

PROPUESTA DE EQUIPO INTEGRADOR PARA LOS CONTENIDOS DE CONTROL CLÁSICO APLICADO EN EL TECN.M.

Fabio Abel Aguirre Cerrillo¹⁸
Oscar Figueroa Cruz¹⁹
Arturo Luna Castro²⁰
Mauro Berber Palafox²¹

RESUMEN.

En el presente trabajo se hace la propuesta de un equipo que puede servir para la enseñanza-aprendizaje de elementos básicos del control clásico y automático para diferentes carreras de Ingeniería que se ofrecen en el Tecnológico Nacional del México (TecNM). Uno de los objetivos es que el equipo integre elementos y conocimientos para que los estudiantes encuentren significado de sus aprendizajes previos como son: ecuaciones diferenciales, motores de cd, electrónica básica y que se articulen con conceptos de modelado, función de transferencia, control en lazo cerrado y sintonización del control PID. El equipo que se propone se está conformado principalmente por un péndulo. En uno de sus extremos cuenta con una hélice que es movida por medio de un motor de CD. El péndulo tiene un eje que gira y que se mide su ángulo de giro con respecto a la vertical. El equipo trabaja en realimentación para variar la velocidad de giro de las hélices y controlar el ángulo de inclinación.

Fecha de recepción: 07 de julio, 2017.

Fecha de aceptación: 04 de septiembre, 2017.

¹⁸ Profesor de tiempo completo. I.T. de Lázaro Cárdenas del TecNM fabio4aguirre@yahoo.com.mx.

¹⁹ Profesor de tiempo completo. I.T. de Lázaro Cárdenas del TecNM ofcc60@prodigy.net.mx.

²⁰ Profesor de tiempo completo. I.T. de Lázaro Cárdenas del TecNM arluca262000@yahoo.com.mx.

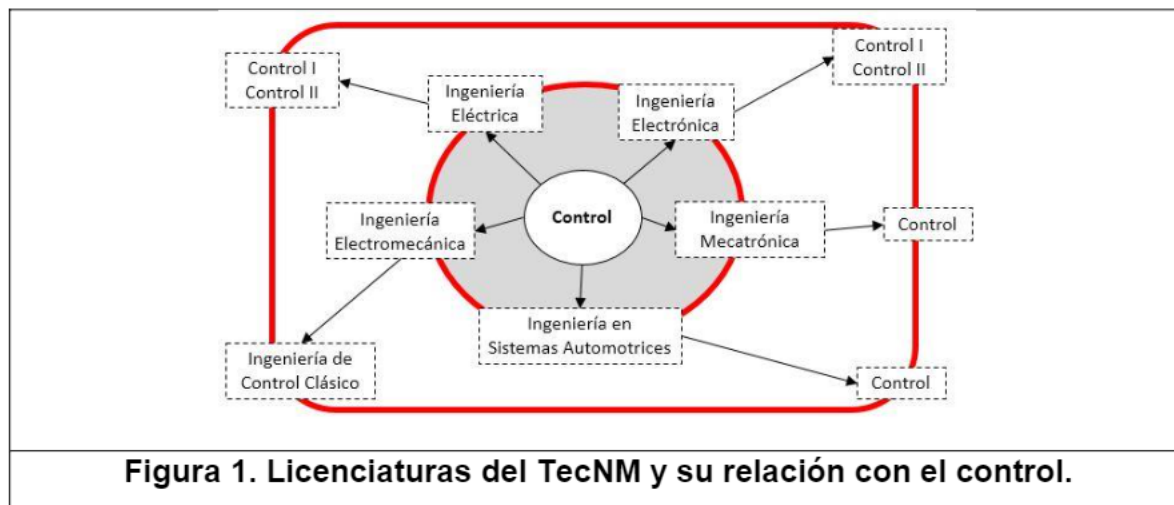
²¹ Profesor de tiempo completo. I.T. de Lázaro Cárdenas del TecNM maurobepa@gmail.com.

INTRODUCCIÓN.

El Tecnológico Nacional de México (TecNM), forma profesionales e investigadores aptos para generar y aplicar conocimientos y tecnologías, con actitud innovadora, emprendedores y creativos; con habilidades en el campo laboral, pensamiento crítico, sentido ético, colaborativos y competentes para contribuir al desarrollo nacional y regional. El TecNM y que anteriormente era la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) tiene una historia de 78 años, y más de un millón de ingenieros egresados de sus aulas, con lo que muestra la enorme contribución que ha dado al desarrollo industrial del país (SEP, 2017).

Con más de 580 mil estudiantes inscritos, el TecNM está formado por 266 instituciones de educación superior distribuidos en las 32 entidades del país, de las cuales 130 son federales y 136 descentralizadas. La oferta educativa del TecNM es de 43 carreras de Licenciatura, 12 de Especialización, 61 de Maestría y 21 de Doctorado, vinculadas a cuatro sectores fundamentales de desarrollo: agroindustrial, automotriz, aeronáutica y energético, constituyéndola como la Institución más grande de México y Latinoamérica (TecNM, 2017). De las 43 carreras de licenciatura que ofrece el TecNM, para el presente trabajo se tiene especial interés en: Ingeniería en Sistemas Automotrices, Ingeniería Electromecánica., Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecatrónica. En todas ellas se ofrece en sus respectivas retículas materias relacionadas con el control tal y como se muestra en la figura 1. En el círculo intermedio se muestran las cinco diferentes licenciaturas y en el rectángulo exterior con esquinas redondeadas se tiene el nombre oficial de la materia para dicha licenciatura. Por ejemplo: para la carrera de Ingeniería Electromecánica la materia es Ingeniería de Control Clásico.

Independientemente del nombre oficial que lleva la materia de Control en las diferentes carreras, en todas ellas los contenidos temáticos son los mismos y para ver la convergencia de los temas véase la tabla 1 (TecNM, 2017).



En todos los contenidos temáticos se presentan los conceptos de: control en lazo abierto, control en lazo cerrado, sistema lineal y no lineal, función de transferencia, modelos matemáticos de sistemas mecánicos y eléctricos, sistemas electromecánicos, respuesta de sistemas de primer o de segundo orden, acciones de control proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) y proporcional-integral-derivativo (PID).

| Tabla 1. Contenidos temáticos por unidad. | | |
|--|--|---|
| Electromecánica | Electrónica | Sistemas Automotrices |
| 1. Sistemas de control. | 1. Conceptos básicos de control. | 1. Introducción al control. |
| 2. Modelado de sistemas dinámicos. | 2. Modelado matemáticos de sistemas físicos. | 2. Tópicos selectos de control. |
| 3. Respuesta dinámica. | 3. Análisis de respuesta en el tiempo. | 3. Desarrollo de controladores. |
| 4. Acciones básicas de controladores. | 4. Modos de control. | 4. Implementación de un sistema de control en lazo cerrado. |
| 5. Estabilidad. | 5. Estabilidad. | |
| 6. Aplicación de proyecto de control. | | |

JUSTIFICACIÓN.

El presente trabajo se justifica debido a que en el Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas se ofertan las licenciaturas de Ingeniería Electrónica y Electromecánica. La institución no cuenta con un equipo como el que se propone para la enseñanza de conceptos básicos de control automático. Significa que se tiene un problema de equipamiento y que una de las soluciones es el auto-equipamiento por medio de este tipo de trabajos. En el sistema del TecNM existen muchos tecnológicos que ofrecen carreras con conocimientos básicos del control y que tales instituciones no cuenta con equipamiento didáctico para la enseñanza-aprendizaje del control por retroalimentación. El sistema de las Universidades Politécnicas es relativamente nuevo en comparación con el TecNM y presenta la misma situación de no contar con equipo didáctico de la problemática planteada. Al contar con el equipo propuesto, el proceso enseñanza-aprendizaje entre el alumno y profesor se mejora debido a que el estudiante tiene la posibilidad de trabajar con elementos prácticos y tener un mayor involucramiento en su propio aprendizaje. La materia de control clásico tiene una gran cantidad de contenidos teóricos y que es importante que los alumnos relacionen dichos aspectos teóricos, como por ejemplo de:

- Ecuaciones diferenciales. Conceptos básicos de una ecuación diferencial de primer y segundo orden y un tema vital importancia para el control clasico, esto es, la transformada de Laplace.
- Algebra Lineal. Temas sobre números complejos y sistemas de ecuaciones lineales.
- Calculo diferencial. Conceptos de funciones y de las derivadas.
- Electrónica Analógica. Funcionamiento del transistor como interruptor y su aplicación para el control encendido-apagado y control de velocidad de un motor de corriente directa.
- Dinámica. Movimiento y aplicación de la segunda ley de newton a un cuerpo rígido.

Objetivo

El objetivo del presente trabajo es el diseñar y construir un equipo didáctico para ser utilizado en el proceso de enseñanza-aprendizaje en la materia de Ingeniería de Control Clásico del Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas perteneciente al TecNM.

METODOLOGÍA.

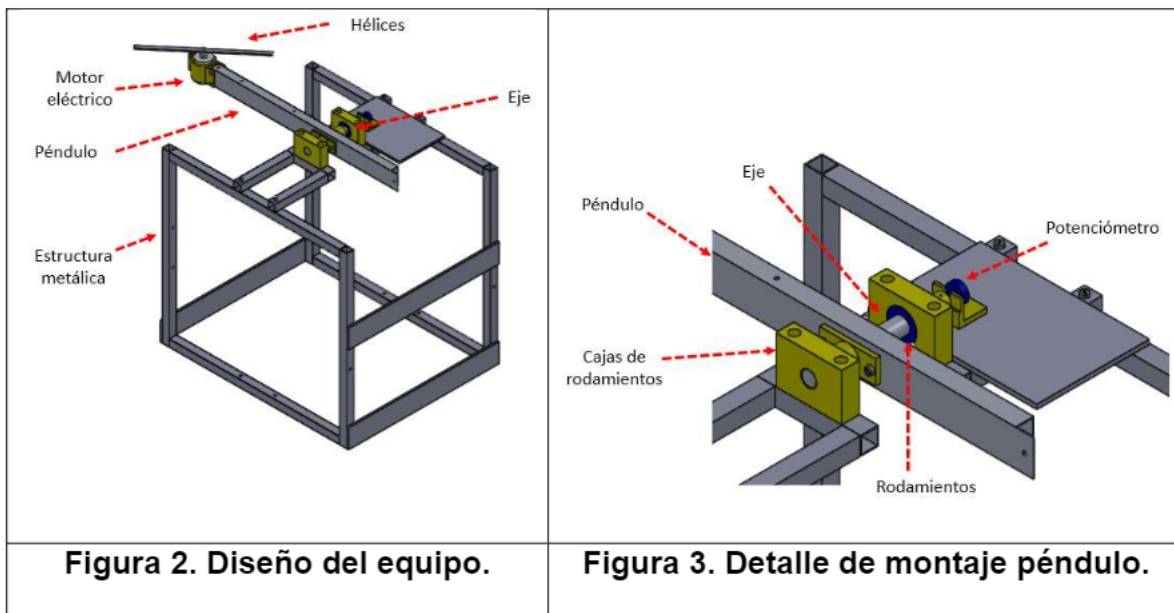
En este trabajo se procedió a hacer un análisis de las características que debería tener el equipo, en el entendido que su estructura debería tener una relación directa con los contenidos temáticos dados por la materia de Ingeniería de Control Clásico de la carrera de Ingeniería Electromecánica. Se revisaron los contenidos por unidad dados en la tabla 1. El punto de partida ha sido el punto 2, esto es, "*Modelado de sistemas dinámicos*", con la intención de proponer un sistema que el resultado de

su modelación matemática fuese una ecuación diferencial con características de un sistema de primer o segundo orden al tratarse de un curso básico de control.

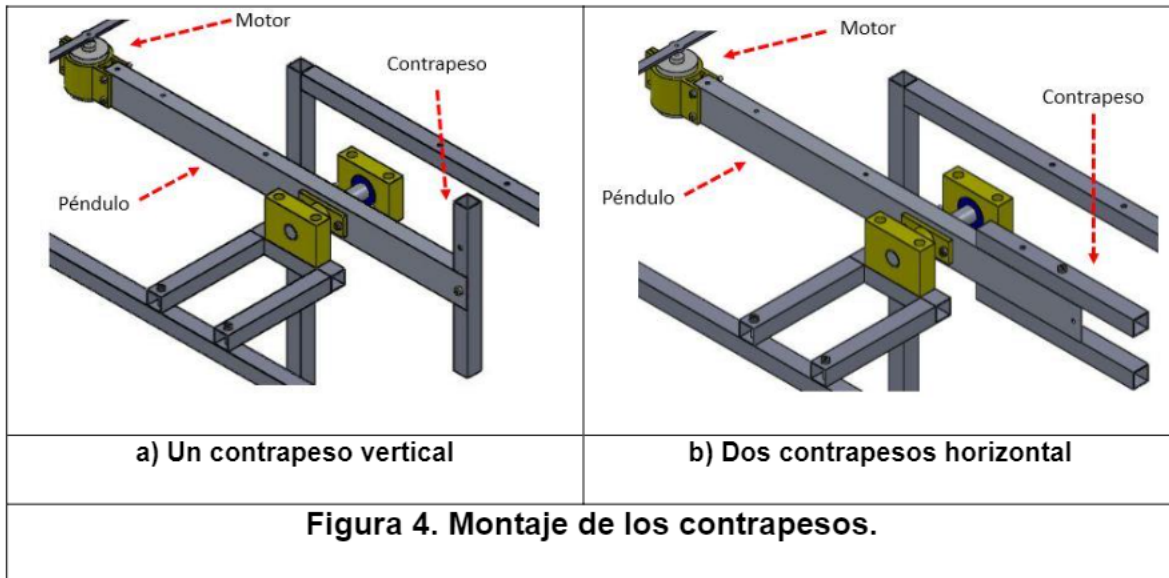
Una vez definido el sistema del presente trabajo, se analizó la forma de construcción debiendo ser relativamente sencilla y que la implementación del control en lazo cerrado (control P, PI o PID) se pudiera implementar en tarjetas electrónicas económicas con la capacidad de comunicarse con la computadora por medio de los puertos de comunicación. Además fue necesario tomar otros factores tales como: 1) los materiales utilizados en la construcción deben ser de adquisición nacional, 2) la reproducción del equipo debe estar al alcance de los estudiantes en caso de que alguno de ellos decida replicarla, al igual que otras instituciones educativas, 3) las señales del sistema deben de contener una estructura abierta con la finalidad de tener acceso a ellas en todo momento. A continuación se describe el equipo que se propone para el presente trabajo.

Diseño mecánico

En la figura 2 se muestra el diseño creado utilizando el software de diseño mecánico SolidWorks (Gómez, 2010). Se puede ver un péndulo que puede girar libremente en un eje. En uno de los extremos se tienen unas hélices (modelo 1045R) que son movidas por un motor eléctrico de 24 VCD. Al accionar el motor eléctrico se mueven las hélices creando una fuerza y a la vez un par para que el péndulo obtenga una posición de equilibrio dependiendo de la velocidad de las hélices. El ángulo de giro del péndulo se puede medir por medio de un potenciómetro mostrado en la figura 3. La estructura metálica es de tubular cuadrado PTR de $\frac{3}{4}$ de pulgada. El péndulo es de un tubular de aluminio de $2 \times \frac{3}{4}$ pulgadas.



Se tiene la opción de agregar contrapesos en el extremo opuesto de montaje del motor eléctrico tal y como se puede ver en la figura 4. Con el contrapeso se tiene la posibilidad de modificar la masa total del péndulo y el momento de inercia respecto eje del péndulo. El contrapeso es un tubular PRT de $\frac{3}{4}$ de pulgada de 200 mm de longitud que tiene una masa de 195 gramos.



Modelado del sistema

Una vez concluido el diseño mecánico del equipo se ha procedido a realizar el modelo matemático partiendo de la figura 5. Se tiene el péndulo de masa m con su centro de gravedad a una distancia L . El momento de inercia respecto al eje de giro del péndulo es I . La fuerza F_m es una fuerza de empuje proporcionada por el conjunto hélice motor del sistema y se encuentra localizada a una distancia L_m para generar un par T_m . El ángulo de giro respecto a la vertical es θ . Se consideran las pérdidas por fuerzas viscosas debido a los rodamientos y que para sistemas rotacionales su momento T_b . Haciendo sumatoria de momentos respecto al origen se tiene:

$$T_m - T_b - F_x L \sin\theta = I \alpha \quad (1)$$

Sustituyendo para T_b , F_x y la aceleración angular α :

$$T_m - b \frac{d\theta}{dt} - mgL \sin\theta = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2)$$

Reacomodando se tiene:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + mgL \sin\theta = T_m \quad (3)$$

Figura 5. Diagrama del cuerpo libre.

La ecuación (3) es una ecuación diferencial invariante en el tiempo no lineal debido al factor $\sin\theta$.

Linealizando la ecuación (3) en el punto de operación $\theta = 0$, se tiene:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + mgL \theta = T_m \quad (4)$$

Le ecuación (4) es una ecuación diferencial de segundo orden lineal invariante en el tiempo y que es una ecuación clásica en los cursos de ecuaciones diferenciales. Obteniendo la transformada de Laplace de la ecuación (4) se tiene:

$$Is^2 \Theta(s) + bs \Theta(s) + mgL \Theta(s) = T_m(s) \quad (5)$$

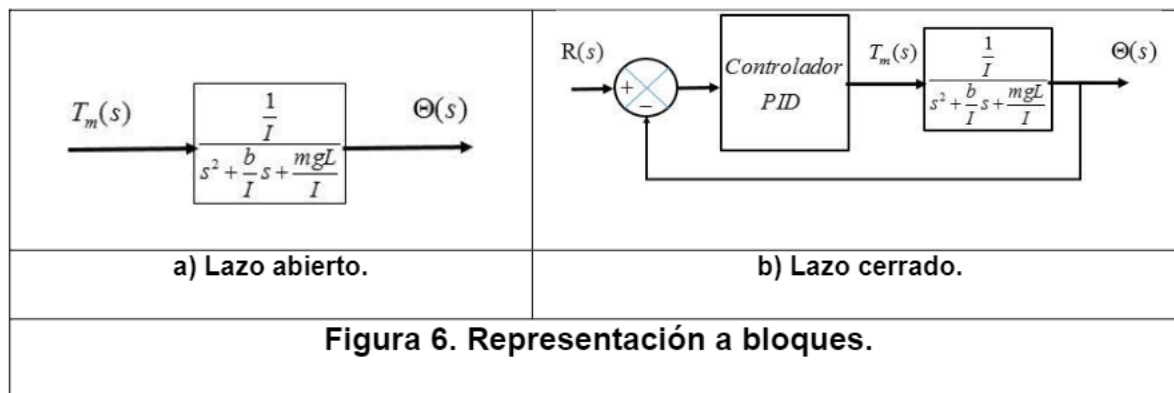
$$\frac{\Theta(s)}{T_m(s)} = \frac{1}{Is^2 + bs + mgL} \quad (6)$$

$$\frac{\Theta(s)}{T_m(s)} = \frac{\frac{1}{I}}{s^2 + \frac{b}{I}s + \frac{mgL}{I}} \quad (7)$$

Por tanto la función de transferencia del sistema es:

$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{T_m(s)} = \frac{\frac{1}{I}}{s^2 + \frac{b}{I}s + \frac{mgL}{I}} \quad (8)$$

La representación del sistema en lazo abierto y en lazo cerrado se puede ver en la figura 6.



Electrónica y función de transferencia

En la figura 7 se puede ver la electrónica usada y el flujo de las señales en el equipo. El diagrama se ha realizado con la ayuda del software libre (Fritzing, 2017). El control del sistema ha implementado en una placa arduino Leonardo (Arduino, 2017). La fotografía del lado derecha de la figura 7 muestra que se ha construido de un shield para el arduino. El shield es una placa modular de circuito impreso para dar funcionalidad extra al arduino.

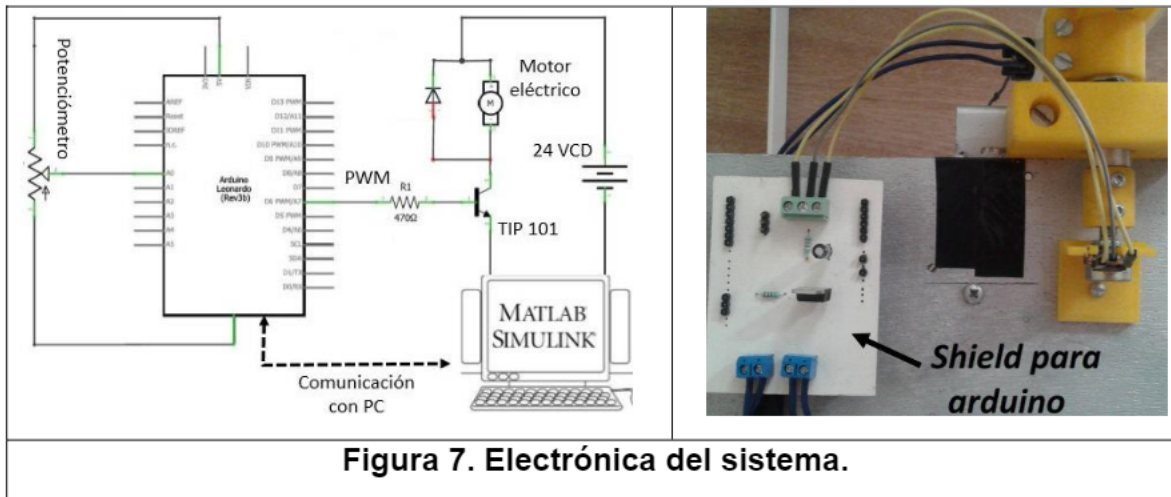


Figura 7. Electrónica del sistema.

- La señal del ángulo de giro es proporcionada por el potenciómetro y es enviada a la entrada analógica A0. El potenciómetro se alimenta de 5 VCD que los toma del microcontrolador.
- Se tiene una salida que proporciona la señal PWM (del inglés pulse width modulation) y que sirve para accionar la base del transistor. Con esta señal se controla la velocidad de giro del motor eléctrico.
- Se tiene comunicación con la computadora utilizando el puerto del microcontrolador.
- En la computadora se trabaja con Matlab Simulink para la visualización de las señales. Se utiliza el Simulink Support Package for Arduino Hardware. Con dicho paquete permite programar de forma gráfica para después realizar la descarga en el microcontrolador (MathWorks, 2017).

Una vez conectado el equipo se ha procedido a calibrar la señal proporcionada por el potenciómetro. Las entradas analógicas de la tarjeta arduino son de 10 bits ($2^{10} = 1024$), de 0 a 1023 para un voltaje de 0 a 5 volts. Se coloca el péndulo en la posición de 0 grados y 90 grados tomando como referencia la figura 5. Se realizan las lecturas de las dos posiciones desde Simulink de Matlab tal y como se puede ver en la figura 8.

| | | |
|-------------------------------|--|--|
| Para 0 grados 487 | | Con los dos valores se obtiene una ecuación de la recta de la forma $y = mx + b$: $\text{Grados} = 0.2486 \text{ Valor} - 121.0773$ |
| Para 90 grados 849 | | |
| Figura 8. Calibración. | | En la figura 9 se puede ver el programa final en Simulink y una gráfica en donde se ha movido el péndulo manualmente para ver el funcionamiento de la calibración. |

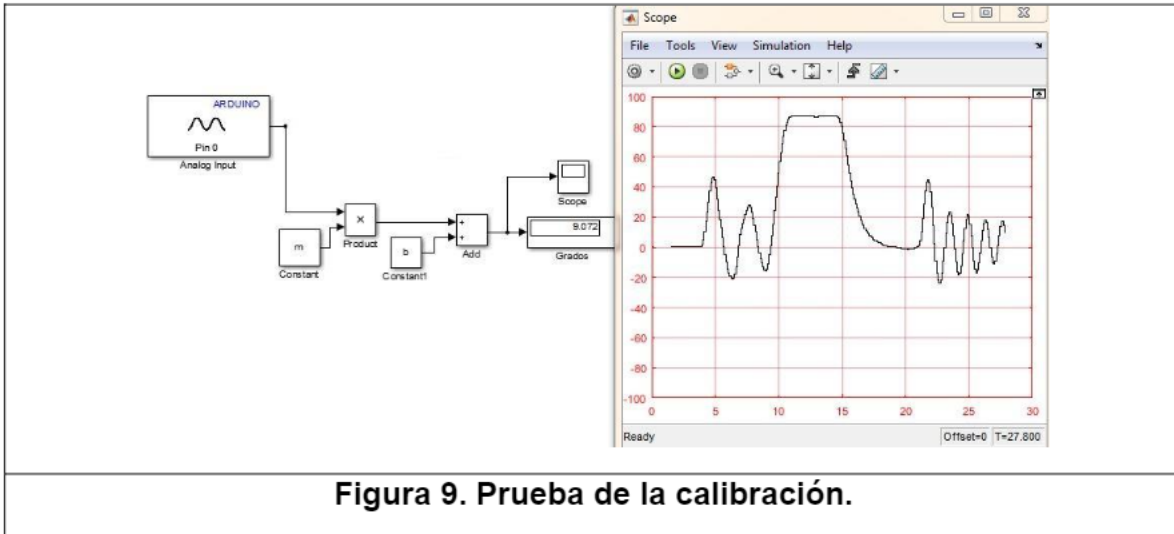


Figura 9. Prueba de la calibración.

La función de transferencia general para un sistema de segundo orden depende de la frecuencia natural ω_n y del factor de amortiguamiento relativo ξ . (Nise, 2010):

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

De lo que se trata es de obtener experimentalmente ω_n y ξ para lo cual se ha hecho programa en Simulink mostrado en la figura 10. Se aplica una señal de PWM para que el péndulo alcance un valor de 40 grados. Dicho valor de PWM corresponde a un voltaje que se le aplica al motor eléctrico. Una vez que se conoce el valor de PWM (de 0 a 255 equivalente a 2^8), se acciona el interruptor manual emulando una señal de un escalón como señal de entrada y se registra la respuesta de salida del sistema.

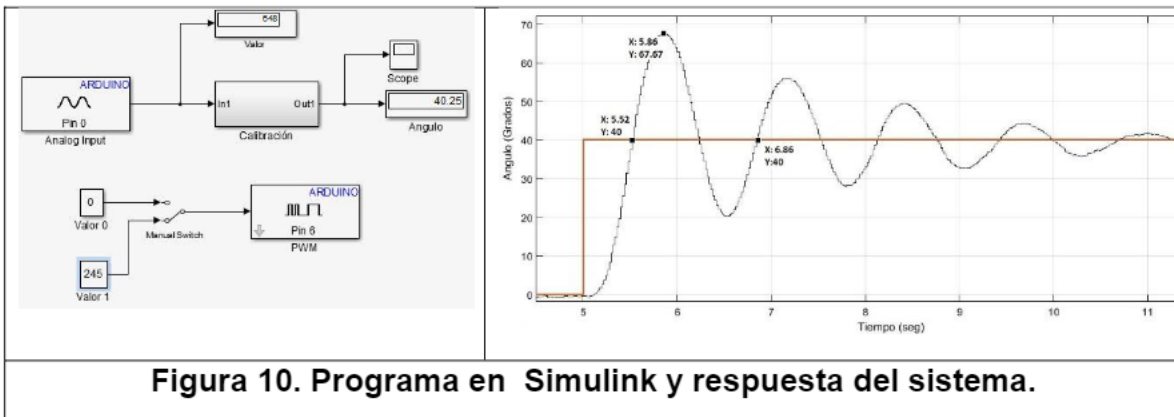


Figura 10. Programa en Simulink y respuesta del sistema.

El factor de amortiguamiento relativo se obtiene utilizando la ecuación (11) y el sobrepaso máximo M_p la gráfica de la figura 11 definido por (Nise, 2010):

$$M_p = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\inf}}{\theta_{\inf}} = \frac{67.67 - 40}{40} = 0.6918 \quad (10)$$

$$\xi = \frac{-\ln(M_p)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(M_p)}} = 0.1165 \quad (11)$$

El periodo amortiguado T_d se obtiene de la gráfica de respuesta de la figura 10.

$$T_d = 6.86 - 5.52 = 1.34 \text{ seg} \quad (12)$$

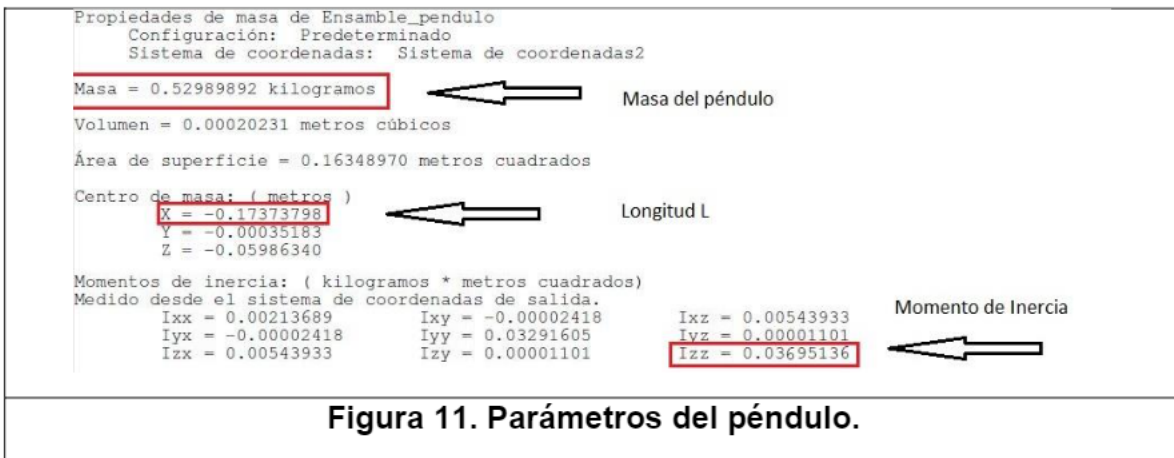
La frecuencia natural amortiguada ω_d es:

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T_d} = 4.6889 \text{ rad / seg} \quad (13)$$

La frecuencia natural ω_n se obtiene por:

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\xi^2}} = 4.7211 \text{ rad / seg} \quad (14)$$

Por tanto ya se tienen los factores del denominador de la ecuación (9). El numerador se obtiene de la ecuación (8). El valor del momento de inercia es $I = 0.03695136 \text{ Kg m}^2$ y es obtenido con la herramienta de propiedades físicas de SolidWorks (ver figura 11). La masa $m = 0.529 \text{ Kgs}$ y la longitud $L = 173.73 \text{ mm}$.



Por tanto la función de transferencia del péndulo es:

$$G(s) = \frac{27.06}{s^2 + 1.1s + 22.29} \quad (15)$$

Simulando un escalón entrada a la ecuación (15) en $t = 5$ segundos equivalente a un par $T_m = 0.5795 \text{ N mts}$, dado por la ecuación (16)

$$T_m = F_x L = m g L \text{Sin}(40^\circ) \quad (16)$$

Para graficar la respuesta dada por el escalón, se utiliza la función step de Matlab y se multiplica por el valor numérico de T_m . En la figura 13 se muestra el resultado de la respuesta simulada y la respuesta real del sistema. Se puede ver que se tiene un retraso en la respuesta real de 0.18 segundos.

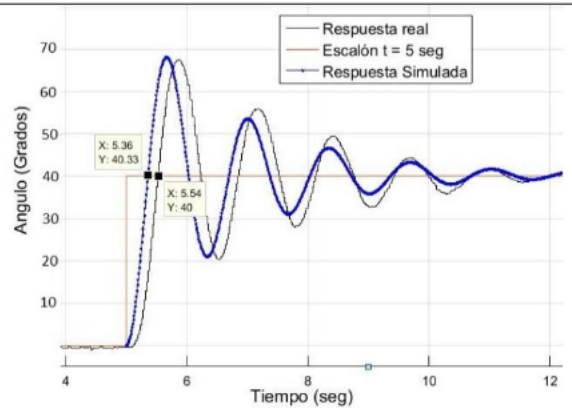


Figura 13. Comparación de gráficas.

Con la función de transferencia dada por (15) y el concepto en lazo cerrado de la figura 6 se puede trabajar con simulaciones eligiendo las ganancias del controlador PID para observar y analizar las diferentes graficas de respuestas en función de la sintonización del controlador PID.

PRUEBAS FINALES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la figura 14 se muestra la construcción del equipo propuesto y el programa de control en lazo cerrado implementado en Simulink. En el lado izquierdo se puede ver el péndulo en la estructura metálica, el conjunto hélice motor y el contrapeso. En el lado izquierdo se tiene la programación gráfica. Se tiene una resta aritmética entre la señal de referencia y la entrada analógica calibrada para tener una señal de error que entra al bloque del controlador. A la salida del controlador se tiene un saturador con valor mínimo de 0 y valor máximo de 255 debido a que las salidas PWM de la tarjeta Leonardo son de 8 bits.

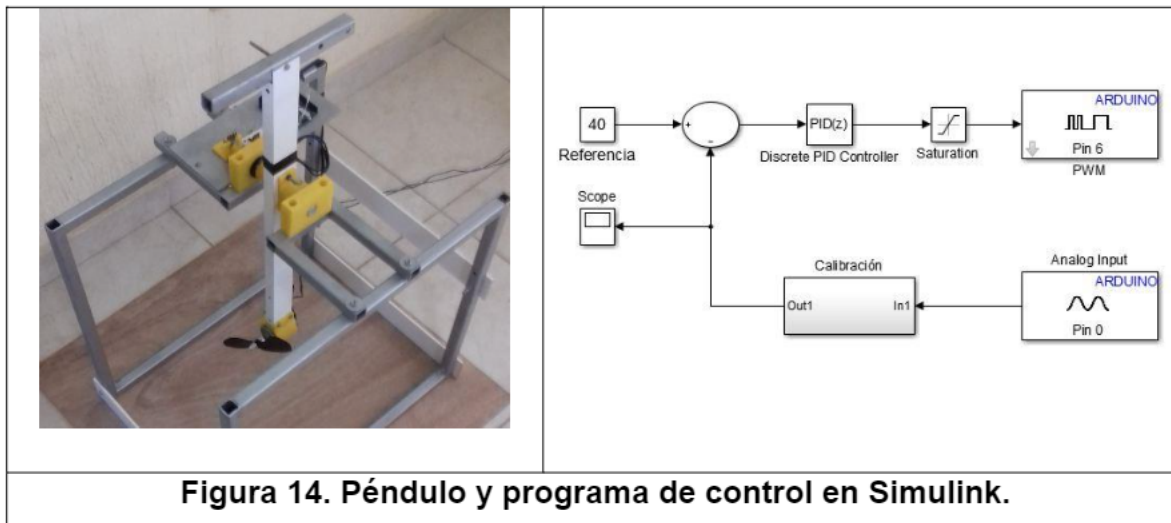


Figura 14. Péndulo y programa de control en Simulink.

En la figura 15 se muestra las gráficas de respuesta del péndulo cuando va de 0 a 40 grados con diferentes valores en las ganancias proporcional e integral. Ambas graficas son sin contrapesos. Se observa que en ambos casos se llega a la posición deseada. En la gráfica de la izquierda se llega a los 40 grados en un menor tiempo que en la gráfica de la derecha pero con algunas oscilaciones en su trayectoria. La grafica de la derecha no presenta prácticamente oscilaciones pero su respuesta es más lenta. Lo anterior es debido a las diferentes ganancias en el controlador. Significa que variando las ganancias del controlador se pueden obtener diferentes gráficas de respuesta en el sistema. Si se desea una respuesta en específico en el péndulo se deberán de sintonizar las ganancias requeridas en función de la respuesta deseada.

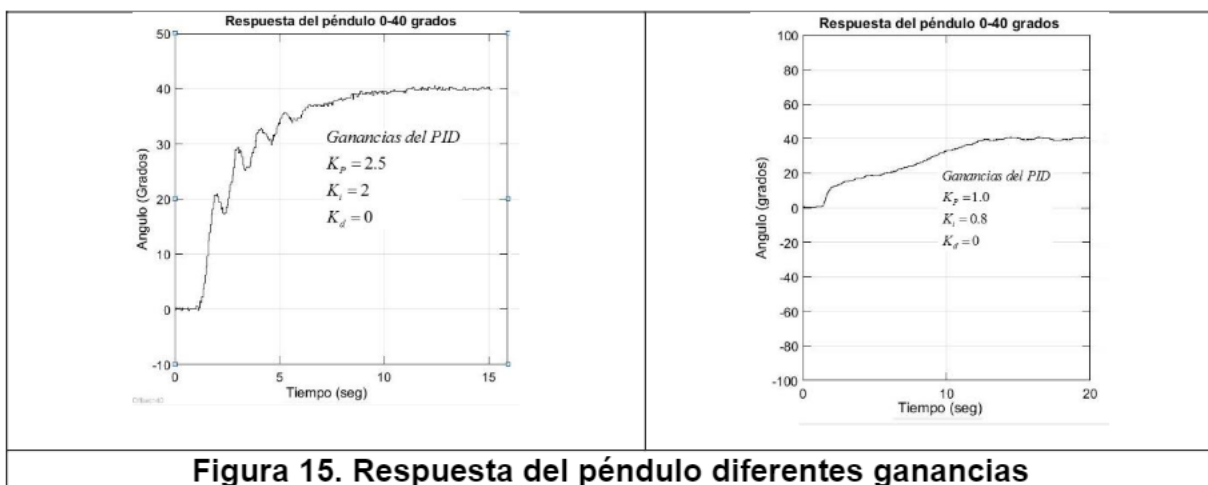
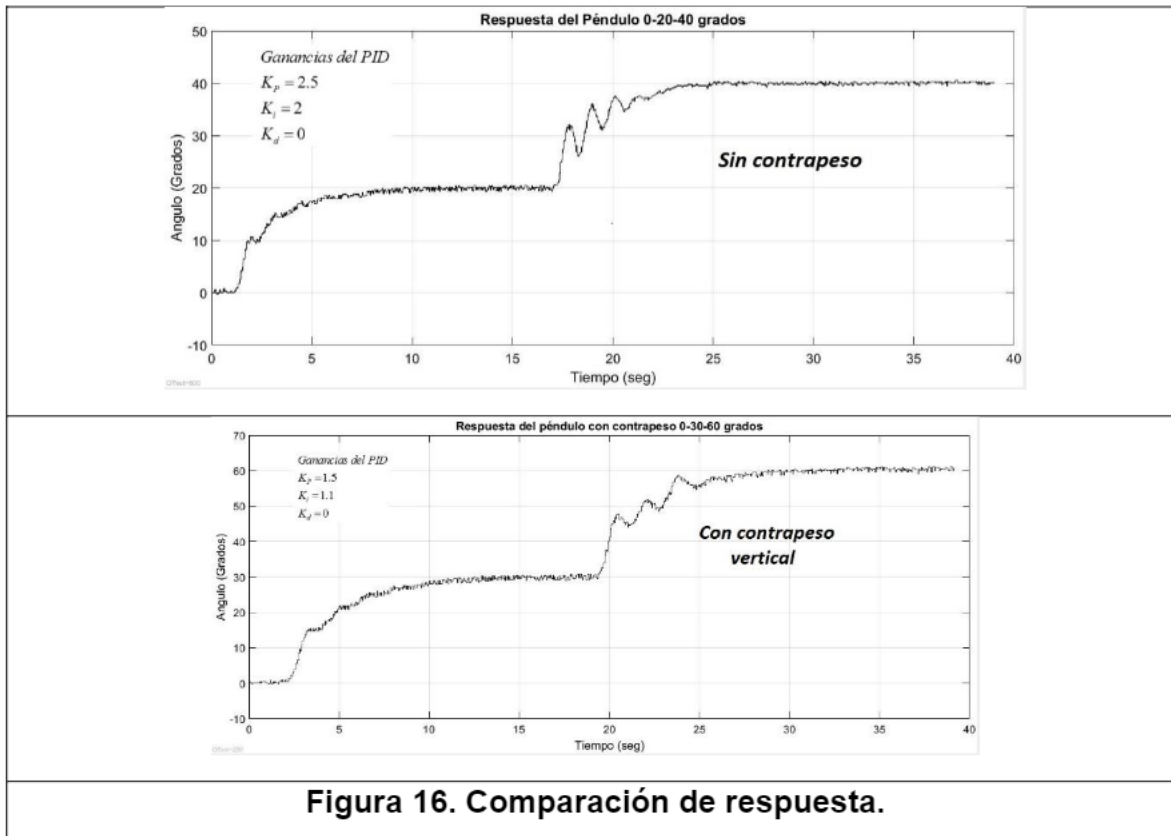


Figura 15. Respuesta del péndulo diferentes ganancias

En la figura 16 se muestran dos gráficas de respuesta del péndulo, sin contrapeso y con contrapeso, esto es, se modifican parámetros del sistema como la masa, el momento de inercia y el centro de gravedad del péndulo. La gráfica sin contrapeso tiene mayores ganancias que la de contrapeso vertical. Lo anterior es debido a que con el contrapeso el sistema requiere de menor energía para mover el péndulo de una posición menor a una posición mayor. El diseño del péndulo permite trabajar con la sintonización de las ganancias del controlador para un mismo sistema con diferentes parámetros.



CONCLUSIONES Y/O RECOMENDACIONES.

El control automático por retroalimentación es un concepto ampliamente utilizado en una gran cantidad de aplicaciones. El TecNM por medio de las licenciaturas de Ingeniería en Sistemas Automotrices, Ingeniería Electromecánica., Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecatrónica, ofrece en sus planes de estudio los conceptos básicos del control.

En la carrera de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas actualmente no tiene equipamiento para realizar prácticas relacionadas con la materia de Ingeniería de Control Clásico. Lo anterior es una realidad, pero también es una oportunidad para proponer prototipos didácticos y suplir con la carencia de equipo en esta materia.

Se ha propuesto un equipo o prototipo que pueda ser usado para la enseñanza-aprendizaje de los conceptos básicos del control por retroalimentación. Con el equipo se pretende que el estudiante tenga herramientas adicionales para que relacione lo visto en materias previas al control.

Se ha presentado el modelo matemático del péndulo obteniendo su ecuación diferencial y la función de transferencia. Se ha explicado la programación realizada para la implementación del control del péndulo utilizando Simulink de Matlab.

El objetivo del presente trabajo no es obtener la sintonización de las ganancias del control PID pero se tiene como tarea pendiente y continuar con la mejora del equipo. Es importante mejorar la tarjeta electrónica de circuito impreso (shield). Es deseable sustituir el potenciómetro como sensor de posición por otra forma, como por ejemplo un acelerómetro utilizado en un dron. De la misma forma pensar en utilizar un motor brushless en el equipo.

BIBLIOGRAFÍA.

Arduino. (2017). *Oficial page Arduino*. Obtenida el 20 de Enero de 2017, de <https://www.arduino.cc>

Fritzing. (2017). *Fritzing electronics made easy*. Obtenida el 15 de Febrero de 2017, de <http://www.fritzing.org>

Gómez, S. (2010) *El gran libro de SolidWorks*,. Alfaomega Grupo Editor, Cuarta reimpression, Distrito Federal, México.

MathWorks. (2017). *Simulink Support Package for Arduino Hardware*. Obtenida el 10 de Enero de 2017, de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40312-simulink-support-package-for-arduino-hardware>

Nise, N. (2010). *Control System Engineering*,. John Wiley & Sons Inc, Sixth Edition, United States of America.

SEP. (2017). *Comunicado 20.- El tecnológico Nacional de México se involucrará más en desarrollo industrial y vinculación con empresas*. Obtenida el 13 de Junio de 2017, de <https://www.gob.mx/sep/prensa/comunicado-20>

TecNM. (2017). *Tecnológico Nacional de México/que hacemos*. Obtenida el 1 de Junio de 2017, de <http://www.gob.mx/tecnm/que-hacemos>

TecNM. (2017). *Planes de estudio 2009-2010*. Obtenida el 1 de Junio de 2017, de <http://www.tecnm.mx/docencia/planes-de-estudio-2009-2010>.