

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Informe Final del Proyecto Electrónico

**Diseño e implementación de sistema de control con  
localización tridimensional para la estabilización de  
un robot bípedo**

**René Francisco Pezo Vergara**

*Prof. José R. Espinoza C.*

Concepción, 16 de Diciembre de 2024

# Tabla de Contenidos

<b>1.</b>	<b>DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>SOLUCIÓN IMPLEMENTADA Y RESULTADOS.....</b>	<b>2</b>
A.	INTRODUCCIÓN.....	2
B.	UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL .....	2
C.	OBTENCIÓN DE DATOS.....	4
D.	FILTROS PARA FUSIÓN DE SENSORES .....	5
E.	COMUNICACIÓN MEDIANTE BUS CAN.....	6
F.	DISEÑO DE PCB PARA INTEGRACIÓN DE COMPONENTES .....	13
<b>3.</b>	<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>17</b>
BIBLIOGRAFÍA 18		
BIBLIOGRAFÍA .....		18

# 1. Definición del Problema

---

Se desea realizar en centro de control para un robot bípedo, el cual debe poder mantenerse de pie y realizar acciones como caminar, agacharse, etc., para lo cual la principal parte que se debe ver es el estudio del microcontrolador y el manejo de los sensores capaces de medir la orientación del robot, lo que se hace a partir de un sensor de medición inercial. Es necesario trabajar con las mediciones de este sensor, para poder calcular y obtener los ángulos, además de realizar filtros de fusión de sensores para poder obtener una buena medición de ángulo real que indica la orientación del sensor, para luego ser aplicada en el robot bípedo.

Junto a la orientación del robot, se debe lograr esta información al resto del sistema de este, para poder mover los actuadores en base a la posición del robot para lograr realizar un control de estabilización, utilizando un protocolo de comunicación adecuado para el sistema del robot en mente.



## 2. Solución implementada y resultados

---

### a. Introducción

Para poder realizar un sistema de control realimentado una etapa importante del proceso para una realimentación es la de obtener información de la salida del sistema, lo que se logra a través de sensores que permitan medir de manera confiable el valor en tiempo real de la salida del sistema a controlar para poder calcular el error en ese instante de tiempo y poder ajustar la acción de control necesaria para mantener un estado deseado.

En un robot bípedo se desea realizar un control de estabilidad de este, para mantenerlo de pie sin que se caiga. Para lograr esto se requieren de sensores que sean capaces de detectar la posición y orientación de este para poder saber las acciones correspondientes para poder estabilizarlo. Para lograr esta tarea se deben obtener los tres ángulos de inclinación con respecto a cada uno de los ejes tridimensionales. Esto se realiza mediante una unidad de medición inercial.

### b. Unidad de medición inercial

Una unidad de medición inercial (IMU) corresponde a un circuito compuesto por distintos tipos de sensores, que combinados pueden entregar data, específicamente sobre la posición y orientación de un objeto en un espacio tridimensional. Una IMU se compone de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros principalmente, obteniendo cada una de estas mediciones a lo largo de cada una de las tres dimensiones, por lo que se considera un sistema con nueve grados de libertad, considerando cada tipo de sensor en cada eje. Cabe mencionar que se puede tener una IMU de seis grados de libertad formada solo por acelerómetros y giroscopios, pero este no permite obtener una orientación completa en tres dimensiones como lo hace una IMU de 9 grados de libertad incluyendo magnetómetros.

En una unidad de medición inercial es importante obtener una medición de cada tipo de sensor a lo largo del eje x, y y z. En un chip de IMU se utiliza un protocolo de comunicación, generalmente I2C para obtener la data de los sensores a través de un microcontrolador. Una unidad de medición

inercial contiene los tres tipos de sensores mencionados en una misma placa. Es importante saber su funcionamiento para entender el comportamiento que tendrá este al medir algún valor.

Un acelerómetro es un tipo de sensor que permite obtener la aceleración lineal en un eje. Esto se realiza con un micro sistema electromecánico (MEMS), donde se tiene un sistema de placas fijas junto a placas conectadas a un resorte, cuando existe una aceleración se mueve la parte de la placa sujeta por el resorte, lo que genera un cambio en la capacitancia generada por las placas, lo que se mide y se convierte a una aceleración correspondiente a través de un balance de fuerzas en base a la segunda ley de Newton y el desplazamiento impuesto en el resorte.

Un giroscopio funciona bajo un sistema (MEMS) similar al de un acelerómetro donde se tienen placas móviles a base de resortes que generan un cambio en capacitancia. A su vez también este desplazamiento de las placas se asocia a una fuerza en el sistema, pero en este caso es debido al efecto Coriolis, en el que se genera una fuerza inercial perpendicular cuando se aplica una velocidad angular a un elemento con velocidad linear tangencial constante. De esta forma se tiene un set de placas en constante oscilación para la generación de la velocidad linear, y al momento de detectar una velocidad angular la placa se mueve con una fuerza perpendicular a la oscilación, que genera un cambio en capacitancia.

El último elemento que compone una unidad de medición inercial de 9 grados de libertad corresponde al magnetómetro, el cual calcula el campo magnético en un eje en base al efecto Hall, donde al aplicar un campo magnético a un conductor por el que circula corriente, se genera un campo eléctrico por la separación de las cargas en este conductor. Así para poder medir la intensidad del campo magnético aplicada en el sensor se tiene, una placa conductora a la que se le aplica una corriente, y ante la presencia de un campo magnético la separación de las cargas genera una diferencia de potencial eléctrico entre ambos extremos de esta, la intensidad de este voltaje se mide y se relaciona a la intensidad del campo magnético que actúa sobre este.

Algo importante de notar con los tipos de sensores que se usan para una unidad de medición inercial y en general es que estos sensores no necesariamente son 100% precisos, y más que eso son susceptibles a ruido que generan perturbaciones indeseadas al momento de aplicar un control. Es necesario poder filtrar estas señales para obtener una buena medición de los valores que se desean

senzar. El acelerómetro, por ejemplo, es susceptible a cualquier movimiento, pues estos generar cierta aceleración que puede generar ruido si el sistema está en constante movimiento. El magnetómetro lee campos magnéticos, y por tanto ante la acción de un circuito electromecánico que genere un campo magnético propio, el sensor no puede distinguir el campo generado por el circuito y la medición real proveniente del medio. Estas son consideraciones importantes al momento de utilizar estos sensores.

### c. Obtención de datos

Para las pruebas iniciales se usa como microcontrolador un Arduino Uno, y se programa mediante el ambiente de programación propio de este. Lo primero que se debe realizar es la conexión a la unidad de medición inercial que contiene los sensores a utilizar. Esta utiliza el protocolo de comunicación I2C para trabajar, por lo que para obtener un dato en un tiempo de muestreo se tiene que iniciar la comunicación entre el microcontrolador y el sensor. Luego mediante el datasheet del sensor se obtienen las direcciones para obtener la información necesaria del sensor.

Como indican los sensores, los valores entregados corresponden a tres mediciones de aceleración, velocidad angular e intensidad de campo magnético a lo largo de cada eje en el espacio tridimensional, por lo tanto es necesario realizar cálculos con estos valores para poder obtener datos de los ángulos de inclinación que tiene el sensor en un momento dado, que permiten saber la orientación de este. Lo primero que uno piensa para obtener la posición angular en un eje es utilizar la velocidad angular, pues esta corresponde a la derivada de la posición, entonces en un tiempo discreto se cumple la relación,

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \omega_k \cdot T$$

donde  $T$  corresponde al tiempo de muestreo del sensor. Sin embargo, esta medición por sí sola no es muy confiable, pues es bastante susceptible a escurrimiento, al acarrear el error de la etapa anterior en cada paso siguiente.

A partir de la medición de los acelerómetros uno puede ver que al dejar el sensor quieto, no se registra una aceleración en el eje x e y, sin embargo sí se puede ver una aceleración a lo largo del eje z, que es causada por la fuerza de gravedad actuando sobre el cuerpo, que sabemos tiene asociada una aceleración de gravedad de  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ . Con esto para la inclinación a lo largo del eje x e y, se puede usar una razón trigonométrica para el cálculo del ángulo de inclinación, pues al rotar el sensor, la aceleración de gravedad se verá repartida en componentes en el eje de movimiento junto al eje z. Para

el movimiento rotacional a lo largo del eje  $z$ , sin embargo, esto no se puede realizar, pues la aceleración de gravedad no refleja un movimiento en torno a este eje. Por esto para calcular el ángulo rotacional en el eje  $z$ , se usa un concepto similar, pero a base de los magnetómetros, dado el campo magnético que genera la Tierra, que se puede medir y en base a una razón trigonométrica tridimensional, se puede obtener el ángulo rotacional en  $z$ . Si bien se obtiene otra medición, y esta no acarrea error y evita escurrimiento, el problema de usar acelerómetros es que la vibración del cuerpo del robot se capta como aceleración, y esta no se distingue de la aceleración causada por la fuerza de gravedad. Por lo que si se mueve el sensor horizontalmente sin inclinarlo, se registrará un ángulo de inclinación debido a la aceleración registrada. Por esto la medición es muy susceptible al ruido y genera medición incorrectas, lo que no sucede con la medición en base a los giroscopios.

Como se tienen diferentes formas de medir los ángulos de rotación en torno a un eje, cada una con sus ventajas y desventajas, se busca utilizar la información útil de todas estas mediciones en conjunto para lograr una medición más completa y correcta. La forma de realizar esto es mediante la fusión de sensores, para lo cual existen diferentes tipos de filtros que logran esta tarea.

#### **d. Filtros para fusión de sensores**

El filtro más acorde para lograr una buena fusión de sensores y obtener la mejor medición posible para los datos entregados, corresponde al uso de un Filtro de Kalman, que mezcla el uso de un modelo predictivo del sistema, con la medición de un sensor con ruido, ambas medidas con cierta incertidumbre, que utiliza una matriz de covarianza en base al ruido presente en estas, para obtener un modelo cambiante que pueda entregar una mejor estimación del valor real del dato a medir, en este caso las posiciones angulares en tres dimensiones.

Para esto se tienen dos etapas del cálculo del filtro, la primera de predicción en base a un modelo, la primera de predicción del modelo, donde se usa el dato obtenido a partir del giroscopio para estimar la posición angular del ángulo en torno a un eje. Y la segunda etapa de corrección donde se agrega la información del sensor multiplicada por la matriz de covarianza dependiente del ruido de los acelerómetros y magnetómetros para obtener finalmente una mejor aproximación de la posición angular del sensor.

En base a el código para un filtro de Kalman se obtienen pruebas iniciales de medición de ángulo para los ejes x e y, donde se puede observar una inclinación medida correspondiente al movimiento realizado en el sensor real en el eje x y luego en el eje y.

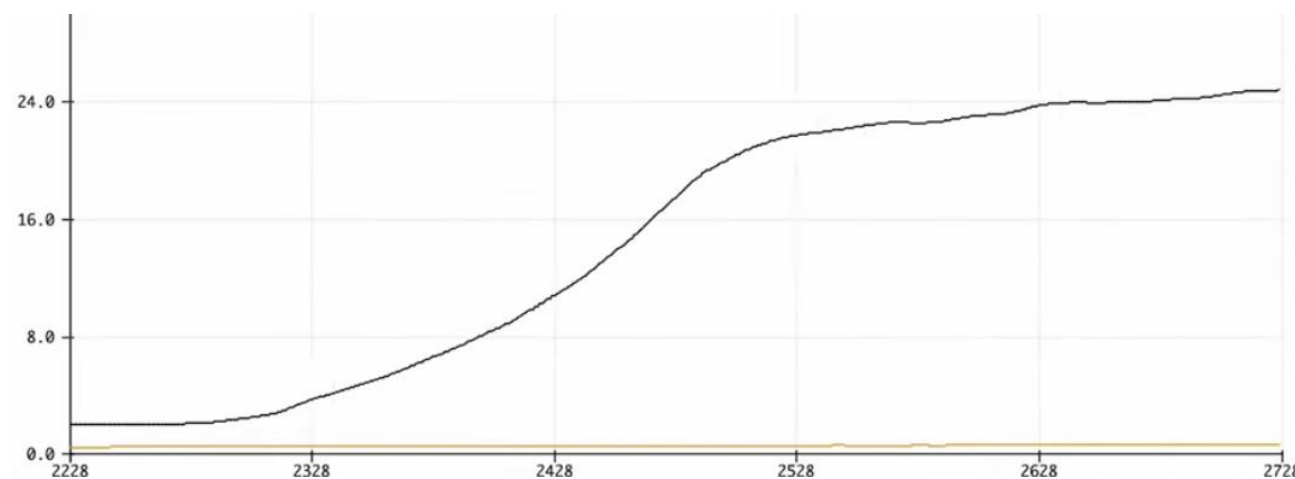


Fig. 1 Medición de posición angular en ejes x e y, con rotación en torno a eje x (negro).

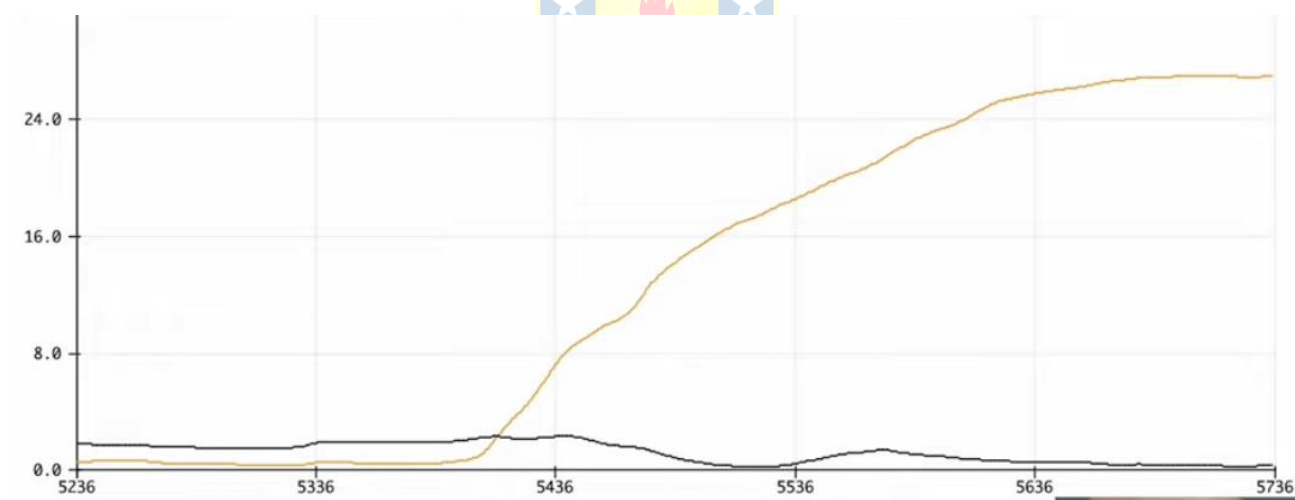


Fig. 2 Medición de posición angular en ejes x e y, con rotación en torno a eje y (amarillo).

### e. Comunicación mediante bus CAN

Para poder realizar la comunicación entre el microcontrolador y los drivers para los servomotores que hacen actuar el robot, se necesita de un protocolo de comunicación de bus CAN (Control Area Network), un estándar para equipos en áreas de automóviles, automatización y robótica. Este protocolo permite una conexión rápida, sencilla y confiable entre una serie de componentes



electrónicos, utilizando solo dos cables para la transmisión de datos, que corresponden a un CAN High y un CAN Low. Mediante estos dos cables se puede realizar una conexión en paralelo entre los componentes de la red de control, de donde viene su nombre. En particular para la aplicación del robot bípedo se requiere de una conexión entre el microcontrolador y todos los drivers de motores, para poder enviar información entre ellos, con el microcontrolador entregando las posiciones requeridas por los actuadores y estos devolviendo el estado de la posición para asegurar un correcto funcionamiento. Es por esto que se debe programar el microcontrolador Teensy para poder enviar y recibir datos mediante este protocolo de comunicación.

La comunicación CAN requiere de dos componentes para su funcionamiento correcto, que corresponde a un controlador CAN y un transmisor CAN, siendo el primero el encargado de controlar el flujo de datos y procesar la información enviada haciendo la conexión con el dispositivo a comunicar, mientras que el transmisor se encarga de traspasar la información a bajo nivel para el envío y la recepción de datos con los otros dispositivos en la red. De esta manera el controlador trabaja niveles típicos de voltaje para la comunicación digital con niveles lógicos en base a ceros y unos mientras que el transmisor se encarga de pasar esta información a dos niveles diferenciales de voltaje que permiten una mejor comunicación y menor susceptibilidad al ruido en la transmisión de los datos, variando el voltaje de la línea CAN High de 2,5 V a 3,75 V y la de CAN Low de 2,5 V a 1,25V, con ambos canales en 2,5 V con una diferencia de voltaje nula significando un estado lógico alto, mientras que para un estado lógico bajo se tiene un voltaje entre las líneas de 2,5 V.

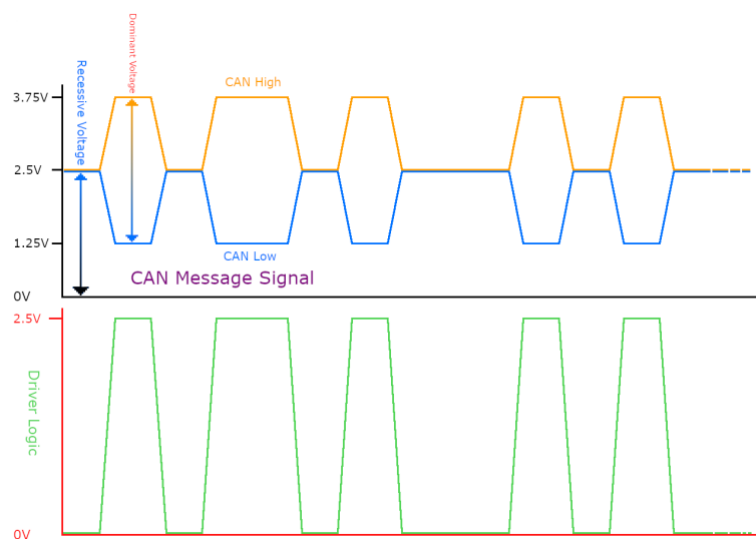


Fig. 3 Señales de protocolo de bus CAN

El microcontrolador Teensy tiene incluido la opción de trabajar con un controlador de CAN, sin embargo, no incluye un transmisor, por lo que se requiere de un componente adicional para poder realizar la comunicación, en este caso se utiliza un módulo de transmisor TJA1050, conectándolo al Teensy directamente mediante los pines para transmisión y recepción de datos mediante comunicación can CTX y CRX respectivamente, y teniendo como salida las líneas de cable para CAN High y CAN Low.

Para la prueba de conexión para comprobar el funcionamiento del protocolo en el microcontrolador se utiliza además un Arduino Uno con conexión serial a la pantalla para observar la información que se está transmitiendo entre este y el Teensy. El Arduino Uno no contiene la capacidad de comunicación mediante protocolo CAN, pues no contiene un transmisor ni un controlador CAN, por lo que para la conexión se utiliza un módulo de CAN para microcontroladores que corresponde al módulo MCP2515, que incorpora un controlador de CAN MCP2515 y un transmisor TJA1050. Para hacer la conexión de este módulo al Arduino se utiliza el protocolo de comunicación SPI, compatible con el Arduino Uno.

Cabe mencionar que por temas de tiempo y costos se está utilizando el transmisor TJA1050, que requiere de un voltaje de alimentación de 5 V para un funcionamiento correcto, mientras que el microcontrolador Teensy utiliza 3,3 V y no permite el uso de 5 V en la mayoría de sus pines, sin embargo, si cuenta con pines específicos que entregan 5 V proveniente de la alimentación al microcontrolador. Se utiliza uno de estos pines para poder alimentar el transmisor para obtener una buena medición de las señales y una correcta recepción de la información. Aun así, como ahora se alimenta el transmisor con 5 V, las señales digitales entrantes a CRX utilizan este voltaje para un estado alto igual a un 1 lógico, lo que daña el pin de recepción del microcontrolador. Para solucionar este problema se implementa un simple divisor de voltaje mediante el uso de dos resistencias en serie de  $1k\Omega$ . Llevando la salida del transmisor a un extremo de las resistencias, y midiendo el voltaje como entrada a CRX en el microcontrolador desde el nodo entre las resistencias, llevando sus valores ahora desde 5 V a la mitad, 2,5 V cuando se tiene un estado alto, manteniendo un voltaje nulo para un nivel lógico 0. Si bien este valor de voltaje alto no es igual a los 3,3 V requeridos, si es un voltaje lo suficientemente alto para que el microcontrolador lo interprete como un 1. Para la transmisión de datos por el otro lado, a pesar de que se requiera de 5 V para hacer funcionar el transmisor de manera

correcta, este sí interpreta un valor de 3,3 V como un nivel lógico alto, por lo que no es necesario realizar una adaptación para el envío de datos. De esta manera se logra comunicar el microcontrolador con el transmisor de manera exitosa a pesar de sus niveles diferentes de voltaje de alimentación.

Para probar la comunicación se conectan ambos microcontroladores mediante sus dispositivos para lograr implementar la comunicación CAN, y se utiliza un osciloscopio GW Instek GDS-1102B para observar la forma de onda de la señal enviada y corroborar que la transmisión se realiza de buena manera utilizando el protocolo establecido. En este se observan las señales vistas por CAN High, CAN Low, CRX y TRX .

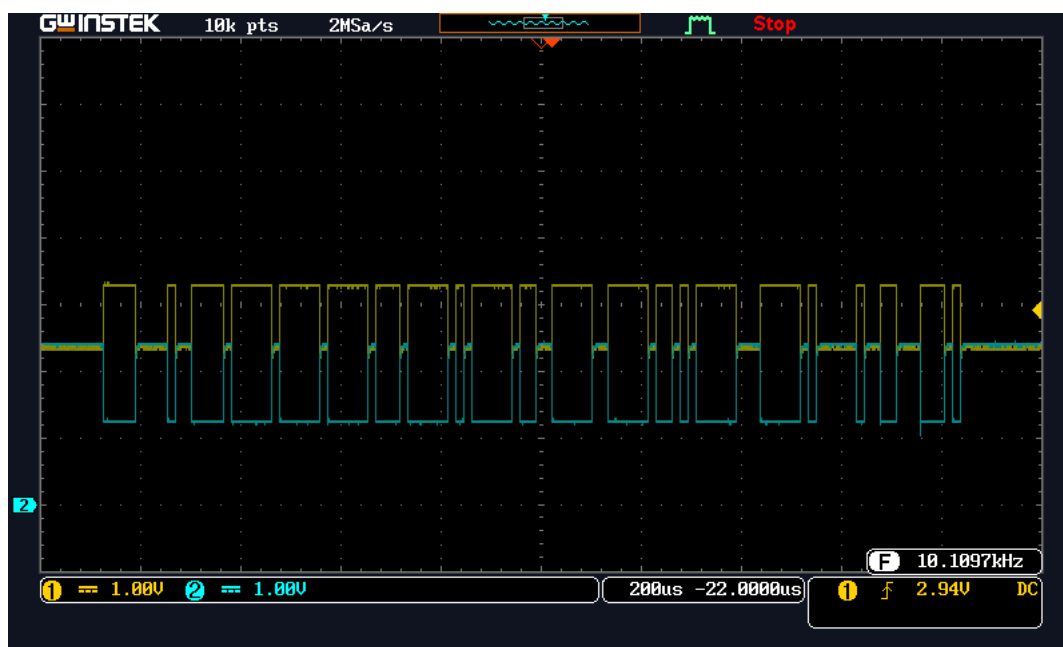


Fig. 4 Medición osciloscopio de CAN High y Low

Para la primera señal se envía un mensaje de 8 bytes de data desde el Teensy al Arduino a una velocidad de 125kbps. Se observa en amarillo el valor de CAN High en el bus, variando desde 2,5 V a 3,75 V mientras que la señal azul representa a CAN Low, variando desde 2,5 V a 1,25 V en los mismos instantes que CAN High.

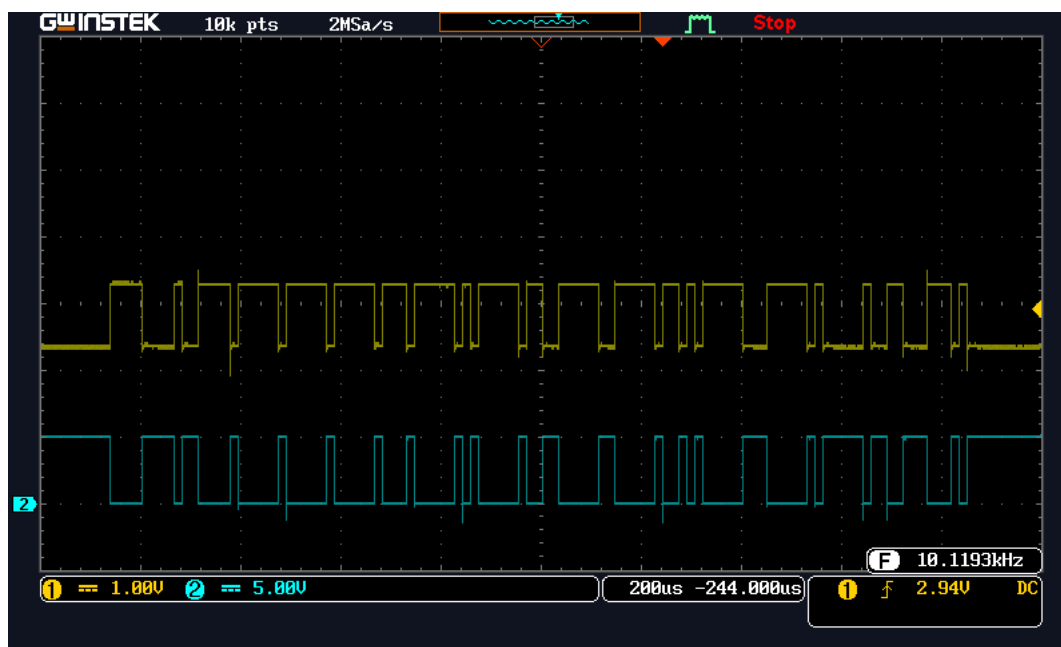


Fig. 5 Medición osciloscopio de CAN High y CRX Arduino

Para la siguiente figura se observa la señal CAN High en amarillo nuevamente pero ahora se agrega la señal recibida por el receptor de Arduino en azul, con una escala menor de 5 V por cuadrícula. Aquí se presencia que cuando CAN High está en 2,5 V y no presenta diferencia de voltaje con CAN Low se tiene un valor de voltaje alto, y cuando se genera una diferencia de potencial entre las líneas esto equivale a un cero lógico. Además se presencia que un mensaje enviado se realiza enviando un valor digital 0 para iniciar el mensaje, y una vez finalizado este se vuelve a llevar la línea a un voltaje digital 1 para indicar que el mensaje a concluido.

Para la segunda prueba se realiza la comunicación desde el Arduino a Teensy, enviando ahora un mensaje de 2 bytes de data.

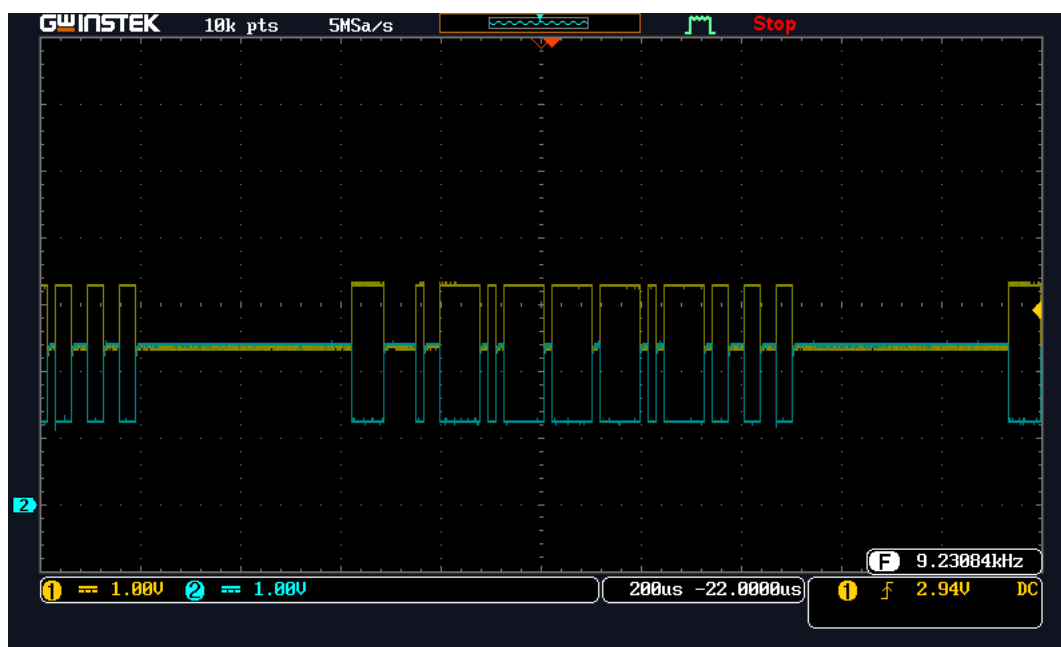


Fig. 6 Medición osciloscopio de CAN High y Low desde Arduino

Nuevamente se observa el estado de CAN High y CAN Low entre los transmisores, que permiten presenciar la diferencia de voltaje que se genera para el envío de un mensaje. Además se observa que el mensaje es de menor duración dada la menor cantidad de información de tipo data enviada, pudiendo ver un mensaje entero, más el inicio y el fin de otros.

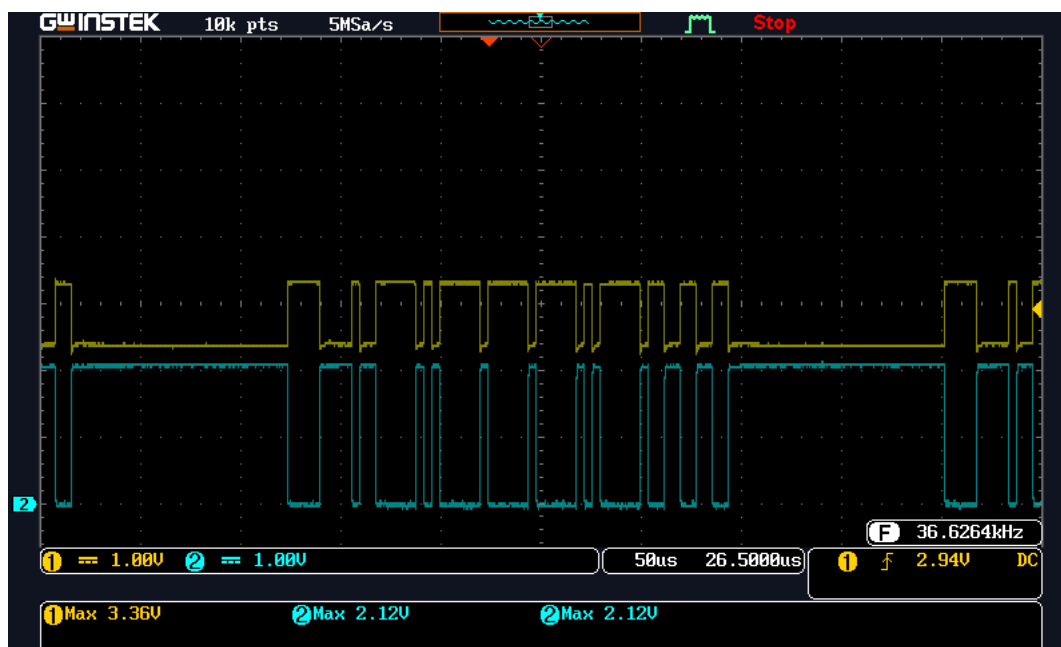


Fig. 7 Medición osciloscopio de CAN High y CRX en Teensy

Luego se observa el mensaje en la salida de la recepción del Teensy después de hacer la conversión de voltaje. En amarillo se observa el valor de CAN High y en azul el voltaje en CRX del microcontrolador Teensy. Se observa que se tiene un menor voltaje al esperado, sin embargo la señal logra ser interpretada por el microcontrolador.

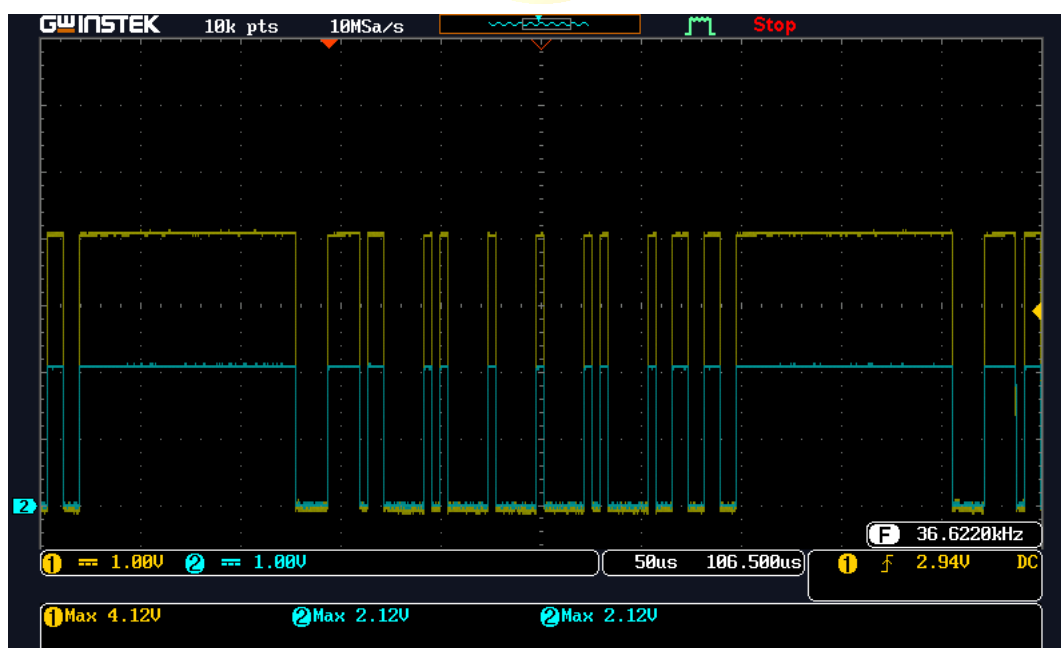
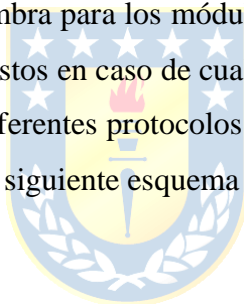


Fig. 8 Medición osciloscopio de salida RX de transmisor y CRX de Teensy

La última gráfica que se puede presenciar del osciloscopio corresponde a las salidas digitales en el lado del microcontrolador Teensy para el mensaje enviado, que corresponde a la señal de salida del transmisor en amarillo, sin el divisor de voltaje y en azul la señal de entrada a CRX en el Teensy saliendo desde el divisor de voltaje creado. Aquí ambos voltajes son menores a los valores esperados de 5 V y 2,5 V respectivamente, pero la señal se logra interpretar como un 1 para los valores altos.

## **f. Diseño de PCB para integración de componentes**

Para poder facilitar el trabajo con el microcontrolador Teensy y los módulos utilizados para el trabajo, se diseña una PCB que sea capaz de contener los componentes de manera fácil y reducida, reduciendo el número de cables a utilizar y permitiendo tener mayor estabilidad al conectar el circuito. Además se utilizan pines conectores hembra para los módulos integrados y el microcontrolador para permitir la retirada y cambio rápido de estos en caso de cualquier necesidad. Se utilizan los pines del Teensy para crear conexiones con los diferentes protocolos de comunicación que se utilizan para los módulos utilizados, para esto se sigue el siguiente esquema de conexión.



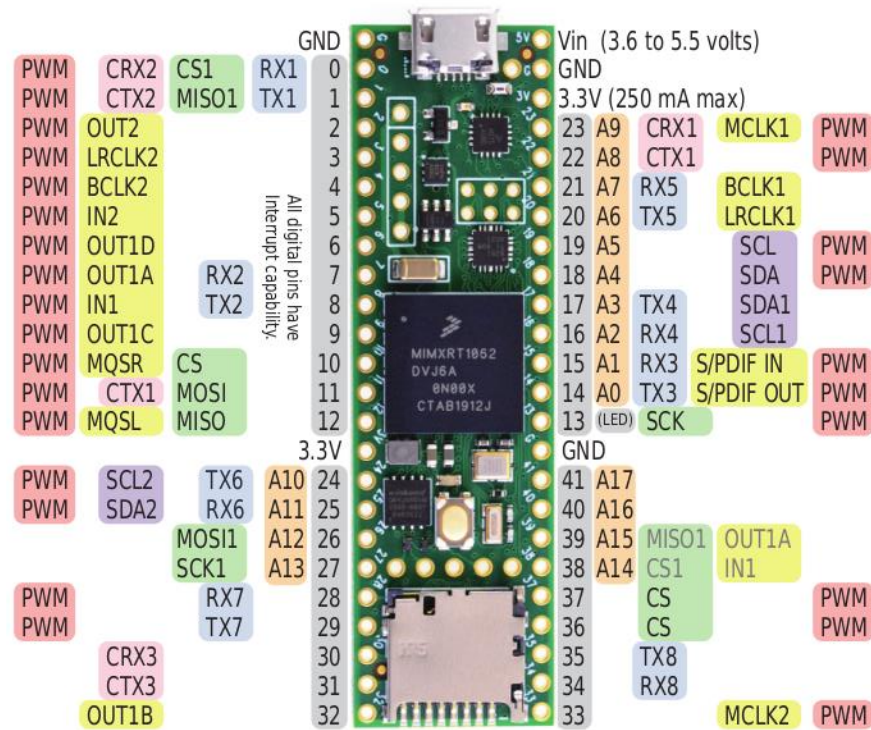


Fig. 9 Pinout para microcontrolador Teensy 4.1

Con esto se usan los pines de CRX y CTX para la comunicación mediante CAN con el transmisor TJA1050, incluyendo el divisor de voltaje entremedio, se utilizan los pines SDA y SCL para la comunicación con la Unidad de Medición Inercial mediante I2C, junto a una pantalla LCD para poder observar la información enviada desde el microcontrolador. También se incluyó el uso de los pines para comunicación SPI para pruebas anteriores.

En base a esto se utiliza el programa KiCad para el diseño de la PCB y el esquema de conexión de los componentes. Con lo que finalmente se llega al siguiente diseño, en el programa.



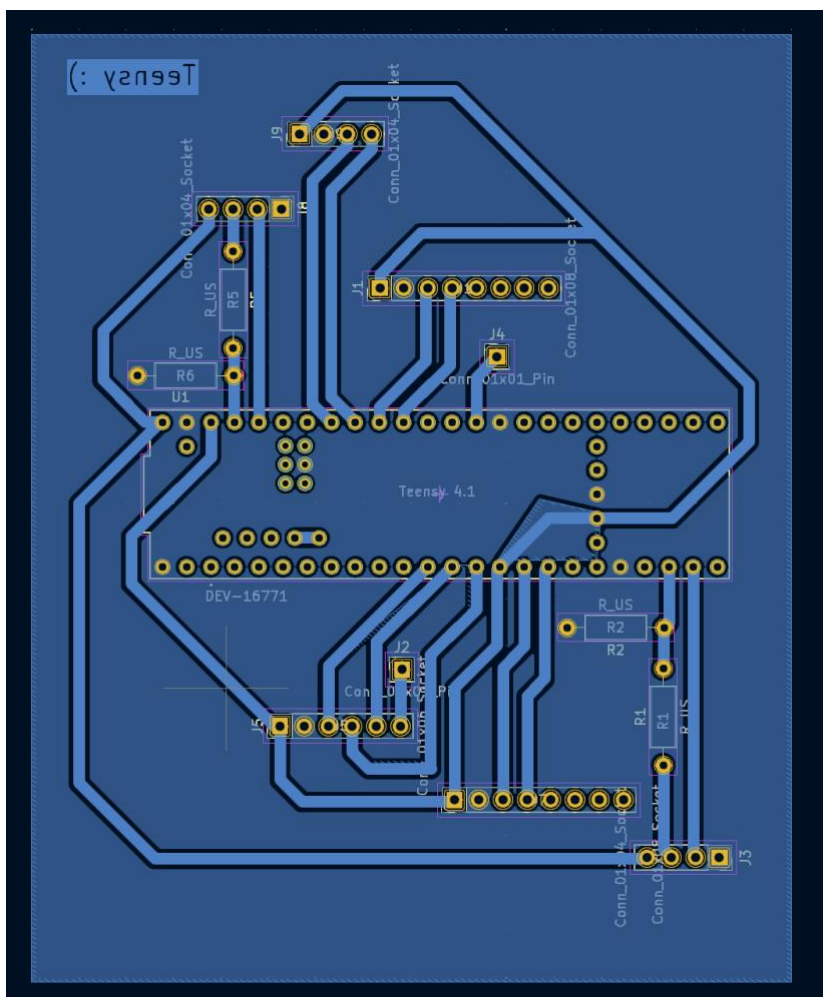


Fig. 10 Diseño de placa PCB en KiCAD

Que finalmente se imprime en una placa de cobre mediante el uso de una CNC, logrando así obtener el circuito diseñado e incorporar los componentes en una sola placa que permita una conexión y uso de módulos más rápida que el uso de cables inicial.

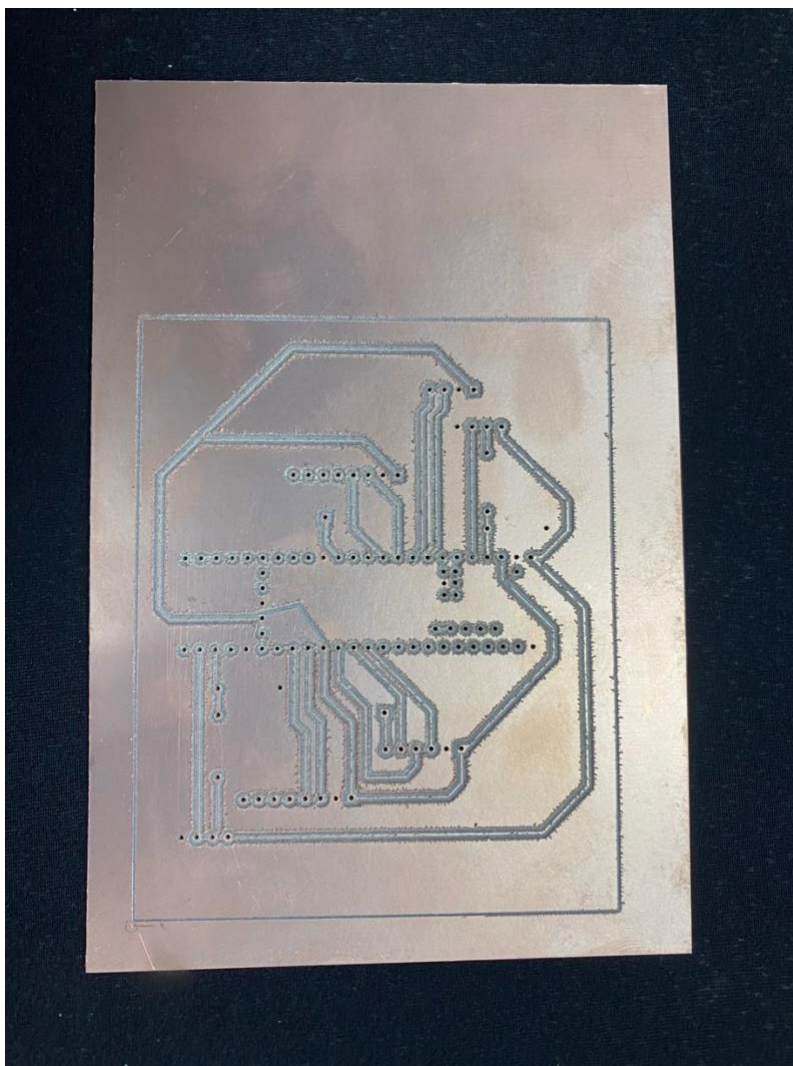


Fig. 11 Resultado de impresión de PCB

En base a la placa realizada se pueden integrar los módulos y el microcontrolador, permitiendo así que esta se pueda integrar en el cuerpo del robot bípedo a implementar una vez esté completado, actuando así como el sistema central para la orientación del robot en base al cuerpo, permitiendo realizar un control de estabilidad, y por otro lado permitiendo la comunicación con los drivers para llevar a los actuadores a los niveles deseados.

### 3. Conclusión

---

En este trabajo se detalla la implementación del sistema de control principal para un robot bípedo, enfocándose en el sistema de medición de la orientación del robot para actuar como el sensor principal para su sistema de estabilización, junto a la comunicación necesaria para, en base a la detección de la orientación, enviar la posición requerida por el sistema de control para los actuadores del robot. El sistema logra obtener una orientación en base a los ángulos que tiene el robot en torno a los ejes x, y, z. Con la aplicación de un filtro de Kalman se puede obtener una mejor medición que es menos susceptible a ruido, siendo así más confiable.

Para mejorar el diseño realizado se debe utilizar módulos más adecuados para el sistema en mente, buscando financiamiento para lograr la compra y envío de dichos componentes que puedan lograr un mejor nivel de estado para el sistema implementado. Se debe buscar un transmisor de CAN que sea capaz de trabajar directamente con un nivel de voltaje de 3,3 V, para así no tener que aplicar un divisor de voltaje que consume energía en las resistencias, y entrega un valor de voltaje menor al requerido por el microcontrolador para un nivel alto, siendo este susceptible a una mala lectura con mayor frecuencia que un transmisor diseñado para el trabajo a este menor voltaje de 3,3 V. A su vez, si bien el uso de filtros ayuda a la medición de orientación y susceptibilidad al ruido, la señal de salida no es perfecta, presenciando niveles de ruido en su salida que pueden afectar al sistema. Se deben buscar componentes de mejor calidad y menor nivel de ruido para el diseño final.

## Bibliografía

---

- [1] G. Wetzstein, “Inertial Measurement Units I.” Stanford University. Disponible: <https://stanford.edu/class/ee267/lectures/lecture9.pdf>
- [2] M. Munuera, “Filtro de Kalman y sus aplicaciones”, 2018. <https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/127417/2/memoria.pdf>
- [3] Y. Bulut, “Applied Kalman filter theory” 2011. Disponible: <https://people.duke.edu/~hpgavin/SystemID/References/Balut-KalmanFilter-PhD-NEU-2011.pdf>



