



#### Profesores

*Ph.D. Victor Grisales P. (Teoría)*

*M.Sc. Horacio Coral E. (Lab)*

## Guía de Laboratorio No. 3 Control ON/OFF y Control Proporcional

### 1. DESCRIPCIÓN

En esta práctica, el estudiante podrá diseñar e implementar sistemas de control on/off para un motor LEGO, también analizar los efectos de la realimentación, y diseñar e implementar sistemas de control proporcional. Cada estrategia de control deberá ser simulada usando Matlab/Simulink y luego implementada mediante código NXC en el Brick Command Center.

En la primera parte, los estudiantes simularán e implementarán controladores on/off para regular la posición del motor y analizarán sus ventajas y desventajas. En la segunda parte del laboratorio, los estudiantes se enfrentarán con el diseño, simulación e implementación de sistemas de control proporcional para los lazos de velocidad y posición del motor LEGO, cumpliendo con requerimientos de diseño como: tiempo de estabilización y error permanente. Así mismo, se analizarán los efectos de la realimentación mediante simulación en Matlab/Simulink que luego se verificarán de forma experimental usando un motor LEGO. Se podrá observar y analizar los efectos que tiene la realimentación en la estabilidad, y en la respuesta dinámica y estática de un sistema.

### 2. OBJETIVOS

- Simular e implementar estrategias de control on/off para regular la posición de un motor LEGO.
- Observar y analizar los efectos de la realimentación en sistemas continuos.
- Diseñar, simular e implementar sistemas de control proporcional usando requerimientos de tiempo de estabilización o error permanente para los lazos de velocidad y posición de un motor LEGO.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Control ON/OFF

Una de las formas más simples de control es el control on-off que se puede describir así [1, p. 23,24]):

$$u = \begin{cases} u_{max}, & \text{si } e > 0 \\ u_{min}, & \text{si } e < 0, \end{cases} \quad (1)$$

donde el error  $e = r - y$  es la diferencia entre la señal de referencia  $r$  y la salida del sistema (planta)  $y$ , y  $u$  es la señal de control. Esta ley de control implica que siempre se use la máxima acción correctiva.

Una de las ventajas del control on-off es que es muy simple y no tiene parametros que seleccionar cuando se implementa en su forma más simple. El control on-off con frecuencia mantiene la variable controlada cerca a

la referencia con oscilaciones, que pueden ser aceptables si la amplitud es lo suficientemente pequeña. Note que en la ecuación 1 la señal de control no está definida cuando el error es cero. Es común realizar modificaciones a la ley de control on-off introduciendo zona muerta o histéresis.

### 3.2. Efectos de la Realimentación

A fin de ilustrar las características y ventajas de la realimentación, se considera un lazo simple de realimentación. Aunque muchos sistemas de control son multivariables, los beneficios en lazos simples se pueden extender a lazos de control más complejos. Vea detalles en [2, p. 237-254].

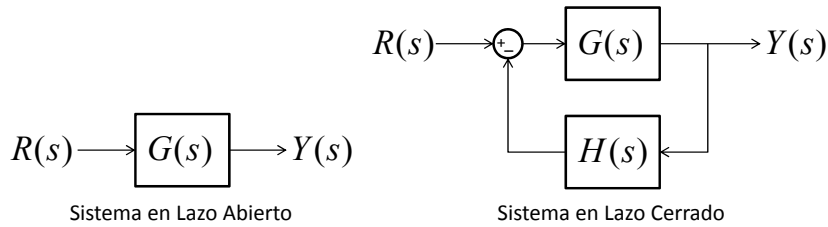


Figura 1: Sistemas en lazo abierto y cerrado.

Consideremos un sistema de control en lazo abierto y otro en lazo cerrado como los mostrados en la Figura 1. La principal diferencia entre los sistemas es la generación y utilización de la señal de error. El sistema en lazo cerrado, cuando funciona correctamente, opera de tal manera que el error se reduce al mínimo valor. La señal  $E_a(s)$  es una medición del error actuante del sistema y es igual al error  $E(s) = R(s) - Y(s)$  cuando  $H(s) = 1$ .

La salida del sistema en lazo abierto es:

$$Y(s) = G(s)R(s) \quad (2)$$

La salida del sistema en lazo cerrado es:

$$Y(s) = G(s)E_a(s) = G(s)[R(s) - H(s)Y(s)], \quad (3)$$

y por tanto,

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1 + GH(s)}R(s). \quad (4)$$

La señal del error actuante es:

$$E_a(s) = \frac{1}{1 + GH(s)}R(s). \quad (5)$$

De lo anterior, es claro que a fin de reducir el error en el sistema de control, la magnitud de  $1 + GH(s)$  debe ser mucho más grande que uno en todo el rango de importancia de  $s$ . También se observa que la ganancia total del sistema en lazo cerrado se reduce en el factor  $(1 + GH(s))$ , y además los polos del sistema en lazo cerrado corresponden a las raíces de  $1 + GH(s) = 0$ .

### 3.3. Control Proporcional

Realizar una acción de control proporcional al error es una opción de control simple de implementar, por esta razón es una estrategia extendida en el control de procesos sin muchas exigencias de desempeño. Este tipo de controlador relaciona la acción de control  $u(t)$  con el error  $e(t)$  por medio de una ganancia constante  $K_p$  tal cual como se muestra en la ecuación (6) o en términos de Laplace como se muestra en la ecuación (7). La constante de proporcionalidad  $K_p$  puede ser ajustada según consideraciones de diseño, aunque se debe prestar atención a los rangos de ganancia que se le puede dar al sistema para evitar que éste se vuelva inestable [3].

$$u(t) = K_p * e(t) \quad (6)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (7)$$

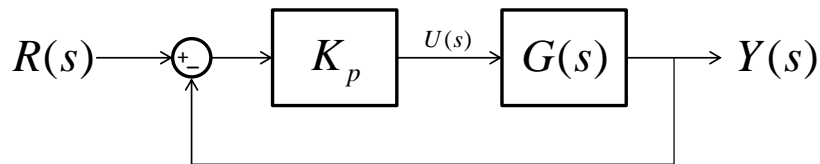


Figura 2: Sistemas en lazo cerrado con control proporcional.

## 4. PROCEDIMIENTO

Esta práctica se divide en dos partes las cuales se desarrollarán en dos semanas (11 y 25 de Septiembre de 2012): Control ON/OFF del motor LEGO, y Control Proporcional del motor LEGO. Los puntos a continuación deberán ser desarrollados en grupos y entregados en un informe la semana siguiente a la culminación de las actividades (vea detalles en la sección 5 y 6). Los puntos prácticos deberán ser sustentados en clase de laboratorio. A continuación se detalla el procedimiento a realizar en cada parte:

### 4.1. Control ON/OFF del motor LEGO

En esta parte de la práctica, el estudiante utilizará la función de transferencia del motor LEGO  $G_{LEGO}(s)$  para diseñar y simular en Simulink un controlador ON/OFF que regule la posición del motor LEGO a un valor deseado. Luego de la simulación, se validará y analizará de forma experimental mediante implementación en el Bricx Command Center.

1. Diseñe y simule un sistema de control ON/OFF de posición del motor LEGO. Use el modelo mostrado en la Figura 3. El código del controlador ON/OFF deberá ser escrito dentro del bloque llamado Matlab function, según se observa en la Figura 4.
2. Analizar el error permanente, el esfuerzo de control y el tiempo de estabilización en el lazo de control.
3. Implementar el sistema de control ON/OFF de posición en el Bricx Command Center. Utilice como base para la implementación el archivo *controlpos.nxc*, y modifique el código en el BricxCC para que en cada experimento que se realice con el motor LEGO, se almacene la variable controlada (posición), la referencia o setpoint del sistema de control y la señal de control (porcentaje de voltaje aplicado al motor LEGO).

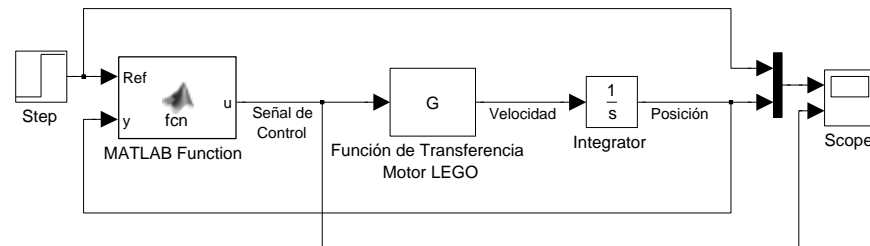


Figura 3: Diagrama de bloques del sistema de control ON/OFF de Posición.

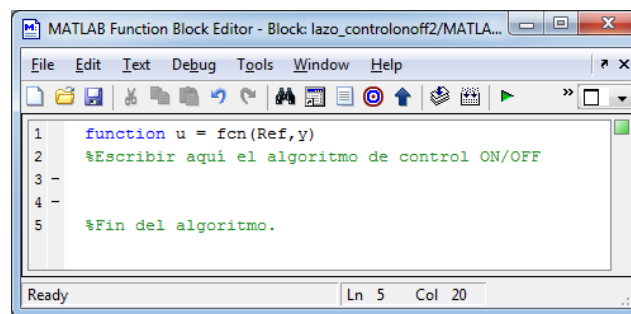


Figura 4: Bloque para la programación del controlador ON/OFF.

4. Comparar en Simulink la señal de control y la variable controlada del sistema de control ON/OFF de la simulación frente a los datos experimentales almacenados. Analizar y encontrar las diferencias y posibles razones.

## 4.2. Control Proporcional del Motor LEGO

En esta última parte de la práctica, el estudiante utilizará la función de transferencia del motor LEGO para diseñar y simular un sistema de control proporcional en los lazos de velocidad y posición, que finalmente validará y analizará de forma experimental mediante implementación en el Brick Command Center. Se requiere que el estudiante registre las respuestas de cada sistema de control implementado para realizar posterior análisis en Matlab.

1. Construya en Simulink un lazo de control de posición (ver Figura 1 derecha) usando la función de transferencia del motor LEGO (asuma  $H(s) = 1$ ) y analice qué efectos tiene la realimentación en contraste con el sistema en lazo abierto en relación a ganancia estática, tiempo de estabilización, ubicación de los polos y estabilidad.
2. Implemente y analice los efectos reales de la realimentación del motor LEGO en el lazo de control de posición. Para la implementación puede usar el archivo *controlpos.nxc*. Analice los mismos aspectos que en el ítem anterior pero ahora con las respuestas experimentales del motor LEGO.
3. Diseñe, simule e implemente un sistema de control proporcional de velocidad del motor LEGO tal que el sistema en lazo cerrado se estabilice dos veces más rápido que en lazo abierto. Para la simulación use el diagrama mostrado en la Figura 5. Describa el procedimiento utilizado para diseñar el controlador y

verifique que en simulación se cumpla el requerimiento solicitado. Para la implementación puede usar el archivo *controlvel.nxc*.

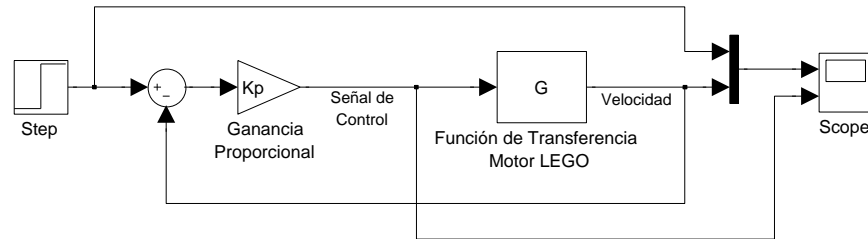


Figura 5: Diagrama de bloques del sistema de control proporcional de Velocidad.

4. Diseñe, simule e implemente un sistema de control proporcional de velocidad del motor LEGO tal que el sistema en lazo cerrado tenga un error permanente de 10 %. Describa el procedimiento utilizado para diseñar el controlador y verifique que en simulación se cumpla el requerimiento solicitado. Para la implementación puede usar el archivo *controlvel.nxc*.
5. Diseñe, simule e implemente un sistema de control proporcional de posición del motor LEGO tal que el sistema en lazo cerrado se estabilice en 2seg. Use el diagrama mostrado en la Figura 6. Describa el procedimiento utilizado para diseñar el controlador y verifique que en simulación se cumpla el requerimiento solicitado. A partir de la respuesta experimental del sistema de control proporcional obtenga el error permanente, la ganancia del sistema en lazo cerrado, el tiempo de estabilización y el sobrenivel porcentual. Muestre la respuesta experimental obtenida y contrástela con la obtenida en simulación. Para la implementación puede usar y modificar el programa *controlpos.nxc*.

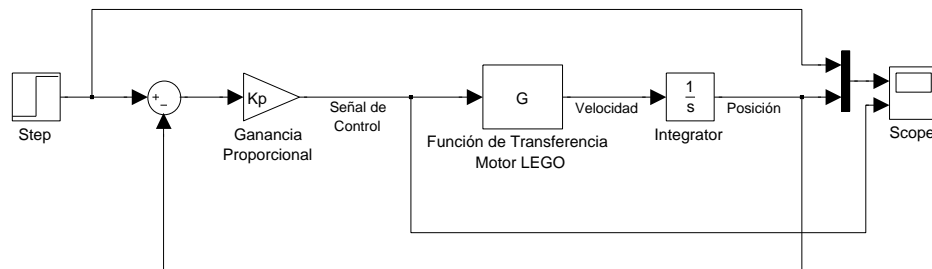


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema de control proporcional de Posición

6. Explique por qué el error permanente no llegó a cero en la implementación del sistema de control de posición a pesar de ser un sistema tipo 1. Realice una demostración que justifique su explicación, puede ser una demostración matemática o mediante simulación.

## 5. INFORME

Desarrollar un informe de la práctica usando el formato IEEE, que contenga los siguientes ítems:



- Título, Autores y Resumen en español.
- Introducción.
- Desarrollo de la sección PROCEDIMIENTO.
- Conclusiones.
- Bibliografía.

## 6. EVALUACIÓN

Entregar informe de la práctica según lineamientos dados en la sección 5. El informe se debe entregar únicamente vía e-mail a la dirección *horacio.unal@gmail.com* como máximo el *01 de Octubre de 2012* y la evaluación sería de la siguiente manera:

- Presentación del Informe ( $P_{INF}$ ) (organización, redacción, ortografía, claridad, formato): **Valor 1.0.**
- Punto 4.1: **Valor 1.5.**
- Punto 4.2: **Valor 3.0.**
- Conclusiones (C): **Valor 0.5.**
- Ecuación de evaluación:

$$\text{Nota} = (P_{4.1} + P_{4.2} + C)P_{INF}$$

## 7. REFERENCIAS

- [1] ASTRÖM, Karl J. ; MURRAY, Richard M.: *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Electronic Edition v2.10e. Princeton, New Jersey : Princeton University Press, 2008. – 411 p. p.
- [2] DORF, Richard C. ; BISHOP, Robert H.: *Modern control systems*. 12th. Prentice Hall : Pearson, 2010. – xxi, 1082 p. p.
- [3] OGATA, Katsuhiko: *Modern control engineering*. 5th. Boston : Prentice-Hall, 2010 (Prentice-Hall electrical engineering series Instrumentation and controls series). – x, 894 p. p.