



Instituto Balseiro

## Servomecanismos Proyecto Final

# Control de un robot balancín

### **Docentes**

Andrés Etchepareborda

Norberto Abaurre

Santiago Pincin

### **Alumnos**

Enzo Schiavoni

Francisco Viñon

Luciano Gutierrez

*Junio 2019*

## **Índice**

1. Resumen.....	3
2. Introducción .....	4
3. Desarrollo.....	5
3.1. Reconocimiento de la planta .....	5
3.1.1. Reconocimiento de la parte mecánica.....	5
3.1.2. Reconocimiento de la parte electrónica .....	6
3.2. Caracterización de variables y procesamiento de señales .....	9
3.2.1. Posición y velocidad lineal mediante la utilización de los encoders .....	9
3.2.1. Posición y velocidad angular mediante la utilización de la IMU.....	9
3.3. Control de trayectoria.....	14
3.4. Modelado e identificación de la planta.....	16
3.4.1. Modelado .....	16
3.4.2. Ensayos .....	19
3.5. Control de actitud .....	26
4. Conclusiones .....	35

## **1. Resumen**

Se tiene como objetivo en este trabajo implementar un sistema de control sobre un dispositivo robot tipo péndulo invertido montado sobre dos ruedas, denominado comúnmente *robot balancín*. La meta final es que éste se mantenga en equilibrio en posición vertical y logre desplazarse hasta una posición lineal dada.

En primer lugar, se realizó un reconocimiento de la planta, observando los detalles constructivos e identificando los sensores y actuadores con los que cuenta y cómo estos envían/reciben información. Se inspeccionó también el software base dado por la cátedra.

Luego, se realizó el procesamiento y acondicionamiento de las señales recibidas desde los sensores, para obtener de éstos las magnitudes físicas de interés.

Una vez obtenidas las señales físicas, se realizó un control para que la trayectoria del robot sea recta y así poder simplificar el problema a dos dimensiones.

Posteriormente, se realizó el modelado matemático de la planta y se la identificó con ayuda de diferentes ensayos, los cuales están destinados a la identificación de parámetros específicos dentro del modelo.

Finalmente, se aplicó el control necesario para que el robot logre mantener la posición vertical y seguir referencias en posición.

## **2. Introducción**

Las actividades que se describirán en el presente informe forman parte del Trabajo Final de la asignatura “Servomecanismos”, perteneciente a la carrera Ingeniería Electromecánica con Orientación en Automatización Industrial de la Facultad de Ingeniería, UNLPam), dictada en el Instituto Balseiro. Todas las experiencias fueron desarrolladas en el Laboratorio de Control, perteneciente al edificio de Laboratorios de Ingeniería.

### **3. Desarrollo**

#### **3.1. Reconocimiento de la planta**

##### **3.1.1. Reconocimiento de la parte mecánica**

El *robot balancín* utilizado en el proyecto está compuesto por un péndulo pivotante sobre un par de ruedas. De aquí, se pueden separar dos partes elementales: el péndulo y las ruedas.

El péndulo está formado por un chasis de aluminio plegado en forma de U, en cuyo interior se colocó un soporte que, por un lado, le brinda rigidez estructural y por otro sirve para sostener la placa electrónica diseñada para el manejo de señales.

Además, sobre el chasis se colocaron los pares motor-encoder que brindan movimiento a las ruedas y miden la posición de las mismas.

Un eje de acero cruza el chasis en el extremo inferior, brindando soporte a las ruedas a través de rodamientos y siendo el punto de pivoteo del sistema.

Las ruedas fueron fabricadas mediante el proceso de impresión 3D, en material polímero PLA. Los motores transmiten el movimiento a las mismas a través de un sistema de engranajes. De la misma manera, los encoders logran registrar su posición.

Para mejorar el coeficiente de fricción entre las ruedas y el piso, se colocaron o rings de goma en la banda de rodadura.

El sistema en su totalidad tiene una masa de aproximadamente 1.98 [kg], dato que será de utilidad a la hora de realizar el modelado.

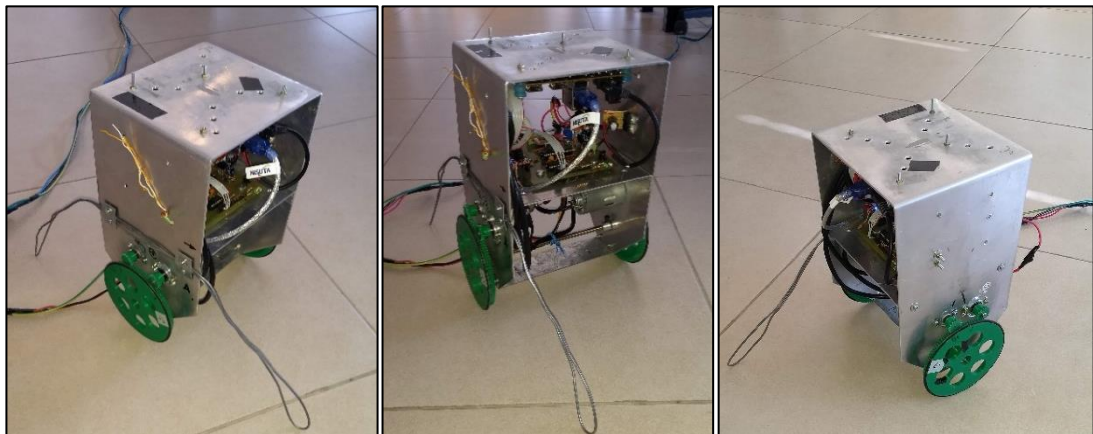


Figura 1 - Imágenes del robot utilizado en el proyecto

### **3.1.2. Reconocimiento de la parte electrónica**

Se analizó la parte electrónica de la planta, identificando todos los componentes presentes y la forma en que se relacionan y comunican. Se investigó sobre la funcionalidad de cada uno de ellos, utilizando las hojas de datos.

Por otra parte, se inspeccionó el código en lenguaje C++ dado por la cátedra, el cual contiene algunas funciones básicas para la comunicación entre el microcontrolador y la computadora *PandaBoard*.

En la figura siguiente, se muestra un diagrama con los componentes reconocidos y las relaciones que se establecen entre ellos.

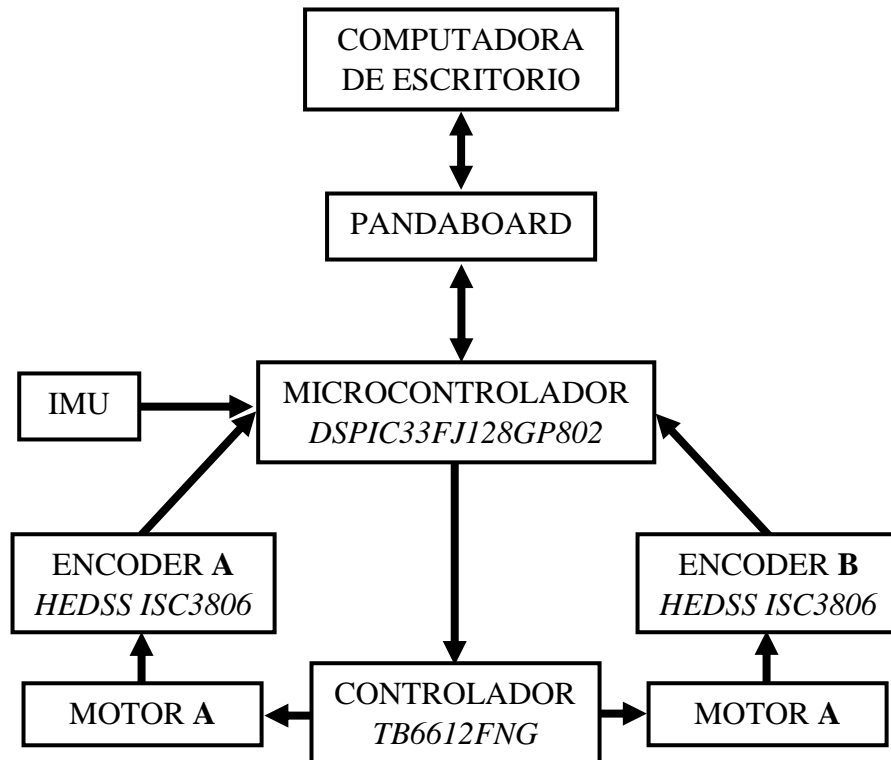


Figura 2 - Diagrama de componentes

### PandaBoard

Para el comando del robot se emplea una computadora de placa única *PandaBoard* del fabricante *Texas Instruments*, en la cual fue programada (en lenguaje C++) la rutina para el control. Esta programación fue realizada utilizando una computadora de escritorio, la cual fue conectada mediante WiFi a la *PandaBoard*.

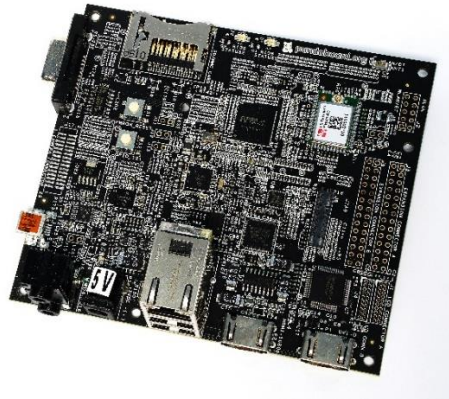


Figura 3 - Imagen de una computadora de placa única como la utilizada en el proyecto

### Microcontrolador

Se utilizó un microcontrolador *DSPIC33FJ128GP802* de la empresa Microchip para el intercambio de señales con los sensores y/o actuadores, fijando éste un período de muestreo fijo de 10 [ms]. Este circuito integrado programable posee un manejo más preciso del tiempo que la computadora, cercano al tiempo real, por esta razón éste es el encargado del manejo de los tiempos de envío y recepción de datos.

Fue necesario hacer un análisis de los datos recibidos en la *PandaBoard* desde el microcontrolador, dado que la programación de este último ya estaba realizada.

### Encoders

Para la medición del estado de las ruedas se utilizaron encoders rotatorios HEDSS ISC3806, de 1000 pasos por vuelta. Estos dispositivos permiten conocer la posición con una resolución de 4000 pasos por cada vuelta de encoder, dada la configuración en la detección de flancos realizada. Esto equivale a 26000 pasos por cada vuelta de rueda, ya que la relación de transmisión es  $N=6.5:1$ .

El sentido de giro es obtenido gracias al desfase entre las señales por éstos entregadas, teniendo en cuenta si una adelanta a la otra o no.



Figura 4 - Imagen de un encoder como los utilizados en el proyecto

### Módulo acelerómetro y giróscopo

El robot cuenta con una unidad de medición inercial (IMU), la cual integra un acelerómetro ADXL345, un giróscopo ITG3200 y un magnetómetro HMC5883L (que no fue utilizado para este proyecto) y se conecta al microcontrolador mediante protocolo I2C. Se utilizará para obtener el ángulo de inclinación y la velocidad angular del péndulo, señales indispensables a la hora de realizar el control.

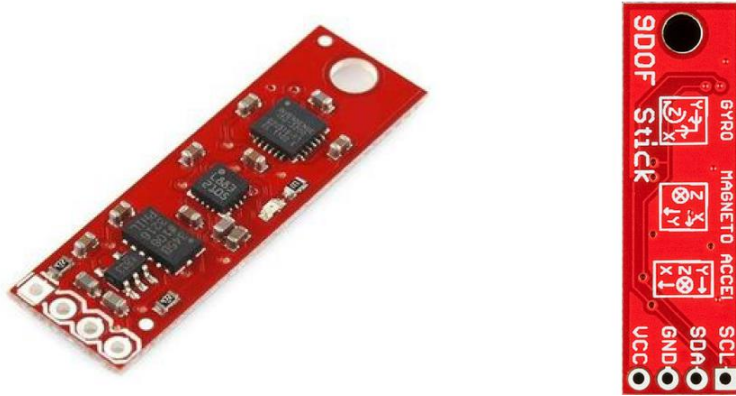


Figura 5 - Imagen del módulo acelerómetro - giróscopo utilizado en el proyecto. En la derecha (vista posterior del dispositivo), pueden verse los sistemas coordenados y los sentidos de giro.

### Controlador de motores

Para comandar los motores de corriente continua que brindan la fuerza motriz al sistema se utilizan dos salidas PWM del microcontrolador y un doble puente H TB6612FNG de Toshiba. Éste permite dar potencia a los motores y controlar el sentido de giro de cada uno, con una alimentación única.

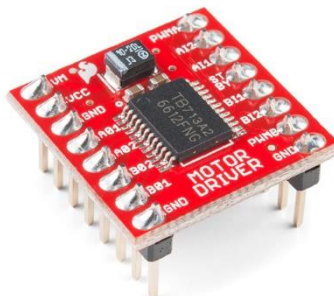


Figura 6 - Módulo utilizado para el manejo de los motores



### **3.2. Caracterización de variables y procesamiento de señales**

Se realizó el procesamiento y acondicionamiento de las señales recibidas desde los sensores, con el fin de convertirlas a unidades físicas para que puedan ser utilizadas en el control a diseñar. Todo esto fue implementado en una función denominada *calc\_estado()*.

#### ***3.2.1. Posición y velocidad lineal mediante la utilización de los encoders***

Se comenzó analizando el funcionamiento de los encoders. Realizando diferentes pruebas, se pudo ver que la señal recibida en la *PandaBoard* es el número de cuentas acumulado y que éste va desde -32768 a 32768. Se vio también que el signo depende del sentido de giro de la rueda.

Para convertir ese número de cuentas recibido a ángulo girado, se tiene que cada vuelta de rueda equivale a 26000 pulsos de encoder. Entonces, almacenando el valor de cuentas en cada medición y restándolo de la anterior, se obtiene un *delta* de cuentas, el cual es convertido a un *delta* de posición angular utilizando la relación anterior.

A este ángulo girado por la rueda, se le debe restar el ángulo de inclinación del péndulo, dadas las características constructivas del robot.

Luego, la posición angular de cada una de las ruedas es el acumulativo de los *deltas* anteriores.

Para obtener la posición lineal de cada una de las ruedas, se multiplica la anterior por el radio, mientras que la posición lineal de todo el robot fue obtenida realizando el promedio de las posiciones anteriores.

Para la obtención de la velocidad angular de cada rueda, el microcontrolador registra y envía el número de cuentas acumulado entre cada comunicación de datos a la *PandaBoard*. Este número de cuentas es dividido por la frecuencia del timer asociado al capture y así es obtenido el tiempo entre mediciones. Luego, se utiliza la variación de la posición de la rueda en ese tiempo para calcular la velocidad.

Al igual que en el caso anterior, es necesario restar la velocidad angular del péndulo, la cual es obtenida de las mediciones del giróscopo.

#### ***3.2.1. Posición y velocidad angular mediante la utilización de la IMU***

Se analizaron los datos referidos al acelerómetro y giróscopo. En estos dos casos, el procesamiento de la señal recibida desde el microcontrolador fue similar.

En el caso del acelerómetro, el número de cuentas recibido necesitó ser multiplicado por la sensibilidad del instrumento. Este valor fue obtenido del datasheet del fabricante, y es de 3.9 [mg/LSB]; luego, se realizó la conversión a [m/s<sup>2</sup>] utilizando la aceleración de la gravedad. Se realizó la calibración del sentido de los ejes coordinados asociados al robot, utilizando la aceleración de la gravedad como guía.

En lo que respecta al giróscopo, observando el datasheet se tiene que la sensibilidad es de 14.375 [LSB/(°/s)]. El resultado obtenido es luego convertido a [rad/s]. Fue necesario, además, programar un período inicial de calibración para eliminar el offset en la medición de velocidad angular.

Mientras que la velocidad angular utilizada para el diseño de la ley de control fue directamente la arrojada por el giróscopo, para el cálculo de la posición angular fue

necesario combinar las mediciones de éste instrumento con las del acelerómetro, como se describirá a continuación.

Una de las formas de calcular el ángulo de inclinación del robot respecto de la vertical es mediante la arcotangente de las componentes de la aceleración de la gravedad que arroja el acelerómetro, aprovechándose de que el vector gravedad es fijo. Pero se presentan dos problemas al utilizar esta técnica, por un lado, la señal que aporta el acelerómetro es ruidosa, y por el otro, el acelerómetro es muy sensible a otras fuerzas externas, es decir, si al balancín se lo acelera manteniendo una inclinación constante, cambian los valores de las componentes de aceleración y con esto el ángulo medido, es por eso que se dice que la información de acelerómetro es creíble a largo plazo.

Con el fin de evitar dicho problema, inicialmente se implementó un filtro complementario, el cual consiste en obtener el ángulo medido mediante la fusión de dos mediciones, donde cada medición tiene un porcentaje de credibilidad. Las dos mediciones que se realizan son la integración de la velocidad angular del giróscopo y la de inclinación con el acelerómetro, como se describió párrafos arriba.

La gran ventaja de utilizar la señal del giróscopo es que ésta tiene poco ruido, pero presenta cierto *drift*.

El filtro complementario utiliza lo mejor de ambas mediciones, dándole más peso al giróscopo a corto plazo, ya que el mismo es preciso e inmune a fuerzas externas, y utilizando la señal del acelerómetro a largo plazo, ya que el mismo no presenta *drift*. Se tiene entonces que el ángulo vendrá dado por:

$$\theta_k = k \cdot (\theta_{k-1} + \dot{\theta}_{Gk} \cdot T_s) + (1 - k) \cdot (\theta_{Ak})$$

Siendo:

- $\theta_k$  la inclinación actual.
- $\theta_{k-1}$  la inclinación en el tiempo anterior
- $\dot{\theta}_{Gk}$  la velocidad angular actual arrojada por el giróscopo
- $T_s$  el tiempo de sampleo
- $\theta_{Ak}$  inclinación arrojada por el acelerómetro utilizando *atan2*.
- $k$  y  $(1-k)$  el factor de peso que se le da a cada sensor.

Al implementar dicho filtro en el balancín, inicialmente se hizo una sentencia que mida por un cierto tiempo de inicialización, los valores de velocidad angular, para luego calcularle la media y con esto tener un valor de offset utilizado para realizar la calibración del giróscopo. Durante dicho tiempo de calibración el balancín debe estar inmóvil para que los valores de offset calculados sean correctos.

Una vez implementada la lógica de dicho filtro en el robot, se obtuvieron los resultados que se muestran en la siguiente gráfica, donde se compara el ángulo entregado por la arcotangente de las componentes del acelerómetro, el calculado mediante la integración de la velocidad angular y los valores de inclinación arrojados por la fusión de las mediciones mediante el filtro complementario.

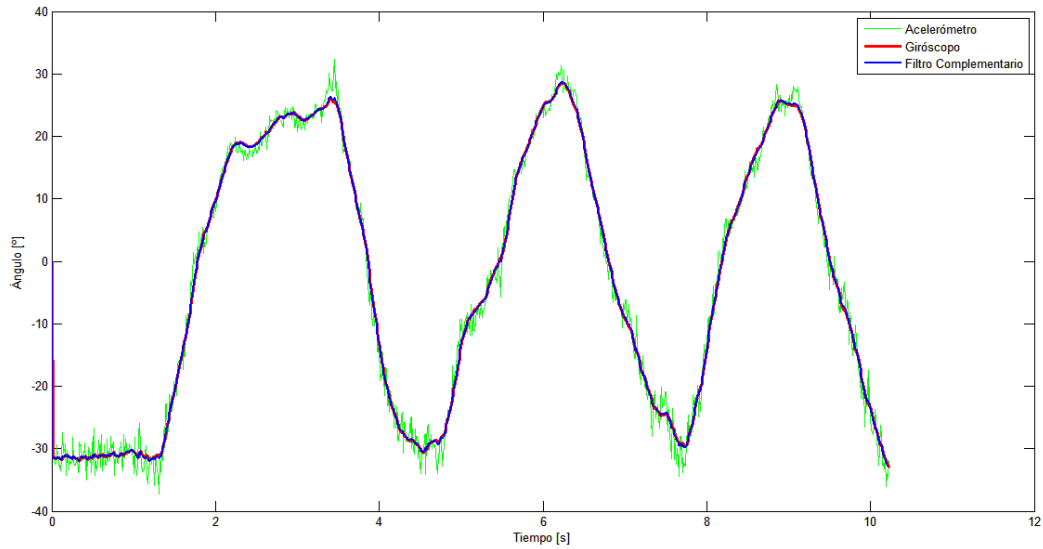


Figura 7 - Comparación del ángulo obtenido mediante el filtro complementario con las mediciones del acelerómetro y giróscopo.

Puede verse que el filtro sigue al giróscopo en los cambios repentinos, pero se mantiene siguiendo la media del acelerómetro en los cambios más lentos. De esta manera, no se tiene en cuenta el ruido del acelerómetro, ni el *drift* del giróscopo.

Con fines de implementar un filtro más robusto, se procedió a obtener el valor de  $\theta$  con otro método, el cual consiste en utilizar un filtro de Kalman para estimar la posición del vector gravedad respecto del sistema no inercial solidario a la IMU y de esta forma calcular la inclinación con la arcotangente de las componentes de este vector estimado.

Para tal fin fue necesario utilizar la matriz de Rotación de Rodrigues, la cual permite rotar un vector en el espacio, dada una dirección y un ángulo de rotación.

$$\vec{v}_{rot} = R \cdot \vec{v}$$

Siendo R la matriz de rotación de Rodrigues, definida de la siguiente manera:

$$R = I - (\sin(\theta)) \cdot N + (1 - \cos(\theta)) \cdot N^2$$

Donde N se define como la matriz producto cruz del vector dirección  $\vec{n}$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & -n_x \\ -n_y & n_x & 0 \end{bmatrix}$$

R es calculada mediante la integración de los valores de velocidad angular que aporta el giróscopo, teniendo cuidado en cambiar los signos de las rotaciones, ya que lo que rota es el sistema de referencia y no el vector gravedad. En el algoritmo esto se resolvió utilizando una función propia de la librería TooN que requiere como parámetro cuanto se rotó la IMU en  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y retorna la matriz de Rodrigues.

Luego, el filtro de Kalman, primero predice el estado (vector gravedad visto desde la IMU) y la matriz de covarianza asociada al error de estimación.

- $\bar{g}_{k|k-1} = R \cdot \hat{g}_{k-1|k-1}$
- $P_{k|k-1} = R \cdot P_{k-1|k-1} \cdot R^T + Q_k$

Donde en la notación utilizada,  $\bar{g}_{k|k-1}$ , hace referencia al cálculo de  $\bar{g}$  en el tiempo  $k$  disponiendo de valores hasta el tiempo  $k-1$ .  $Q_k$  es una matriz de covarianza asociada al ruido de proceso.

Por otro lado, el vector de medición  $z_k$  adopta los valores aportados por el acelerómetro y, en este caso, se lo aumenta en una dimensión, la cual se fija en el valor del módulo al cuadrado de la gravedad. Esto último tiene como objetivo centrarse solamente en la aceleración de la gravedad dejando de lado aceleraciones de otra naturaleza.

La salida estimada,  $h_k$ , es el otro parámetro necesario para calcular el error, el cual directamente se construyó con el vector estimado  $\bar{g}_{k|k-1}$ .

$$z_k = \begin{bmatrix} accel_x \\ accel_y \\ accel_z \\ 9.81^2 \end{bmatrix} \quad h_k = \begin{bmatrix} \bar{g}_x \\ \bar{g}_y \\ \bar{g}_z \\ \bar{g}_x^2 + \bar{g}_y^2 + \bar{g}_z^2 \end{bmatrix}$$

Al ser  $h_k$  de carácter no lineal, el filtro resulta ser un filtro de Kalman extendido, donde es necesario calcular  $H_k$  como la derivada parcial de  $h_k$  respecto de las componentes de  $\bar{g}$  en el tiempo  $k$ , obteniendo:

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 \cdot \bar{g}_x & 2 \cdot \bar{g}_y & 2 \cdot \bar{g}_z \end{bmatrix}$$

Necesaria para calcular la ganancia de Kalman.

$$K_k = P_{k|k-1} \cdot H_k^T [H_k \cdot P_{k|k-1} \cdot H_k^T + R_k]^{-1}$$

Siendo  $R_k$  la matriz de covarianzas asociadas al error de medición del acelerómetro.

Por último, el filtro realiza la actualización por medición con el valor del error y la ganancia calculada previamente.

$$\hat{g}_{k|k} = \bar{g}_{k|k-1} + K_k \cdot (z_k - h_k)$$

Y actualiza  $P_{k|k}$  para utilizarla en la próxima secuencia.

$$P_{k|k} = [I - K_k \cdot H_k] \cdot P_{k|k-1}$$

Una vez obtenido el valor final de la gravedad respecto de la IMU,  $\hat{g}_{k|k}$ , se calculó el ángulo de inclinación del balancín aplicando atan2 a las componentes  $x$ ,  $z$  de dicho vector.

Cabe aclarar que el loop del filtro comienza en el cálculo de la matriz de rotación de Rodrigues; de esta manera, se logra ingresar los valores medidos por el giróscopo.

Finalmente se realizaron comparaciones del ángulo obtenido mediante el filtro complementario implementado con los obtenidos del filtro de Kalman, imprimiéndole al sistema aceleraciones horizontales, intentando mantener el ángulo de inclinación igual a cero. En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos.

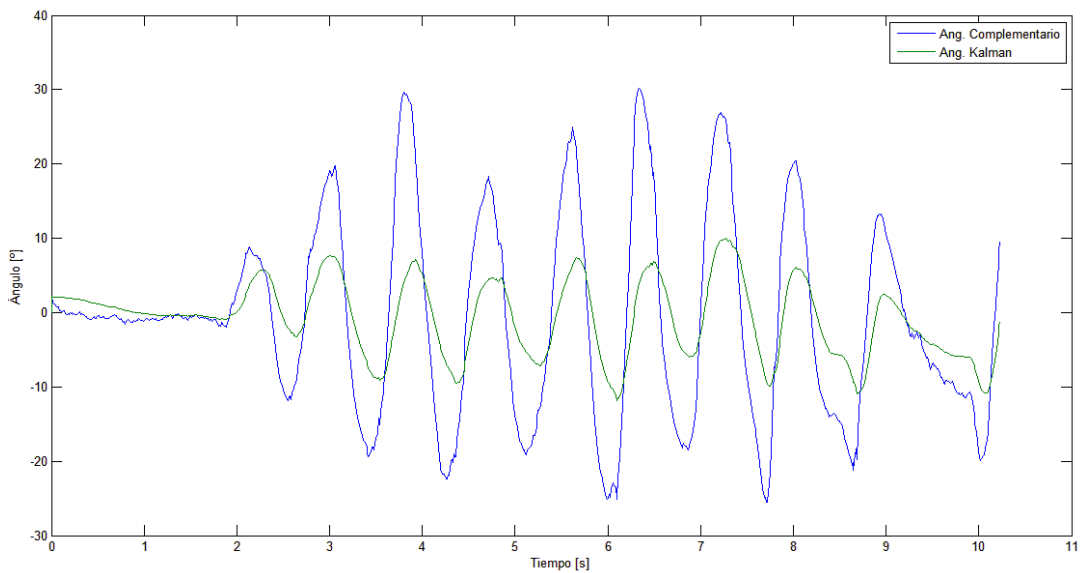


Figura 8 - Comparación filtro complementario y filtro de Kalman

Puede notarse que el filtro de Kalman es inmune a las aceleraciones producidas por fuerzas externas a la planta, mientras que el complementario tiene en cuenta dichas aceleraciones para el cálculo del ángulo.

### 3.3. Control de trayectoria

Se implementó un control proporcional integral sobre la velocidad de los motores para lograr que la trayectoria del robot sea recta, utilizando como error la diferencia de velocidad entre las dos ruedas. Para ello, en primer lugar, se realizó la identificación de los motores dejando las ruedas libres e inyectando en cada uno de ellos un escalón de tensión, obteniendo las velocidades que se muestran en las siguientes gráficas.

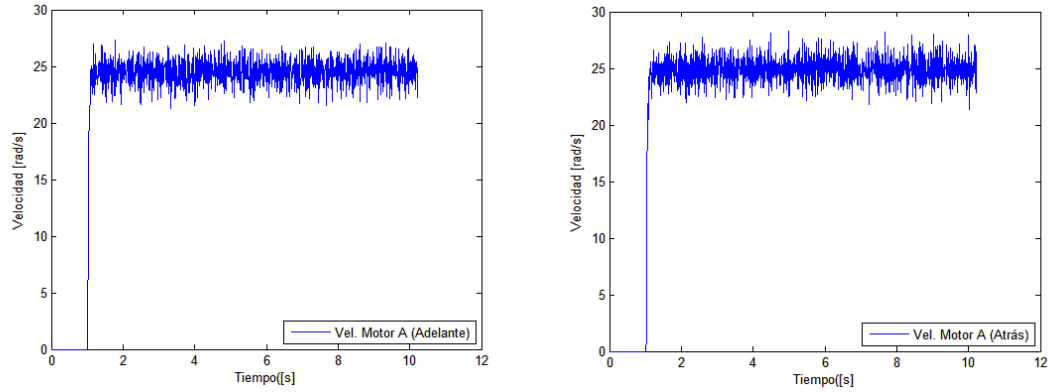


Figura 9 - Valor absoluto de las velocidades desarrolladas por el Motor A, al aplicarle escalones de tensión de 8.3[V] (correspondientes a 45000 cuentas de PWM) en ambos sentidos de giro.

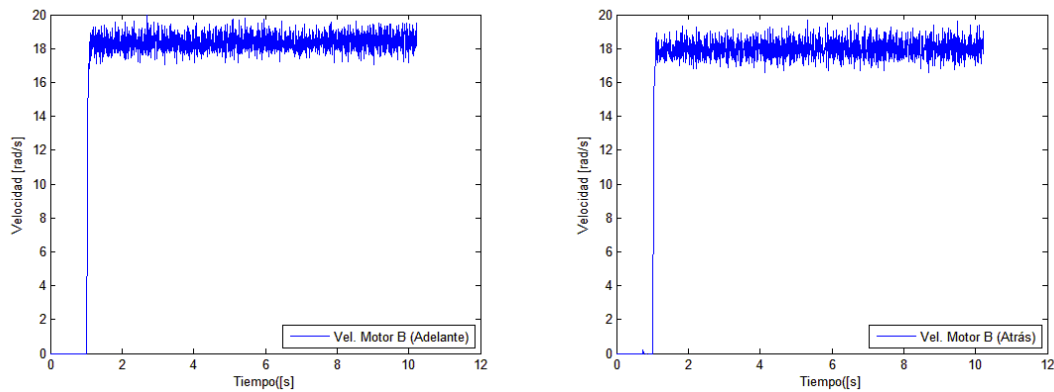


Figura 10 - Valor absoluto de las velocidades desarrolladas por el Motor B, al aplicarle escalones de tensión de 8.3[V] (correspondientes a 45000 cuentas de PWM) en ambos sentidos de giro.

Puede observarse que cada motor se comporta de manera similar en ambos sentidos de giro, pero entre ellos son notoriamente diferentes, principalmente en la ganancia de estado estacionario. En base a los datos anteriores, se obtuvieron las siguientes funciones transferencia:

$$G_A = \frac{69.63}{s+23.61}$$

$$G_B = \frac{55.52}{s+25.11}$$

En la figura siguiente se muestra el diagrama en simulación del control implementado, donde las ganancias del controlador fueron manipuladas observando el comportamiento real de la planta.

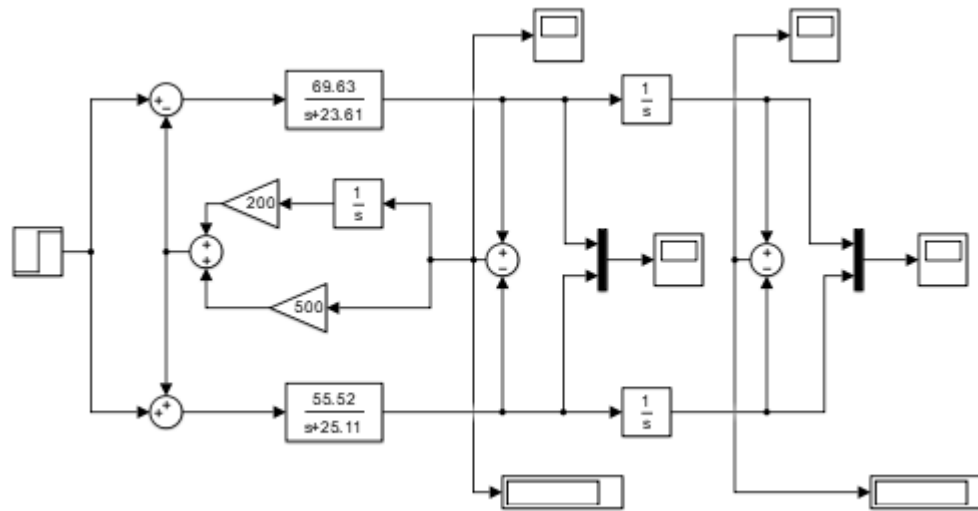


Figura 11 - Primer control de trayectoria aplicado al robot

Dado que los resultados no fueron los esperados, se analizaron las posibles causas y se decidió aplicar un filtro pasa-bajos de 10 [Hz] en la señal de error realimentada ya que ésta es notoriamente ruidosa. Esto mejoró la situación, pero finalmente se aplicó el control mostrado en la siguiente figura, donde la señal realimentada es el error en la posición de ambas ruedas, claramente menos ruidosa. Realizando este control, se pierde la posibilidad de dar una referencia de giro al robot.

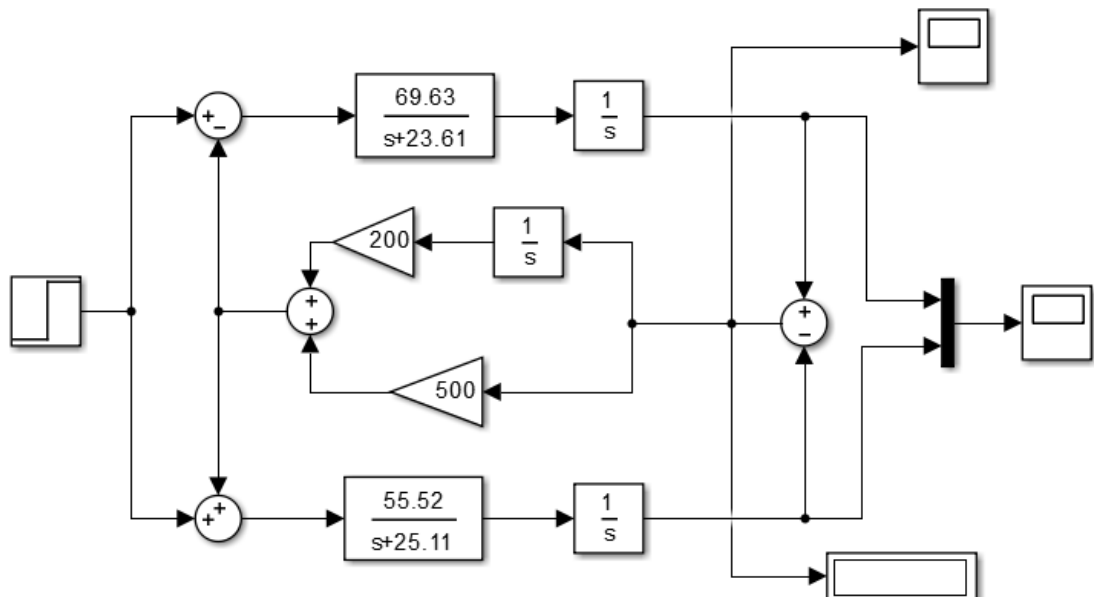


Figura 12 - Control finalmente implementado, donde la señal realimentada es el error

### 3.4. Modelado e identificación de la planta

#### 3.4.1. Modelado

Uno de los primeros pasos para llevar a cabo el proyecto, es conocer el modelo matemático que gobierna la planta, el cual consiste en un conjunto de ecuaciones diferenciales que relaciona sus distintos estados.

En ciertas ocasiones dichas ecuaciones diferenciales suelen ser no lineales, por lo que es necesario linealizarlas en un punto de equilibrio para poder aplicar todas las técnicas de control vistas hasta el momento.

El problema se abordó desde el punto de vista newtoniano, en el cual se plantearon las ecuaciones de fuerzas y momentos de cada cuerpo del balancín en el plano; esto es posible dado que se utilizará una posición y velocidad promedio de las ruedas del robot.

Otras consideraciones que se tuvieron en cuenta son que toda la masa del balancín se encuentra concentrada en el centro de masa del mismo y que no existe deslizamiento entre el piso y las ruedas.

En la imagen siguiente se muestran los diagramas de cuerpo libre de los dos componentes principales del sistema.

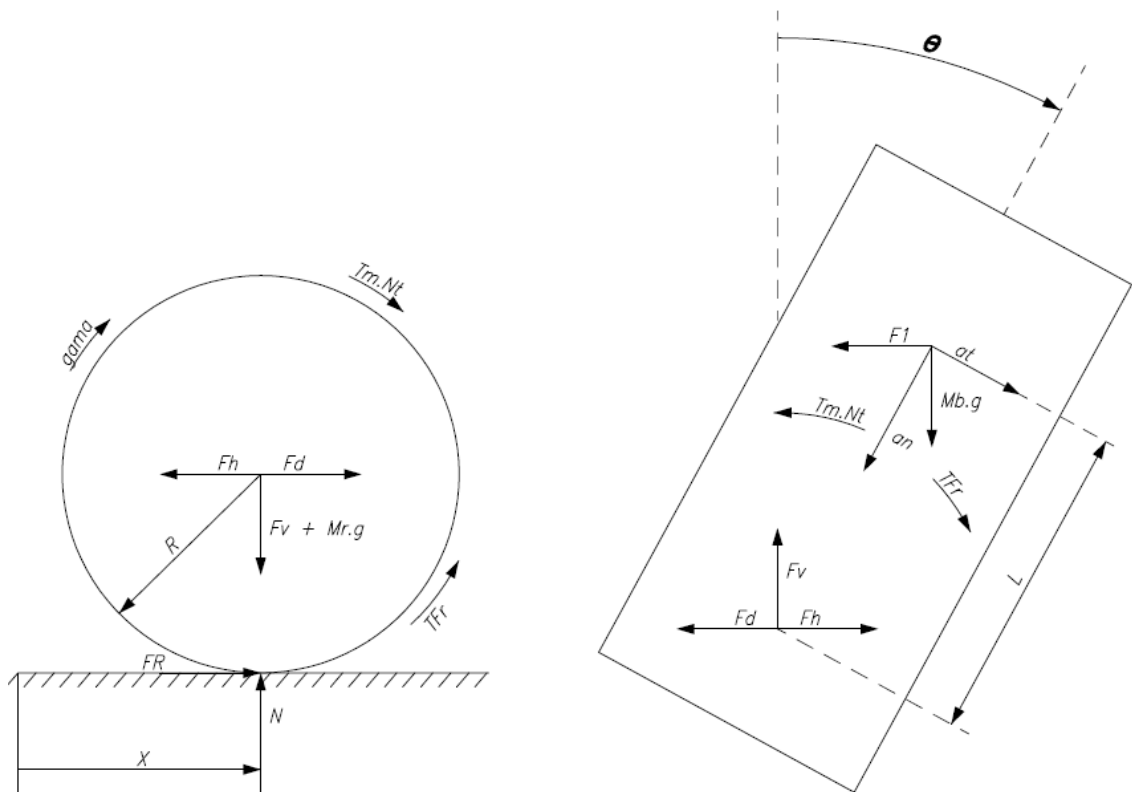


Figura 13 - Diagramas de cuerpo libre

Dónde en los diagramas tenemos:

- X: Es la posición del centro de masa de la rueda.
- $\gamma$ : Posición angular de la rueda.
- Nt: Relación de transmisión motor-rueda.
- Mr: Masa de la rueda.



- $g$ : Aceleración de la gravedad.
- $Fr$ : Fuerza de fricción entre la rueda y el piso.
- $Fh$ : Fuerza horizontal de reacción.
- $Fd$ : Fuerza en el diente del engranaje.
- $Tm$ : Es el torque que ejerce el motor.
- $TFr$ : Torque de fricción.
- $Fv$ : Fuerza vertical de reacción
- $N$ : Fuerza de reacción normal.
- $R$ : Radio de la rueda.
- $L$ : Distancia del centro de masa al centro de rotación instantáneo.
- $\Theta$ : Posición angular del balancín respecto de la vertical.
- $F1$ : Fuerza inercial debido a la aceleración del centro de rotación instantáneo.
- $at$ : Aceleración tangencial del centro de masa.
- $an$ : Aceleración normal del centro de masa.

De donde se desprenden las siguientes ecuaciones para la rueda:

$$Fd - Fh + Fr = Mr \ddot{x}$$

$$-Fv - Mr \cdot g + N = 0$$

$$Tm \cdot Nt - Fr \cdot R + \beta(\dot{\theta} - \dot{\gamma}) = J_R \ddot{\gamma}$$

Siendo  $J_R$  el momento polar de inercia de la rueda y  $\beta$  el coeficiente de fricción. De forma análoga tenemos las siguientes ecuaciones del balancín:

$$Fh - Fd - Mb \cdot \ddot{x} = Mb \cdot (l \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos(\theta) - l \dot{\theta}^2 \sin(\theta))$$

$$Fv - Mb \cdot g = Mb(-l \cdot \ddot{\theta} \cdot \sin(\theta) - l \dot{\theta}^2 \cos(\theta))$$

$$Mb \cdot g \cdot l \cdot \sin(\theta) - Mb \cdot \ddot{x} \cdot l \cdot \cos(\theta) + \beta \cdot \left( \frac{\dot{x}}{R} - \dot{\theta} \right) - Tm \cdot Nt = J_B \ddot{\theta}$$

Donde  $J_B$  corresponde al momento polar de inercia del balancín respecto al eje de las ruedas.

Las ecuaciones de arriba poseen un término dependiente del torque que aplica el motor, por lo que fue necesario modelar el motor de corriente continua.

Las ecuaciones eléctricas que gobiernan el mismo son las siguientes:

$$F_{em} = K_v \cdot \left( \frac{\dot{x}}{R} - \dot{\theta} \right) \cdot N_t$$

$$T_m = K_i \cdot i$$

$$V_i = R_m \cdot i + L_m \cdot \frac{di}{dt} + F_{em}$$

Siendo  $K_v$  la constante de generador del motor,  $L_m$  la inductancia, que se puede considerar despreciable,  $K_i$  la constante de torque y  $R_m$  la resistencia eléctrica.

De las ecuaciones anteriores se puede dejar el troque en función de la tensión aplicada y de las velocidades angulares y lineales del balancín.

$$T_m = \left( \frac{K_i \cdot K_v \cdot N_t}{R_m} \right) \cdot \dot{\theta} - \left( \frac{K_i \cdot K_v \cdot N_t}{R_m \cdot R} \right) \cdot \dot{x} + \left( \frac{K_i}{R_m} \right) \cdot V_i$$

Linealizando aquellas expresiones que no son lineales, tomando como posición de equilibrio ( $\theta = 0$ ,  $\dot{\theta} = 0$ ,  $x = 0$ ,  $\dot{x} = 0$ ) y reordenando las ecuaciones en forma matricial, se obtuvieron las relaciones entre las posiciones, velocidades y aceleraciones del sistema. De aquí en adelante, los subíndices “ip” e “it” significan “identificación péndulo” e “identificación traslación”, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -A_{ip}/g \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & D & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -A_{ip} & B_{ip} & 0 & -B_{ip}/R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -A_{it} & 0 & A_{it}/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_{ip} \\ 0 \\ B_{it} \end{bmatrix} V_i$$

Donde se puede observar una relación entre las componentes que acompañan a las velocidades lineales y angulares, al igual que la aceleración angular se ve asociada a la aceleración lineal.

Los valores teóricos de las constantes son los siguientes:

$$A_{ip} = \frac{-M_B \cdot g \cdot l}{J_B}$$

$$B_{ip} = \left( \frac{K_v \cdot K_i \cdot N_t^2}{J_B \cdot R_m} - \frac{\beta}{J_B} \right)$$

$$C_{ip} = \frac{-N_t \cdot K_i}{J_B \cdot R_m}$$

$$A_{it} = \left( \frac{R}{J_B + R^2 \cdot (M_B + M_R)} \right) \cdot \left( \frac{\beta}{R} + \frac{K_v \cdot K_i \cdot N_t^2}{R \cdot R_m} \right)$$

$$B_{it} = \left( \frac{N_t \cdot K_i}{R_m} \right) \left( \frac{R}{J_R + R^2 \cdot (M_B + M_R)} \right)$$

$$D = \frac{R^2 \cdot M_B \cdot l}{J_R + R^2 \cdot (M_B + M_R)} = \frac{-B_{it} \cdot R \cdot l \cdot M_B}{C_{ip} \cdot J_B}$$

Dichos parámetros deben ser identificados mediante algún conjunto de ensayos realizados a la planta, en los cuales se intenta desacoplar los distintos estados del sistema y con esto reducir la complejidad del problema de identificación de parámetros.

Cabe aclarar que algunas constantes físicas, como lo son la distancia del centro de masa, el radio de la rueda, así como ambas masas fueron obtenidas por medición directa.

### 3.4.2. Ensayos

Con el fin de desacoplar los efectos de traslación de los de rotación, se realizaron dos experimentos. El primer experimento fija la posición y velocidad lineal de la planta en cero, para lo cual se sujetaron las ruedas del balancín a una estructura, dejándolo suspendido en forma de péndulo convencional, como se puede apreciar en la figura de abajo, y luego se procedió a aplicarle una señal tipo chirp con un rango de frecuencias que incluya la frecuencia natural del sistema.

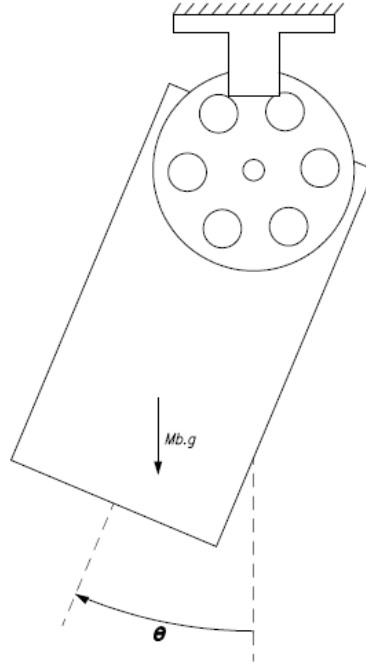


Figura 14 - Diagrama de cuerpo libre para el ensayo en forma de péndulo

Al igual que en el problema original de péndulo invertido, fue necesario obtener las ecuaciones del ensayo, las cuales son las siguientes:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ A_{ip} & B_{ip} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_{ip} \end{bmatrix} V_i$$

Se puede apreciar que con este ensayo se consigue gran parte de los parámetros de la planta.

A la hora de aplicar la señal tipo chirp fue necesario inicialmente conocer la frecuencia natural de la planta, para lo cual se realizó una medición de movimiento oscilatorio libre, obteniendo la siguiente gráfica:

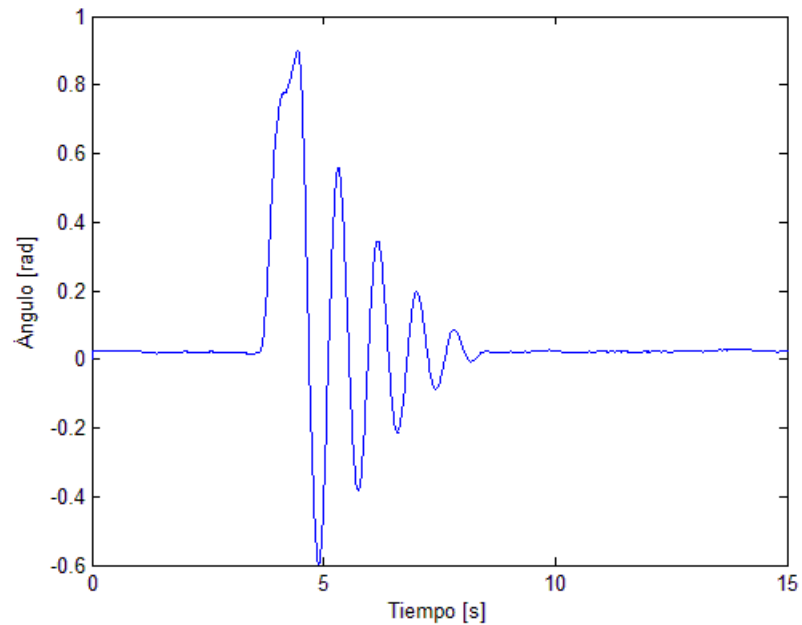


Figura 15 - Posición angular del robot, al hacerlo oscilar libremente. De aquí se obtuvo la frecuencia natural del sistema

Donde fácilmente se calculó la frecuencia natural midiendo el período de la oscilación, cuyo valor es 1.19 [Hz].

Una vez conocido este valor, se aplicó la señal tipo chirp al péndulo con valores de frecuencias desde los 0.50 [Hz] a los 2.5 [Hz] y una amplitud de 2.22 [V]. Se tuvo sumo cuidado en respetar oscilaciones pequeñas y así hacer válida la aproximación  $\sin(\theta) \approx \theta$ , utilizada en las linealizaciones de los modelos.

Tanto la señal inyectada como la respuesta de la planta se pueden apreciar en las siguientes gráficas, concluyéndose que el rango de frecuencias escogido fue el correcto.

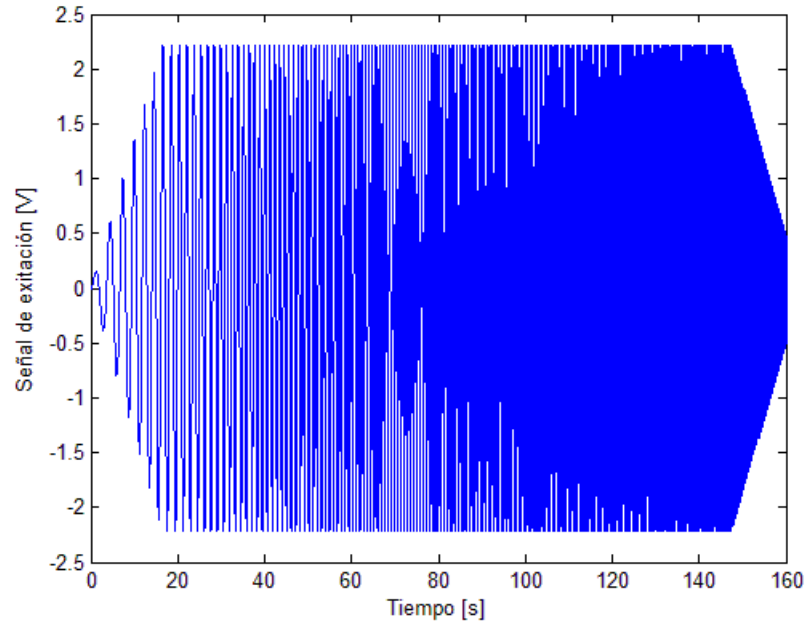


Figura 16 - Señal tipo chirp aplicada al sistema para el ensayo tipo péndulo

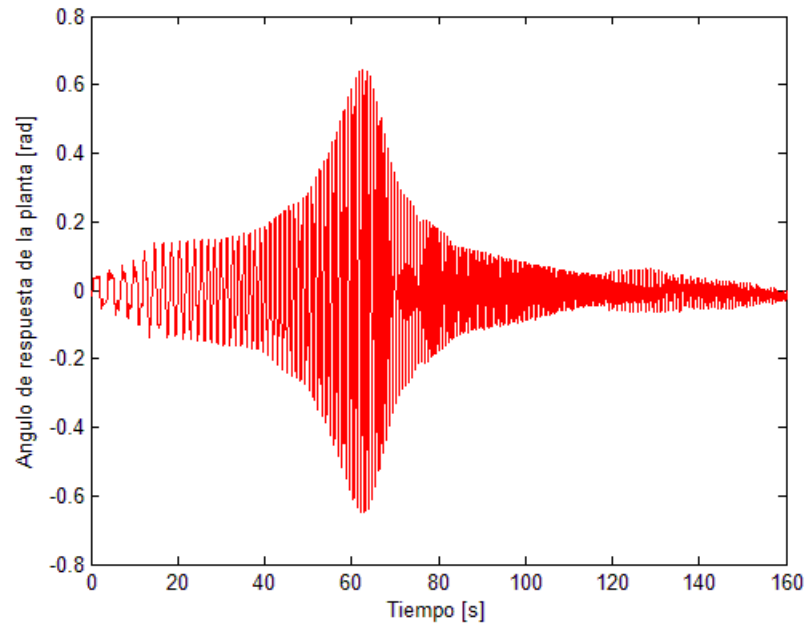


Figura 17 - Respuesta de la planta

Con los datos relevados se realizó la identificación de la función transferencia entre posición angular y tensión de entrada, es decir:

$$G_{\theta}(s) = \frac{C_{ip}}{s^2 - B_{ip} \cdot s - A_{ip}}$$

Donde los valores de las constantes fueron las siguientes:

$$A_{ip} = -52.34 \quad B_{ip} = -1.081 \quad C_{ip} = -2.265$$

De los cuales se pudo obtener el valor del momento de inercia del balancín, ( $0.0355 [Kg.m^2]$ ), útil a la hora de determinar el parámetro D.

El segundo ensayo realizado consistió en restringirle el ángulo de cabeceo a la planta mediante la utilización de soportes laterales y aplicarle escalones de tensión, de distintas amplitudes y en ambos sentidos.

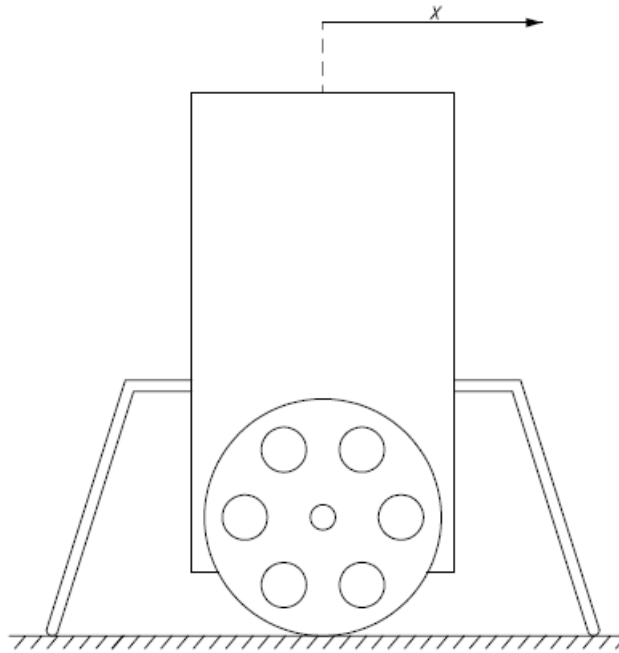


Figura 18 - Ensayo de traslación con ángulo de cabeceo  $\theta$  restringido

Las ecuaciones físicas que rigen dicho experimento son las siguientes:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -A_{it} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_{it} \end{bmatrix} V_i$$

A los datos obtenidos se les realizó un escaleo para determinar cuan lineal resulta ser la planta. Lo que se pudo observar de las gráficas es que la ganancia de la función transferencia  $G_t(s) = \frac{\ddot{x}}{V_i}$  presenta una variación importante según la magnitud de la tensión de entrada, mientras que la constante de tiempo no presenta cambios significativos. Por lo tanto, se toma un valor promedio de K, el cual será luego ajustado en simulación.

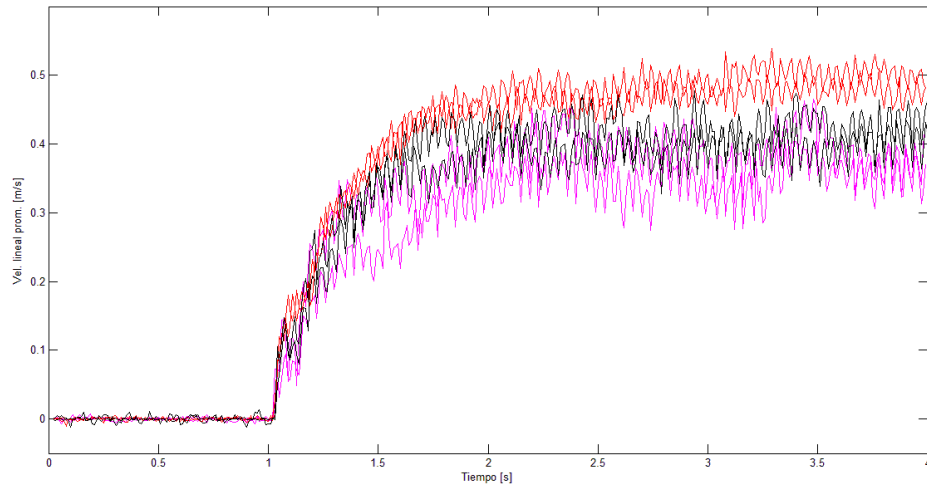


Figura 19 - Respuesta del sistema ante diferentes escalones de entrada. Los datos de salida fueron escalados. Puede verse la gran dispersión en la ganancia de estado estacionario.

Los datos tomados del ensayo son los siguientes:

$$G_t(s) = \frac{B_{it}}{s + A_{it}} = \frac{0.3749}{s + 3.2741}$$

De esta forma se encontraron todos los parámetros necesarios para identificar la planta, el valor de  $D$  se calculó por sustitución directa en la fórmula que lo define, ya que son conocidos todos sus términos.

Con el fin de corroborar la correcta identificación de la planta, se realizó un tercer ensayo de movimiento libre, donde se partió de condiciones iniciales de ángulo de cabeceo distinto a cero y se comandaron los motores con un escalón de tensión suficiente como para que el balancín acelere y genere un intervalo de tiempo donde  $\theta$  cruce por cero.

Extrayéndose los valores de los estados en dicho intervalo de tiempo, se realizó una simulación para comparar la evolución de los estados de la planta real con los de la identificada, donde ambas parten de las mismas condiciones iniciales.

Fue necesario manipular un parámetro para obtener un comportamiento similar, el cual coincide con aquel de mayor incerteza, es decir, la ganancia  $B_{it}$ .

Una observación interesante fue que el sistema es muy sensible a la variación de la ganancia  $B_{it}$ , viendo comportamientos totalmente diferentes a los de la planta real.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques de la simulación y las comparaciones de los cuatro estados.

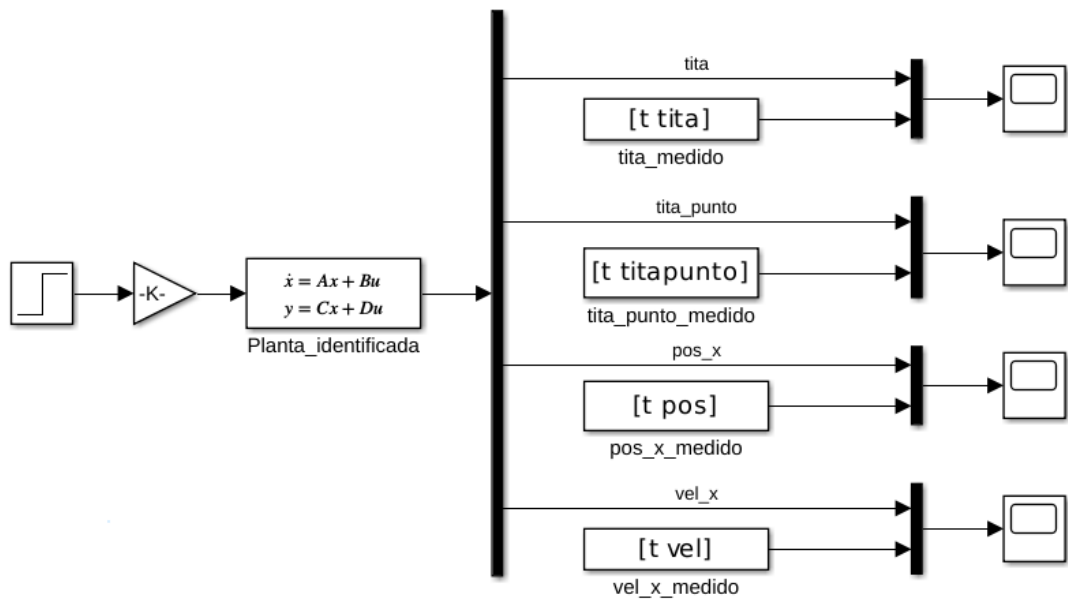


Figura 20 - Diagrama utilizado en el ajuste en simulación

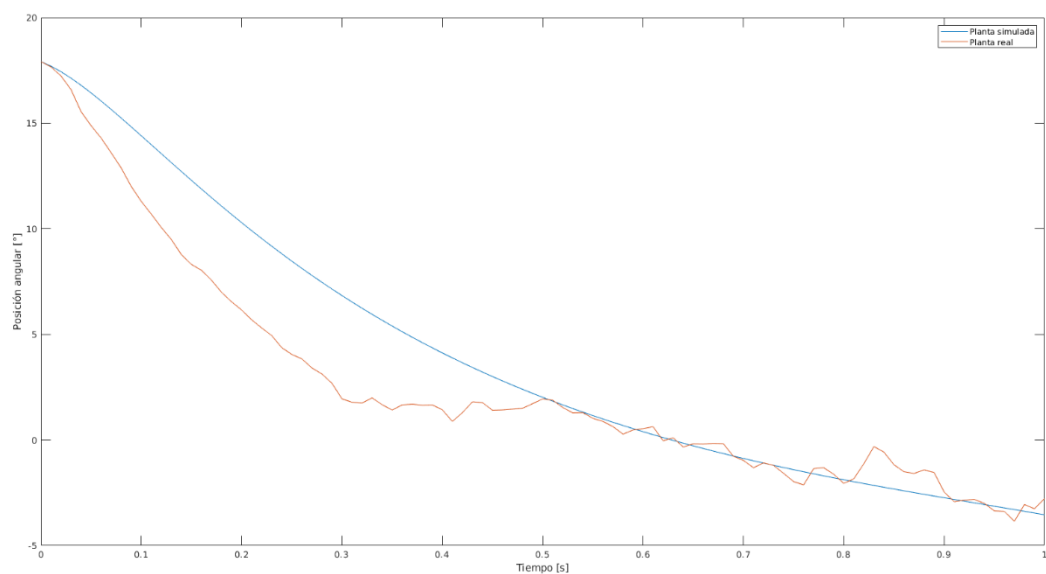


Figura 21 - Ajuste en simulación de la posición angular



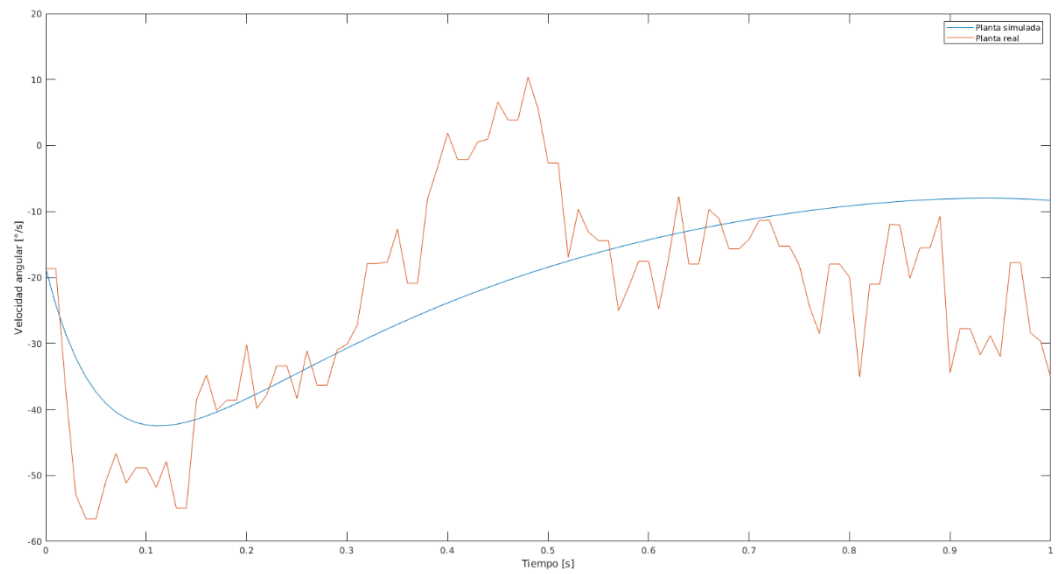


Figura 22 - Ajuste en simulación de la velocidad angular

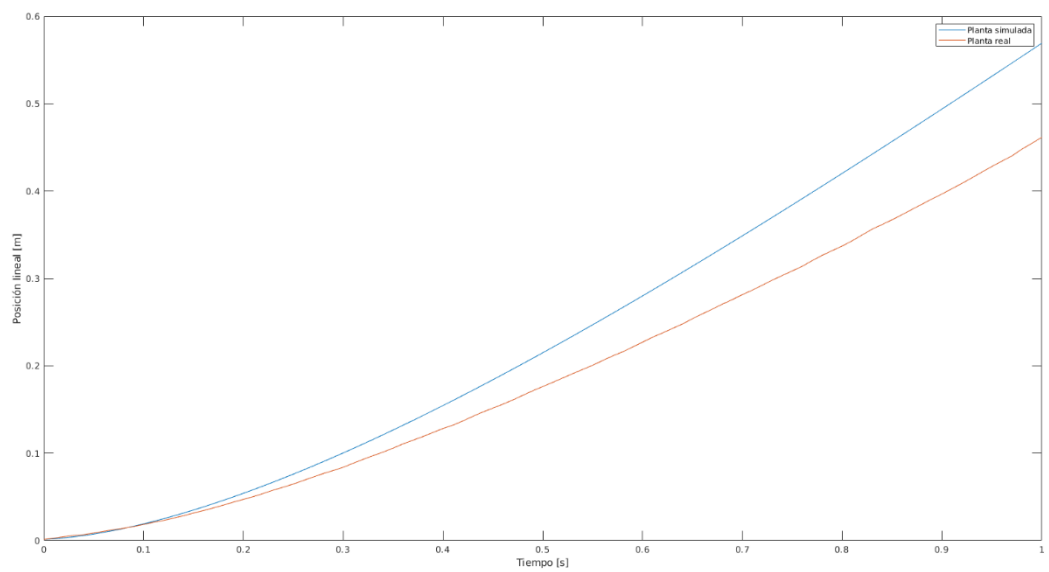


Figura 23 - Ajuste en simulación de la posición lineal

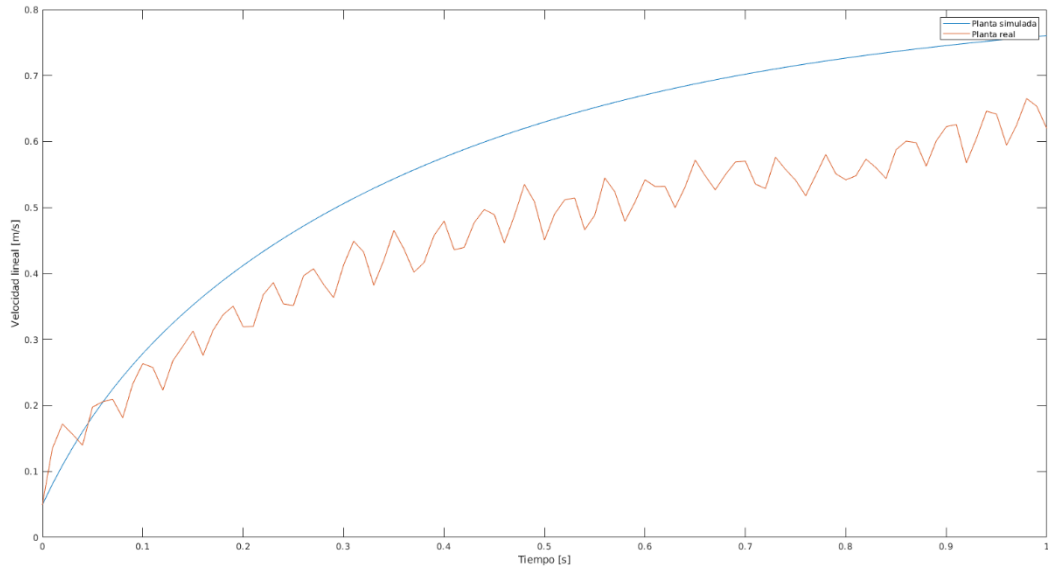


Figura 24- Ajuste en simulación de la velocidad lineal

### 3.5. Control de actitud

Luego del ajuste en simulación y del despeje necesario para llegar a una representación en variables de estado, el sistema quedó descrito de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 5.234 \times 10^1 & -1.397 & 0 & 2.462 \times 10^1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1.866 \times 10^{-1} & 0 & -3.34 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -3.298 \\ 0 \\ 6.196 \times 10^{-1} \end{bmatrix} V_i$$

En primera instancia, dado que se dispone de todos los estados, se planteó diseñar la Ley de Control de modo tal de realimentarlos directamente. Es decir, se pensó en utilizar las variables estado → Angulo, estado → Giro[0], estado → posx, estado → velx (denominadas de este modo en el código) para construir la acción de control.

Se discretizó el sistema con el período de muestreo utilizado (0,01 [s]). La planta obtenida se representa en variables de estado de manera genérica:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Gamma}u(k)$$

donde los valores numéricos que resultaron para cada una de las distintas matrices fueron:

$$\begin{bmatrix} \theta(k+1) \\ \dot{\theta}(k+1) \\ x(k+1) \\ \dot{x}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.003 & 9.894 \times 10^{-3} & 0 & 2.029 \times 10^{-3} \\ 5.178 \times 10^{-1} & 9.800 \times 10^{-1} & 0 & 4.021 \times 10^{-1} \\ 1.606 \times 10^{-6} & 9.161 \times 10^{-6} & 1 & 9.675 \times 10^{-3} \\ 4.795 \times 10^{-4} & 1.816 \times 10^{-3} & 0 & 9.675 \times 10^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(k) \\ \dot{\theta}(k) \\ x(k) \\ \dot{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2.421 \times 10^{-4} \\ -4.798 \times 10^{-2} \\ 1.962 \times 10^{-5} \\ 3.887 \times 10^{-3} \end{bmatrix} V_i(k)$$

Se verificó que el sistema discretizado sea totalmente controlable, mediante el cálculo del rango de la matriz de controlabilidad. Luego, se buscaron los polos del sistema a lazo abierto, los cuales pueden apreciarse en la siguiente ilustración

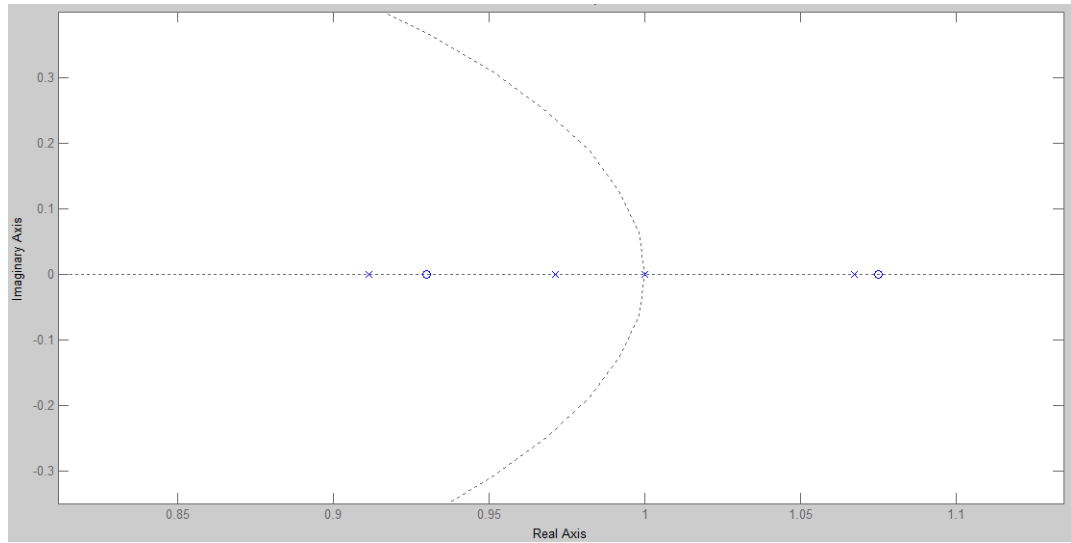


Figura 25 - Ubicación de los polos de lazo abierto del sistema

Se puede observar la existencia de un polo inestable, un polo en el límite de la estabilidad y dos polos dentro del círculo unitario, ambos sobre el eje real. Tomando la salida de la planta como la posición lineal, se tienen tres ceros, uno cerca del polo inestable, otro entre los dos polos estables y otro cercano a -1. Los ceros cerca de polos se asocian a esfuerzos de control grandes para mover este polo, o, en otras palabras, a perder controlabilidad.

Se intentó ubicar los polos de lazo cerrado de manera de mover solo los polos que arruinan la respuesta del sistema para minimizar los esfuerzos de control.

Se tomaron como requerimientos un *rise time* menor a 0.5 [s] y un *damping* mayor a 0.7, por lo que los polos complejos conjugados dominantes deben ubicarse en  $9.751 \times 10^{-1} \pm 6.964 \times 10^{-3}i$ . Los dos polos restantes se eligieron a una distancia tal que no afecten la dinámica total del sistema, como se explicará en el siguiente párrafo.

Como el polo más rápido del sistema, ubicado en  $z=0.91$  se encuentra lo suficientemente alejado, se mantuvo en el mismo lugar y el polo faltante se ubicó cercano a este último. Utilizando esta configuración solo se deben mover 3 polos.

Las ganancias resultantes fueron:

$$\mathbf{K1} = [\mathbf{K1}_1 \quad \mathbf{K1}_2 \quad \mathbf{K1}_3 \quad \mathbf{K1}_4] \rightarrow$$

$$\mathbf{K1} = [-4.550 \times 10^1 \quad -5.801 \times 10^0 \quad -2.029 \times 10^1 \quad -3.062 \times 10^1]$$

Entonces, la acción de control  $u(k) = -\mathbf{Kx}(k)$  en nuestro caso será:

$$V_i(k) = -[\mathbf{K1}_1 \quad \mathbf{K1}_2 \quad \mathbf{K1}_3 \quad \mathbf{K1}_4] \begin{bmatrix} \theta(k) \\ \dot{\theta}(k) \\ x(k) \\ \dot{x}(k) \end{bmatrix}$$

Se simuló el sistema utilizando como condición inicial una inclinación de  $10^\circ$  y el resto de los estados igual a cero. Como no se insertó referencia, se trata de un regulador, donde los estados deben tender a cero, lo que se traduce a que el robot logrará mantenerse en posición vertical. Al analizar la simulación, se vio que la respuesta obtenida es acorde a lo esperado.

Al implementar el mismo control en la planta real, se observa que el sistema es muy oscilatorio, no logra llegar a un valor estacionario fijo como se vio en la simulación, aunque logra mantener el equilibrio.

Estas diferencias entre el modelado en *Simulink* y la planta real pueden deberse a que en la simulación no fueron considerados algunos fenómenos como ruidos en los sensores utilizados o *backlash* en la transmisión. Además de esto, se tienen incertezas en el modelo realizado, el cual además presenta una gran sensibilidad sobre uno de sus parámetros, cuya variación modifica notablemente la respuesta temporal, como fue mencionado anteriormente.

Para intentar corregir este comportamiento oscilatorio, se hizo hincapié en el análisis de la evolución temporal de los estados. Se vio que tanto la velocidad angular como la lineal presentan mucha variación comparable con ruido, probablemente asociada a la alta sensibilidad del giróscopo, que reproduce los cambios repentinos y bruscos producidos por el *backlash* de la transmisión. Para minimizar el efecto de las vibraciones sobre la medición del giróscopo, se amortiguó el sensor utilizando una goma lo cual mejoró notablemente los resultados.

Las señales correspondientes a la posición angular (obtenida a través del filtro Kalman) y la posición lineal presentan valores razonables.

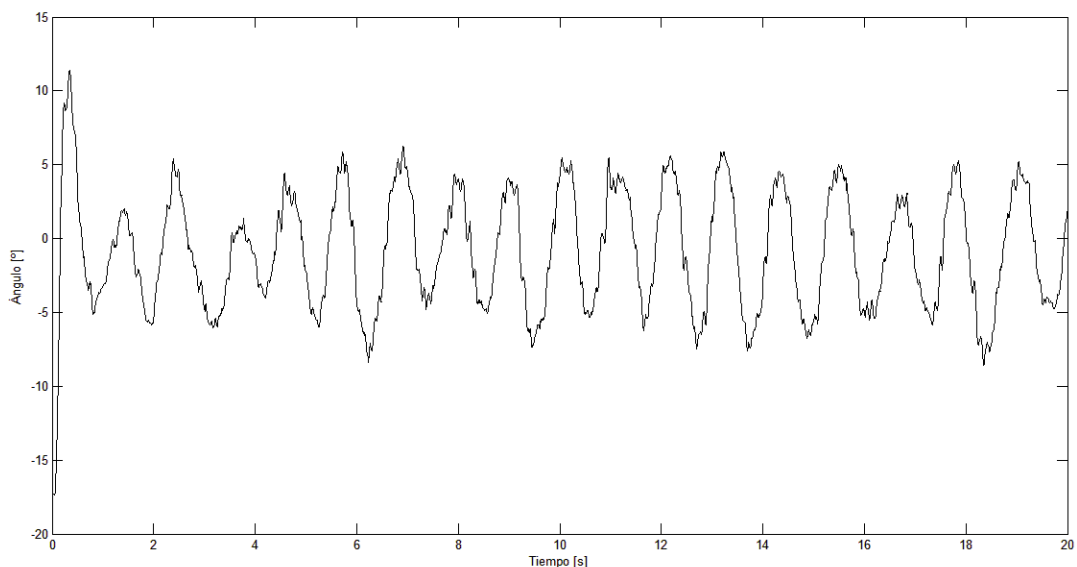


Figura 26 - Ángulo de inclinación del robot

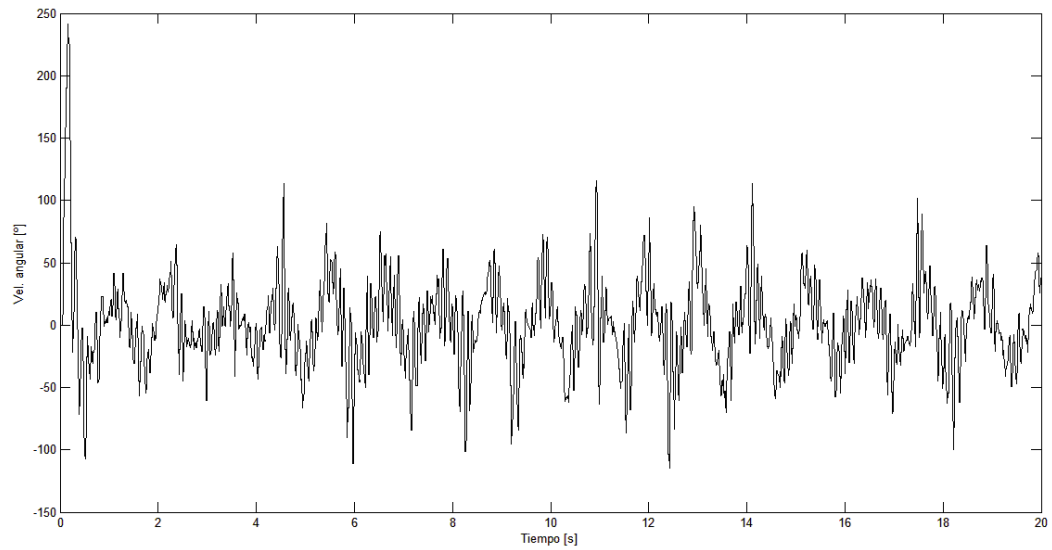


Figura 27 - Velocidad angular del robot sin amortiguación en el sensor. Puede verse que no es una señal "limpia"

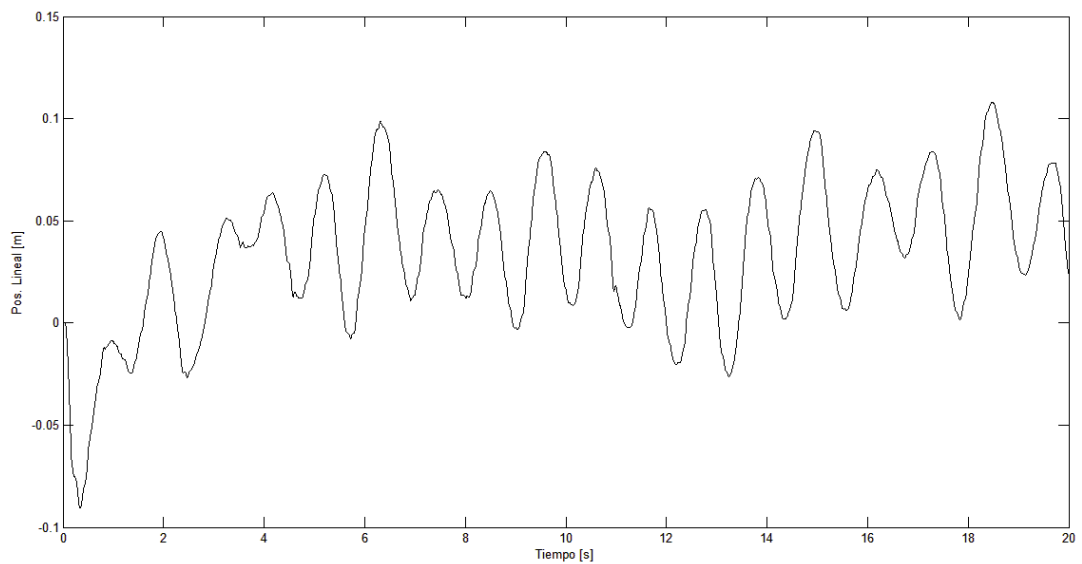


Figura 28 - Posición lineal del robot

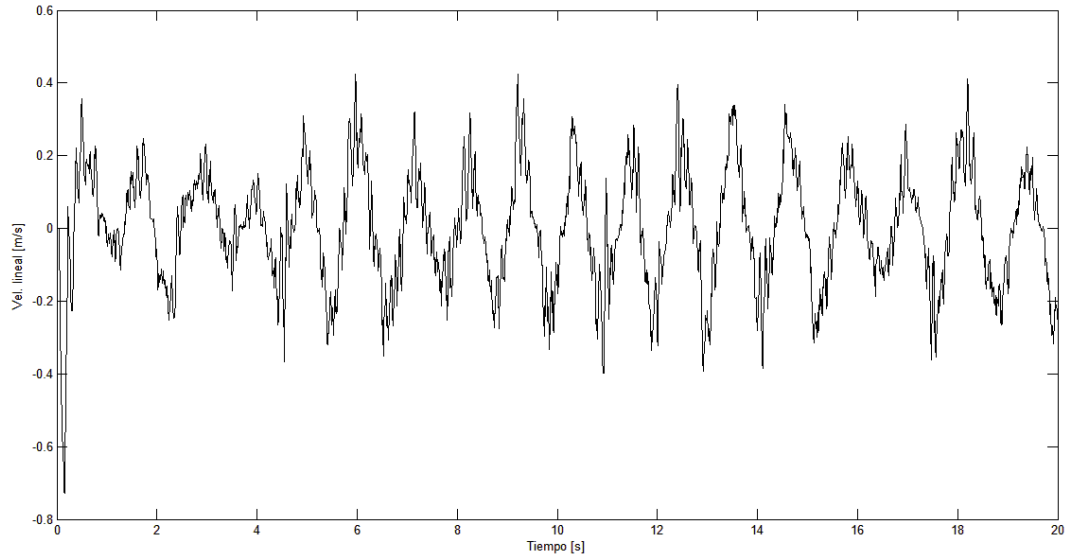


Figura 29 - Velocidad lineal del robot. Puede notarse la influencia de la señal del giróscopo, la cual arruina lo obtenido mediante los encoders.

Con el fin mejorar la respuesta del sistema, la cátedra aconsejó implementar un estimador de orden reducido para poder lograr una velocidad lineal<sup>1</sup> más suave. El estimador a implementar tendrá como estados estimados posición y velocidad lineal. Como salida de la planta se tomará la posición lineal, la cual es la menos ruidosa. Además, se tomaron como entradas al estimador la acción de control (entrada a la planta), la posición angular y la velocidad angular.

La ecuación del estimador utilizado fue:

$$\hat{\mathbf{x}}_b(k+1) = \Phi_{bb}\hat{\mathbf{x}}_b(k) + \Phi_{ba}\mathbf{x}_a(k) + \Gamma_b V_i(k) + \mathbf{L}_r(y(k) - \hat{y}(k))$$

Donde:

$\hat{\mathbf{x}}_b(k)$ : Estados estimados. (Posición y velocidad lineal).

$\mathbf{x}_a(k)$ : Estados que no se necesitan estimar. (Posición y velocidad angular)

$\Phi_{bb}$ ,  $\Phi_{ba}$ ,  $\Gamma_b$ : Matrices obtenidas<sup>2</sup> a partir de la representación discreta del sistema.

$\mathbf{L}_r$ : Vector de ganancias del estimador.

$y(k)$ : Salida de la planta. (Posición lineal)

$\hat{y}(k)$ : Salida estimada. (Posición lineal estimada).

Reemplazando por valores se tiene:

$$\hat{\mathbf{x}}_b(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 9.83 \times 10^{-3} \\ 0 & 9.67 \times 10^{-1} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_b(k) + \begin{bmatrix} 1.60 \times 10^{-6} & 9.16 \times 10^{-6} \\ 4.79 \times 10^{-4} & 1.82 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \mathbf{x}_a(k) + \begin{bmatrix} 1.96 \times 10^{-5} \\ 3.89 \times 10^{-3} \end{bmatrix} V_i(k) + \mathbf{L}_r(y(k) - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_b(k))$$

Se tomaron los polos del estimador sobre el eje real, ubicados lo suficientemente alejados para no afectar los polos dominantes. Los polos elegidos se ubicaron ambos en  $9.417 \times 10^{-1}$ . Se verificó en *Simulink* el correcto funcionamiento del estimador, se agregó un bloque de ruido al estado medido para acercarse a las condiciones reales, y se corroboró el correcto funcionamiento del estimador

<sup>1</sup> Si bien la velocidad angular presenta dispersión en sus valores, no se creyó necesario estimarla.

<sup>2</sup> Las matrices se tomaron:  $\Phi_{bb} = \Phi(3:4,3:4)$   $\Phi_{ba} = \Phi(3:4,1:2)$   $\Gamma_b = \Gamma(3:4)$ .

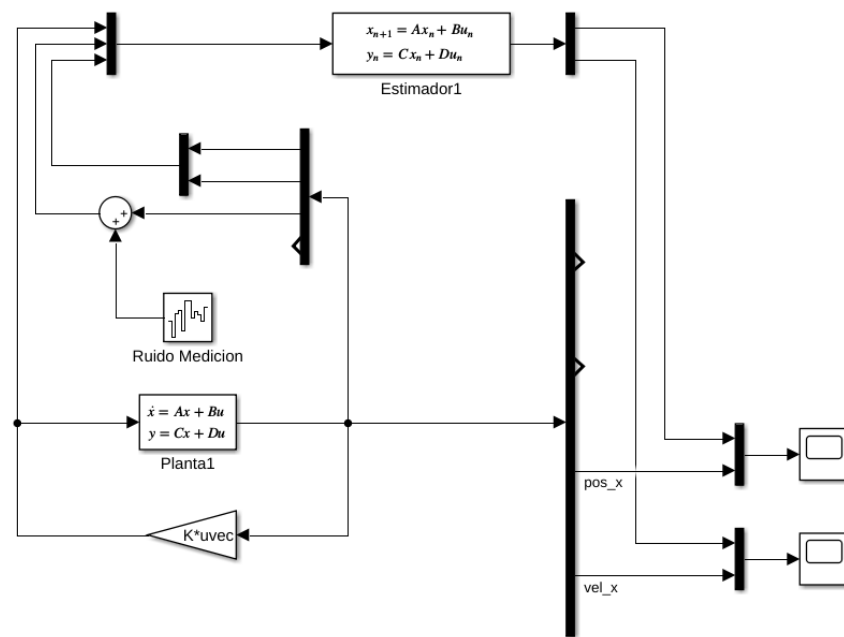


Figura 30 - Diagrama en simulación de la implementación del estimador

Al implementar el estimador, se puede apreciar una notable mejora en la suavidad de la velocidad lineal medida directamente de la planta en comparación con la estimada, lo que se muestra en el gráfico siguiente:

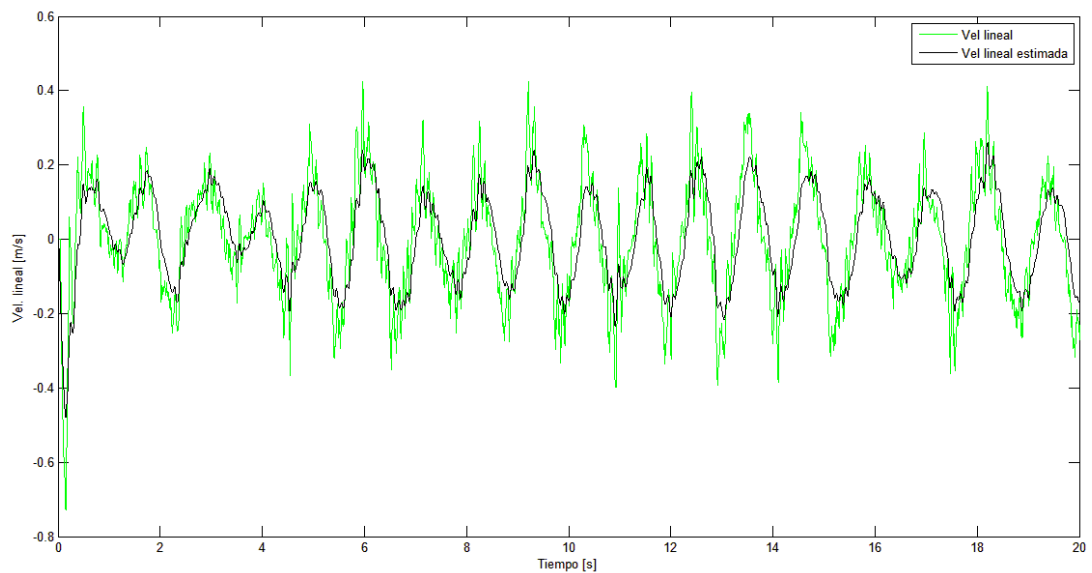


Figura 31 - Comparación de la velocidad lineal medida con la estimada

Luego, se implementó nuevamente la acción de control sobre la planta, pero cambiando la velocidad lineal medida por la estimada. Se logró una mejora en el sistema, aunque continúa su comportamiento oscilatorio.

La acción de control, entonces, viene dada por:

$$V_i(k) = -[K1_1 \quad K1_2 \quad K1_3 \quad K1_4] \begin{bmatrix} \theta(k) \\ \dot{\theta}(k) \\ x(k) \\ \hat{x}_{b2}(k) \end{bmatrix}$$

donde los valores de las ganancias son los obtenidos anteriormente

Aunque la posición lineal fue estimada, se sigue utilizando el estado medido directamente, ya que no presenta mucha diferencia con el estimado, como puede verse en la siguiente figura.

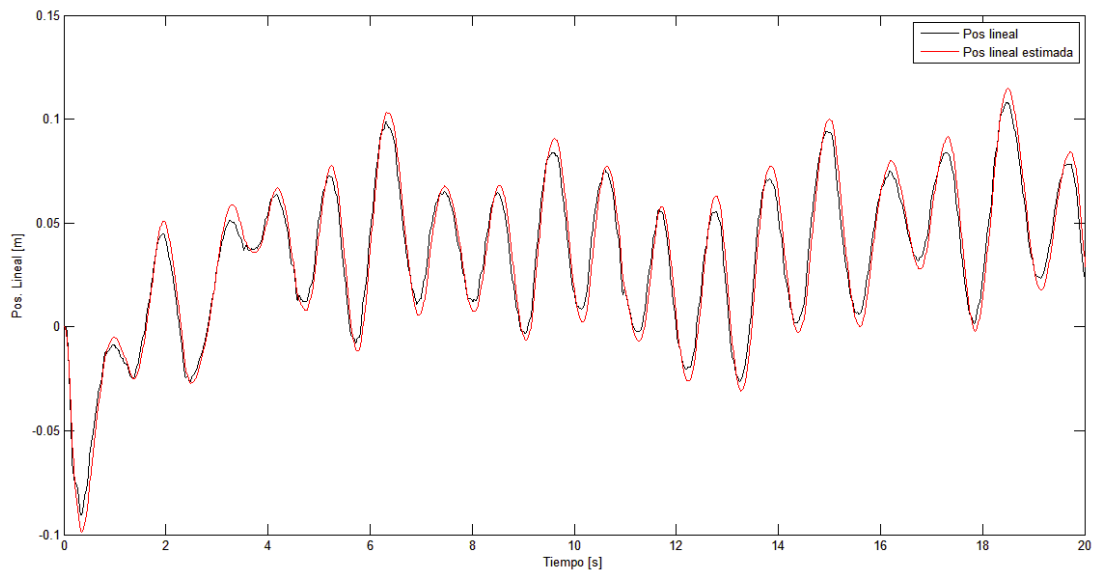


Figura 32 - Comparación posición lineal medida y estimada

Se realizaron modificaciones sobre el modelado realizado en *Simulink* para intentar aproximar su comportamiento al de la planta real. Esto permitiría realizar el cálculo de las ganancias y asegurar que el comportamiento observado en simulación se replicaría en la planta real.

Para esto, se colocó un bloque de banda muerta, ya que para tensiones entre  $\pm 1$  [V] los motores no logran vencer las fuerzas de roce y mover las ruedas.

Como la tensión máxima que pueden recibir los motores es 12 [V] se colocó un bloque de saturación luego de la realimentación de estados para que la acción de control no supere ese valor.

Se ajustó nuevamente el parámetro  $B_{it}$  de la planta, que presenta una alta sensibilidad sobre el sistema.

Por último, agregaron bloques de ruido sobre los estados de la planta para simular las variaciones de estos en las mediciones.

A pesar de todos los intentos realizados por hallar un modelo más cercano a la planta real, no fue posible lograrlo. Se continuaron notando grandes diferencias entre la



respuesta real del sistema y lo obtenido mediante la simulación. Por tal motivo, se decidió dejar de lado la simulación y buscar una mejor respuesta directamente sobre la planta, mediante prueba y error y realizando deducciones sobre su comportamiento.

Se buscó aumentar el valor de *damping* para evitar grandes oscilaciones y se modificaron las ganancias hasta observar un comportamiento aceptable.

Finalmente, se llegó a la siguiente ley de control:

$$V_i(k) = -[K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4] \begin{bmatrix} \theta(k) \\ \dot{\theta}(k) \\ x(k) \\ \hat{x}_{b2}(k) \end{bmatrix}$$

donde la ganancia de realimentación resultó:

$$K = [-6.2602e + 01 \quad -6.1626e + 00 \quad -1.7422e + 01 \quad -4.9872e + 01]$$

Luego de obtener una respuesta razonable de la planta, donde la inclinación del sistema oscila entre valores de  $\pm 5$  [°] y la posición entre valores de  $\pm 0.10$  [m], se decidió continuar con la introducción de una referencia de posición lineal. Esto quiere decir, insertar una referencia de posición y lograr que el robot se desplace hasta esa posición manteniendo el equilibrio.

Si se insertara la referencia de forma convencional (es decir, afectando directamente la posición lineal) no se podría asegurar que el robot mantenga el equilibrio en todo momento, por lo que se utilizó otra estrategia.

Esta consistió, en primer lugar, en hacer cero el elemento del vector de ganancias  $K$  de la acción de control relacionada al estado de posición lineal ( $K_3$ ). Esto se implementó para evitar que la acción de control crezca de manera brusca al insertar la referencia de posición, ya que ahora la ganancia  $K_3$  se encuentra multiplicada por el error entre la posición lineal actual y su señal de referencia y al insertar esta última, el error toma un valor muy alto.

Seguidamente se creó una referencia de inclinación ficticia. De esta manera, el robot intentará mantenerse con una cierta inclinación. Para lograr esto deberá acelerarse linealmente, lo que conlleva a cambiar su posición lineal, pero manteniendo el equilibrio.

Una vez que el robot se movió hasta estar cerca de la referencia de posición, se vuelve la posición angular ficticia a cero. Con este propósito se tomó la referencia de inclinación como una constante por el error de posición, como se muestra en las ecuaciones de más abajo.

Así el robot queda manteniendo el equilibrio sobre la posición de referencia asignada. En este momento, se vuelve la ganancia  $K_3$  a su valor original, ya que la diferencia entre este estado y su referencia ahora es cercano a cero.

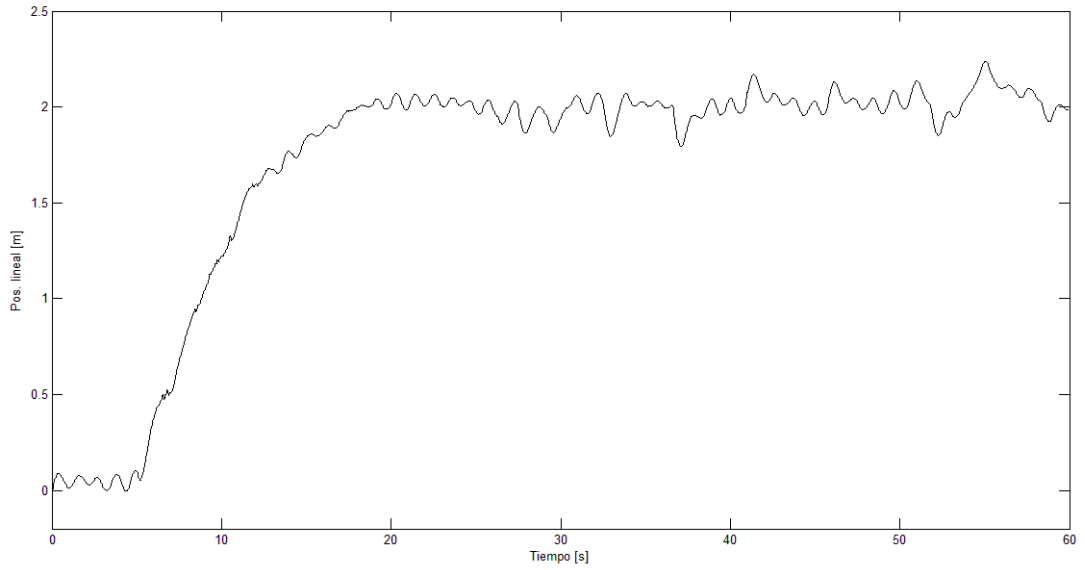


Figura 33 - Seguimiento de referencia. En este caso, se hizo que el robot avanece dos metros hacia adelante

La acción de control con referencia quedó definida como:

$$V_i(k) = -[K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4] \begin{bmatrix} \theta(k) - \theta_{\text{ref}} \\ \dot{\theta}(k) \\ x(k) - x_{\text{ref}} \\ \hat{x}_{b2}(k) \end{bmatrix}$$

Donde

$$\theta_{\text{ref}} = K_{\text{ref}}(x(k) - x_{\text{ref}})$$

Cabe mencionar que se tomó la cautela de acotar el valor de inclinación ficticia, ya que, si la referencia toma un valor muy alto, la referencia de inclinación puede ser lo suficientemente grande como para desestabilizar el sistema. Los valores de saturación de referencia se tomaron en  $\pm 8$  [°].

#### **4. Conclusiones**

Luego de finalizado el proyecto y analizando todo el proceso llevado a cabo, se puede concluir que ha sido un aprendizaje constante, en el cual se ha podido combinar la teoría vista durante mucho tiempo con la práctica. Además, se puede afirmar que el proyecto no solo abarcó conocimientos referidos a teoría de control, sino que también se aprendieron nuevos conceptos de programación y electrónica.

Por otra parte, se incorporaron técnicas de análisis y organización de datos que con certeza serán útiles en proyectos futuros.

Se pudo interactuar con una planta real y diseñar un sistema de control para ésta, sorteando las numerosas dificultades que se tuvieron trabajando en equipo y con la inmensa ayuda de los integrantes de la cátedra. Dentro de estas dificultades, cabe mencionar que el proyecto se vio demorado en un principio, con un encoder que no funcionaba correctamente, y, más tarde, con la computadora *PandaBoard*, la cual perdía la comunicación o se reiniciaba frecuentemente. De todos modos, pudo finalizarse el proyecto.

En cuanto a los resultados, se pudo observar que el robot oscila constantemente, tanto en la posición lineal como angular. Esto puede deberse al juego mecánico presente en la transmisión, o a fallas en el modelado de la planta, en el cual se tuvieron numerosas dificultades dadas las características físicas del robot.

Quedan como actividades a futuro mejorar el control de la trayectoria (ya que el robot no seguía una línea perfectamente recta) y también hacer un control para que pueda cambiar de dirección. Además, se podría implementar un estimador o buscar otra solución viable para la obtención de la velocidad angular.