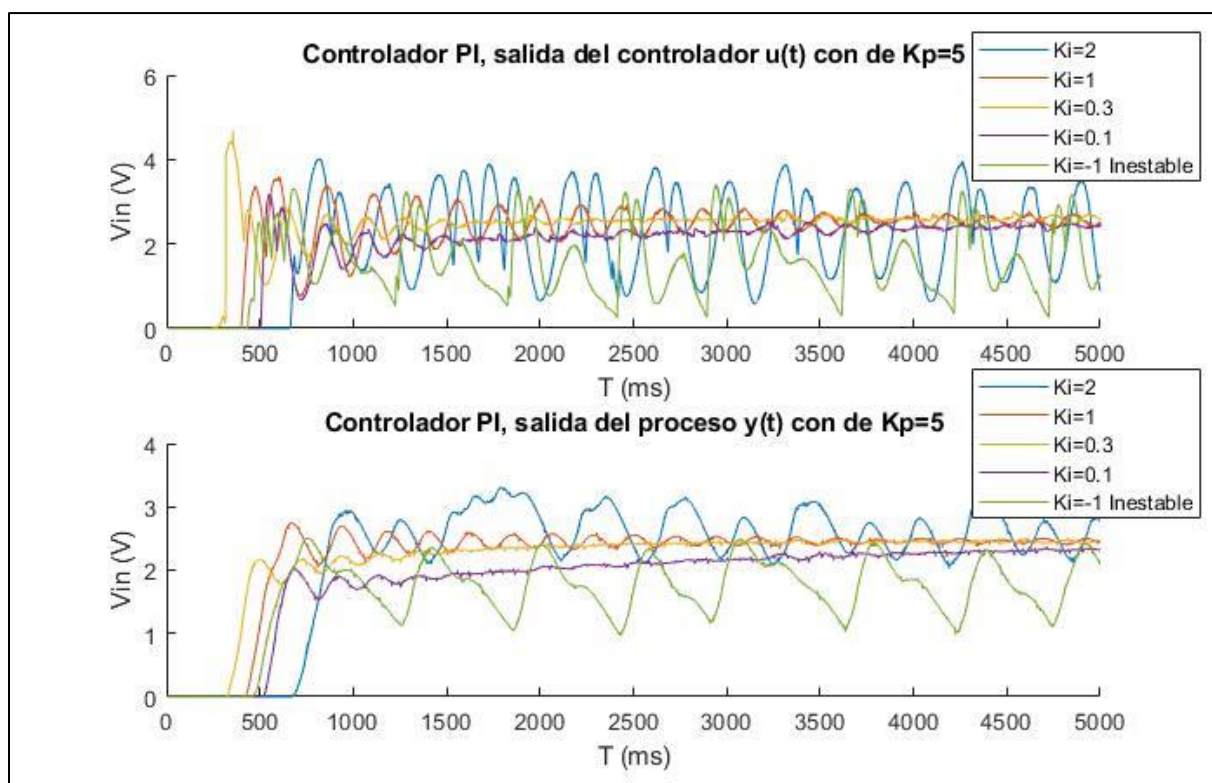


Fig. 1.8 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_p=5$  fijo y  $K_i$  variable

Bajamos el valor de  $k_p$  hasta 3 y observamos que dependiendo mucho de la  $K_i$  tiende a mejorar cuando esta es más pequeña y empeora si el valor de  $k_i$  es bastante elevado.

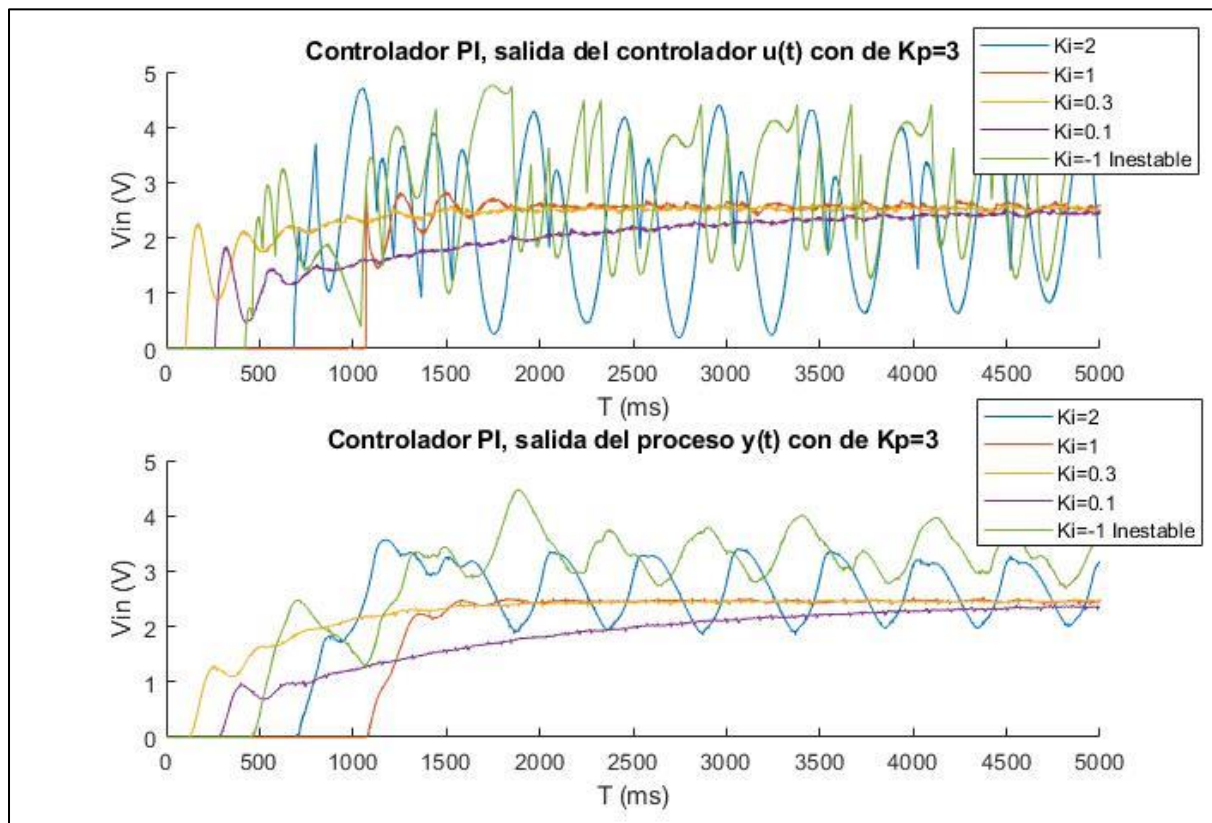


Fig. 1.9 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_p=3$  fijo y  $K_i$  variable

## Gráficas con $K_P$ fijos

Como anteriormente se comentó, después de sacar los valores con  $k_p$  fijos, se hace lo mismo, pero ahora con los  $k_i$  fijos, obteniendo los siguientes resultados.

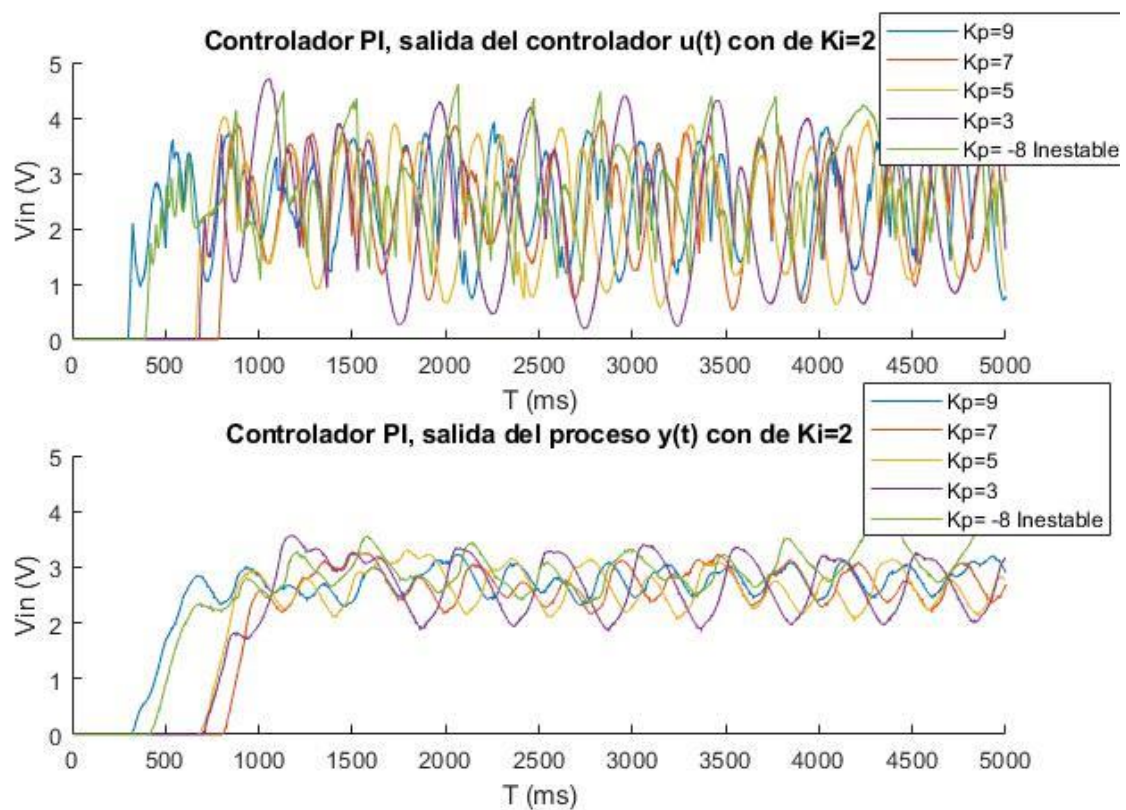


Fig. 1.10 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_i=2$  fijo y  $K_p$  variable

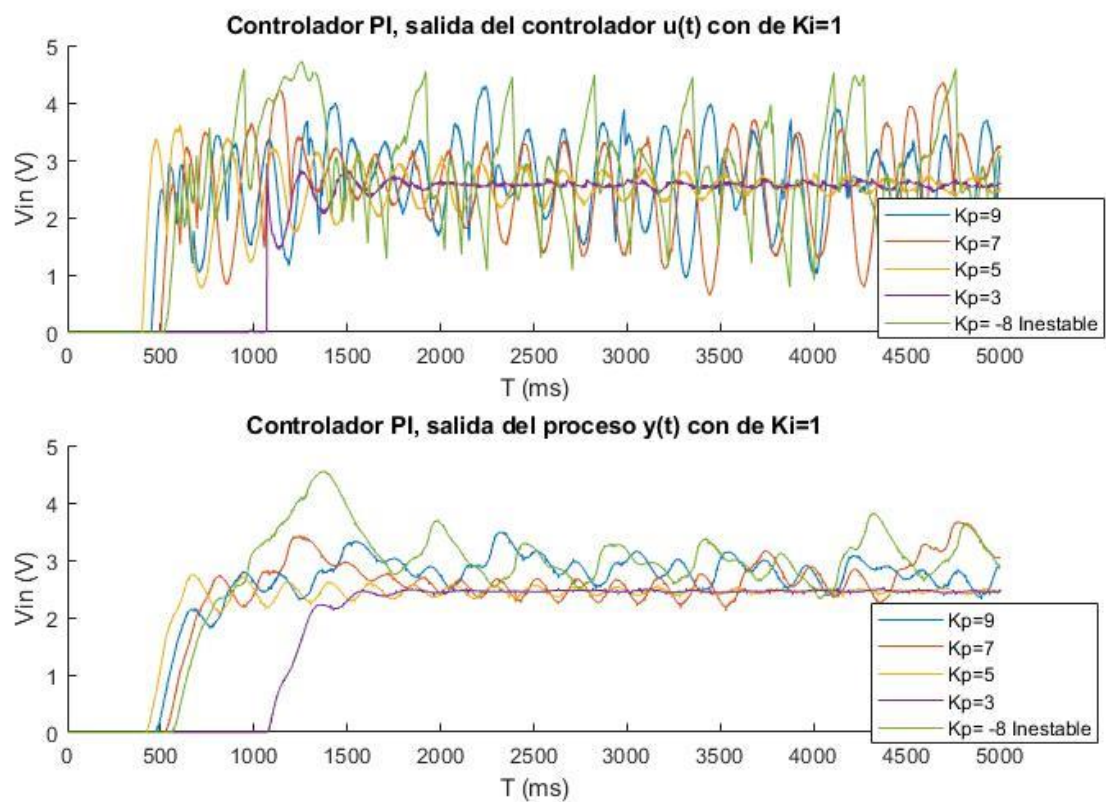


Fig. 1.11 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_i=1$  fijo y  $K_p$  variable



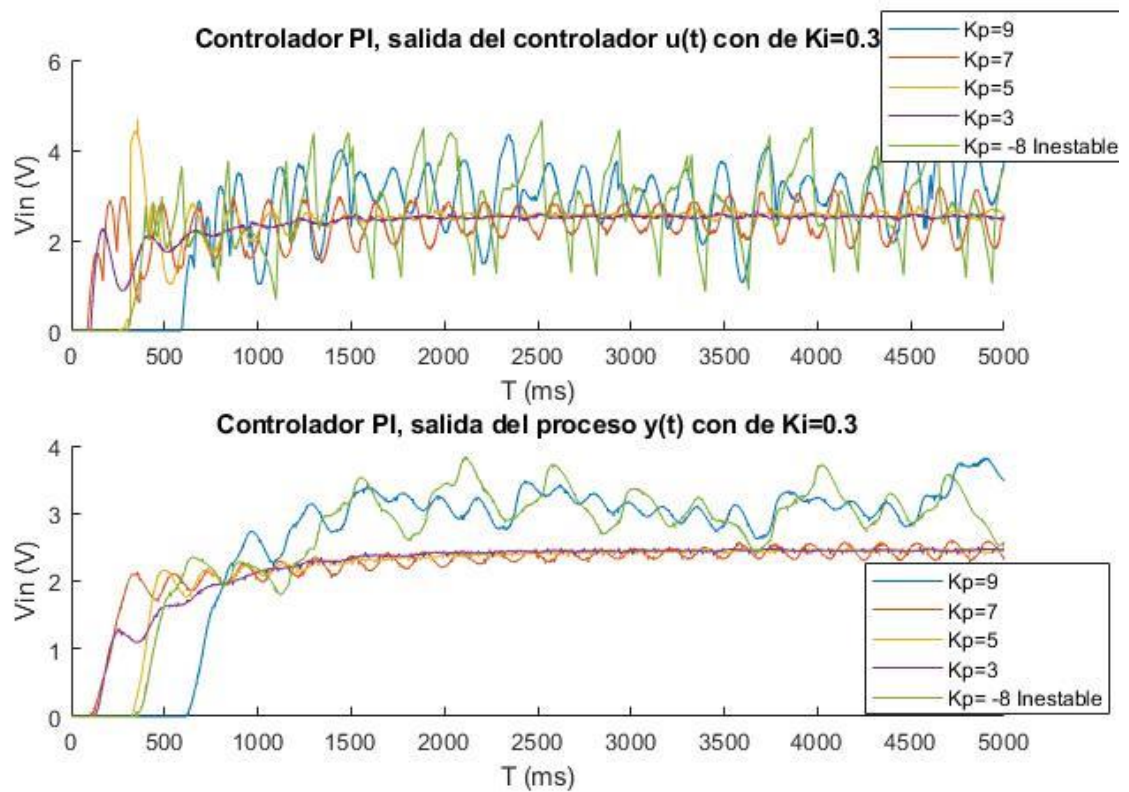


Fig. 1.12 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_i=0.3$  fijo y  $K_p$  variable

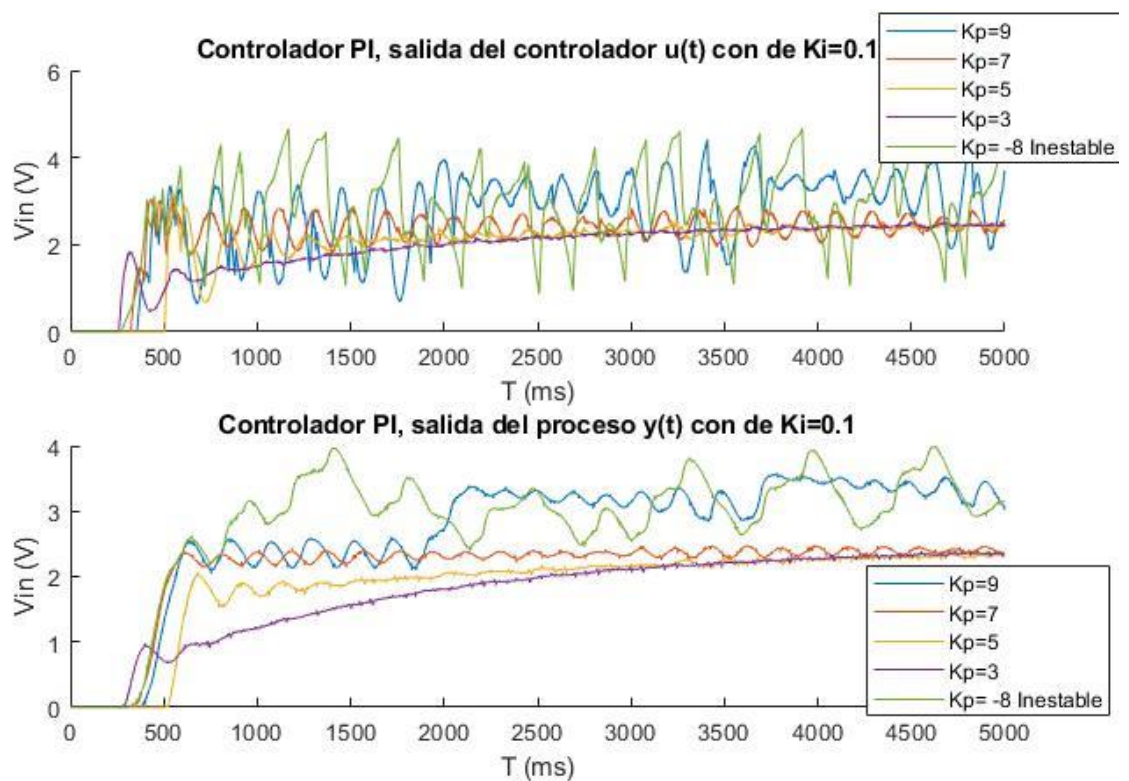


Fig. 1.13 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_i=0.1$  fijo y  $K_p$  variable

Tal y como se pueden observar en las diferentes gráficas de los resultados, cuando se tiene un valor ya sea  $K_p$  o  $K_i$  inestable, la respuesta del proceso nunca se estabiliza aun cuando se tiene un tiempo amplio de espera, por lo que cumple con la definición de una respuesta inestable ya que incluso en un lapso infinito la respuesta seguirá siendo variable y por lo tanto inestable.

Después se nos pide obtener unas gráficas similares a las descritas en clase para poder observar mejor el comportamiento del controlador PI.

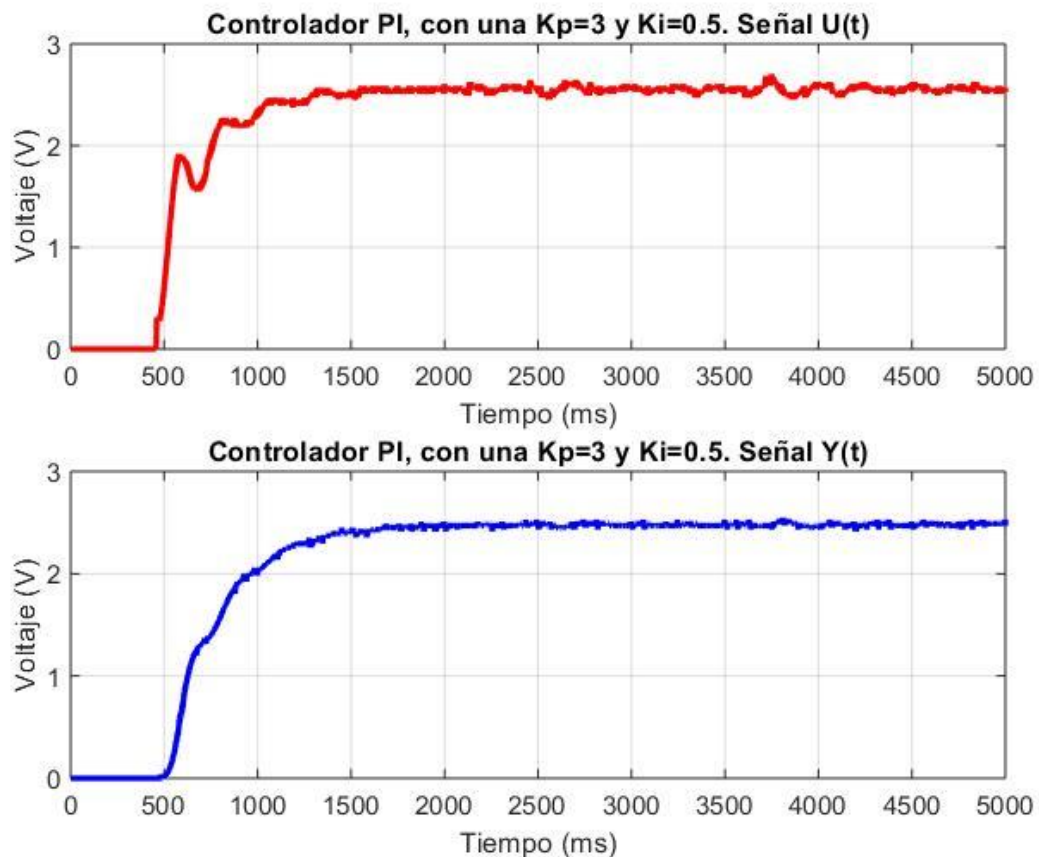


Fig. 1.14 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_i=0.5$  fijo y  $K_p=3$

En la Fig.14 podemos observar un comportamiento de salida similar a uno de primer orden, este lo obtuvimos con un valor de  $K_i$  algo pequeño y un  $K_p$  no muy alto para evitar la saturación, pensamos que es un tipo de balance en estos valores para poder tener este tipo de salida.

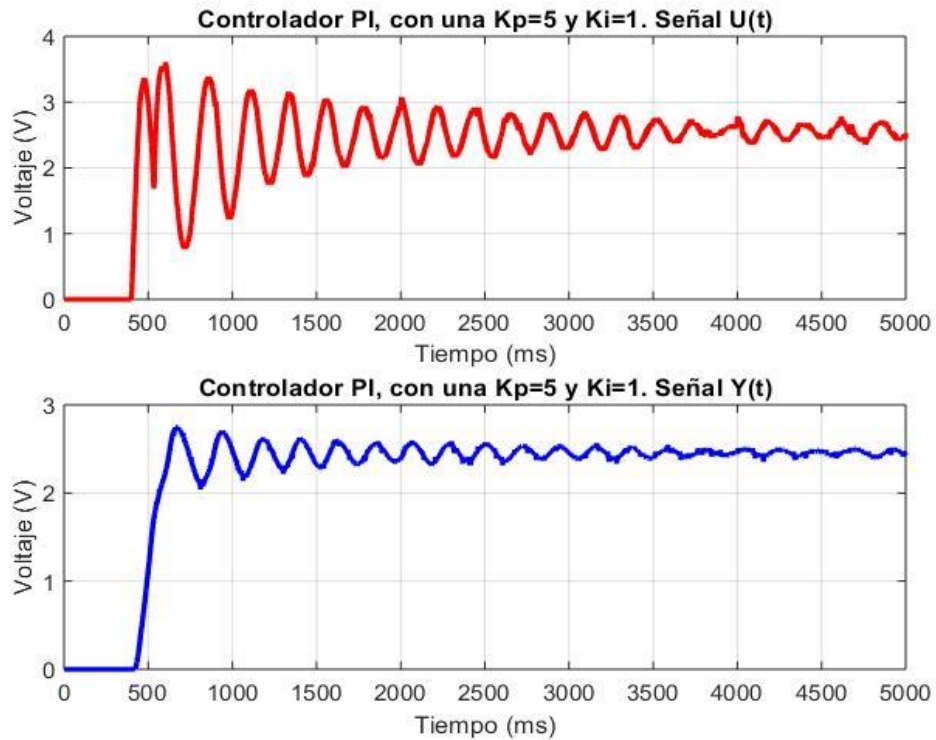


Fig. 1.15 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_i=1$  fijo y  $K_p=5$ .

En la Fig. 1.15 se ve la salida un poco más parecida a un comportamiento de segundo orden, el cual presenta una señal amortiguada hasta llegar a estabilizarse por completo.

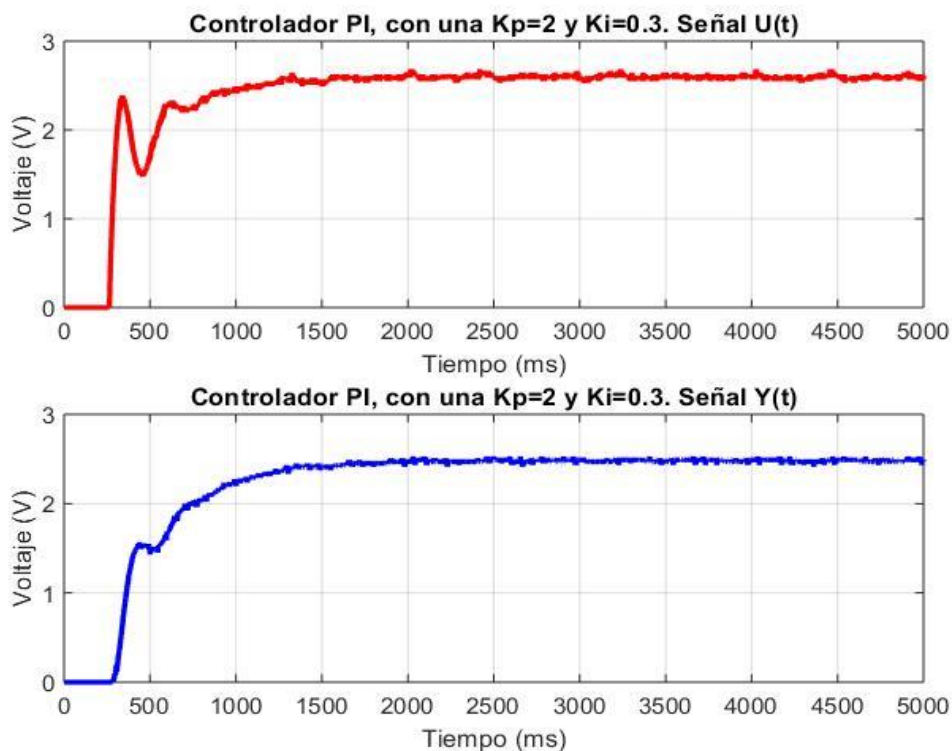


Fig. 1.16 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_i=0.3$  fijo y  $K_p=2$

En la Fig.1.16 se observa una señal que pareciera tener un comportamiento de primer orden, pero no es del todo exponencial, teniendo una pequeña caída y después subiendo nuevamente hasta estabilizarse, en la parte del controlador podemos observar el cómo sube rápidamente y después baja para compensar la señal de salida.

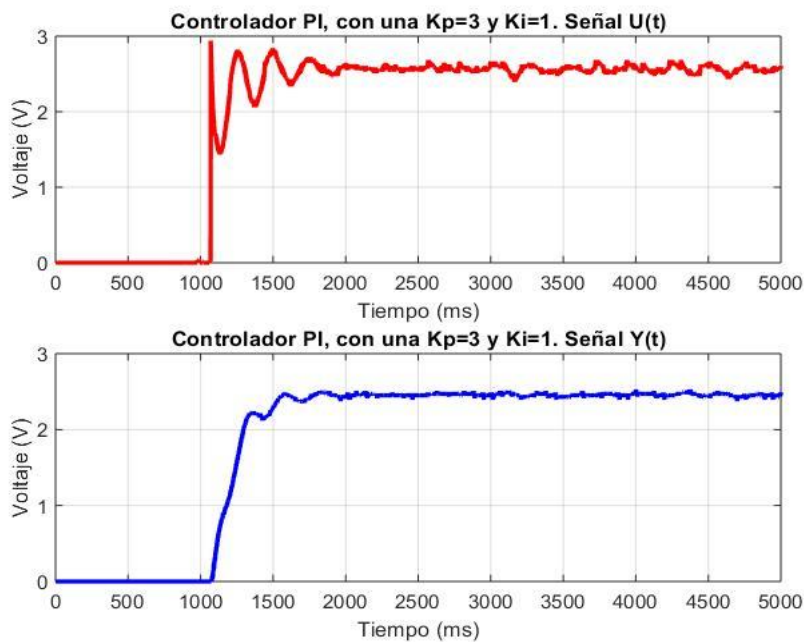


Fig. 1.17 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_i=1$  fijo y  $K_p=3$

En la Fig. 1.17 se observa como la pendiente en el controlador es disparada desde un inicio y después se amortigua y llega a estabilizarse, mostrando de salida un comportamiento diferente a las gráficas anteriores.

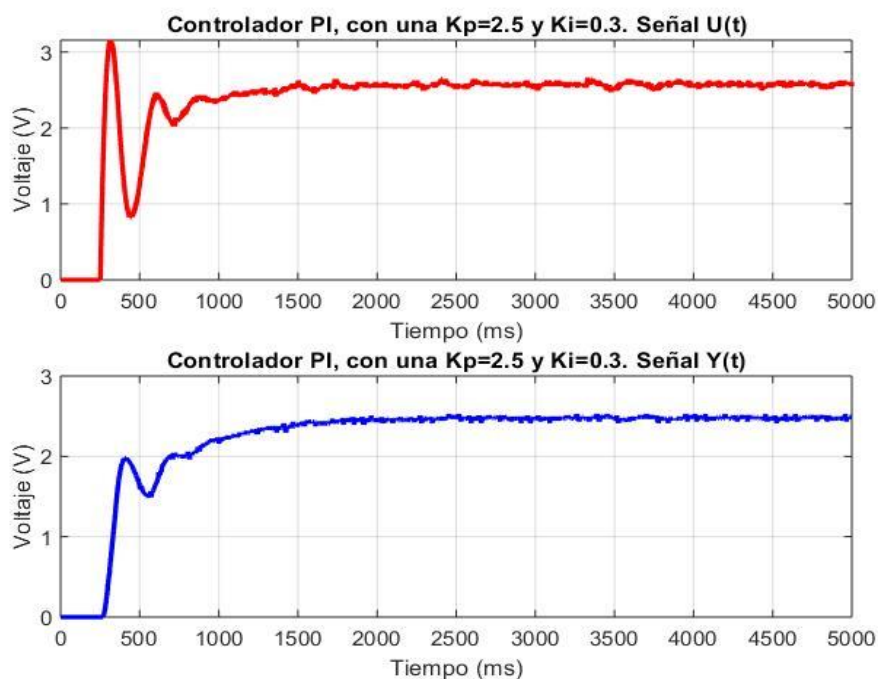


Fig. 1.18 Respuesta del controlador  $u(t)$  y del proceso  $y(t)$  con  $K_i=0.3$  fijo y  $K_p=2.5$



Para la Fig. 1.18 se muestra en el controlador como se dispara la señal y después da un bajón para compensarlo, llegando a amortiguarse un poco y empezar a estabilizarse, teniendo un comportamiento de salida con una pequeña montaña y después sube a estabilizarse.

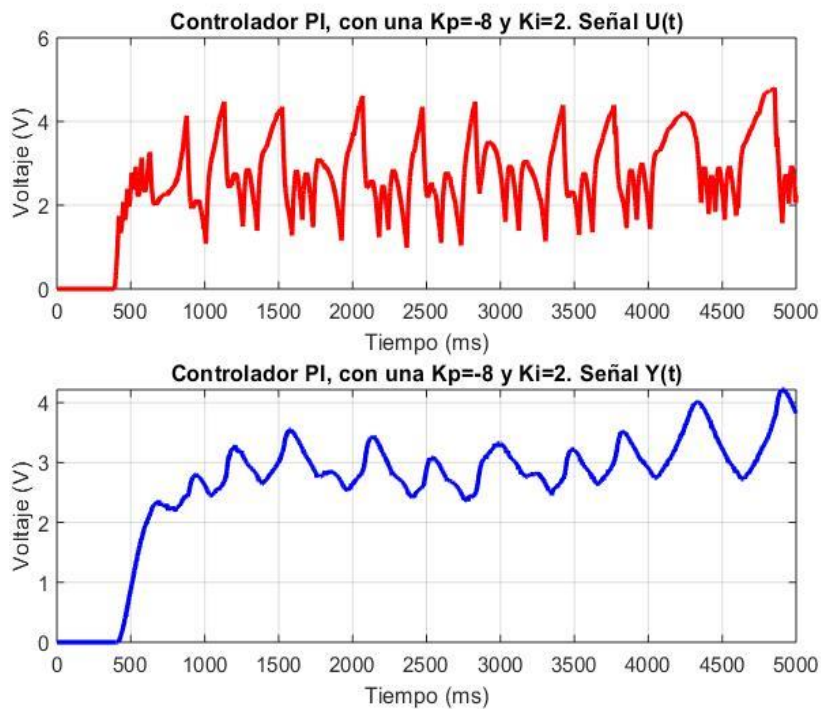


Fig 1.19: Respuesta del controlador PI con valores inestables 1

En la Fig. 1.19 se usa una  $K_p$  inestable, haciendo que el sistema se comporte de manera extraña, no llegando a estabilizarse y mostrando un tipo de relieve en la salida, teniendo un comportamiento raro en el controlador intentando compensarlo.

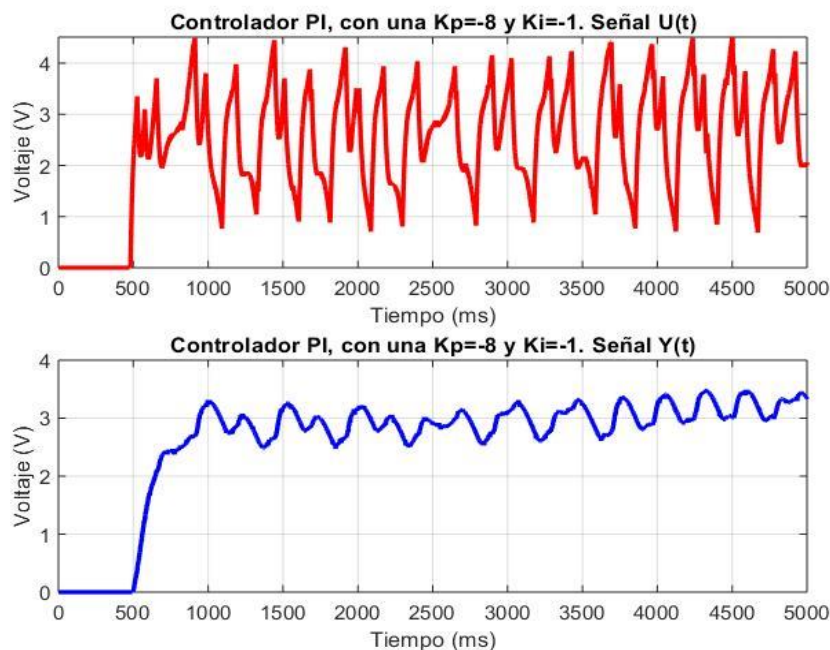


Fig 1.20: Respuesta del controlador PI con valores inestables 2



Para la última figura solicitada la Fig. 1.20 se usaron 2 valores inestables para tanto  $k_p$  como para  $k_i$ , teniendo un resultado interesante, si bien la salida muestra comportamiento extraño, tiene algo de continuidad en la señal, haciendo que el controlador haga picos para intentar compensarlo, aun así, no llega a estabilizarse y no se encuentra cerca de nuestro valor deseado.

## Tuning ON/OFF Histéresis

Para este controlador se utilizaron diferentes valores para la ventana de histéresis con el fin de poder conocer la forma en la que funciona el controlador. Se puede observar que entre mayor sea el valor de la ventana la salida se vuelve más amplia y tardada, haciendo que nuestro proceso si bien intenta estabilizarse en el valor deseado, por el hecho de ser un ON/OFF no puede llegar al valor deseado, siendo el error dependiente de la ventana de histéresis.

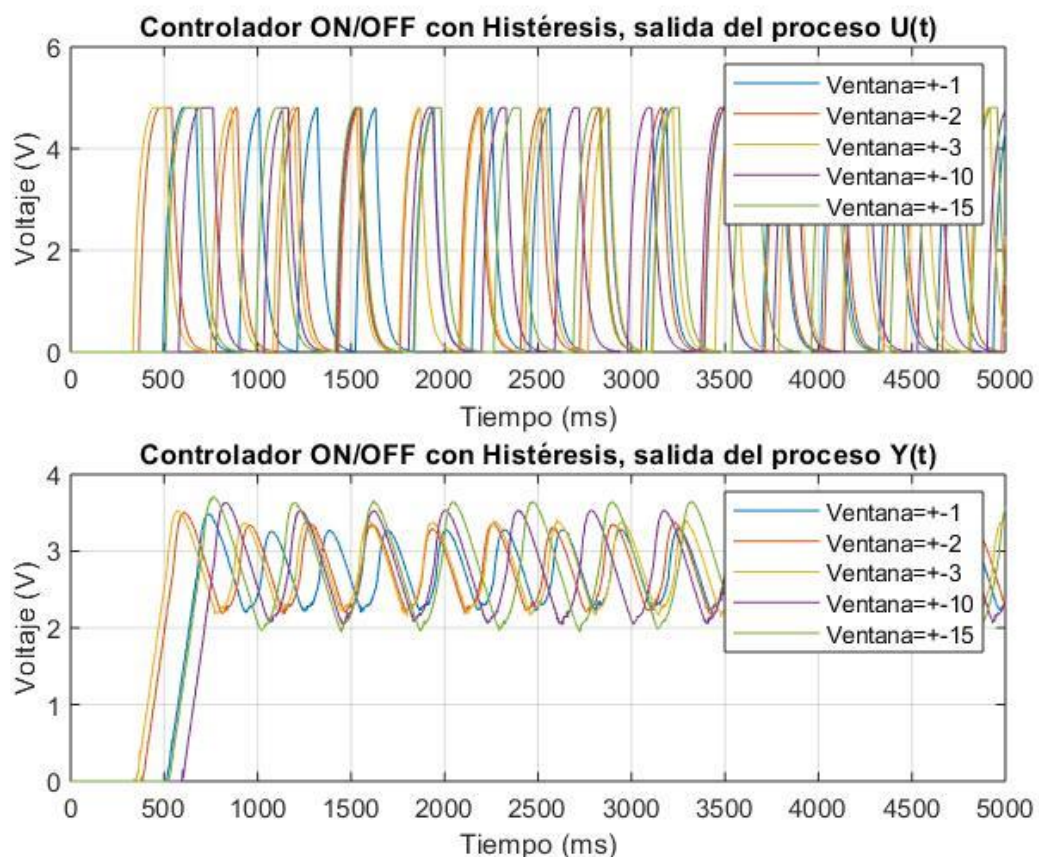


Fig 1.21: Respuesta del controlador ON/OFF Histéresis

# Conclusiones

Como conclusión de este apartado se recuerda el uso del criterio de Routh-Hurwitz para poder analizar el área de estabilidad de nuestros controladores, analizando de forma teórica nuestros valores de  $K_p$  y  $K_i$ , respecto a cada uno de ellos y así proponiendo de forma empírica valores con la finalidad de tener la respuesta más acertada para nuestro proceso, usando la modificación por medio de la interfaz creada.

Obtuvimos resultados satisfactorios para cada uno de los controladores creados y podemos tener una idea mejor del funcionamiento de ellos con cada una de las modificaciones, las cuales nos ayudan a poder conocer la forma de actuar respecto a los diferentes valores propuestos en cada uno de ellos.

# Referencias

Definiciones. (2016). Que es Tuning. Octubre 08,2018, de Definiciones Sitio web:

<https://definicion.de/tuning/>

Jean,F.. (2017). Teoria de control. Octubre 08,2018, de DULHOSTE Sitio web:

[http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index\\_archivos/Documentos/TC6\\_Estabilidad.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Documentos/TC6_Estabilidad.pdf)

NE. (2016). CRITERIO DE ROUTH–HURWITZ.. Octubre 08,2018, de Ingenieria Sitio web:

[http://www.ing.uc.edu.ve/~dgramos/tema15/tema15\\_4.html](http://www.ing.uc.edu.ve/~dgramos/tema15/tema15_4.html)

