

Práctica No.4. Motor DC y Control.

1st Juan Carlos Garduño Gutiérrez 157302
Ingeniería en Telecomunicaciones
Instituto Tecnológico Autónomo de México
jgarduo6@itam.mx

2nd Humberto Martínez Barrón y Robles 166056
Ingeniería en Mecatrónica
Instituto Tecnológico Autónomo de México
hmartin3@itam.mx

3rd Sebastián Aranda Bassegoda 157465
Ingeniería en Computación e Ingeniería Industrial
Instituto Tecnológico Autónomo de México
sarandab@itam.mx

Resumen—En este escrito se reporta el trabajo realizado durante la cuarta práctica del laboratorio de principios de mecatrónica, en ésta se realizaron simulaciones de sistemas a través de Matlab y Simulink. Se buscó implementar y sintonizar un control P, PI y PID de posición a través del uso de Op-amps.

Index Terms—Simulación, sistemas, P, PI, PID, motor, potenciómetro, op-amps.

I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los sistemas actuales que incorporan sensores con actuadores requieren algún método de control para poder alcanzar los niveles deseados a la salida. Esto ocurre porque los sistemas eléctricos que controlan a los sistemas mecánicos, rotacionales, neumáticos e hidráulicos simplemente entregan un voltaje a la salida que consume la planta que alimentan. Sin embargo, existen variaciones en las condiciones físicas en las que opera el sistema que pueden impedir que el resultado logrado sea igual al deseado. Para resolver esto, se utiliza una medición del error en el valor del resultado observado con respecto al valor deseado de la planta. Así, con una función de este error, se modifica la entrada para que el resultado sea más parecido al que se desea obtener.

Este procedimiento sirve para controlar sistemas de todo tipo: presión de bombas de agua, velocidades de motores, la altura a la que se elevan drones, etc. Por lo tanto, resulta de gran importancia conocer las aplicaciones de estas técnicas para aplicarlas en sistemas que interactúen con el mundo físico, pues, sin ellas, sería prácticamente imposible garantizar que el sistema tendrá un comportamiento adecuado bajo circunstancias adversas.

En esta práctica, el objetivo consistió en implementar estos controladores tanto en *software* como en *hardware* para controlar la velocidad de un motor. Ambas implementaciones sirvieron para aprender acerca de algunas de las limitantes prácticas del control a lazo cerrado, así como verificar sus múltiples ventajas.

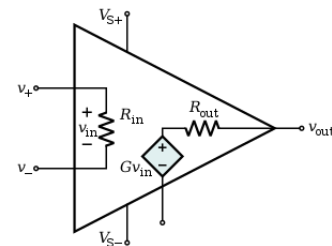
Esta práctica se dividió en dos partes: la implementación del controlador en *software* y la implementación del controlador en *hardware*. Para la primera parte, se utilizó *Simulink*, una herramienta incluida (*built-in*) en *MatLab* que permite simular circuitos y sistemas en general a nivel de bloques.

Se construyó un diagrama para representar el controlador que se armaría (primero uno tipo P, luego PI y luego PID). Después, se sintonizó el controlador con el método de Zeiger-Nichols y, finalmente, se programó a nivel de una función de *MatLab* el controlador al que se había llegado con el método mencionado.

Para la segunda parte, se armó un circuito usando amplificadores operacionales en forma amplificadora inversora, integradora y diferenciadora para implementar controladores P, PI y PID para un motor de corriente directa. Un tipo más de modalidad del amplificador operacional fue necesaria en este paso: un restador para comparar el error medido con la señal de entrada.

II. MARCO TEÓRICO

Para la parte de la práctica en la que corresponde alambrar, se utilizó principalmente un componente llamado amplificador operacional y comúnmente conocido como *op-amp*. Este componente es un dispositivo compacto, activo y lineal de alta ganancia diseñados para proporcionar la función de transferencia deseada. Un amplificador operacional está compuesto por un circuito electrónico que tiene dos entradas y una salida. En la siguiente figura se muestra el modelo ideal de un amplificador operacional:



Este es un componente especial, por decirlo de alguna manera, por las siguientes tres razones:

- Tiene impedencia infinita en ambas entradas; por lo tanto, no extrae corriente de los circuitos de entrada. En consecuencia:

$$I_+ = I_- = 0$$

- Tiene ganancia infinita. Por lo tanto, la diferencia entre los voltajes de entrada debe ser cero. De otro modo, la salida sería infinita. Esto se denota en la figura mediante el cortocircuito de las dos entradas. En consecuencia:

$$V_+ = V_-$$

- Tiene impedancia de salida cero. Por lo tanto, el voltaje de salida no depende de la corriente de salida.

Existen diferentes configuraciones en donde se usan los op-amps:

- Circuito sumador.
- Circuito restador.
- Circuito integrador.
- Circuito diferenciador.
- Circuito amplificador no inversor.
- Circuito amplificador inversor.

En particular, en esta práctica se utilizan: amplificador inversor, integrador, derivador y un restador. Antes de explicar la parte de control, es conveniente saber por qué cada una de estas configuraciones funciona; para esto, basta estudiar la función de transferencia ($H(t) = \frac{V_{out}(t)}{V_{in}(t)}$) y V_{out} de cada configuración. Es necesario realizar un análisis de circuitos, tomando en cuenta las tres características de el op-amp mencionadas anteriormente.

- Amplificador inversor:

$$H(t) = \frac{V_{out}(t)}{V_{in}(t)} = \frac{-R_f}{R}$$

- Circuito integrador:

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \cdot \int_0^t v_{in}(\tau) d\tau$$

- Circuito derivador:

$$V_{out}(t) = -RC \cdot \frac{dv_{in}(t)}{dt}$$

- Circuito restador:

$$V_{out}(t) = \frac{R_f}{R} (V_2 - V_1)$$

Los esquemáticos de cada configuración se encuentran en el desarrollo.

En cuanto a la teoría de control, resulta importante señalar que no se puede garantizar la estabilidad de un sistema que utilice un controlador P , PI o PID . En realidad, la técnica de control a lazo cerrado está ligada al modelado del sistema, y muchas veces el intento de controlar un sistema que no está modelado adecuadamente resultará fútil. Es necesario comprender la manera en la que se están relacionando los componentes internos para garantizar convergencia, y aún más si se requiere que el controlador sea óptimo. Resulta que las constantes K_p , K_i y K_d influyen fuertemente en la convergencia del sistema. Es decir, pueden existir constantes para las que el controlador nunca pueda converger, y otras que garanticen la convergencia, pero con comportamientos específicos que no necesariamente son los deseados. Este

comportamiento se conoce en teoría de control como amortiguación. La amortiguación de un sistema estará siempre ligada a los polos y los ceros de la función de transferencia de la planta. Además, estos polos y ceros cambiarán cuando se agregan controladores a la misma. Por lo tanto, cabe mencionar que, si bien esta práctica está pensada para comprender el concepto, no para volver a los integrantes del equipo expertos en teoría de control, es necesario tener en mente que la formulación física y matemática de este tipo de controladores suele ser bastante más complicada que simplemente sintonizar constantes adecuadas cuando se diseñen controladores para sistemas a nivel industrial.

III. DESARROLLO

III-A. Parte 1

Matlab y Simulink En la primera parte de la práctica se utilizó un archivo inicial que consistía en un bloque representando un motor. Posteriormente, usando bloques de simulink se implementó lo siguiente:

1. Implementar y sintonizar un control P
2. Implementar y sintonizar un control PI
3. Implementar y sintonizar un control PID
4. Sintonizar el controlador utilizando el método Ziegler-Nichols
5. Implementar el control PID utilizando el bloque *Matlab Function*

$$u(t) = K_p e(t) + \int_0^t K_i e(t') dt' + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

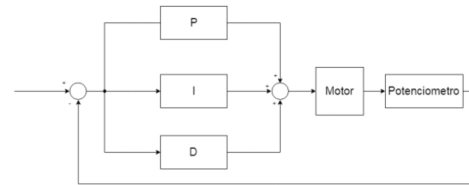


Figura 1. Ecuación del controlador PID y diagrama del control PID

Para implementar los controladores P y PI se asignó el valor de 0 a las constantes K_i y K_p en la ecuación. Posteriormente, para poder sintonizar el controlador se utilizó el método Ziegler-Nichols. Este método consiste en identificar si es positiva o negativa la ganancia requerida, establecer el control en P e incrementar la ganancia K_p lentamente hasta que la respuesta llegue a un estado estable. Al tener oscilaciones periódicas de manera sostenida se identificó el valor de K_p y K_u y se midió P_u (el periodo de oscilación). A partir de la tabla en la figura 2 es que se pudo obtener las ganancias.

III-B. Parte 2

Op-amps En esta segunda parte de la práctica se buscaba implementar un control analógico de posición para un motor DC a través de Op-amps. Para poder hacer el controlador hizo falta implementar 4 diferentes configuraciones:

Control	K_p	K_i	K_d
Control P	$\frac{K_u}{2}$		
Control PI	$\frac{K_u}{2.2}$	$\frac{P_u}{1.2}$	
Control PID	$\frac{K_u}{1.7}$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8}$

Figura 2. Tabla de sintonización de Ziegler-Nichols

Amplificador La configuración se puede observar en la figura de abajo. El voltaje de salida es $v_o(t) = -\frac{R_F}{R_1} \cdot v_1(t)$.

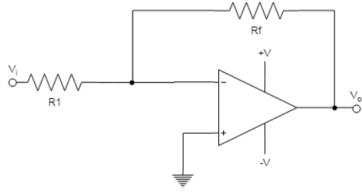


Figura 3. Configuración del Amplificador

Sumador La configuración se puede observar en la figura de abajo. El voltaje de salida es $v_o(t) = -R_F \cdot \left[\frac{1}{R_1} \cdot v_1(t) + \dots + \frac{1}{R_n} \cdot v_n(t) \right]$.

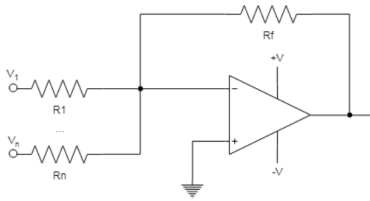


Figura 4. Configuración del Sumador

Integrador La configuración se puede observar en la figura 5. El voltaje de salida es $v_o(t) = -\frac{1}{RC} \cdot \int_0^t v_i(\tau) d\tau$ donde R es el valor de la resistencia y C el del capacitor.

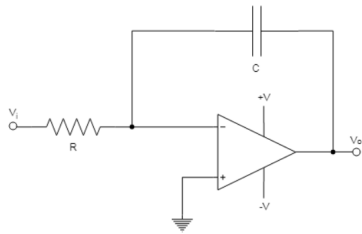


Figura 5. Configuración del Integrador

Diferenciador La configuración se puede observar en la figura de abajo en dónde se cuenta con dos capacitores y una resistencia. El voltaje de salida es $v_o(t) = -RC \cdot \frac{dv_i}{dt}(t)$.

Posteriormente, tras la elaboración de los op-amps se utilizó un motor DC y un potenciómetro para implementar el control de posición. Éstos estaban conectados mediante engranes como se puede observar en la siguiente figura. De esta manera

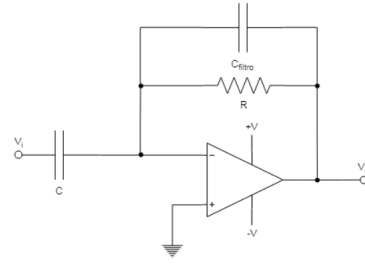


Figura 6. Configuración del Diferenciador

se conectó todo el circuito como se puede observar en el diagrama del control PID en la figura 1.

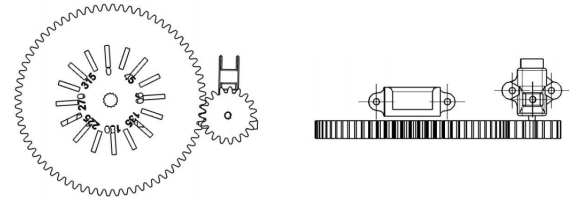


Figura 7. Motor, potenciómetro y engranes

IV. RESULTADOS

IV-A. Primera parte de la práctica. Matlab y Simulink

La primera parte de la práctica fue relativamente simple: lo más útil de las herramientas que permiten hacer prototipado y simulación fácil y rápidamente es que el usuario se puede concentrar en resolver los problemas de alto nivel en vez de preocuparse por el funcionamiento básico de cada bloque. Gracias a esto, resulta evidente que la intención de la primera mitad de la práctica fue familiarizar a los miembros del equipo con el control a lazo cerrado y con la forma en la que las constantes que influyen sobre la parte proporcional, integradora y diferencial del controlador se relacionan para dar resultados que convergen (o no) con diferentes comportamientos.

Al realizar el controlador puramente proporcional, se observaron oscilaciones en el estado estacionario que perpetuaban un error más o menos constante, pues es difícil que el controlador logre llevar el error a cero cuando sólo tiene un componente proporcional al error para modificar la entrada. Este comportamiento no suele ser deseable, pues las oscilaciones pueden llevar a pérdidas de energía no deseadas en el sistema.

Al agregar un control integral (es decir, trabajar con un controlador *PI*), resultó que el error en el estado estacionario convergía a cero - es decir, el valor observado a la salida del sistema era igual al valor deseado después de un tiempo corto. Sin embargo, se podían observar grandes oscilaciones antes de converger. El problema con estas oscilaciones en las etapas tempranas del proceso es que pueden exceder la tolerancia de voltaje del sistema. Si sucede esto, se corre el riesgo de exponer el componente a una cantidad excesiva de corriente. Esto quemaría el circuito sin duda alguna. Por lo

tanto, estas oscilaciones (que reciben el nombre de sobrepaso o *overshoot*) deben ser contenidas de alguna manera - normalmente, esto se logra cambiando las constantes de K_p y K_i , e incluso se puede definir un porcentaje de sobrepaso máximo para definir el mejor valor para estas constantes.

El control derivativo permitió que la convergencia del sistema fuera más suave. La razón por la que esto puede ser deseable es que las cantidades de energía que demandan cambios abruptos en el voltaje de entrada pueden dañar los componentes del circuito, además de que suele ser energéticamente ineficiente.

IV-B. Segunda parte de la práctica. Op-amps

En la segunda parte de la práctica fue posible realizar las 4 diferentes configuraciones de op-amps de manera exitosa como se puede observar en las figuras. Conectando las diferentes configuraciones de op-amps al osciloscopio fue posible observar cómo cada una de las diferentes configuraciones modificaba el voltaje de entrada de la manera deseada.

A pesar de múltiples dificultades, se logró que el resultado fuera el esperado. Sin embargo, no se logró que el controlador produjera un movimiento en el motor. Al iniciar el procedimiento de alambrear y probar cada circuito, se encontraron varias complicaciones prácticas que impedían el funcionamiento correcto de los componentes y, de hecho, no se logró el funcionamiento adecuado de ninguno de ellos hasta que se decidió cambiarlos todos (incluyendo la *Protoboard*).

Curiosamente, el alambrado del circuito que finalmente funcionó fue prácticamente idéntico al del circuito que se había probado (sin éxito) anteriormente. La diferencia principal entre el segundo alambrado y el primero fue el valor de los capacitores para los circuitos integrador y derivador. Aunque es poco probable, puede ser que ésta haya sido una de las razones detrás del cambio en comportamiento del circuito. En cuanto al movimiento del motor, la razón principal por la que no se logró fue que la salida del circuito carecía de la corriente necesaria para generar una rotación.

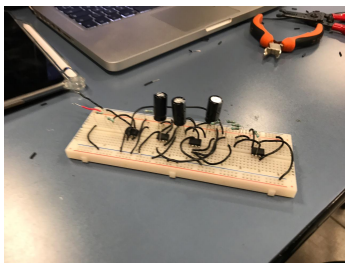


Figura 8. Configuración del circuito completo

Todo el circuito que formaban los op-amps se conectó al potenciómetro como se ve en la figura de abajo. Y se analizó con el osciloscopio la señal de entrada *v.s.* la de salida y se llegó a la conclusión de que en realidad si se estaba calculando el error, como se puede observar en la siguiente figura:

Al mover el potenciómetro, se puede observar un cambio en las crestas y el error que está calculando. Lo que sucede es

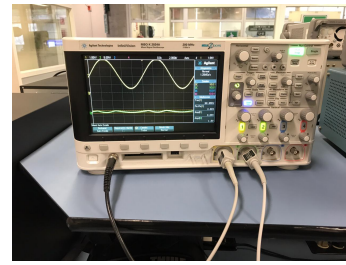
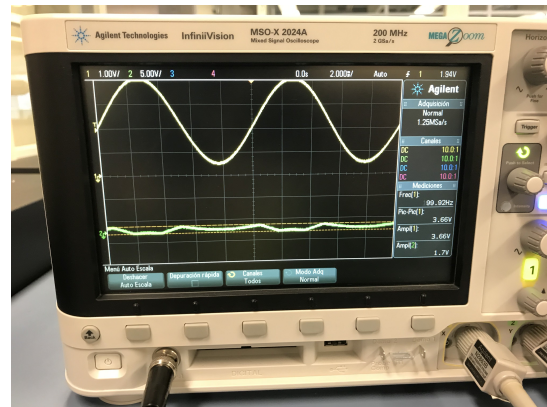


Figura 9. Osciloscopio mostrando los voltajes de entrada y de salida



no se contaba con la suficiente corriente para hacer mover al motor; además que el motor tenía una pata floja que terminó cayéndose.

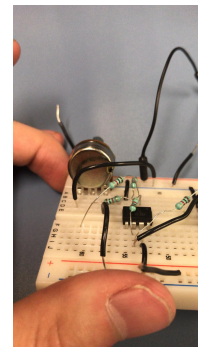


Figura 10. Conexión del circuito con el potenciómetro

V. CONCLUSIONES

V-A. Humberto Martínez

En esta práctica, fue necesaria una cantidad de paciencia mayor a lo normal. Es evidente que, entre más avanzan las prácticas, más complicada se vuelve la implementación en *hardware*. Parecería que la implementación física de estos controladores, por su dependencia del funcionamiento correcto de los componentes que se están utilizando y otros inconvenientes que pueden presentarse (como, por ejemplo, un consumo excesivo de corriente en el circuito), estas tareas pueden resultar desgastantes.

El aprendizaje más importante de esta práctica es que hay una diferencia que en algunos casos llega a ser abismal entre la simulación, la teoría y la práctica. Mientras que las dos primeras suelen ser más o menos parecidas, en la práctica existirán fenómenos físicos que no se toman en cuenta en la teoría y que son prácticamente imposibles de simular porque no se consideran al construir el modelo. Como futuros ingenieros, es crucial tener en mente que existe esta discrepancia para lograr proyectos exitosos en las aplicaciones que se le den a estos conocimientos.

V-B. Juan Carlos Garduño

Desde mi punto de vista, esta práctica resulta de gran utilidad para llevar a la práctica todo lo estudiado en clase con relación a los op-amps. Me doy cuenta que en la teoría todo resulta bonito y con un poco de álgebra sale lo que esperábamos y a la hora de aplicar esta teoría suceden muchas cosas que no se contemplan en ella y hay muchas razones por las cuales los op-amps no llegan a funcionar como esperábamos: la *protoboard*, op-amps quemados, capacitores quemados, etc. Entonces, resulta bastante complicado implementar bien estos circuitos en el primer alambrado.

Pienso que esta práctica resulta de mucha utilidad y desenvolupa en mucho el aprendizaje, ya que, con base a la teoría vista en clase, se llega a temas más complicados, como lo es *control* que aparentemente todavía se encuentran fuera de mi alcance; sin embargo, con la teoría *base* bien sólida y un poco de investigación se pueden llegar a resultados bastante interesantes.

También, me siento satisfecho con el trabajo de mi equipo porque creo que nos hemos completado bastante bien y nuestros horarios se asemejan para poder trabajar fuera de horas de clase.

V-C. Sebastián Aranda

Esta práctica fue muy útil para entender mejor y a mayor profundidad los op-amps. En clase ya habíamos sido introducidos a ellos y eran fáciles de comprender y operar, pero al ser llevados a la práctica nos dimos cuenta que eran más complicados de lo que aparentaban e hizo falta implementarlos repetidamente.

De esta práctica saco otra conclusión importante, la importancia del material que utilizamos en nuestro trabajo. Fue una práctica con varios elementos, como la *protoboard*, op-amps, etc. y había ocasiones en las que a pesar de que toda nuestra lógica parecía estar correcta no funcionaba el circuito. Esto se debía a que alguno de los elementos no operaba de manera correcta y era necesario rearmar el circuito, algo tedioso frustrante.

Finalmente, como equipo tengo la impresión de que trabajamos exitosamente, conforme hemos colaborado más y más nos hemos conocido y podido organizar para trabajar de la manera más eficiente posible.

VI. ROL O PAPEL

VI-A. Humberto Martínez

En la primera sección de la práctica, Humberto tomó posesión del teclado para realizar el código necesario en la práctica. Humberto iba a escribiendo el código, incluyendo su propia lógica y las de sus compañeros. De la misma manera en la segunda sección, al igual que el resto de sus compañeros, elaboró el alambrado de diferentes configuraciones en el largo proceso de acierto y error durante el armado de los op-amps. En cuanto al reporte Humberto elaboró o colaboró las siguientes secciones:

- Introducción.
- Marco Teórico.
- Resultados.
- Sus respectivas conclusiones.

VI-B. Juan Carlos Garduño

En la práctica, Juan Carlos se encargó junto con Sebastián a ir alambrando los componentes necesarios. En la primera parte de la práctica, iba dictando algunas secciones del código a Humberto que había investigado y podían ser de utilidad para la compilación del programa. De igual manera, iba revisando que la sintaxis de Humberto en el código, fuera la correcta. En cuanto al reporte Juan Carlos elaboró las siguientes secciones:

- Marco teórico.
- Resumen.
- Sus respectivas conclusiones.

VI-C. Sebastián Aranda

En la práctica, Sebastián se encargó del alambrado junto con Juan Carlos, así como de ir colaborando con los demás integrantes en la elaboración del código. En cuanto al reporte él elaboró las secciones siguientes:

- Desarrollo.
- Resultados.
- Rol o Papel.
- Sus respectivas conclusiones.

REFERENCIAS

- [1] García, V. (2010). El amplificador operacional. abril 10, 2019 de Electrónica Práctica Aplicada. Sitio web: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-amplificador-operacional>
- [2] Romero, J. (2019) Sistemas de medición. Instituto Tecnológico Autónomo de México. Departamento Académico de Sistemas Digitales. México, D.F.
- [3] MathWorks. (2019). Simulink Documentation - MathWorks América Latina. Recuperado 12 abril, 2019, de <https://la.mathworks.com/help/simulink/index.html>
- [4] Texas Instruments. (2019). TL08xx JFET-Input Operational Amplifiers. Recuperado 12 abril, 2019, de <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl082a.pdf>