

Elaboración de robot móvil tipo balancín.

Development of a two wheeled robot

-  **Sanchez-Quintal, Ricardo Jesus** profesor en el Instituto Tecnológico de Lerma de Campeche (México) (ricardo.sq@itlerma.edu.mx), (<https://orcid.org/0009-0003-8437-931X>), Maestro.
-  **Noh-Caamal, Sergio Raúl** profesor en el Instituto Tecnológico de Lerma de Campeche (México) (sergio.nc@itlerma.edu.mx), (<https://orcid.org/0000-0002-7898-2847>), Maestro.
-  **Duran-Lugo, Juan Miguel** profesor en el Instituto Tecnológico de Lerma de Campeche (México) (juan.dl@itlerma.edu.mx), (<https://orcid.org/0000-0001-7179-4301>), Doctor.
-  **Oreza-Sanz, Carlos** profesor en el Instituto Tecnológico de Lerma de Campeche (México) (carlos.os@itlerma.edu.mx), (<https://orcid.org/0009-0006-3978-7308>), Maestro.

Resumen: La adquisición de equipo para prácticas de laboratorio es un reto para Institutos Tecnológicos y Universidades no solamente por el costo del equipo sino también por los costos de mantenimiento. Como alternativa, existe el auto equipamiento que es de bajo presupuesto; y debido a que conlleva la coordinación de las labores de los docentes, alumnos y autoridades involucrados, el esfuerzo es institucional y por tanto es una forma de fomentar el trabajo en equipo. En este trabajo se presenta una propuesta de auto equipamiento para poder trabajar en robótica móvil como línea de investigación en el Instituto Tecnológico de Lerma. Se opta por un robot móvil balancín ya que solamente lleva dos ruedas y dos motores siendo de esta manera más económico que cualquier otra opción a cuatro llantas; pero, al comportarse como un péndulo invertido se necesita de técnicas de control, propias de las materias de ingeniería en mecatrónica para que pueda mantenerse erguido. Se trata de un sistema no lineal subactuado ideal para aplicar técnicas de control moderno. El robot móvil al simplificar el mecanismo de locomoción complica la instrumentación debido a que es necesario conocer la posición y el ángulo de inclinación del robot, para ello la implementación del sensor acelerómetro y giroscopio MPU6050. Este sensor de bajo costo cuenta con una librería para ser manejado en diversas plataformas de programación, en este trabajo se usa la plataforma Arduino para la regulación y control básico, siendo posible escalar el robot para aplicaciones de marcha, formación y consenso.

Palabras clave: robot móvil, giroscopio, MPU6050, Control, Autoequipamiento.

Cómo citar: Sanchez-Quintal, R.J., Noh-Caamal, S.R., Duran-Lugo, J.M. y Oreza-Sanz, C. (2023). Elaboración de robot móvil tipo balancín. *Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales*, 5(9), pp. 67-81. <https://doi.org/10.56913/teceo.5.9.67-81>

Recibido: 03-11-2022 | Revisado: 09-08-2023 | Aprobado: 09-08-2023 | Publicado: 31-12-2023

Abstract: Acquiring Laboratory equipment is a challenge for universities and institutes not just for the initial cost, but also the maintenance is expensive. Self-made equipment is attractive as an alternative, not only for being cheaper and because it involves the coordination of the work, of the teachers, students and authorities. In this paper presents a proposal for self-equipment to work in mobile robotics as a line of research at the ITL. A self-balance robot is chosen since it only has two wheels and two motors, being in this way, more economical than any other option of four wheels, as well behaving like an inverted pendulum, you should use modern control techniques, typical of mechatronics engineering subjects, to keep it upright. It is an underactive nonlinear system, ideal for applying modern control techniques. By simplifying the locomotion mechanism of the rocker, it complicates the instrumentation because it is necessary to know the position and tilt of the robot, to resolve the problem, we implemented the sensor MPU6050. This low-cost sensor has a library to manage on different programming platforms, in this work we use the Arduino platform for basics control rules, being capable to implement robot march and formation on a future work.

Keywords: Mobil robot, Gyro, MPU6050, Control, Self-equipment.

Introducción

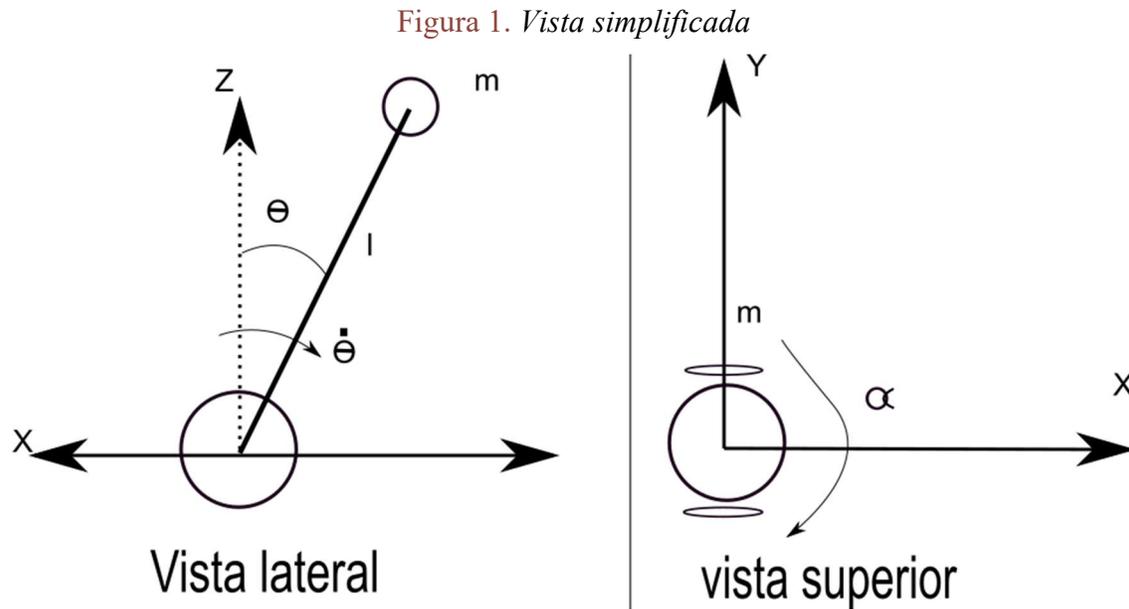
La mayoría de los robots móviles cuenta con cuatro o más ruedas, estas pueden ser actuadas, es decir que están conectadas a un motor o libres solamente para dar equilibrio al robot, cabe mencionar que han surgido esfuerzos para estabilizar robots a una y dos ruedas, debido a la versatilidad que tienen este tipo de vehículos para desempeñarse cotidianamente como es el caso del Segway (Morantes, Espitia, Morales, Jiménez, & Avilés, 2018)

La plataforma elegida es la de un robot móvil con dos llantas (ilustración 1), cada llanta cuenta con un motor, la disposición de estos motores es colineal entre sus ejes, el chasis del robot soporta los dos motores y al estar la pila en la parte superior el centro de gravedad queda ubicado por encima del eje de giro. El diseño del robot es una versión de menor tamaño que la realizada por la universidad del transporte de Corea (Korea National University of Transportation) (Han, 2013), el modelo simplificado se observa en la ilustración 1. Para control del robot cuenta con una tarjeta Arduino Mega 2560 y un acelerómetro/giroscopio MPU6050.

Es un sistema que cuenta con cuatro grados de libertad con solo dos actuadores, debido a esto es un sistema subactuado (A. Valera, 2002). Este tipo de sistemas han sido utilizados para plataformas para investigar y aplicar diversas técnicas de control tales como: Controlador cuadrático lineal conocido como LQR (Lineal Quadratic Regulator) (Han, 2013), PID (Morantes, Espitia, Morales, Jiménez, & Avilés, 2018), Algoritmos inteligentes, Lógica difusa, etc.

Este tipo de robots para navegación autónoma fueron estudiados en Japón donde en 1996 se construye el robot Yambico Kurara (DUARTE, LIERA, & JAGÜEY, 2016), en él se implementan tres controladores independientes, uno para balancear el robot y dar la velocidad lineal, otro que mueve al robot por el plano (X,Y) y por último uno para la navegación. La versión comercial de estos robots es el Segway altamente utilizado en ambientes urbanos (Segway, Inc., 2022)

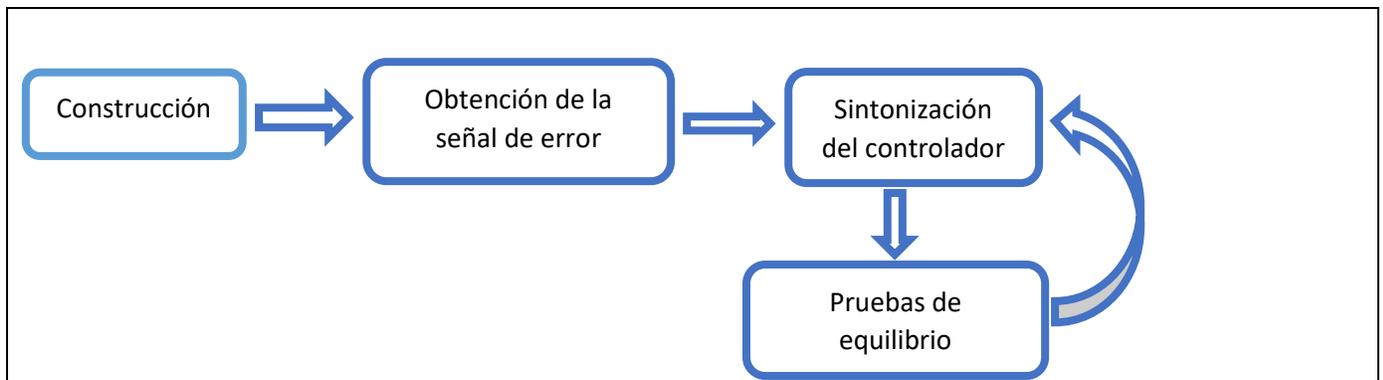
El robot se asume como dos sistemas independientes uno que corresponde al péndulo invertido y otro la plataforma móvil que se moverá sobre el plano X, Y. Este vehículo está limitado en su velocidad lineal por la capacidad de mantener el Ángulo θ (Ilustración 1) diferente de cero, de esta manera al inclinar el robot se moverá en el sentido de la inclinación de forma lineal (Lara, 2017).



Método

El método que se utilizó para la elaboración del robot mostrado en la ilustración 2 consiste en: la construcción de la plataforma (ilustración 1), la obtención de la señal de error basado en el filtrado de la señal del acelerómetro utilizando un filtro Kalman (Díaz, Mejías, & Arteaga, 2001), de esta manera podemos deducir el cabeceo de la plataforma (Pozo, 2014). La sintonización del controlador PID, fue realizada de manera manual por los participantes del proyecto usando la técnica de sintonización Ziegler-Nichols (Cantarero, 2015). Posteriormente se realizan las pruebas de equilibrio, a su vez, estas pruebas realimentan la etapa sintonización del controlador hasta que se logra el desempeño esperado.

Figura 2. Procedimiento realizado en el robot balancín.

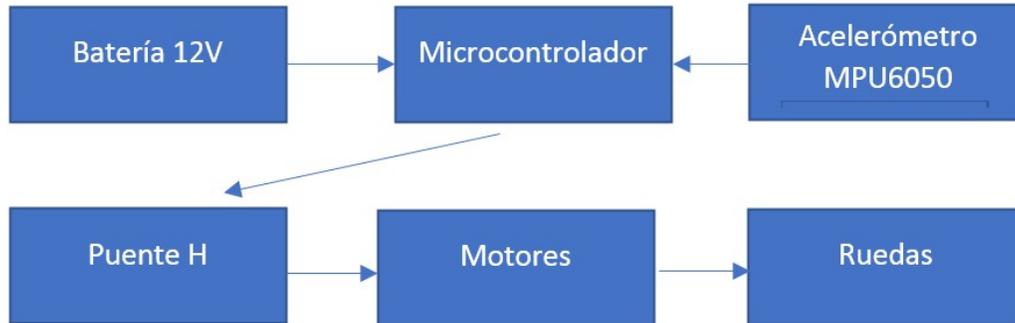


Construcción

El robot móvil está compuesto por una plataforma donde se fijan los motores de forma colineal a las ruedas, un driver controlador de motores L298N, un Arduino mega 2560, un MPU6050 que es un acelerómetro de bajo costo para determinar la posición del robot. Como muestra la ilustración 3.

El microcontrolador utilizado es el Arduino mega 2560, que consta de 54 entradas/salidas digitales, 16 entradas analógicas y 4 puertos especiales, este modelo tiene una interfaz de programación basada en C, muy popular entre los estudiantes de ingeniería mecatrónica debido al soporte técnico comunitario, gran disponibilidad de librerías, capacidad y precio.

Figura 3. Diagrama de funcionamiento.



Obtención de la señal de error

Un acelerómetro de estado sólido es un sensor electrónico inercial cuyo objetivo es obtener mediciones de aceleración, es decir mide la diferencia entre la aceleración traslacional y la componente gravitatoria (Randall K. Curey, 2004).

Los acelerómetros son clasificados (N Yazdi, 1998) por su sensibilidad, máximo rango de operación, resolución, frecuencia de respuesta, linealidad a máxima escala, offset y resistencia al impacto (MSY SivaPrasad, 2010). En la tabla 1 se pueden apreciar los parámetros de desempeño para acelerómetros.

Tabla 1. Acelerómetros según su aplicación (N Yazdi, 1998)

Parameter	Automotive	Navigation
Range	$\pm 50g$ (airbag) $\pm 2g$ (vehicle stability system)	$\pm 1g$
Frequency Range	DC – 400Hz	DC – 100Hz
Resolution	$< 100 mg$ (airbag) $< 10mg$ (vehicle stability System)	$< 4\mu g$
Off – axis Sensitivity	$< 5 \%$	$< 0.1\%$
Nonlinearity	$< 2\%$	$< 0.1\%$
Max. Shock in 1msec	2000g	10g
Temperature range	$-40^{\circ}C$ to $85^{\circ}C$	$-40^{\circ}C$ to $85^{\circ}C$
Tc of offset	$< 60mg/^{\circ}C$	$< 50\mu g/^{\circ}C$
Tc of Sensitivity	$< 900ppm/^{\circ}C$	$< \pm 50ppm/^{\circ}C$

Es conocido que para determinar la derivada a partir de una señal continua, se pueden provocar errores de cálculo y existe la necesidad de utilizar filtros y técnicas para obtener una aproximación (DUARTE, LIERA, & JAGÜEY, 2016), lo mismo ocurre al realizar la lectura de la aceleración angular, la cual debe ser integrada para obtener el ángulo de inclinación, también conocido como cabeceo, por lo que en este trabajo presentamos un filtro de Kalman para obtener el dato y pueda ser usado en el control. El filtro de Kalman implementado en su forma no extendida es mostrado en la Ecuación.

Ecuación 1. Filtro no extendido.

$$\hat{x}[k+1|k+1] = \hat{x}[k+1|k] + K[k+1]v[k+1]$$

$$\hat{P}[k+1|k+1] = \hat{P}[k+1|k] - K[k+1]H\hat{P}[k+1|k]$$

Donde \hat{x} representa el estado estimado y \hat{P} es la covarianza estimada o incertidumbre en \hat{x} , la predicción P involucra la suma de dos valores definidos positivos por lo que la incertidumbre se incrementa. Para resolver esto, se introduce nueva información que proviene de los sensores en cada ciclo, a lo que se llama innovación.

El filtro programado en C es más simple de verificar como muestra la Figura 4.

Figura 4. Filtro de Kalman en C.

```
Y1 = angle;
X1 = A1* X1;
P1 = A1*P1 *A1 + Q1;
K1 = (P1*H1)*(1/(H1*P1*H1+R1));
X1 = X1 + K1 * (Y1-H1*X1);
P1 = P1 - K1 *H1 *P1;
```

Implementación del control

En este artículo se describe el control del equilibrio como primer meta de control, posteriormente se implementará el control de velocidad y giro del vehículo. El control utilizado para equilibrar el vehículo es del tipo proporcional integral derivativo, que se muestra en la Ecuación 2 para cada una de las llantas.

Ecuación 2. controlador PID

$$\tau_{1,2} = k_p e + k_i e + k_d \dot{e}$$

Este controlador se eligió por su robustez y fácil implementación del algoritmo (Patete, Aguirre, & Sánchez, 2011), se debe mencionar que el controlador PID se ha usado en este tipo de vehículos previamente (Otero Salamanca, 2020), otra de las razones es que es un controlador independiente al modelo matemático de la planta, lo cual permite que los estudiantes sintonicen el controlador de manera empírica. Cabe mencionar que el desempeño del controlador depende la precisión con que este error sea medido.

La sintonización de las constantes del controlador deberá tener los siguientes objetivos:

- Rapidez en estabilizar los estados: debido a la naturaleza inestable de la plataforma suspendida en dos ruedas es necesario el péndulo se estabilice en la posición vertical en el menor tiempo posible.
- Mínimo número de oscilaciones posible: el vehículo deberá presentar pocas oscilaciones para que pueda desempeñar otras tareas aparte de mantener su equilibrio.
- La señal de control deberá requerir el mínimo de cómputo posible para permitir la futura comunicación de los robots con un control centralizado para las otras aplicaciones requeridas.

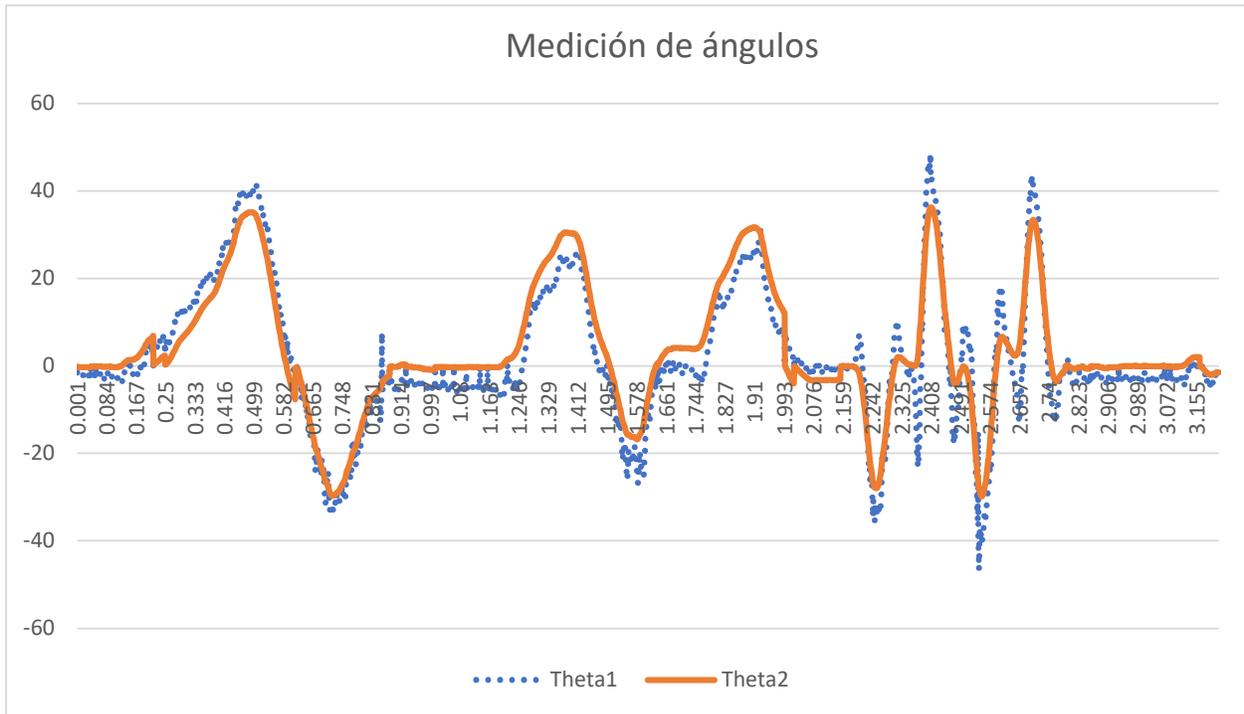
Resultados

En la ilustración 5 podemos comparar la medición del Angulo de inclinación realizado por el acelerómetro, sin filtro que corresponde a la línea naranja de la gráfica y con el filtro de Kalman corresponde a la línea azul.

El filtrado del ángulo de inclinación θ a través del filtro Kalman produce transiciones más suaves que permitirán al controlador una salida con menos oscilaciones como se puede observar en la gráfica de Theta 2, la señal obtenida de los datos usando los valores del acelerómetro se pueden apreciar en Theta 1, se observa que la señal filtrada ignora los cambios abruptos en el ángulo, como por ejemplo, en el tiempo 0.8 s existe un cambio abrupto que es suavizado por el filtro, estos

cambios abruptos ocurren más cuando el robot se queda quieto en el punto de equilibrio como puede apreciarse del tiempo 0.9 s al 1.3 s, sin el filtro, el robot a pesar del desempeño del controlador reaccionaría a estas variaciones oscilando para tratar de equilibrar al robot, normalmente a estas vibraciones se les denomina ruido.

Figura 5. ángulo de inclinación



El controlador del robot fue sintonizado en la búsqueda de las mínimas oscilaciones, de manera que se mantenga en su punto de equilibrio inestable y pueda soportar un ligero empujón para probar el controlador; cabe mencionar que el desempeño del controlador depende de la sintonización realizada, obteniendo los valores de las constantes mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Constantes del controlador PID

Constante	valor
kp	130.0
ki	80.0
kd	130.0

Para poder darle sentido a los motores (variables u1, u2) y controlar el puente h con las salidas digitales del microcontrolador se implementó el código mostrado en la ilustración 5. El código consiste en activar el puente H con el PWM y dar dirección con los pines de control.

Figura 5. Código para activar motores.

```
analogWrite(5, abs(u1));
analogWrite(10,abs(u2));
if (u1<0)
{
  digitalWrite(7,HIGH);
  digitalWrite(6,LOW);
}else{
  digitalWrite(6,HIGH);
  digitalWrite(7,LOW);
}
if (u2<0)
{
  digitalWrite(8,HIGH);
  digitalWrite(9,LOW);
}else{
  digitalWrite(9,HIGH);
  digitalWrite(8,LOW);
}
```

El robot después de ser sintonizado para trabajar en su punto estable presenta un mínimo de oscilaciones, para reducir estas oscilaciones se aumenta el valor de la constante de integración k_i como muestra la tabla 1, también se debe mencionar que valores altos de la constante de proporcionalidad causan oscilaciones que no alcanzan a reducir la constante de derivación k_d .

Se observó que la simetría de los motores no se puede asumir, se deben compensar los valores de las salidas de control (u_1 , u_2) dependiendo de la sensibilidad particular de cada motor como muestra la Figura 6.

Se realizó una prueba en el punto de equilibrio que puede apreciarse en la ilustración 6, a los 3.5 segundos de haber encendido el robot (35 en el eje x), se le proporciona una perturbación, esta perturbación se aprecia en la línea de Theta, el controlador rápidamente regresa al robot a su punto de equilibrio con mínimas oscilaciones.

En la ilustración 7 se puede observar los resultados de una prueba de regulación, en esta prueba se le indica al controlador regular un Angulo de 4 grados $\theta = 4^\circ$, en esta prueba la salida del controlador presenta una oscilación propia de la acción de regulación, pero el ángulo presenta un descenso suave hasta el valor deseado (en la escala de la gráfica es 40), cabe mencionar que para

que el robot regule este ángulo se tiene que encontrar en desplazamiento y es la manera en que se le da dirección y velocidad a este sistema subactuado.

Figura 6. Robot en punto estable.

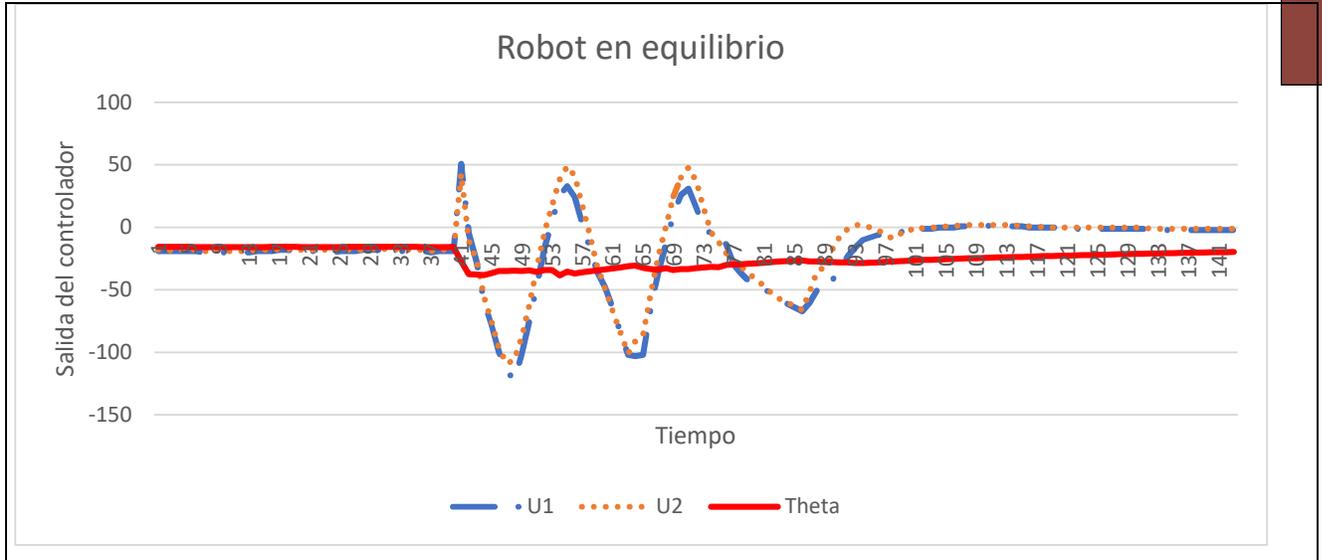
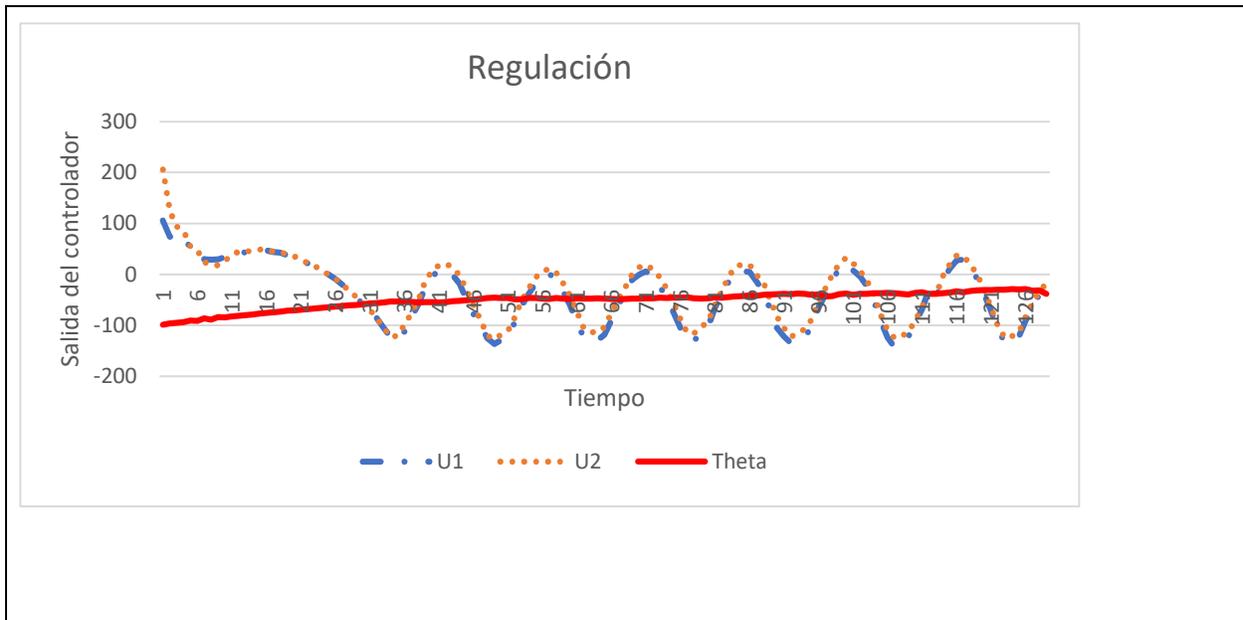


Figura 7. Robot en regulación.



Discusión

El trabajo realizado en este proyecto culminará con la elaboración de varios de estos vehículos, para poder ser usados en las materias de instrumentación, control y control inteligente las cuales son importantes para el perfil de egreso del ingeniero mecatrónico. La participación de los estudiantes en la elaboración y sintonización de los controladores permite profundizar en los temas mencionados.

Como conclusión, podemos deducir que el controlador, aunque no puede eliminar el error en estado estable, logra mantener en equilibrio al robot, este efecto del error en estado estable es atribuible a que estamos usando un robot de cuatro grados de libertad controlado con solo dos actuadores, esto como hemos mencionado, es un sistema subactuado.

La prueba de regulación permitió al robot desplazarse a velocidad constante, el robot mantuvo el equilibrio hasta el valor de $\theta = 7^\circ$, sin caerse durante las pruebas realizadas.

Se debe mencionar que la calidad de la medición es crucial para el desempeño del control, se debió cambiar el acelerómetro debido a que generaba más ruido de lo común, posiblemente debido a algún impacto durante los traslados, al ser sustituido se lograron movimientos más suaves y menos oscilaciones en el robot balancín.

Como trabajo a futuro se tendrán que implementar controladores más complejos que sean pertinentes para este tipo de sistemas como lo son el regulador cuadrático lineal, predictivos por modelo, o adaptativos para tener un mejor desempeño.

Referencias

- Cantarero, T. A. (2015). Diseño del controlador PID. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática-Universidad de Sevilla.
- Cortés Fernández, N. (2019). Diseño, fabricación, montaje, estudio dinámico, control y teleoperación de un vehículo tipo péndulo invertido sobre dos ruedas. Universidad de Sevilla.
- DUARTE, A. A., LIERA, D. M., & JAGÜEY, D. M. (2016). Control de un robot autónomo tipo péndulo invertido. Instituto Tecnológico de la Paz, LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO.
- Han, M. K. (2013). Implementation of unicycle segway using unscented Kalman filter in LQR control. 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE.
- Lara, V. M. (2017). Control Predictivo para un vehículo tipo segway. Universidad de Sevilla. trabajo de Fin de Grado.
- Morantes, J., Espitia, D., Morales, O., Jiménez, R., & Avilés, O. (2018). Control system for a segway. International Journal of Applied Engineering Research, 13(18), 13--767.
- MSY SivaPrasad, P. M. (2010). Design Simulation & Fabrication of Micromachined Acceleration Sensor. PhD. Dissertation, Dept. Mech. Eng., Jawaharlal Nehru Technological University.,Kukatpally.
- N Yazdi, F. A. (1998). Micromachined Inertial Sensors. IEEE, Proceedings , Vol. 86, No. 8,.

- Otero Salamanca, A. F. (2020). Diseño, análisis e implementación de un controlador para un péndulo invertido tipo segway. Universidad de los Andes.
- Patete, A., Aguirre, I., & Sánchez, H. (2011). Control de un péndulo invertido basado en un modelo reducido. *Revista Ingeniería Uc*, 18(1), 12--22.
- Pozo, D. S. (2014). Medición de ángulos de inclinación por medio de fusión sensorial aplicando filtro de Kalman. *Revista Politécnica*, 33.
- Randall K. Curey, M. E. (2004). Proposed IEEE Inertial Systems Terminology Standard. Position Location and Navigation Symposium, 2004. PLANS 2004, pp.83,90, 26-29.
- Segway, Inc. (2022). Obtenido de <https://www.segway.com/>