

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación
en Instrumentación y Control**

**Giroscopios y acelerómetros electrónicos para
medición de velocidad angular de mecanismos**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Jesús Fernando Gutiérrez García

Ensenada, Baja California, México

2020

Tesis defendida por

Jesús Fernando Gutiérrez García

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rafael de Jesús Kelly Martínez
Director de tesis

Dr. César Cruz Hernández

Dra. María del Carmen Monroy Lara

Dr. Daniel Saucedo Carvajal

Dr. Heriberto Márquez Becerra



Dr. Daniel Saucedo Carvajal
Coordinador del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Jesús Fernando Gutiérrez García © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta Jesús Fernando Gutiérrez García como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Instrumentación y Control.

Giroskopios y acelerómetros electrónicos para medición de velocidad angular de mecanismos

Resumen aprobado por:

Dr. Rafael de Jesús Kelly Martínez
Director de tesis

La determinación de la posición y orientación juega un rol importante en la descripción de cuerpos rígidos y mecanismos en general. Entre estos últimos se encuentran, por ejemplo: robots, sistemas de visión, aeronaves, satélites y submarinos. Por otra parte, para fines de control automático de esa clase de mecanismos (robots aeronaves, submarinos y satélites), puede requerirse el sensado mediante medición directa de variables físicas como orientación y velocidad angular. Motivados por las posibilidades de medir la orientación y principalmente la velocidad angular de algún objeto utilizando sensores giroscopios y acelerómetros, en esta tesis se aborda un estudio teórico-experimental del uso e implementación de estos sensores. Además, se presenta el diseño de un sistema utilizando componentes electrónicos para medir la velocidad angular a la que está girando el eje de un motor. Para comprobar el funcionamiento adecuado del sistema propuesto se realizaron pruebas de laboratorio en las que se comparan las mediciones obtenidas con una referencia confiable.

Palabras clave: sensor, velocidad angular, giroscopio, acelerómetro

Abstract of the thesis presented by Jesús Fernando Gutiérrez García as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Name of the Degree with orientation in Instrumentation and Control.

Gyroscopes and electronic accelerometers for angular velocity measurement of mechanisms

Abstract approved by:

Dr. Rafael de Jesús Kelly Martínez
Thesis Director

The determination of position and orientation plays an important role in the description of rigid bodies and mechanisms in general. An example of these are: robots, vision systems, aircraft, satellites and submarines. On the other hand, for the purpose of automatic control of this kind of mechanisms (aircraft, submarine and satellite robots), sensing may be required by direct measurement of physical variables such as orientation and angular velocity. Motivated by the possibilities of measuring the orientation and mainly the angular velocity of a object using gyro sensors and accelerometers, this thesis deals with a theoretical-experimental study of the use and implementation of these sensors. In addition, a system design using electronic components to measure the angular speed at which a motor shaft is rotating is presented. To verify the proper functioning of the proposed system, laboratory tests were performed in which the measurements obtained are compared with a reliable reference.

Keywords: sensor, angular velocity, gyroscope, accelerometer

Dedicatoria

***A mi esposa, Nahomi;
eres lo mejor de mi vida, TE AMO***

Agradecimientos

Doy gracias a Dios primeramente por darme vida y salud, así como el haberme guiado a lo largo de mi vida y darme el conocimiento, capacidad y fuerza para alcanzar este triunfo.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por darme la oportunidad alcanzar esta gran meta.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Rafael Kelly, mi profesor y director de tesis, por confiar en mí para desarrollar esta tesis y compartir sus conocimientos, así como el apoyo otorgado para el desarrollo y culminación de la misma.

A los miembros del comité por sus consejos y aportaciones que me ayudaron a desarrollar este trabajo.

Al Dr. Roberto Conte y Dr. Miguel Alonso Arévalo, por sus consejos y motivarme a que ingresara a la maestría.

A mi esposa Nahomi, por estar a mi lado, por su amor, paciencia y motivación que fueron un factor importante para terminar este logro.

A mis padres Fernando y Verónica por su amor, apoyo constante y enseñanzas.

A mi familia por su apoyo incondicional en mis proyectos personales y por siempre estar conmigo.

A todos mis compañeros y amigos en CICESE por los momentos compartidos. Agradecimiento especial a Jonathan, Alberto, Guillermo, Alan, Roilhi, Manuel, Rogelio y Ernesto por brindarme su apoyo y amistad.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xii
Capítulo 1. Introducción	
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	1
1.3. Objetivos	1
1.3.1. Objetivo general	1
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.4. Estructura de la memoria de tesis	2
Capítulo 2. Preliminares	
2.1. Sensores Inerciales	4
2.1.1. Giroscopios	4
2.1.2. Acelerómetros	11
2.1.3. MEMS	18
2.2. Motores Eléctricos	18
2.2.1. Motor DC	18
2.2.2. Motor DC sin escobillas (Brushless)	20
2.3. Medición y calibración	22
Capítulo 3. Requerimientos de diseño de la tarjeta de medición	
3.1. Baterías	25
3.2. Reguladores de voltaje	27
3.3. Unidad de proceso y control	28
3.4. Módulo de transmisión inalámbrica	29
3.5. Periodo de muestreo	30
Capítulo 4. Diseño de la tarjeta MMAVA	
4.1. Modelo propuesto	31
4.2. Diseño de esquemáticos	31
4.3. Selección de componentes	38
4.4. Diseño de tarjeta de circuito impreso	40
4.5. Firmware	44

Tabla de contenido (continuación)

Capítulo 5. Diseño de la interfaz de usuario.

5.1. Requerimientos	46
5.2. Software utilizado	46
5.3. Protocolo de comunicación	48
5.4. Configuración de la tarjeta MMAVA	49
5.5. Configuración del motor	50

Capítulo 6. Pruebas de la tarjeta de medición.

6.1. Prueba de en estado de reposo	54
6.2. Cálculo del sesgo (offset)	55
6.3. Segunda prueba de en estado de reposo	57

Capítulo 7. Análisis de resultados

Capítulo 8. Conclusiones y trabajo futuro

8.1. Conclusiones	71
8.2. Trabajo futuro	72

Literatura citada	73
------------------------------------	----

Lista de figuras

Figura	Página
1. Giroscopio montado sobre un soporte de Cardano.	4
2. Momento angular del giroscopio.	5
3. Interferómetro Sagnac.	7
4. Trayectorias de los haces de luz después de t_r	8
5. Sistema masa resorte amortiguador de dos grados de libertad.	9
6. Acelerómetro mecánico que indica el desplazamiento de la masa.	12
7. Diferencia de potencial generada al presionar un material piezoeléctrico.	14
8. Generación de energía piezoeléctrica.	14
9. Esquema de un capacitor.	16
10. Modelo simplificado de un acelerómetros capacitivo.	17
11. Sensor acelerómetro empaquetado en un circuito integrado.	18
12. Motor de corriente directa.	19
13. Composición de un motor eléctrico.	19
14. Funcionamiento de un motor eléctrico CC.	20
15. Motor CC brushless.	21
16. Motor CC brushless.	21
17. Modelo de un instrumento simple.	22
18. Estructura típica de un instrumento de medición.	22
19. Errores en las mediciones de velocidad angular de un objeto.	23
20. Curva de calibración.	24
21. Batería de iones de litio.	25
22. Regulador de tensión lineal LM317.	27
23. Modelo del regulador conmutado TPS62046.	28
24. Microcontrolador de montaje superficial de la compañía Microchip.	29
25. Modulo transmisión inalámbrica con antena.	29
26. Señal analógica muestreada con periodo de muestreo T	30
27. Diagrama a bloques de la tarjeta MAAVA.	31
28. Diagrama electrónico de los reguladores de voltaje.	32
29. Esquemático de la alimentación del microcontrolador.	33
30. Esquemático de conexión de los puertos del microcontrolador.	34

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
31. Esquemático de conexión del cristal de cuarzo.	35
32. Diagrama de interconexión del ducto I2C.	36
33. Esquemático de la conexión de los sensores inerciales.	36
34. Esquemático de conexión del modulo transmisor inalámbrico.	37
35. Pagina web del proveedor de componentes Mouser electronics.	38
36. Catálogo de capacitores de la pagina de Digikey.	39
37. Vista superior de la tarjeta MMAVA.	40
38. Vista inferior de la tarjeta MMAVA.	41
39. Capa interna de plano de tierra de la tarjeta MMAVA.	41
40. Capa interna de plano de voltaje de la tarjeta MMAVA.	42
41. Capa de cobre superior de la tarjeta MMAVA.	42
42. Capa de cobre inferior de la tarjeta MMAVA.	43
43. Diagrama de flujo del código para operar la MMAVA.	45
44. Interfaz de usuario propuesta para operar la MMAVA.	46
45. Interfaz de usuario configurando las variables a graficar.	47
46. Adaptador USB a serial DB9.	48
47. Interfaz de usuario seccionada por función.	49
48. Diagrama de flujo del proceso de configuración del MMAVA.	50
49. Diagrama de flujo del proceso de configuración del motor con la interfaz gráfica.	51
50. Modelo mecánico en 3D de la maquea de pruebas de la tarjeta MMAVA. . .	52
51. Maqueta de pruebas de la tarjeta MMAVA.	53
52. Tarjeta MMAVA montada en la maqueta de pruebas.	53
53. Mediciones de la tarjeta MMAVA estando el motor apagado.	54
54. Mediciones de la tarjeta MMAVA estando el motor apagado con ajuste de sesgo.	58
55. Gráfica de comparación de las velocidades angulares obtenidas con y sin ajuste de sesgo.	58

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
56. Gráfica de comparación de las aceleraciones obtenidas con y sin ajuste de sesgo.	59
57. Curva de calibración de la tarjeta MMAVA.	60
58. Señales capturadas en prueba de velocidad angular con valor de 50rpm. .	61
59. Prueba de velocidad angular con valor de 50rpm con motor inicialmente apagado.	62
60. Señales capturadas en prueba de velocidad angular con valor de 300 RPM.	63
61. Señales capturadas en prueba de velocidad angular con valor de 300 RPM.	63
62. Prueba de velocidad angular con una función sinusoidal de 50rpm de amplitud pico.	64
63. Señales capturadas en prueba de velocidad angular con una forma cuadrada.	65
64. Gráfica con 5 mediciones diferentes.	66
65. Gráfica de los errores de las señales con respecto al promedio.	67
66. Gráfica del error de la señal del motor y el promedio de las señales de la tarjeta MMAVA.	69

Lista de tablas

Tabla		Página
1.	Terminales de alimentación del microcontrolador TMS5701224CPGE.	33
2.	Características de la tarjeta MMAVA.	43
3.	Desviación de cada medición.	68
4.	Características operacionales de la tarjeta MMAVA.	70

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

En la actualidad los sensores inerciales están presentes en varias áreas de la ciencia e ingeniería a tal grado que muchos dispositivos y aplicaciones dependen de ellos para poder funcionar. La investigación y desarrollo de los sensores inerciales continúa creciendo desde hace aproximadamente 50 años con el objetivo de crear sensores cada vez más pequeños, de menor costo y con mayor precisión.

Su campo de aplicación es muy amplio; los vemos actualmente en el entretenimiento como en consolas de vídeo juegos o aplicaciones para celulares, en navegación y orientación de aviones, automóviles, barcos, naves espaciales, satélites, etc. También son utilizados en el área de la robótica, medicina y en aplicaciones militares (Armenise *et al.*, 2010).

1.2. Justificación

Los sistemas inerciales no solo se componen de los sensores (acelerómetros y giroscopios), sino también de una unidad de procesamiento (Kok *et al.*, 2017). La cual además de tomar las mediciones de los sensores, calculan, procesan, filtran, almacenan y/o envían la información a otro lugar.

Con este contexto que se propone el presente trabajo de tesis donde se aborda el diseño, desarrollo y evaluación de un sistema de medición inercial implementando acelerómetros y giroscopios con transmisión de mediciones de manera inalámbrica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Esta propuesta de tesis, aborda en primera instancia el estudio de los aspectos funcionales basados en principios de la física de estos tipos de sensores electrónicos (acelerómetros y giroscopios). El objetivo subyacente es comprender y dominar los fundamentos físicos y operacionales de giroscopios y acelerómetros electrónicos; y

como emplearlos y donde colocarlos para medir orientación y sobre todo para medir velocidad angular de mecanismos. De modo que esta tesis se enfoca principalmente a la medición de velocidad angular y como enfoque complementario explorar los principios para medición de orientación.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseño y desarrollo de sistema de medición inercial que integre los sensores giroscopios y acelerómetros, el microcontrolador, una batería y el módulo de comunicación inalámbrica.
- Diseño y desarrollo de la interfaz gráfica para el uso de la tarjeta de medición inercial.
- Construir una maqueta para realizar experimentos del sistema propuesto.
- Validar si las mediciones obtenidas con el sistema propuesto en este proyecto son confiables y determinar el rango de operación.

1.4. Estructura de la memoria de tesis

El contenido de esta tesis se encuentra organizado de la siguiente manera:

En el *Capítulo 2* se exponen los fundamentos de los sensores inerciales, motores eléctricos. También se describen los conceptos de mediciones e instrumentación.

En el *Capítulo 3* se describen los diferentes subsistemas o módulos que conforman un sistema de medición inercial.

En el *Capítulo 4* se define un sistema de base a los requerimientos de diseño. Además se especifica cada componente utilizado así como la interconexión de estos.

En el *Capítulo 5* se presenta el diseño de la interfaz de usuario para operar la tarjeta de medición inercial.

En el *Capítulo 6* se presentan las pruebas hechas a la tarjeta de medición inercial. También se emplea la calibración de la tarjeta para mejorar las mediciones.

En el *Capítulo 7* se analizan los análisis de resultados de las diferentes pruebas de velocidad angular.

Finalmente, en el *Capítulo 8* se muestran las conclusiones de la tesis, así como las recomendaciones sugeridas para el que se pretende realizar en el futuro.

Capítulo 2. Preliminares

2.1. Sensores Inerciales

2.1.1. Giroscopios

Los giroscopios miden la velocidad angular alrededor de unos ejes fijos con respecto a un plano inercial.

Podemos clasificar los giroscopios en 3 categorías:

- Giroscopios de masa giratoria.
- Giroscopios ópticos.
- Giroscopios de vibración.

Giroscopio de masa giratoria

Este tipo de giroscopio se basa en el principio del momento angular (Alonso y Finn, 1967). El cual está formado por un disco giratorio se encuentra sobre un eje libre, el disco se hace girar a una gran velocidad. En la Figura 1 se muestra un giroscopio y las partes que lo conforman.

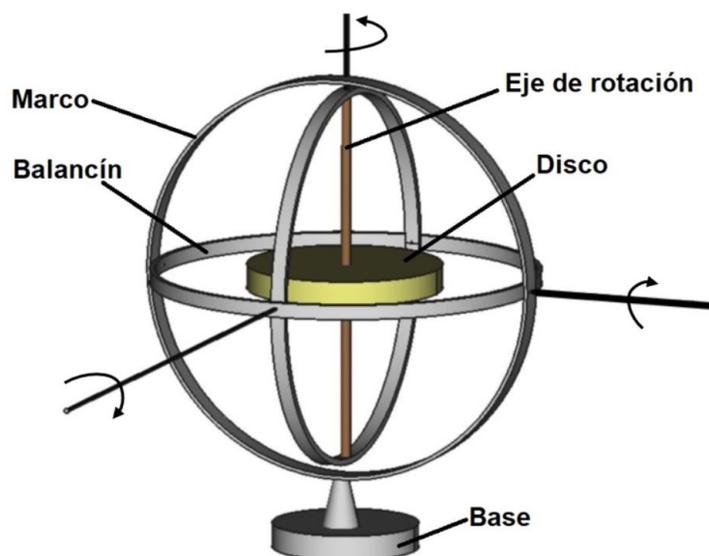


Figura 1. Giroscopio montado sobre un soporte de Cardano.

Consideremos la Figura 2 para entender el principio de funcionamiento, tenemos un disco con masa m que gira alrededor del eje Z con una velocidad angular constante ω . La velocidad lineal v es perpendicular al radio R del disco formado por el punto O y el punto A . Como el disco está rotando con respecto al eje Z tenemos el momento angular es:

$$\mathbf{L} = I\omega \quad (1)$$

Con dirección perpendicular al plano determinado por el radio R y el vector, v y paralelo a la velocidad angular ω . La cantidad I se denomina momento de inercia con respecto al eje de rotación.

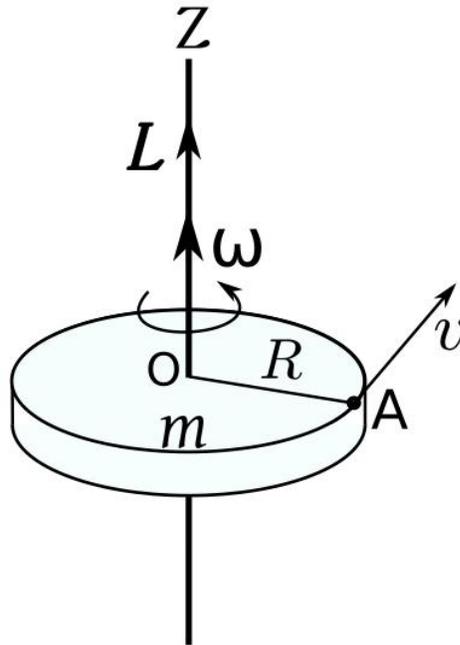


Figura 2. Momento angular del giroscopio.

Si aplicamos una fuerza sobre el eje de rotación Z crearemos un par τ que es el producto de unidad de fuerza por unidad de distancia. Quedando esta expresión:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (2)$$

Siendo \mathbf{r} el vector posición donde se aplicará \mathbf{F} con respecto al punto O , produciendo un cambio en el momento angular \mathbf{L} , dado por la siguientes expresiones:

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

$$d\mathbf{L} = \boldsymbol{\tau} dt \quad (4)$$

Por lo tanto se puede decir que el cambio en el momento angular tiene siempre la dirección del par. Además, si el par es perpendicular al momento angular \mathbf{L} , el cambio $d\mathbf{L}$ es también perpendicular a \mathbf{L} y el momento angular cambia de dirección pero no de magnitud. Así el eje de rotación cambiara de dirección de OZ a OZ_0 pero la magnitud de \mathbf{L} será la misma. Lo que origina el primer movimiento del giroscopio, llamada precesión. Que es el movimiento del eje de rotación alrededor de un eje fijo debido a un par externo. La velocidad angular de precesión ω se define como la velocidad a la cual el eje del disco OZ_0 rota alrededor del eje OZ ; esto es,

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

Los fenómenos giroscópicos tienen amplia aplicación. La tendencia de un giroscopio a mantener el eje de rotación fijo en el espacio es un principio el cual es utilizado en la estabilización a bordo de los barcos y en los pilotos automáticos de los aviones.

Giroscopio ópticos

Están basados en el efecto de Sagnac (Armenise *et al.*, 2010). Este induce un cambio de fase entre dos señales ópticas que se propagan en direcciones opuestas en un interferómetro de anillo que gira alrededor de un eje perpendicular al anillo.

Consideremos la Figura 3, La luz entra por el punto P y es dividida por un divisor de haz en dos señales que viajan en sentidos opuestos: a las que llamaremos CW y CCW . La señal CW viaja en sentido a las manecillas del reloj y la señal CCW viaja en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Cuando el interferómetro está en reposo (no está girando) ambas señales CW y CCW recorren el anillo con sentido contrario y llegan otra vez al divisor de haz al mismo tiempo. Puesto ambas señales viajan a la velocidad de la luz. El intervalo de tiempo en el que ambas señales regresan al divisor de haz está dado por la ecuación (6).

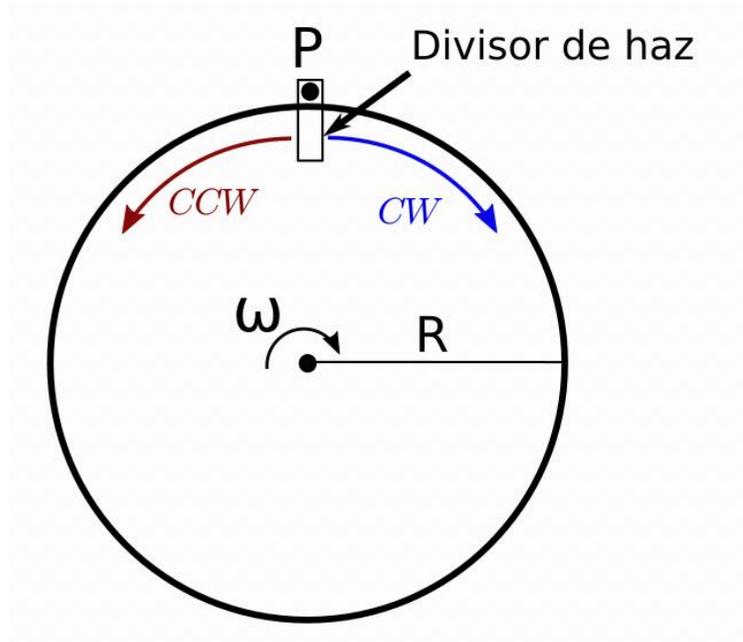


Figura 3. Interferómetro Sagnac.

$$t_r = \frac{2\pi R}{c} \quad (6)$$

Donde R es el radio del interferómetro.

c es la velocidad de la luz en el espacio libre.

Si se hace rotar el anillo en la misma dirección que CW , con una velocidad angular ω . El divisor de haz que inicio en el punto P , se estará moviendo durante el intervalo t_r y al transcurrir ese tiempo el divisor de haz estará en:

$$\Delta l = \omega R t_r \quad (7)$$

Como la señal CW viaja en el mismo sentido que ω , esta recorrerá una trayectoria mayor que $2\pi R$ para regresar al divisor de haz. Por el contrario, la señal CCW recorrerá una trayectoria menor a $2\pi R$ para regresar al divisor de haz. La Figura 4 ilustra esto.

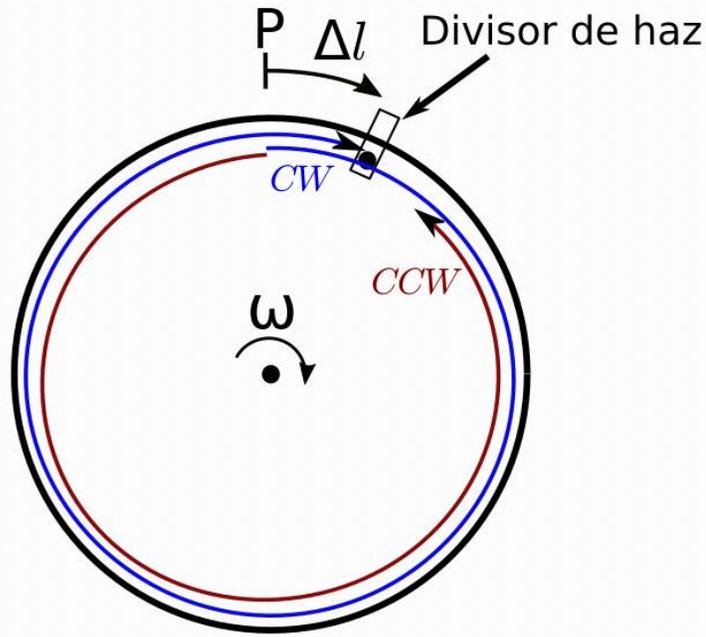


Figura 4. Trayectorias de los haces de luz después de t_r .

La diferencia entre las trayectorias de las señales $CW(T_{CW})$ y $CCW(T_{CCW})$ está dada por:

$$\Delta T = T_{CW} - T_{CCW} = 2\Delta l = 2\omega R t_r = \frac{4\pi\omega R^2}{c} \quad (8)$$

Ya que CW y CCW viajan a la misma velocidad. El retardo con el que las dos señales llegan completan una vuelta completa es:

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{c} = \frac{4\pi\omega R^2}{c^2} \quad (9)$$

Es este principio el que se utiliza en los giroscopios para determinar la velocidad angular. La fuente emite el haz de luz, se divide en las 2 señales que viajaran en sentido contrario, y se captura el tiempo en que las señales regresan al punto de origen. Posteriormente se calcula el retardo entre las señales con una resta $\Delta t = t_{CW} - t_{CCW}$. Y despejando ω de la ecuación (9), obtenemos la velocidad angular a la que giró el anillo:

$$\omega = \frac{\Delta t c^2}{4\pi R^2} \quad (10)$$

Giroskopios de vibración

Están basados en el efecto de Coriolis sobre una masa vibratoria (Armenise *et al.*, 2010). La fuerza de Coriolis es una fuerza ficticia que experimenta una masa m que se está moviendo en un sistema de referencia en rotación. Este efecto consiste en la existencia de una aceleración relativa del cuerpo en dicho sistema en rotación. Esta aceleración es siempre perpendicular al eje de rotación del sistema y a la velocidad del cuerpo. Para explicar mejor este efecto se muestra un modelo de un sistema *MRA* en un marco de referencia en rotación en la Figura 5.

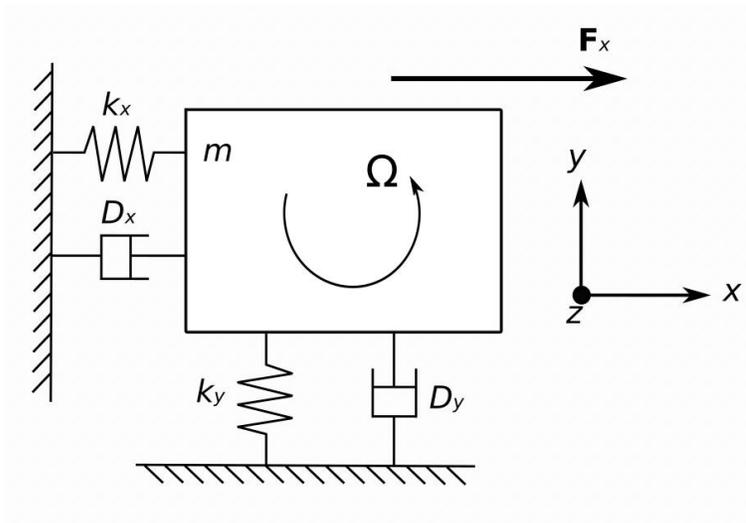


Figura 5. Sistema masa resorte amortiguador de dos grados de libertad.

La masa m puede moverse a lo largo del eje x y y , y Ω gira sobre el eje z . La fuerza de Coriolis está dada por:

$$\vec{F}_c = 2m(\vec{v} \times \vec{\Omega}) \quad (11)$$

Donde v es la velocidad de la masa.

Ω es la velocidad angular del marco de referencia.

La fuerza del efecto Coriolis en un sistema *MRA* de 2 grados de libertad puede ser derivado de las ecuaciones dinámicas que describen el movimiento del sistema en un marco de referencia en rotación.

Las oscilaciones en el eje x , son producidas directamente por la fuerza F_x , y las oscilaciones en el eje y son oscilaciones secundarias debido a que el sistema está gi-

rando sobre el eje z. Las ecuaciones de movimiento del sistema quedan de la siguiente manera:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} + D_x \frac{dx}{dt} + k_x x - 2\Omega m \frac{dy}{dt} = F_x \\ m \frac{d^2y}{dt^2} + D_y \frac{dy}{dt} + k_y y + 2\Omega m \frac{dx}{dt} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Donde Ω es el módulo de la velocidad angular.

D_x y D_y son los coeficientes del amortiguador para los ejes x y y respectivamente.

K_x y K_y son los coeficientes del resorte para los ejes x y y respectivamente.

Usualmente la oscilación primaria es excitada por una fuerza sinusoidal F_x , con una amplitud constante a_x . Así para maximizar a_x , la frecuencia angular de la fuerza de excitación w_d es típicamente cercana a la frecuencia de resonancia $w_x = \sqrt{\frac{k_x}{m}}$ del primer resonador. Así, $x(t)$ puede ser descrita como:

$$x(t) = a_x \sin(w_d t) \cong a_x \sin(w_x t) \quad (13)$$

Para calcular $y(t)$ podemos usar la segunda ecuación del sistema de ecuaciones (12), la cual podemos reescribir como:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{w_d}{Q_y} \frac{d^2y}{dt^2} + w_y^2 y = -2a_x \Omega w_x \cos(w_x t) \quad (14)$$

Donde $w_y = \sqrt{\frac{k_y}{m}}$ es la frecuencia de resonancia del segundo oscilador.

$Q_y = \sqrt{\frac{mk_y}{D_y}}$ es el factor de calidad del modo del sentido.

Después del tiempo transitorio, suponemos que $y(t)$ toma una forma general

$$y(t) = a_y \cos(w_x t + \phi_y) \quad (15)$$

Donde a_y es la respuesta de amplitud del oscilador secundario a w_x .

ϕ es la respuesta de fase del oscilador secundario a w_x .

Calculando la derivada y doble derivada de y y sustituyendo en la ecuación (14),

obtenemos:

$$\begin{aligned} & \left[-a_y w_x^2 \cos(\phi_y) + a_y w_y^2 \cos(\phi_y) \frac{a_y w_x w_y}{Q_y} \sin(\phi_y) \right] \cos w_x(t) \\ & + \left[a_y w_x^2 \sin(\phi_y) - a_y w_y^2 \sin(\phi_y) \frac{a_y w_x w_y}{Q_y} \cos(\phi_y) \right] \sin w_x(t) \\ & = -2a_x \Omega w_x \cos(w_x t) \end{aligned} \quad (16)$$

Que nos provee el siguiente sistema algebraico.

$$\begin{cases} \left[-a_y w_x^2 \cos(\phi_y) + a_y w_y^2 \cos(\phi_y) \frac{a_y w_x w_y}{Q_y} \sin(\phi_y) \right] = -2a_x \Omega w_x \\ \left[a_y w_x^2 \sin(\phi_y) - a_y w_y^2 \sin(\phi_y) \frac{a_y w_x w_y}{Q_y} \cos(\phi_y) \right] = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior, a_y y $y(t)$ nos quedan de la siguiente manera:

$$a_y = -\frac{2a_x \Omega w_x}{\sqrt{(w_x^2 - w_y^2)^2 + \frac{w_x^2 w_y}{Q_y^2}}} \quad (18)$$

$$y(t) = -\frac{2a_x \Omega w_x}{\sqrt{(w_x^2 - w_y^2)^2 + \frac{w_x^2 w_y}{Q_y^2}}} \cos(w_x t + \phi_y) \quad (19)$$

La ecuación (19) nos muestra que la amplitud del modo de sentido es directamente proporcional a la velocidad angular Ω . Así la velocidad angular puede ser estimada fácilmente en este sistema propuesto, midiendo la amplitud de la oscilación a lo largo del eje y .

2.1.2. Acelerómetros

Acelerómetros mecánicos

Se basan en la Segunda Ley de Newton y la ley de elasticidad de Hooke (Young *et al.*, 1996).

El mecanismo es el siguiente: Consta de una masa unida a un resorte o muelle dentro

de un cilindro, donde una punta del resorte está fija dentro del cilindro y la otra punta está unida a la masa de tal manera que la masa se encuentra suspendida dentro del cilindro y esta puede alargarse o comprimirse. La aceleración que se obtendrá es únicamente en el eje longitudinal.

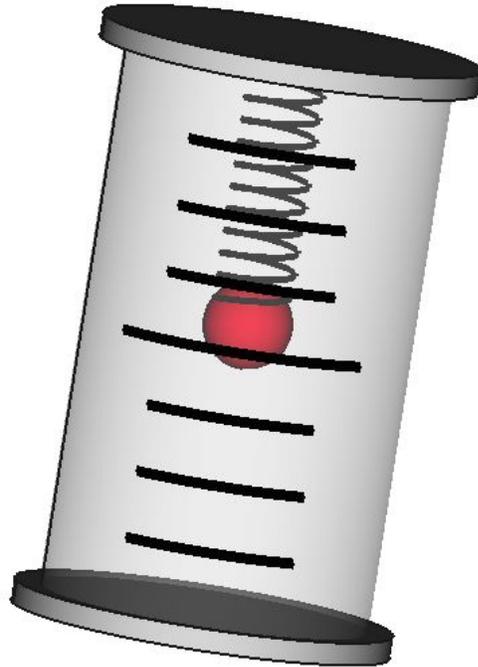


Figura 6. Acelerómetro mecánico que indica el desplazamiento de la masa.

La ley de elasticidad de Hooke nos dice que: El alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada.

$$\mathbf{F} = kx \quad (20)$$

Donde **F** es la fuerza aplicada.

k es la constante de elasticidad del muelle.

x es el desplazamiento de la masa.

La Segunda Ley de Newton o principio fundamental establece que las aceleraciones que experimenta un cuerpo son proporcionales a las fuerzas que recibe (Halliday *et al.*, 2013).

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (21)$$

Donde \mathbf{F} es la fuerza resultante que actúa sobre la masa m .

\mathbf{a} es la aceleración.

Cuando se aplica una fuerza para mover el cilindro, la masa m se desplaza una distancia proporcional a la fuerza aplicada (ley de Hooke), y que a su vez es proporcional a la aceleración aplicada al cilindro (segunda ley de Newton).

Se despeja aceleración de la ecuación (21) para obtener

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} \quad (22)$$

Y sustituyendo \mathbf{F} de la ecuación (20) en la ecuación (22) se obtiene

$$\mathbf{a} = \frac{k}{m}x \quad (23)$$

De la ecuación anterior podemos conocer el valor de la aceleración, puesto que k y m son conocidas, y la distancia x se puede medir. Además, comprobamos que la aceleración es proporcional al desplazamiento, con un factor k/m .

Debemos aclarar que la aceleración calculada es solo para un eje, si se desea conocer la aceleración en los 3 ejes (x, y, z) es necesario colocar 3 cilindros perpendiculares entre sí.

Acelerómetros piezoeléctrico

Su funcionamiento se basa en la piezoelectricidad (Naduvnamani y Iyer, 2016), que fue descubierta por los hermanos Curie en 1880. Esta se refiere a la capacidad de un material, por lo general cristales, para generar un potencial eléctrico bajo la aplicación de tensión mecánica, o viceversa, es decir, convertir el potencial eléctrico en tensión mecánica o deformación como se explica en la Figura 7.

Los materiales piezoeléctricos comúnmente están hechos de titanato zirconato de plomo (PZT), cuarzo, óxido de zinc y polifluoruro de vinilideno (PVDF), y por lo general son muy frágiles y no operan bien a altas temperaturas.

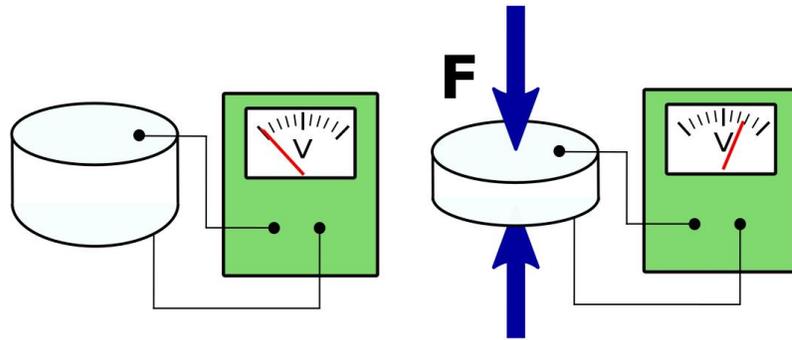


Figura 7. Diferencia de potencial generada al presionar un material piezoeléctrico.

Los acelerómetros piezoeléctricos están diseñados para medir vibraciones desde muy baja frecuencias (unidades de Hertz) a frecuencias que alcanzan las unidades de KHz, por tal motivo el rango de aplicaciones es muy amplio, desde baja aceleración y baja frecuencia para movimientos sísmicos hasta vibraciones de alto valor y frecuencia en máquinas industriales.

El modelo matemático (aproximado) es el siguiente: el acelerómetro está formado por una viga o capa de material piezoeléctrico, que tiene un largo L , un ancho W y un espesor t . Esta viga se encuentra entre 2 electrodos de platino de los cuales se toma el voltaje generado al comprimir la capa de material piezoeléctrico como se muestra en la Figura 8.

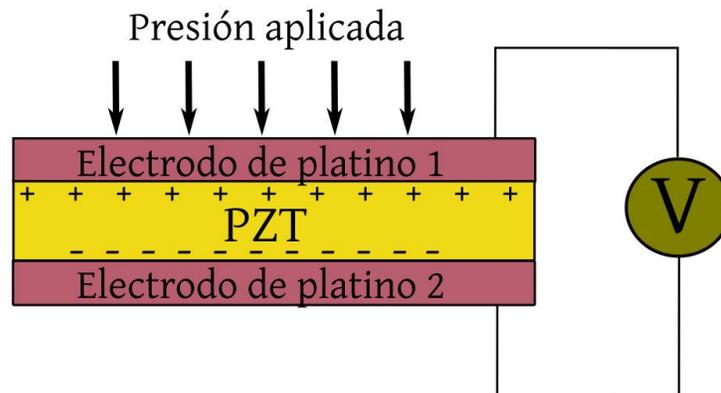


Figura 8. Generación de energía piezoeléctrica.

La fuerza aplicada está dada por:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (N) \quad (24)$$

Y la masa m está dada por:

$$m = \rho V \quad (\text{kg}) \quad (25)$$

Donde ρ es la densidad en $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

V es el volumen en m^3 .

a es la aceleración en $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

La expresión para el momento de flexión está dada por:

$$\mathbf{M} = \mathbf{F}_{eq} * l \quad \left(\frac{\text{N}}{\text{m}}\right) \quad (26)$$

Donde \mathbf{F}_{eq} es la fuerza de flexión equivalente dada en Newtons.

l es la mitad del largo de la viga.

El estrés de flexión es el siguiente:

$$\sigma = \frac{\mathbf{M} * c}{\mathbf{I}} \quad (\text{Pa}) \quad (27)$$

Donde \mathbf{M} el momento de flexión en $\frac{\text{N}}{\text{m}}$.

c es la mitad de la sección transversal en m .

\mathbf{I} es el momento de inercia m^4 .

Y el momento de inercia para un objeto cubico está dado por:

$$\mathbf{I} = \frac{L t^3}{12} \quad (\text{m}^4) \quad (28)$$

Donde L el largo de la viga.

t es el grosor de la viga.

Y la deformación mecánica está dada por:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{m}}\right) \quad (29)$$

Donde σ es el estrés de flexión en Pascales.

E es modulo de PZT.

$E = 1.9 \times 10^{11}$ Pa.

El voltaje por metro en el cristal está dado por:

$$V_{pm} = \frac{\varepsilon}{d} \quad (\text{volts}) \quad (30)$$

Donde d es la constante piezoeléctrica de PZT.

$$E = 480 \times 10^{-12} \frac{m}{V}.$$

Y el voltaje total:

$$V = V_{pm}L \quad (\text{volts}) \quad (31)$$

Y el voltaje total en términos de la aceleración:

$$V = \left(\frac{3\rho WL^2}{tEd} \right) \times a \quad (\text{volts}) \quad (32)$$

Acelerómetros capacitivos

Estos dispositivos son pequeños capacitores basculantes (Teslyuk *et al.*, 2010). Un capacitor común es un componente eléctrico que tiene la propiedad de almacenar energía eléctrica entre 2 placas conductoras paralelas separadas por un material dieléctrico. La capacitancia de un capacitor está dada por la distancia entre las placas conductoras, el área de las placas y el dieléctrico utilizado.

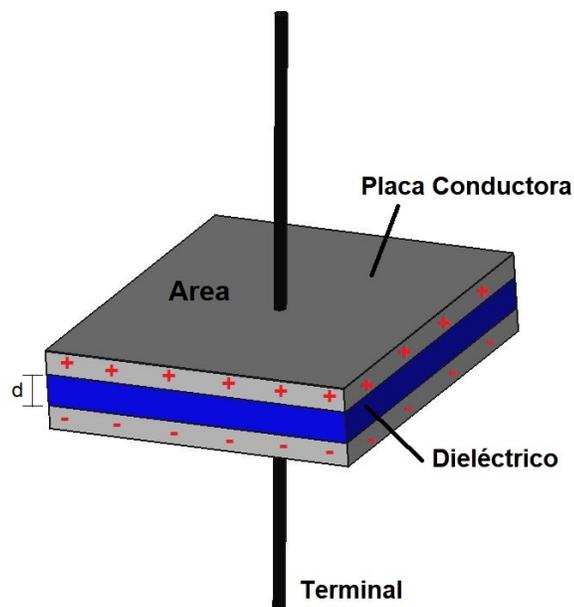


Figura 9. Esquema de un capacitor.

Así los acelerómetros capacitivos están hechos de forma tal que una de sus placas pueda moverse de forma proporcional a la fuerza externa, y de esta forma la capacitancia está cambiando en respuesta a la variación de la aceleración.

En el modelo presentado en la Figura 10: m es la masa que se moverá, F es la fuerza aplicada, k es el coeficiente de elasticidad y b es el coeficiente de amortiguamiento (Ogata y Yang, 2002).

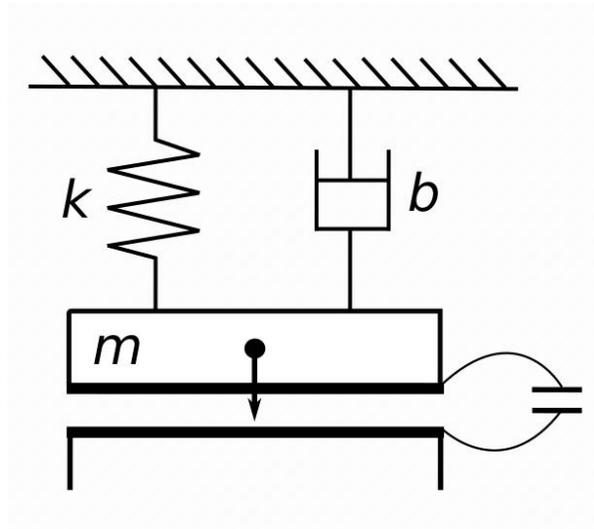


Figura 10. Modelo simplificado de un acelerómetros capacitivo.

El modelo matemático es descrito por una ecuación diferencial de segundo orden:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F, \quad F = F_a + F_{el} \quad (33)$$

Donde x es el desplazamiento de la masa.

F_a es la fuerza mecánica.

F_{el} es una fuerza predefinida por el campo electrostático.

Para determinar el valor de la fuerza electrostática se utiliza la siguiente expresión:

$$F_{el} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2}{2(d-x)^2}, \quad C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d-x} \quad (34)$$

Donde C es la capacidad eléctrica.

S es el área de las placas del capacitor.

U es la tensión aplicada.

d es la distancia inicial entre las placas del capacitor.

ε y ε_0 son la conductividad del ambiente entre las placas del capacitor y la conductividad en el vacío respectivamente.

2.1.3. MEMS

Los sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) se refieren a dispositivos que tienen una longitud característica inferior a 1 milímetro pero mayor a 1 micrómetro, que combinan componentes eléctricos y mecánicos, y que se fabrican utilizando tecnologías de procesamiento por lotes de circuito integrado (Younis, 2011).

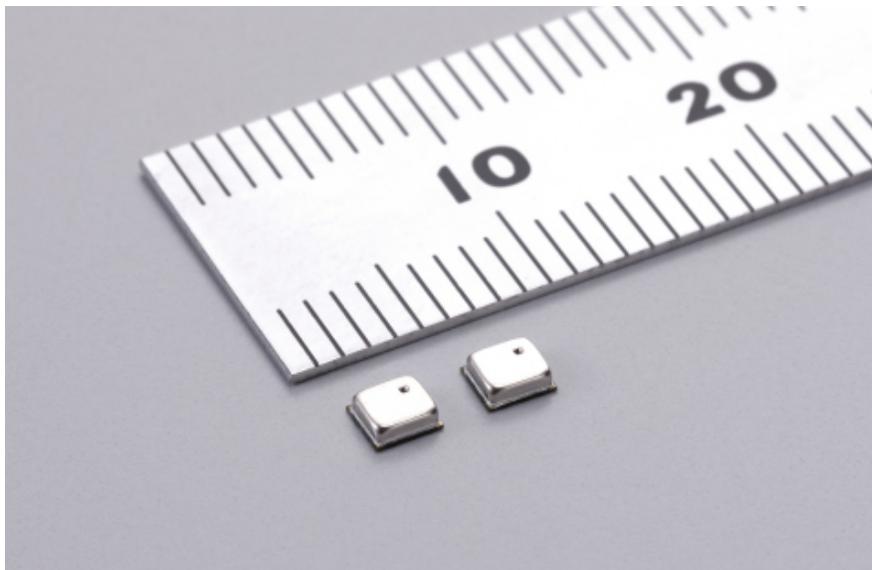


Figura 11. Sensor acelerómetro empaquetado en un circuito integrado.

Hoy en día, muchos giroscopios y acelerómetros se basan en este tipo de tecnología. Así, los componentes son más pequeños, livianos, económicos, tienen bajo consumo de energía.

2.2. Motores Eléctricos

2.2.1. Motor DC

El motor de corriente continua es una máquina que convierte energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético.



Figura 12. Motor de corriente directa.

Partes de un motor DC.

- **Estátor:** da soporte mecánico al aparato y contiene los polos de la máquina (devanados o con imanes).
- **Rotor:** es generalmente de forma cilíndrica, devanado y con núcleo, alimentado con corriente directa a través de las escobillas.
- **Escobillas:** son los elementos de carbón que ejercen la conexión eléctrica entre la parte fija y la giratoria dentro de un motor eléctrico (rotor).
- **Conmutador:** es un interruptor eléctrico rotativo que periódicamente cambia la dirección de la corriente entre el rotor y el circuito externo.
- **Eje:** Es una pieza metálica que compone al rotor y que destinado a guiar el movimiento de rotación del motor.

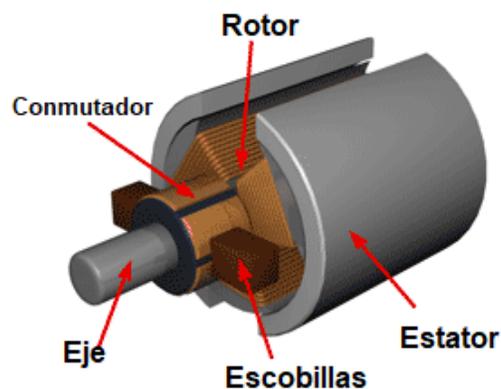


Figura 13. Composición de un motor eléctrico.

Principio de funcionamiento.

$$F = B \cdot L \cdot I \quad (35)$$

Donde F es la fuerza en Newtons.

I es la intensidad de corriente en amperios.

L es la longitud del conductor en metros.

B es la densidad de campo magnético debido a imanes/corriente.

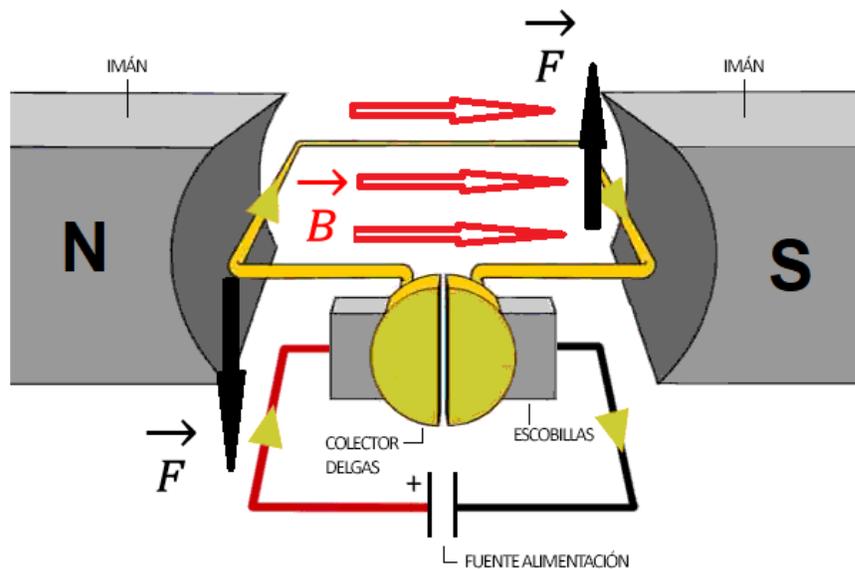


Figura 14. Funcionamiento de un motor eléctrico CC.

2.2.2. Motor DC sin escobillas (Brushless)

Los motores brushless son motores eléctricos que constan de un rotor formado por una serie de imanes permanentes y un estátor bobinado (Chau, 2015). Los imanes permanentes en el rotor es la característica principal de estos motores y por los que se les llama “sin escobillas” o brushless. Están diseñados para conmutar la tensión en sus devanados, sin sufrir desgaste mecánico. Para este efecto utilizan controladores digitales y sensores de posición. Estos motores son frecuentemente utilizados en aplicaciones de baja potencia, por ejemplo en los ventiladores de computadoras.



Figura 15. Motor CC brushless.

Para entender el principio de funcionamiento consideremos la Figura 16, el rotor está compuesto por dos imanes y al energizar los polos de la bobina color naranja se produce un campo magnético que interactúa con el campo generado con los imanes produciendo que el rotor gire un paso en sentido contrario a las manecillas del reloj. El siguiente paso es desenergizar la bobina naranja y energizar la bobina color amarillo para generar el mismo par con el mismo sentido. Repetir este proceso en cada una de las bobinas es lo que produce que el rotor gire en un sentido.

Es complicado controlar la velocidad de giro de este tipo de motor ya que es imposible hacer los cambios de conexiones entre las terminales de los embobinados a mano, es por ello que se utiliza un controlador electrónico de velocidad para poder variar las velocidades de giro.

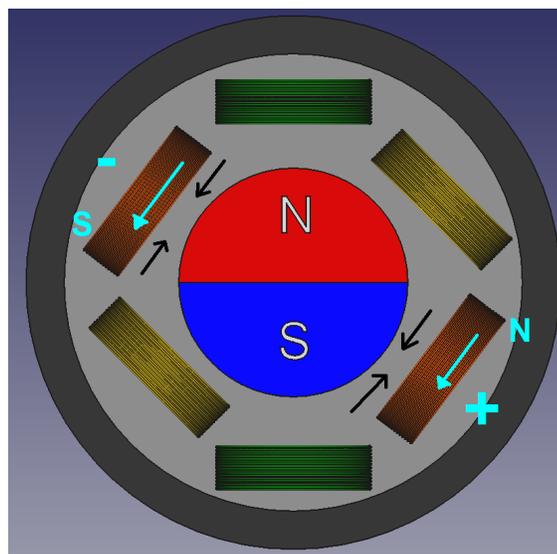


Figura 16. Motor CC brushless.

2.3. Medición y calibración

Un **instrumento de medición** es un dispositivo que transforma una variable física de interés (el mensurando) en una forma adecuada para ser mostrada o almacenada (la medición) (Webster, 1999). Al proceso de obtener experimentalmente información de un mundo físico para determinar el valor o cantidad del mensurado se le conoce como **medición**. Para que este valor sea consistente se suele tener un sistema estándar de unidades, con esto es posible comparar mediciones de diferentes instrumentos. La Figura 17 ilustra estos conceptos.

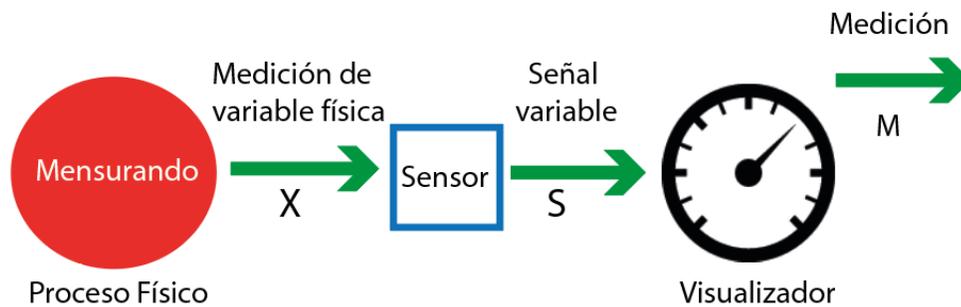


Figura 17. Modelo de un instrumento simple.

Como se muestra en la figura anterior, el elemento clave de un instrumento de medición es el **sensor**, cuya función es tomar la variable física y convertirla en una señal de salida variable que puede ser manipulada de distintas maneras, tales como: amplificarse, transmitirse, almacenarse, filtrarse entre otras. Normalmente, un instrumento de medición tiene las siguientes etapas: una etapa de medición sensor o transductor, etapa de acondicionamiento de señal y una etapa de salida o terminación. La Figura 18 muestra las etapas de un instrumento de medición.

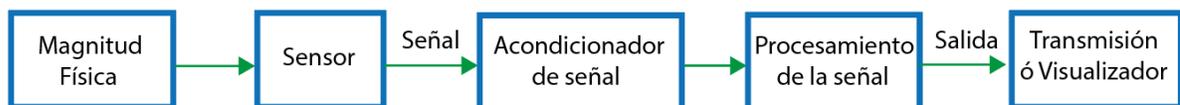


Figura 18. Estructura típica de un instrumento de medición.

Un instrumento tiene algunas características que representan la calidad y confiabilidad del mismo, que a su vez incrementa o reduce el costo del dispositivo.

Exactitud

La exactitud de un instrumento se define como la diferencia entre el valor real del mensurando y el valor medido indicado por el instrumento. Típicamente, el valor real se define en referencia a algún estándar acordado.

Precisión

La precisión en un sentido estricto se refiere a la repetibilidad de la medición usando un instrumento dado (Raghavendra y Krishnamurthy, 2013). El error aleatorio en las mediciones a veces se denomina ruido, que puede definirse como una señal que no lleva información útil.

Para cualquier medición en particular, habrá algún error debido a fuentes de error sistemáticas (sesgo) y aleatorias (ruido). La combinación de error sistemático y aleatorio puede visualizarse en la Figura 19, la cual muestra las mediciones de velocidad angulas hechas a un objeto que se encuentra girando a $30rpm$.

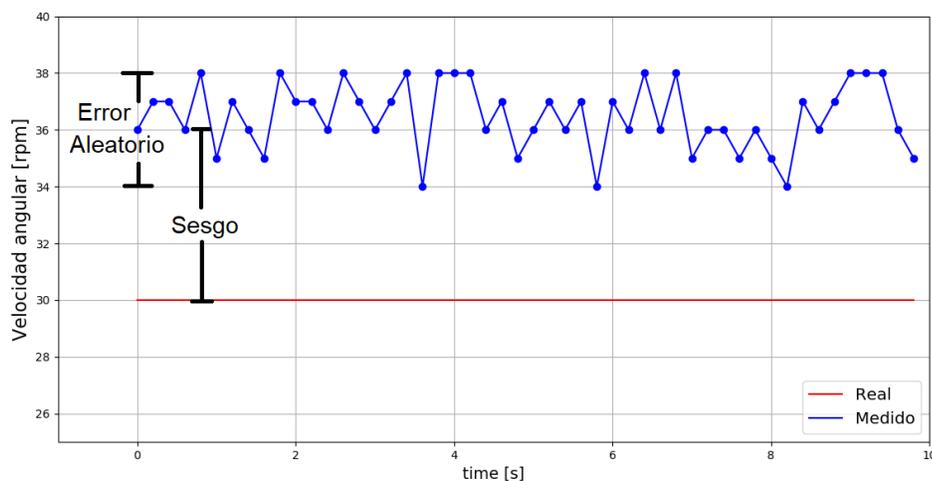


Figura 19. Errores en las mediciones de velocidad angular de un objeto.

Como puede verse en la figura anterior, el error total en cada muestra resulta de la suma del error por sesgo y el error aleatorio. El sesgo da como resultado que las mediciones tengan un desajuste de aproximadamente $6rpm$. El tamaño de la agrupación está determinado por fuentes de error aleatorias y es una medida de la precisión del

disparo.

Calibración

La relación entre la variable física de entrada y la señal de salida variable para un sensor específico se conoce como la calibración. La cual es esencial en un instrumento para verificar su desempeño con respecto a los estándares conocidos. Esto proporciona consistencia en las lecturas y reduce los errores, validando así las mediciones de manera universal. Típicamente, un sensor o un instrumento de medición se calibra haciendo una serie de mediciones, proporcionando una entrada física conocida al sistema y registrando la salida, después ir aumentando el valor de la entrada física y registrar la señal de salida nuevamente. Los datos obtenidos se trazan en una curva de calibración como se muestra en la Figura 20.

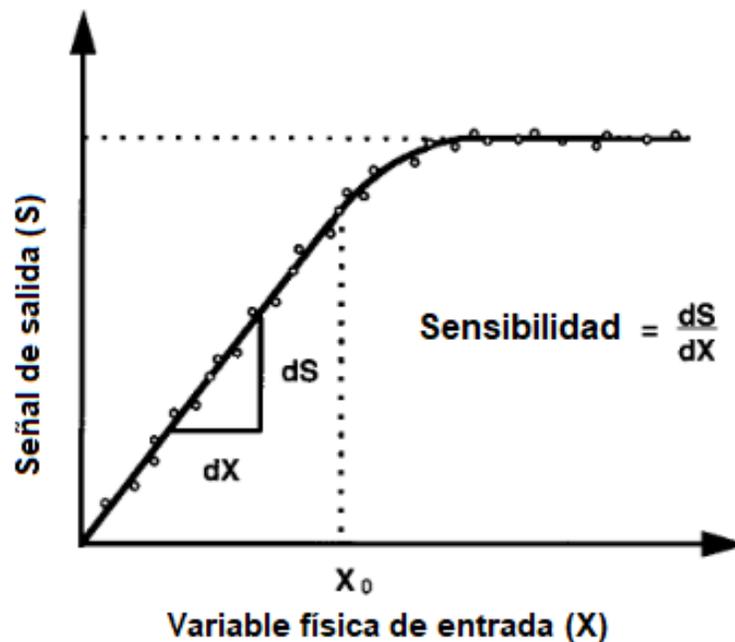


Figura 20. Curva de calibración.

La sensibilidad del dispositivo está determinada por la pendiente de la curva de calibración.

Capítulo 3. Requerimientos de diseño de la tarjeta de medición

En el desarrollo de tarjetas de circuitos impresos existen especificaciones que se deben cumplir de manera cuantitativa y cualitativa, estas se conocen como **requerimientos de diseño**. Los cuales son establecidos antes de comenzar con el desarrollo de la tarjeta electrónica.

Los aspectos más importantes son definir que se desea diseñar (¿cuál es el producto final?, ¿qué debe hacer la tarjeta?). Después se debe definir lo siguiente: presupuesto, componentes electrónicos a utilizar, tamaño de la tarjeta, tiempo de entrega. Como se vio en los objetivos específicos, para este proyecto de tesis se desea diseñar un sistema de medición inercial que integre los sensores giroscopios y acelerómetros, el microcontrolador, una batería y el módulo de comunicación inalámbrica.

A continuación se describen los componentes que serán parte del sistema de medición inercial.

3.1. Baterías

Son dispositivos que almacenan energía en celdas electroquímicas y convierten esa energía química en energía eléctrica, estas son una pieza clave en el desarrollo de proyectos eléctricos/electrónicos, ya que son las que proporcionan la energía para todo el sistema.

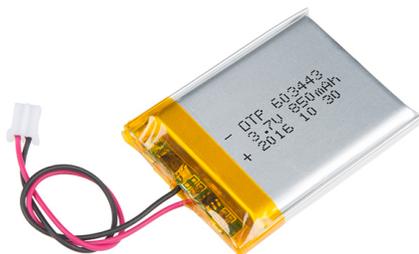


Figura 21. Batería de iones de litio.

Desde sistemas tan ordinarios como las baterías de los automóviles que dan la energía para accionar el arrancador, hasta sistemas más remotos y difíciles de ser reemplazados como las baterías de los satélites que alimentan a todo el satélite.

Las baterías se clasifican o se dividen en 2 clases (Horowitz y Hill, 1989), en función a la posibilidad de ser recargadas una vez que han perdido su carga eléctrica:

- **Baterías primarias:** No se pueden recargar. Esto es una vez que ha cedido toda su energía al circuito electrónico a alimentar la batería queda descargada y es inútil por lo tanto es necesario reemplazarla para que el circuito funcione. Un ejemplo de este tipo de baterías son las del control remoto de la televisión, funcionan durante un tiempo, pero una vez que se han descargado es necesario cambiarlas por unas nuevas para que el control remoto funcione.
- **Baterías secundarias:** Si se pueden recargar. Este tipo de baterías entregan energía de la que han adquirido. Ósea que para que puedan suministrar energía a un circuito eléctrico primero es necesario cargar la batería. Y si esta batería se descarga, es posible volver a cargarla, también es posible cargar la batería, aunque no esté totalmente descargada. Un ejemplo de este tipo de baterías son las baterías de los celulares que para que funcione tenemos que conectar el celular al cargador.

Hay algunas características que deben ser tomadas en cuenta para poder elegir una batería e integrarla al proyecto.

- **Voltaje:** Es la característica más importante al considerar el uso de una batería, ya que si no se tiene cuidado en el rango de voltaje que soportan los componentes y el voltaje de batería es mayor que el voltaje con el que trabaja el sistema es probable que algunos componentes electrónicos sufran algún daño y dejen de funcionar. Por lo contrario si el voltaje de batería es menor que el voltaje de funcionamiento del sistema, este nunca encenderá.
- **Capacidad:** Es la medida de la carga que puede almacenar la batería, es decir, la cantidad máxima de energía que se puede extraer de la batería. La unidad para indicar la capacidad es Amperes-hora (Ah).

- **Dimensiones:** El tamaño de la batería es un aspecto importante a considerar ya que esta deberá estar cerca de los circuitos que alimentara. Su tamaño y forma deberá ser tomado en cuenta para crear los modelo mecánicos, soportes para fijarla, y en el caso en que sea un sistema móvil como un dron debe ser tomado en cuenta su peso.
- **Precio:** Todas las características anteriores se ven reflejadas en el precio, entre mejor sea la batería (mayor capacidad, mejor eficiencia, mejor material) el precio será mayor. Por tanto es importante hacer un balance entre la batería deseada y la que se puede comprar con el presupuesto que se tiene para el proyecto.

3.2. Reguladores de voltaje

Es un componente electrónico que a partir de un voltaje de entrada mantiene un voltaje de salida a un valor deseado o cerca de ese valor. Existen diferentes tipos y modelos de reguladores de voltaje. Reguladores de voltaje en AC y en DC. Dentro de la sección de reguladores de corriente continua también existen diferentes tipos que se basan en la forma en que regulan o mantienen su voltaje de salida lo más cercano posible al valor deseado.

Reguladores de tensión lineal: Son los más sencillos de utilizar. Están basados en un transistor de potencia que actúa como una resistencia en serie entre la entrada y la carga que opera en su región lineal, así el transistor conduce constantemente. Y a la salida el voltaje es fijo (sin oscilaciones).

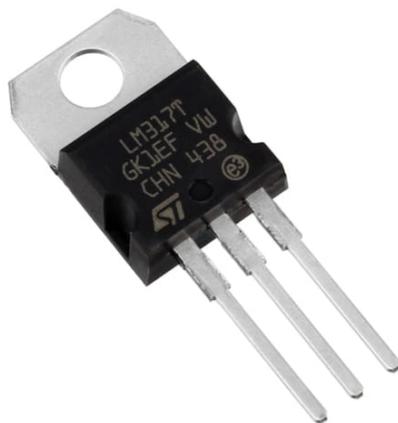


Figura 22. Regulador de tensión lineal LM317.

Estos reguladores son poco eficientes ya que el circuito tiende a calentarse mucho y esto provoca que consuman mucha potencia. Se suelen utilizar disipadores de calor para evitar que el regulador llegue a calentarse al punto en el que se quemara, aunque aun así se desperdicia energía en calor. La eficiencia de este tipo de reguladores es del 60%. Es decir de la potencia que reciben solo el 60% de esa potencia entregan a la salida, el otro 40% se disipa en calor.

Reguladores conmutados: Son dispositivos donde un transistor está conmutando el modo de operación, trabaja un tiempo en la región de corte y otro en la región de saturación de forma periódica. Esto hace que el circuito genere pulsos de voltaje que al pasarlos por un capacitor se obtiene nivel de voltaje lineal con pequeñas ondulaciones.

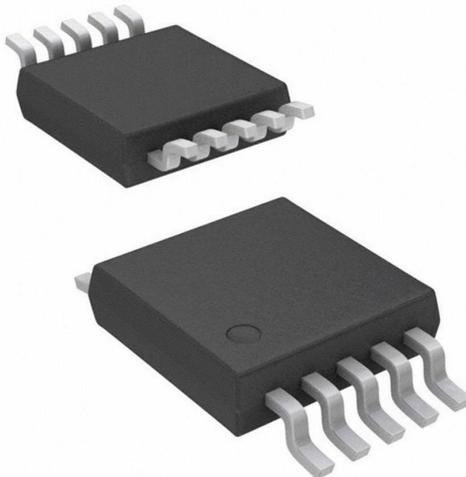


Figura 23. Modelo del regulador conmutado TPS62046.

3.3. Unidad de proceso y control

Un microcontrolador (abreviado μ C, UC o MCU) es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria (Valvano, 2011). Está compuesto de varios bloques funcionales que cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida.



Figura 24. Microcontrolador de montaje superficial de la compañía Microchip.

3.4. Módulo de transmisión inalámbrica

La comunicación inalámbrica o sin cables es aquella en la que la comunicación (emisor/receptor) no se encuentra unida por un medio de propagación físico, sino que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio. En este sentido, los dispositivos físicos solo están presentes en los emisores y receptores de la señal, entre los cuales encontramos: antenas, computadoras portátiles, PDA, teléfonos móviles, etc. Existen proyectos o procesos donde no es posible tener un cable entre la tarjeta de adquisición de datos o el módulo de lectura de sensores y la computadora donde se guardan y muestran los datos medidos, ya sea por cuestiones de que el sistema que toma las mediciones se está moviendo, o requiere alejarse de el punto de almacenamiento. En estos casos se requiere de transmitir las lecturas de los sensores u otra información por transmisión inalámbrica.

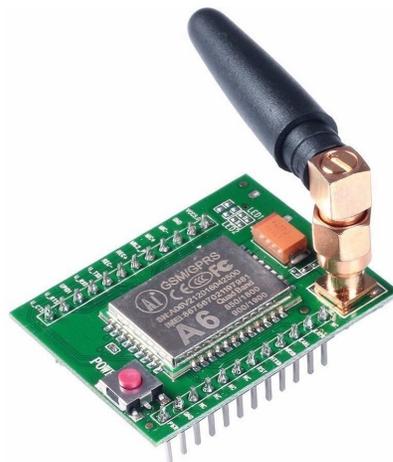


Figura 25. Modulo transmisión inalámbrica con antena.

3.5. Periodo de muestreo

Los sensores digitales hacen mediciones de variables físicas que son continuas en el tiempo, posteriormente esas mediciones pasan por un proceso de conversión analógico-digital (ADC) para entregar a la salida un valor o código digital que represente el valor de la medición (De Silva *et al.*, 2015). Estas mediciones son hechas en intervalos de tiempo, a esto se le conoce como tiempo de muestreo o periodo de muestreo, que sencillamente es el tiempo transcurrido entre cada muestra obtenida. Es aquí en donde entra la capacidad de los sensores, hay sensores que tiene un periodo de muestreo muy pequeño (en microsegundos) y otros con un periodo mayor de cuestión de segundos, incluso hay sensores donde el periodo de muestreo puede ser determinado por el usuario. La elección del sensor tomando en cuenta su periodo de muestreo depende de la razón de cambio del proceso u objeto que se desea medir, ya que el periodo de muestreo siempre debe ser menor a la razón de cambio del proceso. Por ejemplo, si se desea medir un proceso que constantemente está cambiando en cuestión de nanosegundos no se debe utilizar un sensor que su periodo de muestreo mínimo sea de milisegundos o segundos, ya que el sensor no es capaz de detectar esos cambios que tuvo el proceso.



Figura 26. Señal analógica muestreada con periodo de muestreo T .

Capítulo 4. Diseño de la tarjeta MMAVA

4.1. Modelo propuesto

Teniendo en cuenta los requerimientos mencionados en el capítulo 3, se presenta el siguiente diagrama a bloques del sistema propuesto. Al cual se nombrara MMAVA “Módulo de Medición de Aceleración y Velocidad Angular”.

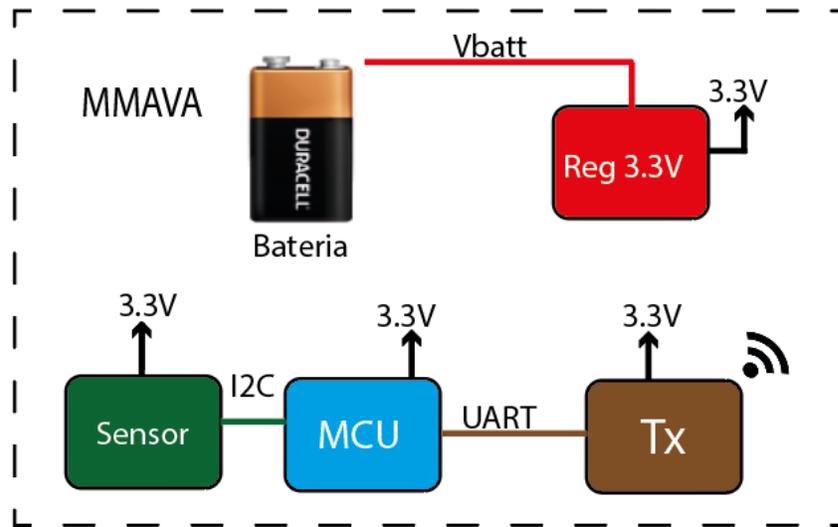


Figura 27. Diagrama a bloques de la tarjeta MMAVA.

El diseño de una tarjeta de circuito impreso consta esencialmente de 3 partes: diseño de esquemáticos, selección de componentes, y diseño de layout.

En este proyecto de tesis se utilizó el software Altium Designer para crear el proyecto que contiene los diagramas esquemáticos y diagrama layout, también provee la funcionalidad para generar una lista con los componentes utilizados, su descripción, valor, fabricante, precio, entre otras cosas.

4.2. Diseño de esquemáticos

Un diagrama esquemático representa de forma gráfica un circuito electrónico (Combs y Holden, 2001). En este cada componente del circuito se representa con un símbolo, además de mostrar las conexiones de alimentación y de señal eléctrica entre los distintos dispositivos. Cuando el proyecto es muy grande (tiene muchos componentes electrónicos) se recomienda dividir el circuito en varios diagramas esquemáticos

interconectados entre si. De esta manera hay un mayor orden en el proyecto, ya que al ser más chicos los esquemáticos son más fáciles de manejar, modificar o reutilizar.

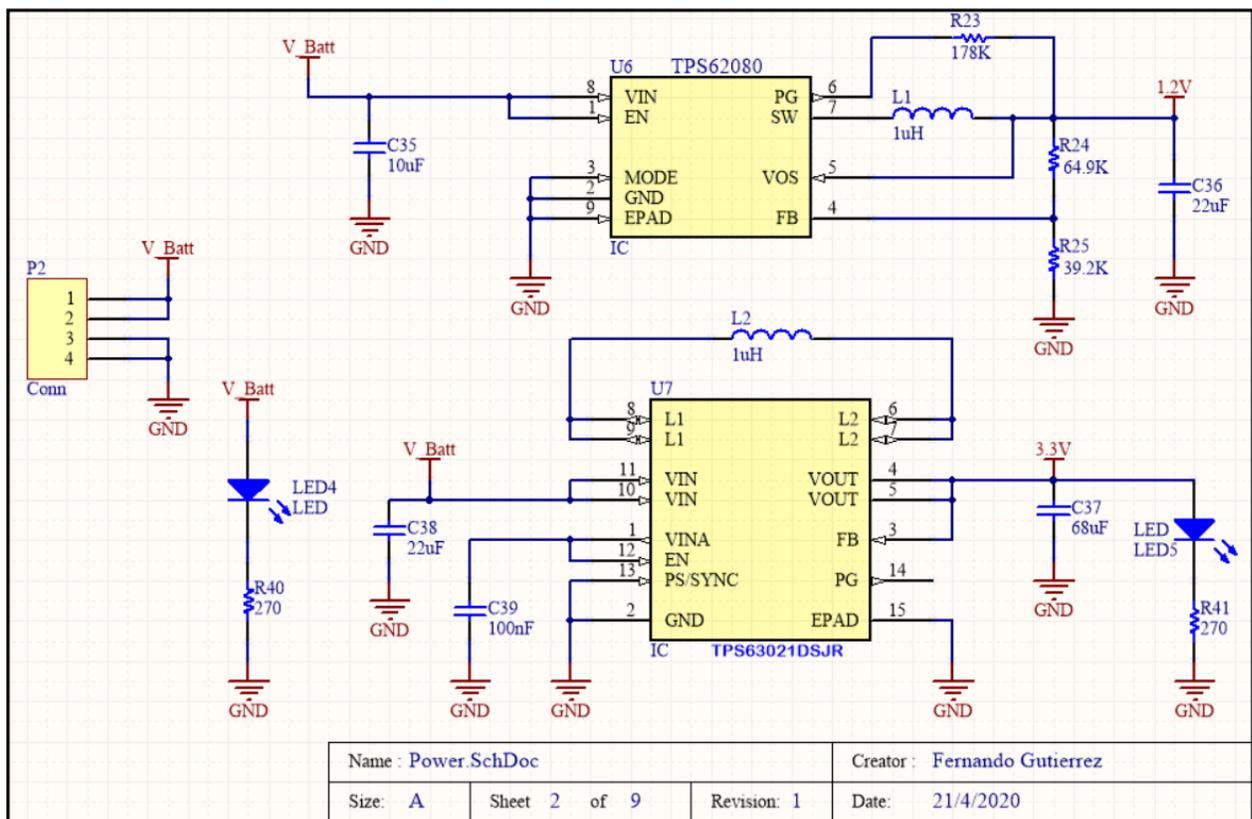


Figura 28. Diagrama electrónico de los reguladores de voltaje.

La Figura 28 muestra la conexión de los circuitos integrados reguladores de voltaje. Este diagrama se enfoca en proveer la energía para toda la tarjeta. La batería se une al conector *P2*, que es por donde entra la energía para el sistema. Las terminales 1 y 2 del conector se unen a un nodo al cual llamamos *V_Batt*. Esto es útil, ya que cada vez que queramos utilizar el voltaje de batería, solo debemos conectarnos a este nodo. Como nuestro sistema MMAVA funciona con dos niveles de voltaje, fue necesario utilizar dos reguladores de voltaje. El regulador *U6* toma del nodo *V_Batt* el voltaje de batería y regula a su salida el un voltaje con nivel de 1.2V. Y el regulador *U7* también toma el voltaje de batería y regula en su salida un voltaje de 3.3V. Estos nuevos nodos 1.2V y 3.3V serán utilizados en otros esquemáticos para alimentar a otros componentes.

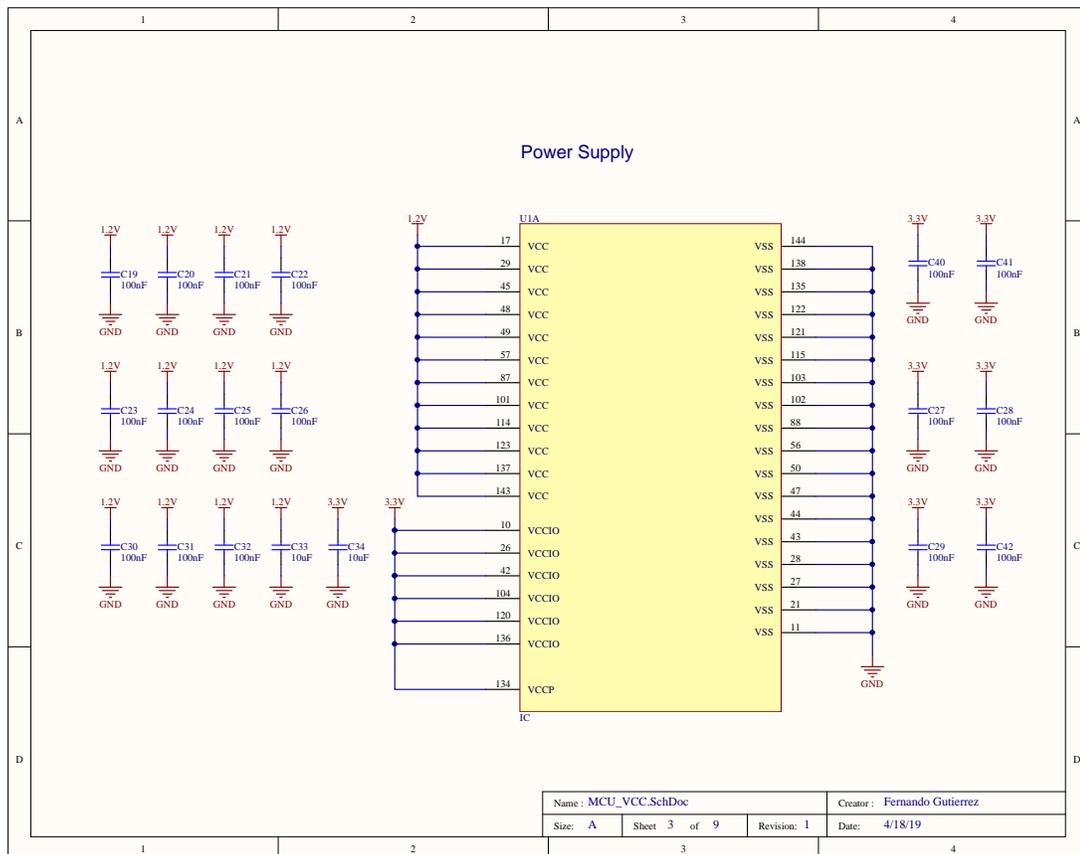


Figura 29. Esquemático de la alimentación del microcontrolador.

La Figura 29 muestra de que manera polarizar el microcontrolador. Se toman los nodos de 1.2V y 3.3V y son conectados a sus respectivas entradas. Estas conexiones están especificadas en la hoja de datos del microcontrolador. Ya que algunos módulos internos funcionan con un voltaje de alimentación de 3.3V y algunos otros con un voltaje de 1.2V. La siguiente tabla muestra como polarizar correctamente el microcontrolador.

Tabla 1. Terminales de alimentación del microcontrolador TMS5701224CPGE.

Señal	Voltaje	Terminales	Descripción
VCC	1.2V	17, 29, 45, 48, 49, 57, 87, 101, 114, 123, 137, 143	Alimentación del núcleo
VCCIO	3.3V	10,26,42,104,120,136	Voltaje de operación para los puestos de entrada y salida
VSS	Tierra	11, 21, 27, 28, 43, 44, 47, 50, 56, 88, 102, 103, 115, 121, 122, 135, 138, 144	Referencia a tierra

Como se ve en el esquemático se agregaron algunos capacitores de filtrado para las entradas de alimentación, ya que hay un rango permitido de voltaje de alimentación. Estos capacitores quitan los rizados que pudiera tener los voltajes de entrada.

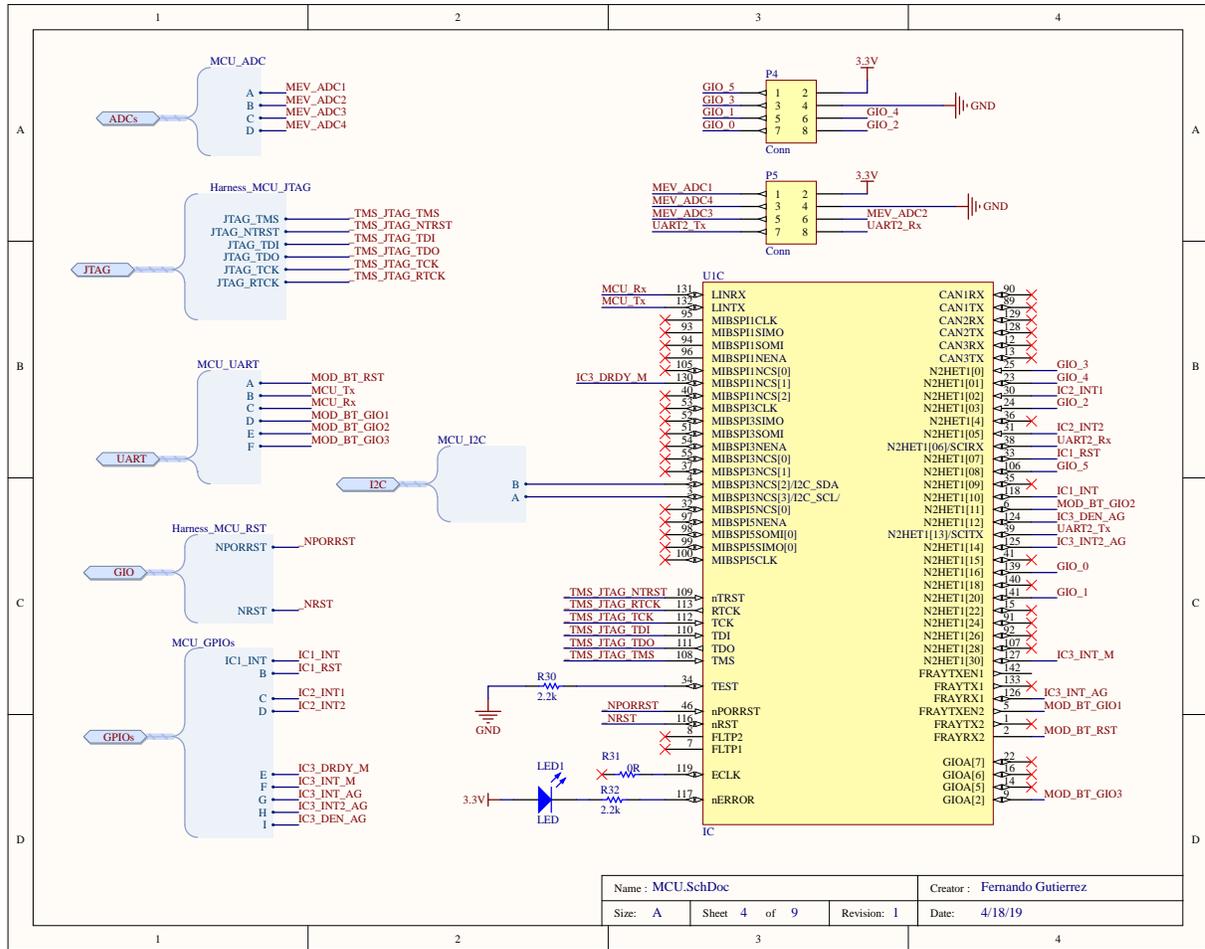


Figura 30. Esquemático de conexión de los puertos del microcontrolador.

Como se mencionó en el Capítulo 3 el microcontrolador es la unidad de procesamiento, de manera que este es el encargado de cumplir con el objetivo de la aplicación y tener el control de la mayoría de componentes que se encuentran en la placa. El esquemático de la Figura 30 muestra las conexiones de los puertos de entrada y salida digitales, entradas analógicas, puertos de comunicación UART e I2C, entre otros.

Ya que este chip contiene 80 terminales es más fácil de visualizar y desarrollar el diagrama separando los diferentes tipos de señales. Para esto se crearon pequeños grupos llamados “Harness” (es el nombre que le da el software) los cuales contienen a las diferentes líneas eléctricas para conectar al microcontrolador con algún otro componente (resistencia, capacitor, sensor, etc). Por ejemplo el “Harness_MCU_JTAG” contiene todas las líneas de comunicación para programar al microcontrolador y el “Harness_MCU_I2C” contiene las 2 señales de protocolo I2C para comunicarse con los sensores inerciales.

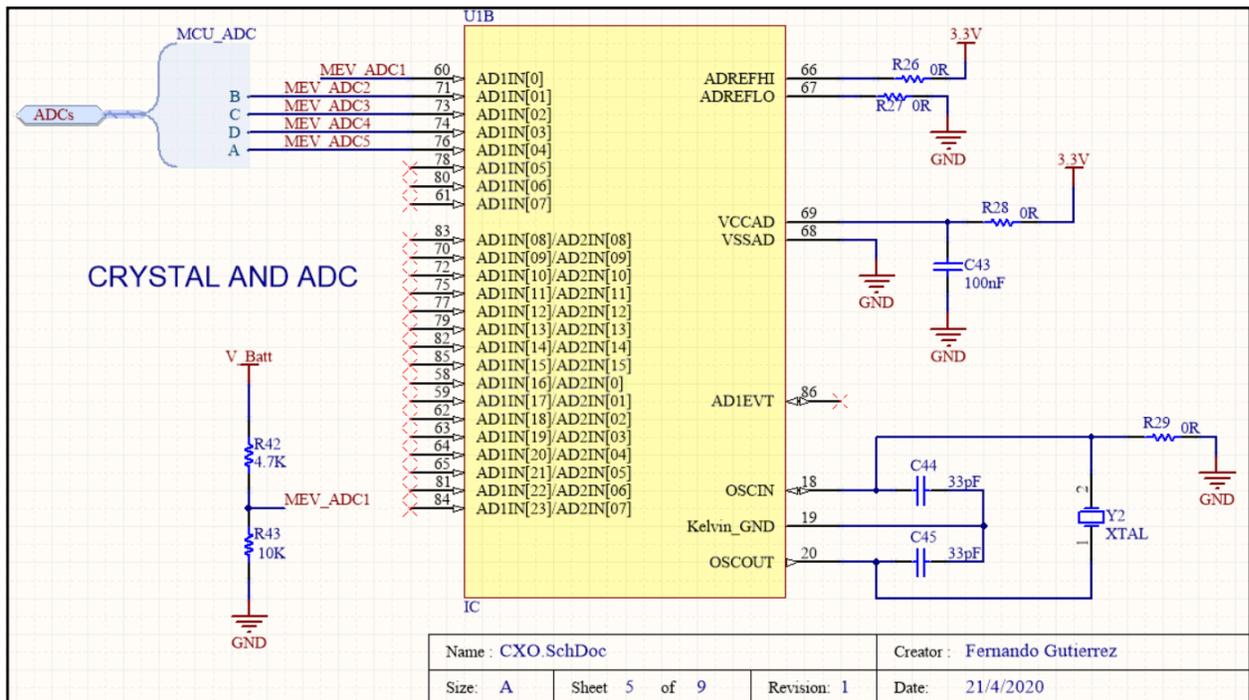


Figura 31. Esquemático de conexión del cristal de cuarzo.

La Figura 31 muestra el esquemático del cristal y como es que se conecta al microcontrolador para que funcione. Ya que este componente en conjunto con los capacitores “C44” y “C45” forman el circuito oscilador que produce la señal de reloj (conmutando entre 3.3V y 0V), la cual se conecta a la entrada “OSCIN” (terminal 19).

Ya que la tarea principal de la tarjeta es medir la velocidad angular y aceleración, se propone la utilización de varios sensores inerciales de bajo costo para probarlos y comparar sus mediciones, y así elegir el que nos entregue mediciones más exactas. Dentro del estudio de estos sensores se encontró que en su mayoría se comunican con el protocolo I2C (ducto inter-circuitos integrados, por sus siglas en ingles), el cual permite interconectar varios sensores en el mismo ducto. Por tanto, se propuso implementar 3 sensores que se comunicaran con este protocolo.

La Figura 32 muestra la como se configura el ducto I2C. La línea de datos SDA (Serial Data) y la línea SCL (Serial Clock), son conectadas al voltaje de alimentación a través de una resistencia para mantener el estado lógico en “1”. El dispositivo maestro es el responsable de generar la señal de reloj SCL y de definir con que esclavo se quiere comunicar.

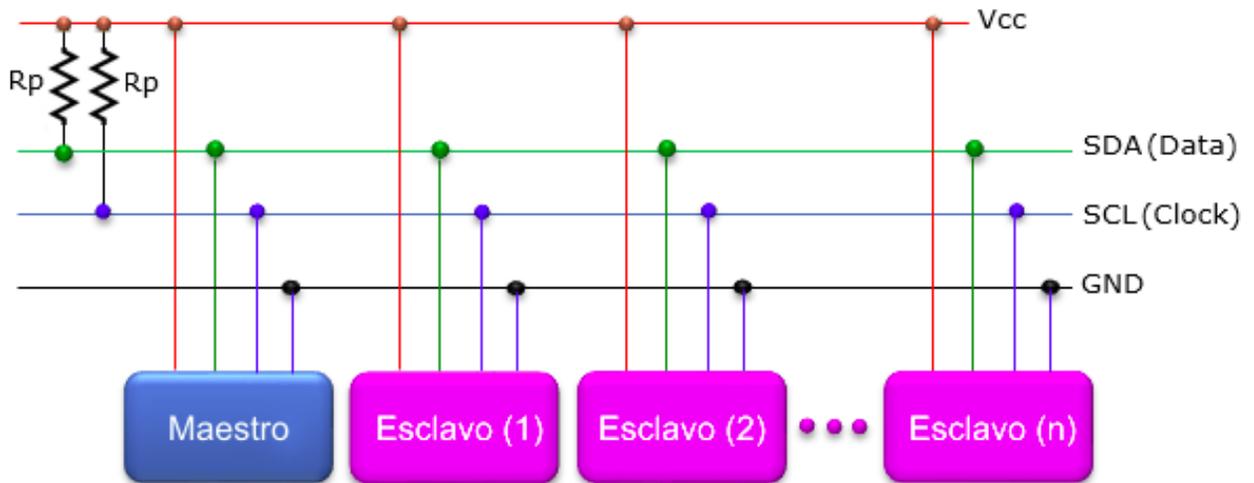


Figura 32. Diagrama de interconexión del ducto I2C.

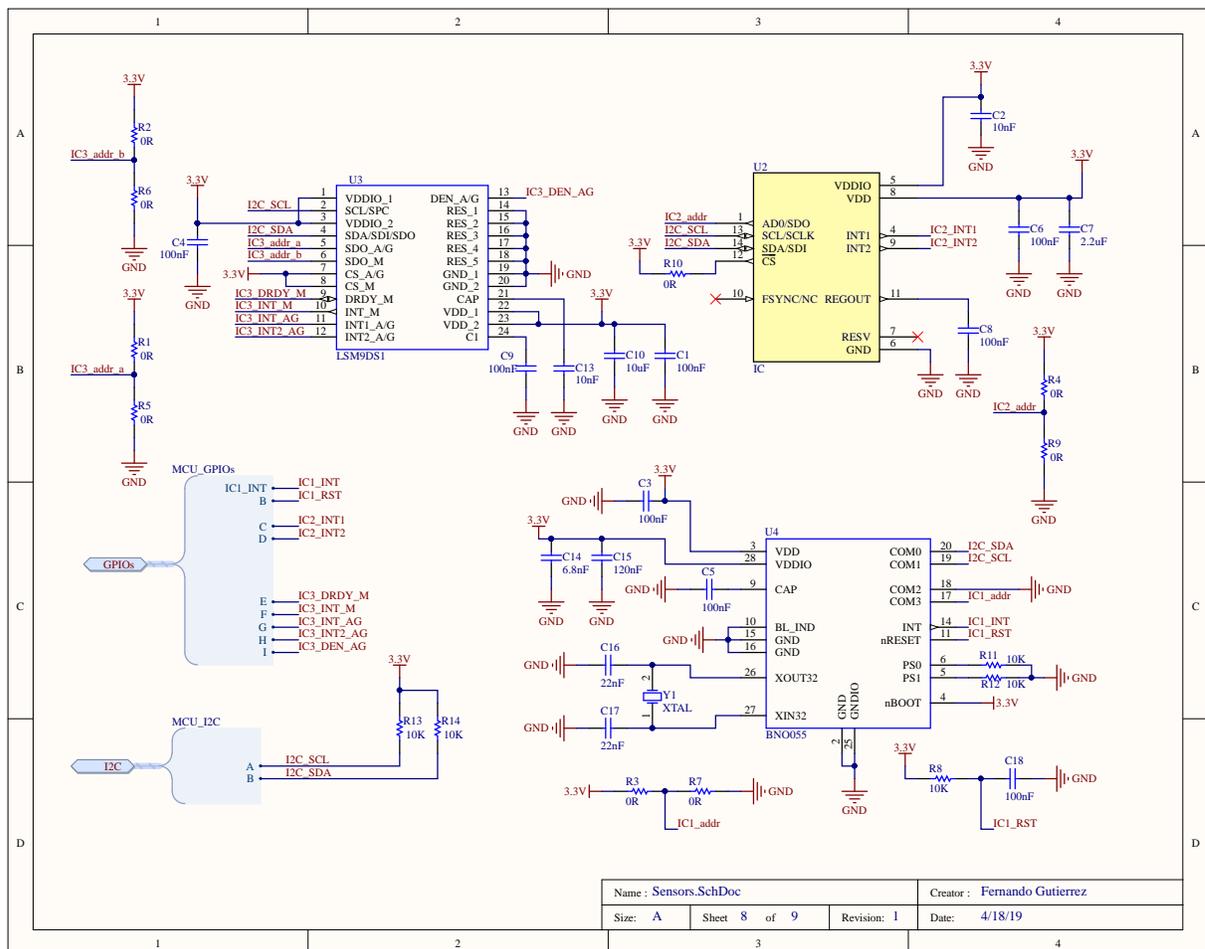


Figura 33. Esquemático de la conexión de los sensores inerciales.

La Figura 33 muestra la conexión de los 3 estos sensores inerciales; voltaje de alimentación, resistencias y capacitores para que los sensores funcionen adecuadamente.

Además, se puede ver que a través del “Harness MCU_I2C” llegan las líneas SCL y SDA, que son conectadas a 3.3V por las resistencias R13 y R14 y posteriormente estas líneas eléctricas a sus respectivas terminales en cada sensor.

Por otra parte, nuestra tarjeta estará destinada a operar girando o en constante movimiento no es posible tener un cable de comunicación hacia la computadora donde se guardarán y graficarán los datos medidos. Por tanto, se requiere transmitir las lecturas de los sensores u otra información de forma inalámbrica. Para lograr esto se emplea un módulo RF XBee, el cual utiliza el protocolo de red llamado IEEE 802.15.4 para crear redes punto a punto, y estando este montado y conectado en la tarjeta de medición angular enviara las mediciones hacia una computadora.

La Figura 34 muestra la manera de conectarlo adecuadamente. El voltaje de alimentación es de 3.3V y se conecta a la terminal 1, las terminales 2 y 3 son el puerto de comunicación UART con el que se comunica al microcontrolador, por último la terminal 10 conectar al nodo de tierra.

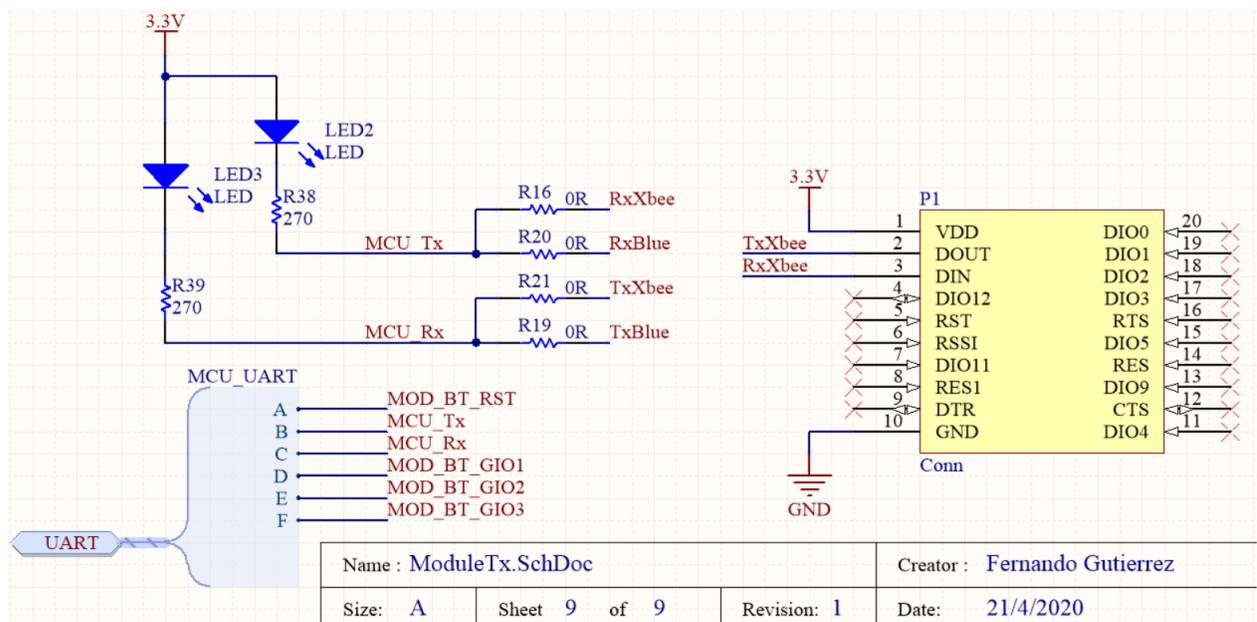


Figura 34. Esquemático de conexión del módulo transmisor inalámbrico.

4.3. Selección de componentes

Con base a los requerimientos de diseño y al modelo propuesto se realizó una búsqueda de componentes electrónicos usando paginas de internet de los proveedores Digikey y Mouser electronics.

The screenshot shows the Mouser Electronics website interface. At the top, there is a navigation bar with links for Products, Manufacturers, Services & Tools, Technical Resources, and Help. A search bar is present with the text 'Part # / Keyword'. Below the navigation bar, the breadcrumb trail reads: 'All Products > Passive Components > Inductors, Chokes & Coils > Fixed Inductors'. The main content area is titled 'Fixed Inductors' and shows 'Results: 98,588'. Below this, there are tabs for 'Products (98,588)', 'Datasheets (7,834)', 'Images (2,510)', and 'Newest Products'. The 'Applied Filters' section shows 'Passive Components', 'Inductors, Chokes & Coils', and 'Fixed Inductors'. A table of product specifications is displayed with the following columns: Manufacturer, Termination Style, Package / Case, Shielding, Inductance, Tolerance, and Maximum DC Current. The table lists various manufacturers like Bourns, Coilcraft, Murata, TDK, Wurth Elektronik, Taiyo Yuden, Vishay, and ABRACON, along with their respective termination styles, package cases, shielding options, inductance values, tolerances, and maximum DC currents.

Manufacturer	Termination Style	Package / Case	Shielding	Inductance	Tolerance	Maximum DC Current
----	Axial	0.6 mm x 0.3 mm	-	100 pH	0.05 nH	0.3 mA
Bourns	Radial	01005 (0402 metric)	Shielded	150 pH	0.1 nH	0.37 mA
Coilcraft	Screw	0201 (0603 metric)	Unshielded	180 pH	0.2 nH	400 uA
Murata	SMD/SMT	0201 (0603)		200 pH	0.3 nH	0.68 mA
TDK	Solder Tab	0201(0603 metric)		220 pH	0.5 nH	0.75 mA
Wurth Elektronik	Wire Leads	0202 (4442 metric)		270 pH	0.1 %	0.84 mA
Taiyo Yuden		0202 (5452 metric)		300 pH	0.2 %	0.85 mA
Vishay		0202 (7155 metric)		330 pH	0.25 %	0.95 mA
ABRACON		03015 (0804 metric)		390 pH	0.5 %	0.97 mA
		03019 (0805 metric)		400 pH	-40 %, +20 %	0.99 mA
				470 pH	-30 %, +50 %	1 mA

Figura 35. Pagina web del proveedor de componentes Mouser electronics.

Posteriormente se hizo una evaluación para elegir los componentes que se comprarían para la fabricación de la tarjeta MMAVA, tomando en cuenta los siguientes puntos:

- Potencia:** Se desea que el sistema se mantenga en modo de operación el mayor tiempo posible. Para esto se consideró una batería recargarle con una alta capacidad y que los componentes electrónicos consumieran la menor potencia posible
- Voltaje de operación:** El sistema estará compuesto por la batería, sensores inerciales, microcontrolador, módulo de transmisión inalámbrica. Así que nuestra batería tiene que ser elegida para alimentar a todos estos dispositivos. Considerando primeramente el microcontrolador, el cual funciona a voltajes pequeños típicamente 3.3V o 5V y posteriormente los sensores inerciales electrónicos que funcionan en su mayoría con un voltaje de 3.3V, así como el módulo de transmi-

sión inalámbrica, la batería deberá tener un voltaje un poco mayor a 3.3V, para que pueda ser regulado al valor de 3.3V.

- **Frecuencia de operación:** Que el sistema sea capaz de muestrear con periodos de muestreo del orden de unidades de milisegundos. Lo cual se logra teniendo un microcontrolador que operación una frecuencia de trabajo alta.
- **Condiciones de operación:** Que el sistema opere bajo condiciones diferentes a las típicas de laboratorio, es decir, que opere con el mayor rango de temperatura. Por lo que se busca que todos los componentes tuvieran un rango de temperatura similar. Que el sistema sea capaz de medir aceleración y velocidad angular en los 3 ejes (x, y y z). Y que además tenga un rango de medición amplio, así como una sensibilidad pequeña para que detecte las pequeñas variaciones. Que el sistema pueda transmitir la información de los sensores a grandes distancias sin perder el enlace de comunicación.

La Figura 36 muestra el catalogo en línea del proveedor, el cual es muy útil ya que te permite realizar una búsqueda avanzada de componentes, te muestra la descripción del componente, y permite filtrar por diferentes parámetros, como: voltaje nominal, tolerancia, material, temperatura de operación, numero de piezas disponibles, precio, tamaño, además de que permite consultar las hojas de especificaciones.

Comparar piezas	Imagen	Número de pieza de Digi-Key	Número de pieza del fabricante	Fabricante	Descripción	Cantidad disponible	Precio unitario USD	Cantidad mínima	Empaquetado	Serie	Estado de la pieza	Capacitancia	Tolerancia	Voltaje nominal	Coefficiente de temperatura	Temperatura de operación
<input type="checkbox"/>		490-17811-2-ND	GRM0335C1H100JA01J	Murata Electronics	CAP CER 10PF 50V NPO 0201	450,000 - Inmediata	\$0.00204	50,000	Cinta y rollo (TR) Embalaje alternativo	GRM	Activo	10pF	±5%	50V	COG, NPO	-55 a 125
<input type="checkbox"/>		490-17811-1-ND	GRM0335C1H100JA01J	Murata Electronics	CAP CER 10PF 50V NPO 0201	540,159 - Inmediata	\$0.10000	1	Cinta cortada (CT) Embalaje alternativo	GRM	Activo	10pF	±5%	50V	COG, NPO	-55 a 125
<input type="checkbox"/>		490-17811-6-ND	GRM0335C1H100JA01J	Murata Electronics	CAP CER 10PF 50V NPO 0201	540,159 - Inmediata	Carrete de Digi-Key (Digi-Reel)®	1	Digi-Reel® Embalaje alternativo	GRM	Activo	10pF	±5%	50V	COG, NPO	-55 a 125
<input type="checkbox"/>		490-13331-2-ND	GRM0335C1H8R0DA01J	Murata Electronics	CAP CER 8PF 50V COG/NPO 0201	50,000 - Inmediata	\$0.00204	50,000	Cinta y rollo (TR) Embalaje alternativo	GRM	Activo	8pF	±0.5pF	50V	COG, NPO	-55 a 125
<input type="checkbox"/>		490-13331-1-ND	GRM0335C1H8R0DA01J	Murata Electronics	CAP CER 8PF 50V COG/NPO 0201	89,690 - Inmediata	\$0.10000	1	Cinta cortada (CT) Embalaje alternativo	GRM	Activo	8pF	±0.5pF	50V	COG, NPO	-55 a 125
<input type="checkbox"/>		490-13331-6-ND	GRM0335C1H8R0DA01J	Murata Electronics	CAP CER 8PF 50V COG/NPO 0201	89,690 - Inmediata	Carrete de Digi-Key (Digi-Reel)®	1	Digi-Reel® Embalaje alternativo	GRM	Activo	8pF	±0.5pF	50V	COG, NPO	-55 a 125
<input type="checkbox"/>		490-14548-2-ND	GRM0335C1E470JA01J	Murata Electronics	CAP CER 47PF 25V COG/NPO 0201	50,000 - Inmediata	\$0.00204	50,000	Cinta y rollo (TR) Embalaje alternativo	GRM	Activo	47pF	±5%	25V	COG, NPO	-55 a 125

Figura 36. Catálogo de capacitores de la pagina de Digikey.

4.4. Diseño de tarjeta de circuito impreso

El diseño de la tarjeta de circuito impreso ó PCB (Printed Circuit Board por sus siglas en inglés) de este proyecto de tesis está basado en la información y técnicas aprendidas en libros y otros trabajos similares como (Goto *et al.*, 1998).

La tarjeta MMAVA es un circuito impreso de 62mm de largo y 62mm de ancho, es un PCB de 4 capas de la cuales dos capas son para señales, una capa para voltaje de alimentación y una capa para la referencia o tierra.

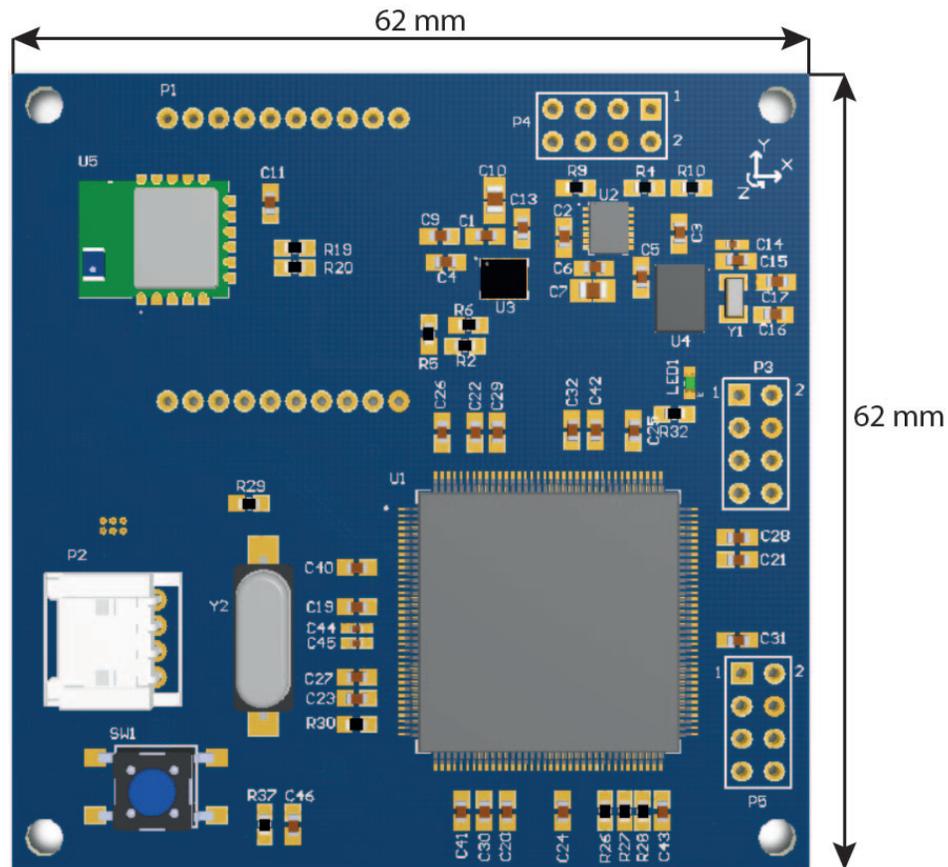


Figura 37. Vista superior de la tarjeta MMAVA.

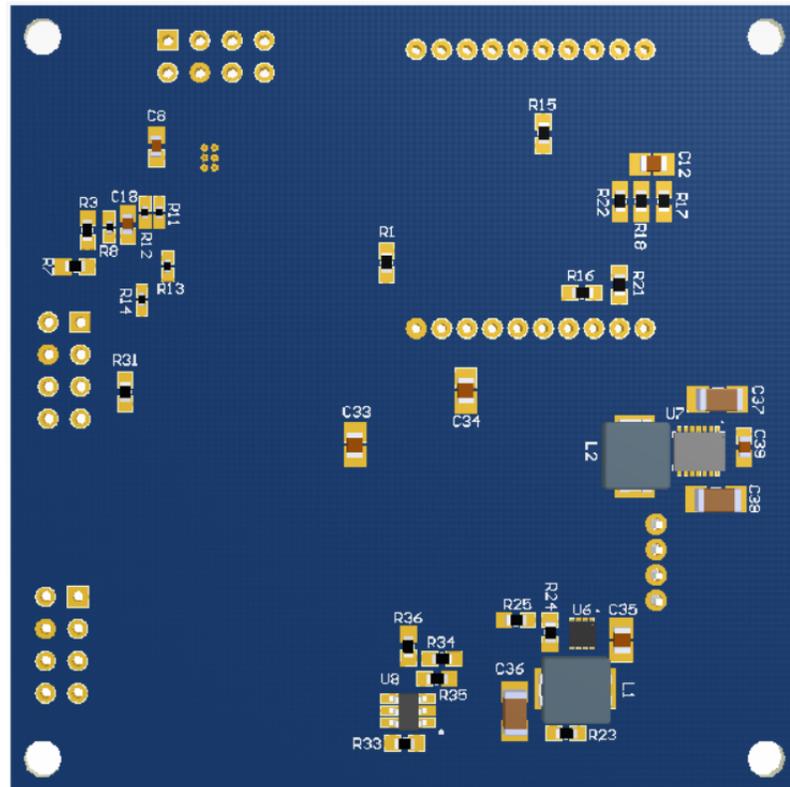


Figura 38. Vista inferior de la tarjeta MMAVA.

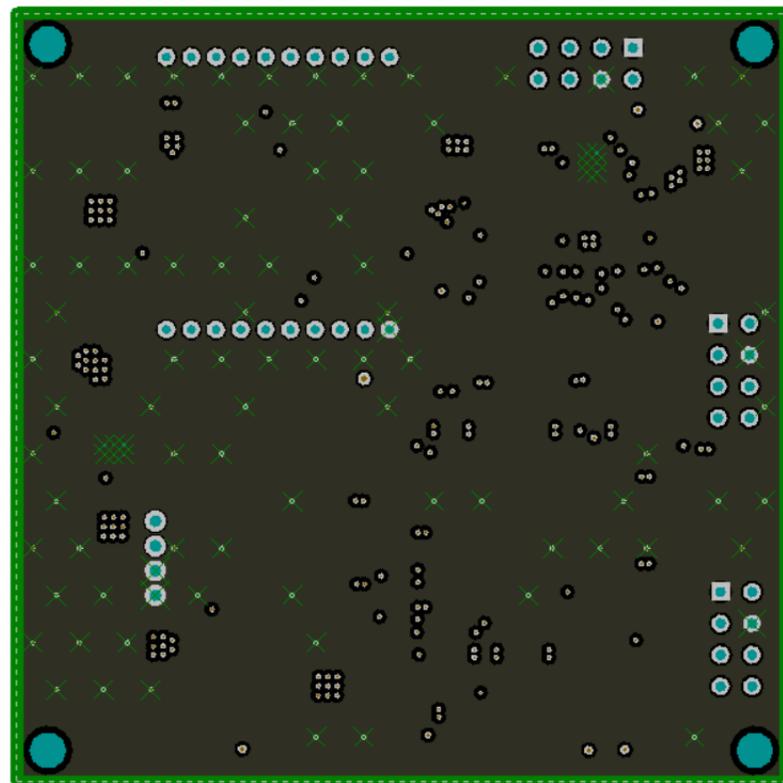


Figura 39. Capa interna de plano de tierra de la tarjeta MMAVA.

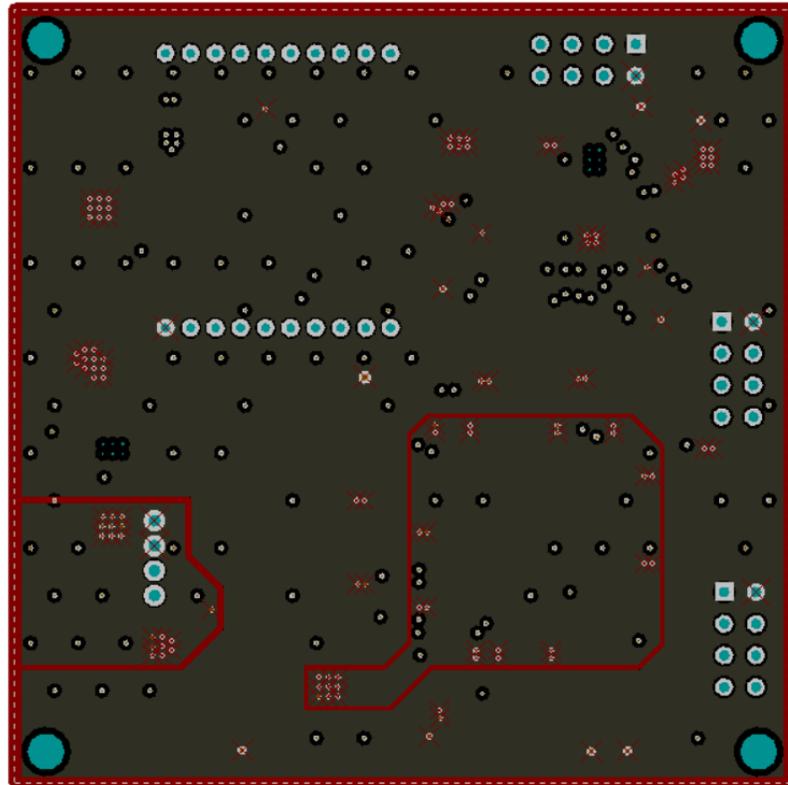


Figura 40. Capa interna de plano de voltaje de la tarjeta MMAVA.

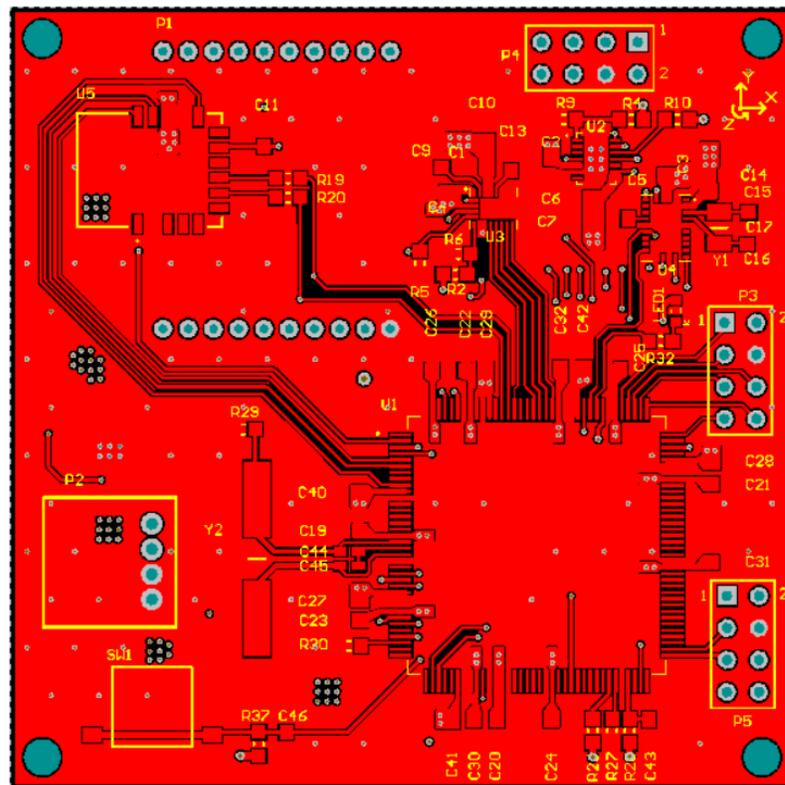


Figura 41. Capa de cobre superior de la tarjeta MMAVA.

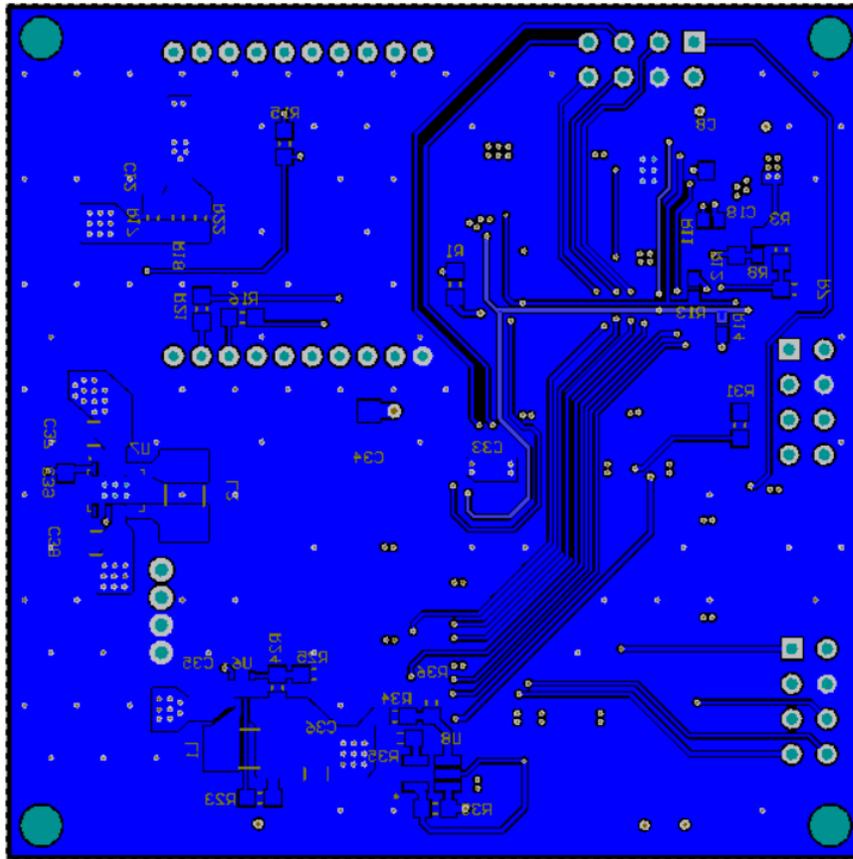


Figura 42. Capa de cobre inferior de la tarjeta MMAVA.

Tabla 2. Características de la tarjeta MMAVA.

Atributo	Valor
Microcontrolador	TMS5701224CPGE
Sensores	Acelerómetro 3 ejes, Giroscopio 3 ejes, Magnetómetro 3 ejes, Sensor de temperatura
Comunicación inalámbrica	Módulo RF Xbee
Botón	Reinicio
Indicadores led	Alimentación, encendido, transmisión y recepción inalámbrica
Botón	Reinicio
Sensores	Acelerómetro 3 ejes, Giroscopio 3 ejes
Comunicación inalámbrica	Módulo RF Xbee
Conector adicional	4 ADC, 5 GPIOs, 1 UART

La Tabla 2 muestra las características del diseño final de la tarjeta MMAVA.

Los sensores magnetómetro y de temperatura no son parte del objetivo de las mediciones, por tanto actualmente no se encuentran habilitados. De la misma manera, las señales del conector adicional tampoco se encuentran habilitadas, pero se incluyeron en el diseño, pensando que si en el futuro se llegara a necesitar usar algún otro sen-

sor o utilizar alguna salida digital como para controlar algún motor PWM se pudiera realizar.

4.5. Firmware

El firmware es un software de bajo nivel que puede acceder directamente al hardware. Más específicamente en este proyecto de tesis, es el código que contiene la lógica para controlar los circuitos electrónicos presentes en la tarjeta MMAVA. Una vez que este programa es compilado se descarga al microcontrolador, el cual ejecutara este firmware cada vez que sea encendido.

El programa fue desarrollado con el software IAR Embedded Workbench. Allí se crearon los archivos de código utilizando las librerías específicas para el microcontrolador TMS5701s1224.

Lo primero que realiza es la configuración tanto de registros, sensores, entradas y salidas digitales como declaración de variables así como declarar el uso de la interrupción por temporizador. Después entramos a un ciclo en el cual el microcontrolador se comunica y lee los sensores, obtiene las mediciones y envía los valores al módulo de transmisión. La Figura 43 muestra de manera gráfica la lógica del firmware desarrollado.

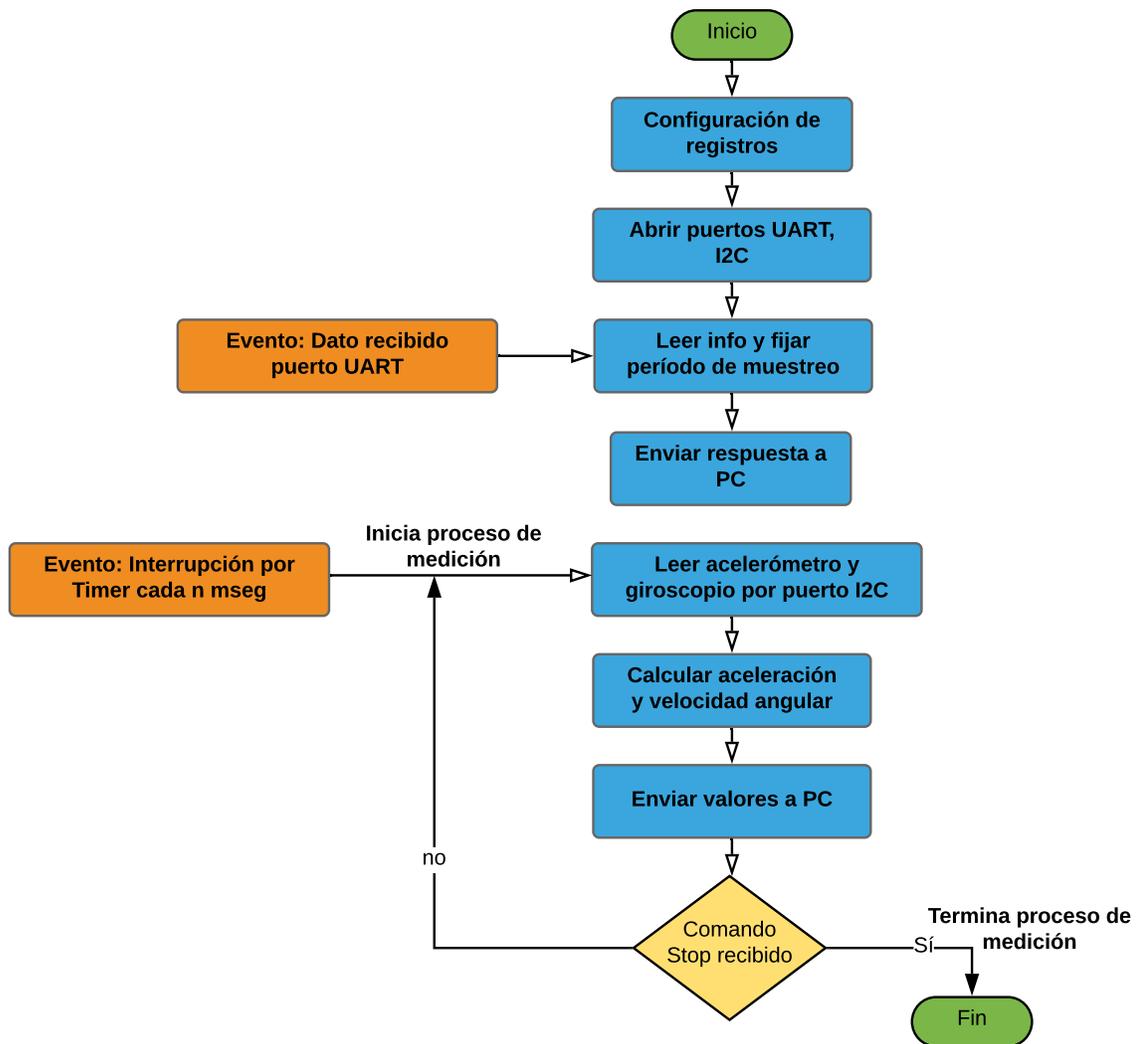


Figura 43. Diagrama de flujo del código para operar la MMAVA.

Capítulo 5. Diseño de la interfaz de usuario.

5.1. Requerimientos

Se requiere que la interfaz de usuario sea en un ambiente gráfico, amigable para el usuario. Que establezca una comunicación estable con la tarjeta MMAVA. Además que proporcione las herramientas como botones, cuadros desplegables para configurar el periodo de muestreo de la tarjeta, así como los botones de “Iniciar” y “Detener” lectura de sensores inerciales. También se pretende que la interfaz pueda controlar un motor eléctrico con el cual se realizarán pruebas de velocidad angular. Es necesario configurar parámetros del motor como: puerto de comunicación, velocidad angular, sentido de giro, etc.



Figura 44. Interfaz de usuario propuesta para operar la MMAVA.

5.2. Software utilizado

Para el diseño de la interfaz se utilizó el entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) de Microsoft visual studio version 2017 en el sistema operativo Windows. Para la interfaz gráfica de usuario, conocida también como GUI (del inglés graphical user interface) se utilizó la plataforma Microsoft .NET Framework donde se

creó un formulario principal que contiene las 2 secciones de visualización y control para el motor y la tarjeta MMAVA. El lenguaje de programación utilizado fue C# en una metodología programación orientada a objetos (POO), donde se declararon las variables, crearon las funciones y métodos que son ejecutados al ocurrir algún evento en la interfaz gráfica.

Una funcionalidad importante que se desarrollo en la interfaz de usuario es la generación de gráficas de las variables inerciales en tiempo real con la opción de seleccionar que variables se desean graficar. Las variables inerciales son; aceleración en los 3 ejes y velocidad angular para los 3 ejes. Y es posible graficar desde solo una variable hasta las 6 variables.



Figura 45. Interfaz de usuario configurando las variables a graficar.

Otra funcionalidad es que la interfaz de usuario permite guardar sesiones de pruebas o lecturas específicas. Por ejemplo, guardar los valores de las mediciones de alguna variable en un archivo en el equipo. La interfaz también tiene integrada la funcionalidad de abrir sesiones guardadas, y graficar dichas sesiones para poder analizar los datos sin tener que volver a encender ni el motor ni la tarjeta MMAVA.

5.3. Protocolo de comunicación

Para comunicarnos con nuestros dos sistemas (MMAVA y motor) se utilizó el puerto serie con el protocolo RS232. La interfaz de usuario detecta automáticamente los puertos COM conectados al equipo y los muestra en los cuadros desplegables. Al hacer clic en el botón de “Abrir” se establece la comunicación con la tarjeta MMAVA o motor. Es importante aclarar que son 2 puertos los que se utilizarán 1 para el motor y el otro para la tarjeta. Por tanto el usuario deberá saber a que puerto COM corresponde cada uno. La velocidad de transmisión de datos es de 115200 baudios. Esto significa que es posible transferir un máximo de 115200 bits por segundo en cada puerto. Cabe mencionar que las laptops y algunas computadoras de escritorio ya no tienen incluido el puerto rs232 si no solo puertos “USB” cuyo puerto es el más popular y utilizado tanto en computadoras como en celulares. Actualmente existen adaptadores de usb a db9 que utilizan un “driver” en la computadora para convertir una señal con protocolo usb a una con protocolo rs232. Implementando este adaptador es posible controlar el motor desde cualquier computadora (que tenga puerto usb).



Figura 46. Adaptador USB a serial DB9.

5.4. Configuración de la tarjeta MMAVA

El área de configuración del MMAVA se encuentra en la parte de la derecha como se muestra en la Figura 47. En “6” se selecciona el puerto serial al que está conectado el modulo Xbee con el que se comunica el MMAVA. Después de la selección de puerto se elige el tiempo de muestreo expresado en milisegundos. Con el botón de “Iniciar” “7” se realizan dos acciones: primero envía a el MMAVA el comando para fijar el tiempo de muestreo. Después la interfaz espera la respuesta de el MMAVA. Posteriormente la interfaz envía el comando de iniciar proceso de medición y el texto del boton cambia a “Detener”. Con esto el MMAVA comenzara a hacer las mediciones inerciales y transmitir las inalámbricamente. Cada que llegue un paquete de datos a la computadora se producirá una interrupción en el programa y se ejecutará un método para obtener las variables inerciales y desplegarlas en sus respectivos cuadros de texto “8”. Si se habilitó la opción de graficar “1” cada valor recibido será dibujado. Existen dos gráficas diferentes una para las aceleraciones y otra para las velocidades angulares. El proceso terminara cuando el usuario haga clic en el botón de “Detener”. Es posible guardar las mediciones realizadas en la prueba, dando clic en el botón de guardar “1”. Lo cual abre otra pestaña para indicar el nombre con el que queremos guardar la sesión.

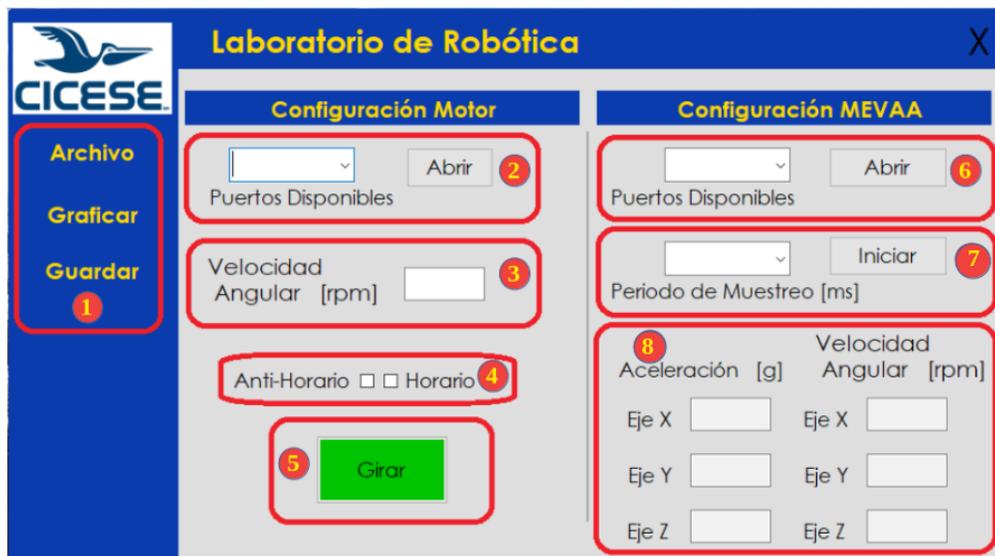


Figura 47. Interfaz de usuario seccionada por función.

El algoritmo anterior se puede apreciar de manera gráfica en el siguiente diagrama de flujo.

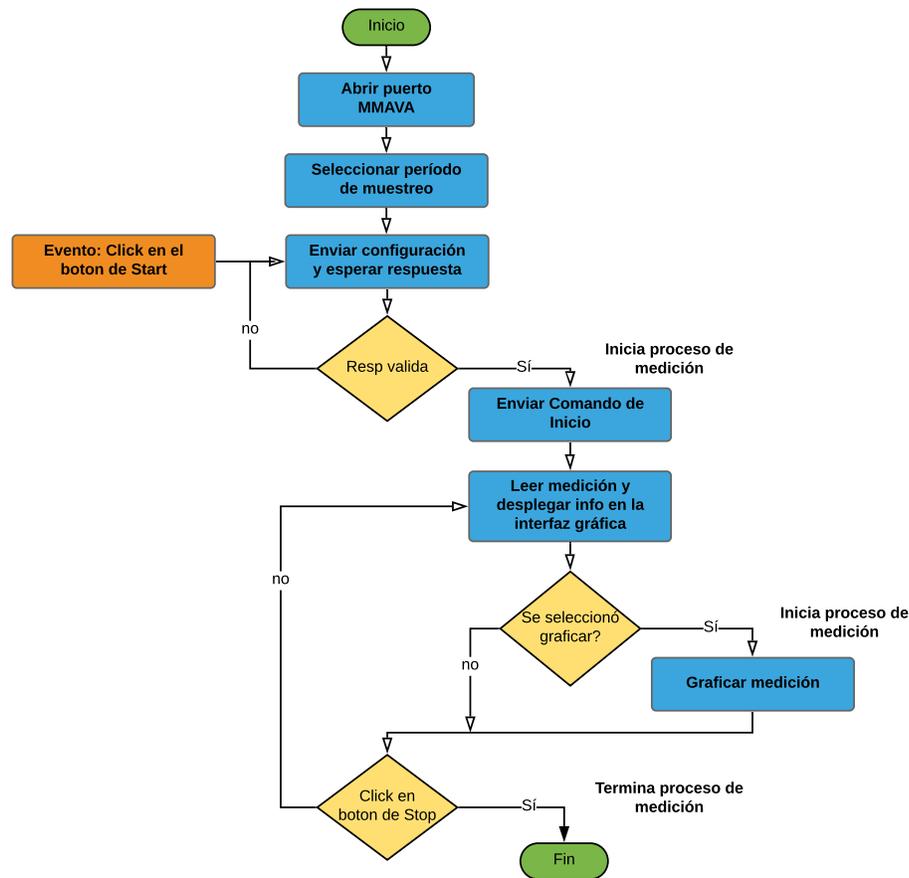


Figura 48. Diagrama de flujo del proceso de configuración del MMAVA.

5.5. Configuración del motor

La configuración del motor se encuentra en la parte izquierda de la interfaz gráfica. En el cuadro desplegable de “Puertos disponibles” “2” se selecciona el puerto serial al que está conectado el controlador del motor. En “3” hay un cuadro de texto donde se escribe a que velocidad en RPM se desea que gire el motor. El valor de giro que se envía al controlador del motor debe ser un numero entero. Es por eso que la interfaz esta programada solo para aceptar números en este cuadro de texto, de lo contrario muestra un mensaje de error indicando que se ingresaron letras o algún otro carácter diferente, y el comando no es enviado. Además existe un rango de velocidad que va de 1 RMP hasta 1000 RMP. Si se ingresa un valor fuera de ese rango la interfaz mostrara un mensaje de error indicando que es necesario corregir el valor de la velocidad para poder enviar en comando. Después, en “4” se selecciona el sentido de giro a favor o en contra de las manecillas del reloj. Con el botón verde de “Girar” “5” se envía el comando a el controlador del motor que establece la velocidad de giro deseada.

Cuando se realiza esta acción el botón cambia de color de verde a rojo, y el texto del botón cambia a “Parar”. El motor se mantendrá girando hasta que el usuario haga clic en el botón de “Parar”. Si el usuario hace clic en el botón de “Parar”, el botón vuelve a cambiar a color verde y su texto cambia a “Iniciar” con lo que se puede volver a hacer girar el motor. El diagrama de flujo de la Figura 49 muestra este proceso.

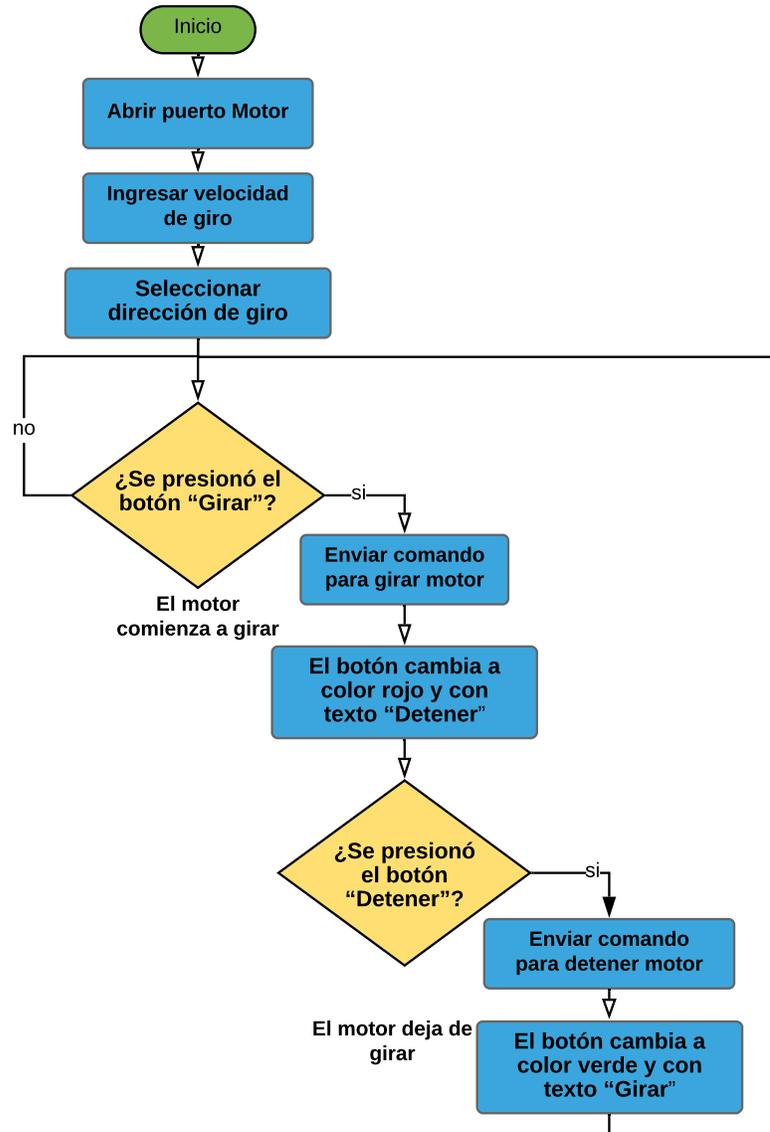


Figura 49. Diagrama de flujo del proceso de configuración del motor con la interfaz gráfica.

Capítulo 6. Pruebas de la tarjeta de medición.

Ya que uno de los objetivos específicos es validar la precisión de las mediciones de velocidad angular hechas por la tarjeta desarrollada en este proyecto de tesis, es necesario comparar las mediciones obtenidas por la tarjeta MMAVA con una referencia confiable. Con la finalidad de cumplir este objetivo se compró un motor con encoder integrado para poder usar esas mediciones de velocidad angular como referencia. El motor es tipo brushless de la compañía alemana Faulhaber con número de parte 2232S012BX4. Por lo tanto, se propone y desarrolla un experimento para probar la tarjeta MMAVA, al cual llamaremos maqueta de pruebas. Esta consiste en una base de madera sobre la cual se monta el motor y en el eje de este se monta la tarjeta MMAVA como se aprecia en la Figura 50.

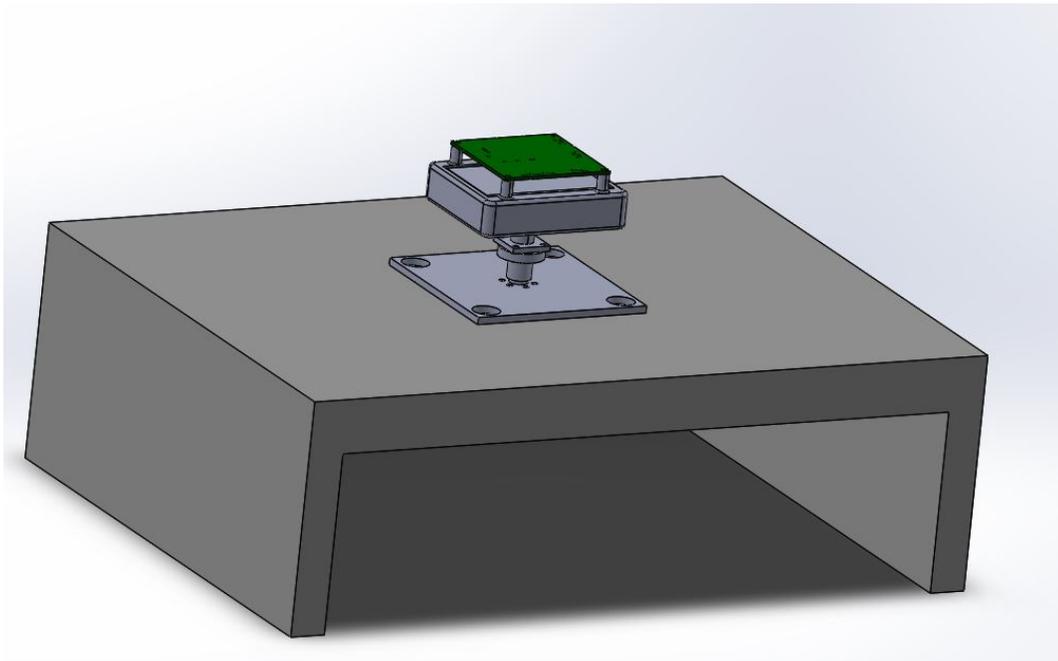


Figura 50. Modelo mecánico en 3D de la maqueta de pruebas de la tarjeta MMAVA.

El motor está posicionado verticalmente, o sea que el eje del motor esta sobre alineado al eje z. En la Figura 51 puede apreciarse que la tarjeta esta orientada horizontalmente quedando su eje z alineado verticalmente. Con esta configuración al hacer girar el motor la tarjeta MMAVA girara sobre el eje z. Tanto la base de la tarjeta MMAVA como la que sujeta al eje del motor fueron piezas que se diseñaron en este proyecto de tesis. Primeramente se diseñó el modelo mecánico y después fueron fabricadas; de plástico en una impresora 3D y de aluminio en un taller de maquinado respectivamente.



Figura 51. Maqueta de pruebas de la tarjeta MMAVA.



Figura 52. Tarjeta MMAVA montada en la maqueta de pruebas.

Una vez terminada la maqueta de pruebas, se procedió a abrir y configurar la interfaz de usuario para comenzar las pruebas. Primero se seleccionaron los puertos de cone-

xión para la comunicación con el motor y con la tarjeta MMAVA. En la configuración de la MMAVA se tomó el periodo de muestreo de 50 ms.

6.1. Prueba de en estado de reposo

La primera prueba del experimento fue puramente para corroborar el funcionamiento de la tarjeta MMAVA. La prueba tiene una duración de 10 segundos, en la cual el motor está apagado por lo que la tarjeta MMAVA está inmóvil.

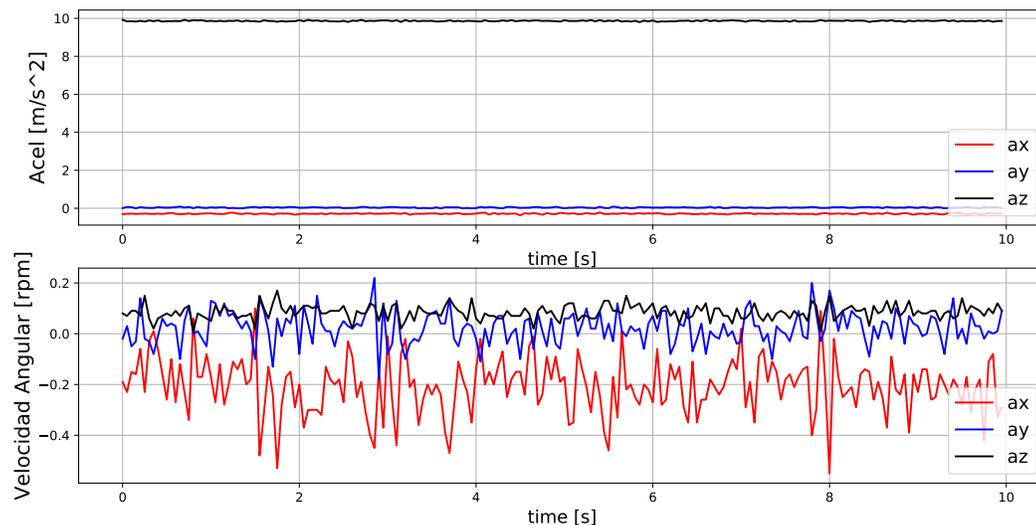


Figura 53. Mediciones de la tarjeta MMAVA estando el motor apagado.

Ya que el motor se encuentra apagado la tarjeta MMAVA no está girando, por lo tanto la velocidad angular debería ser nula en los 3 ejes. Sin embargo, observando la gráfica (parte inferior) no presenta un valor constante sino que el valor de la medición está fluctuando entre cada medición, además podemos observar que las señales presentan un desplazamiento en magnitud, tal y como explicamos en el capítulo 2 a esto se le conoce como sesgo.

Para el caso de la velocidad angular en el eje x (color rojo) presenta un desplazamiento de -0.2rpm y para la velocidad angular en el eje z (color negro) se presenta un desplazamiento de 0.1rpm .

Para las aceleraciones (parte superior) también se presenta cierto error, ya que al estar estática la tarjeta, las mediciones deberían ser nulas para los ejes x y y, y

$9.81m/s^2$ para el eje z , el cual es el valor de la fuerza de gravedad. Para el caso de la aceleración en el eje x (color rojo) presenta un desplazamiento de $-0.3m/s^2$.

6.2. Cálculo del sesgo (offset)

Para calcular el sesgo o desajuste tomaremos las mediciones de la Figura 53. Usaremos el método de regresión por mínimos cuadrados para obtener el valor que más se aproxime al valor nulo. El cual se explica a continuación:

Paso 1: Para cada punto (x, y) calcular x^2 y xy .

Paso 2: Sumar cada valor de los vectores vector x, y, x^2 y xy para obtener $\sum x, \sum y, \sum x^2$ y $\sum xy$ respectivamente.

Paso 3: Calcular la pendiente m .

$$m = \frac{N \sum(xy) - \sum x \sum y}{N \sum(x^2) - (\sum x)^2} \quad (36)$$

Paso 4: Calcular la intercepción b .

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{N} \quad (37)$$

Donde N es el numero de muestras.

x es el vector de tiempo t , el cual dura 10 segundos.

y es cada una de las variables inerciales medidas.

Para este caso

$$N = 200$$

$$\mathbf{t} = [0 \quad 0.05 \quad 0.1 \quad \dots \quad 9.9 \quad 9.95]$$

Siguiendo el procedimiento anterior se obtuvieron los siguientes valores:

Velocidad angular en el eje x (g_x)

$$\sum x = 995$$

$$\sum y = -41.09$$

$$\sum x^2 = 6616.75$$

$$\sum xy = -208.55$$

$$m_{g_x} = -0.0024$$

$$b_{g_x} = -0.193$$

Velocidad angular en el eje y (g_y)

$$\sum x = 995$$

$$\sum y = 4.55$$

$$\sum x^2 = 6616.75$$

$$\sum xy = 23.01$$

$$m_{g_y} = 0.0002$$

$$b_{g_y} = 0.021$$

Velocidad angular en el eje z (g_z)

$$\sum x = 995$$

$$\sum y = 16.91$$

$$\sum x^2 = 6616.75$$

$$\sum xy = 85.16$$

$$m_{g_z} = 0.0005$$

$$b_{g_z} = 0.0081$$

Aceleración en el eje x (a_x)

$$\sum x = 995$$

$$\sum y = -57.11$$

$$\sum x^2 = 6616.75$$

$$\sum xy = -283.96$$

$$m_{a_x} = 9.93$$

$$b_{a_x} = -0.286$$

Aceleración en el eje y (a_y)

$$\begin{aligned}\sum x &= 995 \\ \sum y &= 7.729 \\ \sum x^2 &= 6616.75 \\ \sum xy &= 38.12 \\ m_{a_y} &= -0.0001 \\ b_{a_y} &= 0.039\end{aligned}$$

Aceleración en el eje z (a_z)

$$\begin{aligned}\sum x &= 995 \\ \sum y &= 1972.5 \\ \sum x^2 &= 6616.75 \\ \sum xy &= 9813.3 \\ m_{a_z} &= -0.0001 \\ b_{a_z} &= 9.86\end{aligned}$$

Para corregir el sesgo o desplazamiento hay que restar el valor obtenido en el proceso anterior a cada medición para que el valor final sea lo más cercano posible a cero, exceptuando la variable de aceleración en el eje z que idealmente su valor es de $9.81m/s^2$. Por ejemplo para el caso de la velocidad angular en el eje x:

$$valor_{final} = vel_{x_{medido}} - g_x \quad (38)$$

Y para el caso de la aceleración en el eje z queda así:

$$valor_{final} = acel_{z_{medido}} - (a_z - 9.81) \quad (39)$$

6.3. Segunda prueba de en estado de reposo

Se hace una segunda prueba estando el motor apagado, pero ahora las mediciones tienen el ajuste de sesgo. Los resultados de la prueba se muestran en la Figura 54.

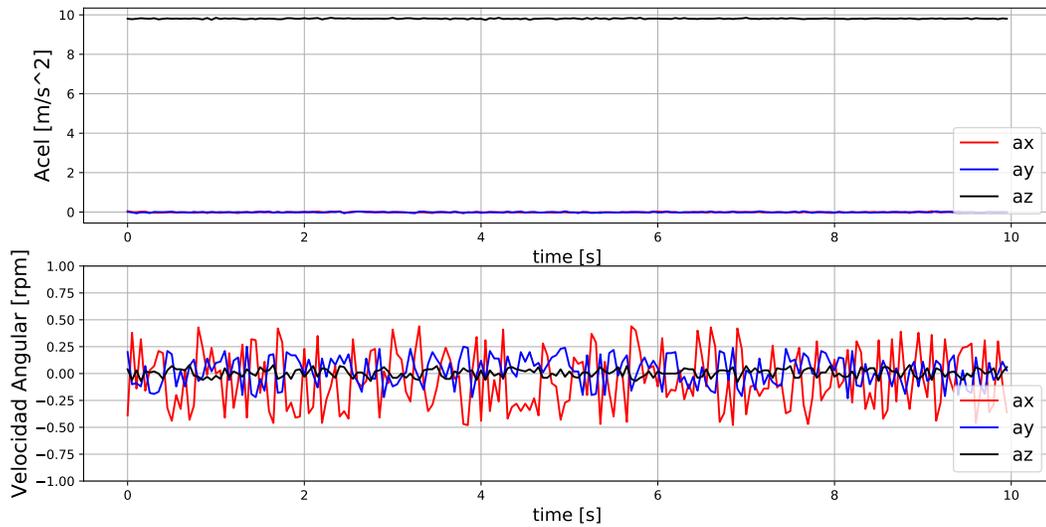


Figura 54. Mediciones de la tarjeta MMAVA estando el motor apagado con ajuste de sesgo.

Como se puede ver en las Figura 54 las nuevas mediciones están centradas al valor esperado. Es decir, sus valores tienen una media muy cercana a cero.

La Figura 55 compara las velocidades angulares originales y las corregidas. Por ejemplo para el eje z (parte inferior), la señal original (línea azul) algunos valores están por encima de $0.1rpm$ y no tiene valores negativos, mientras que para la señal corregida (línea roja) presenta valores positivos y negativos no mayores a $\pm 0.08rpm$.

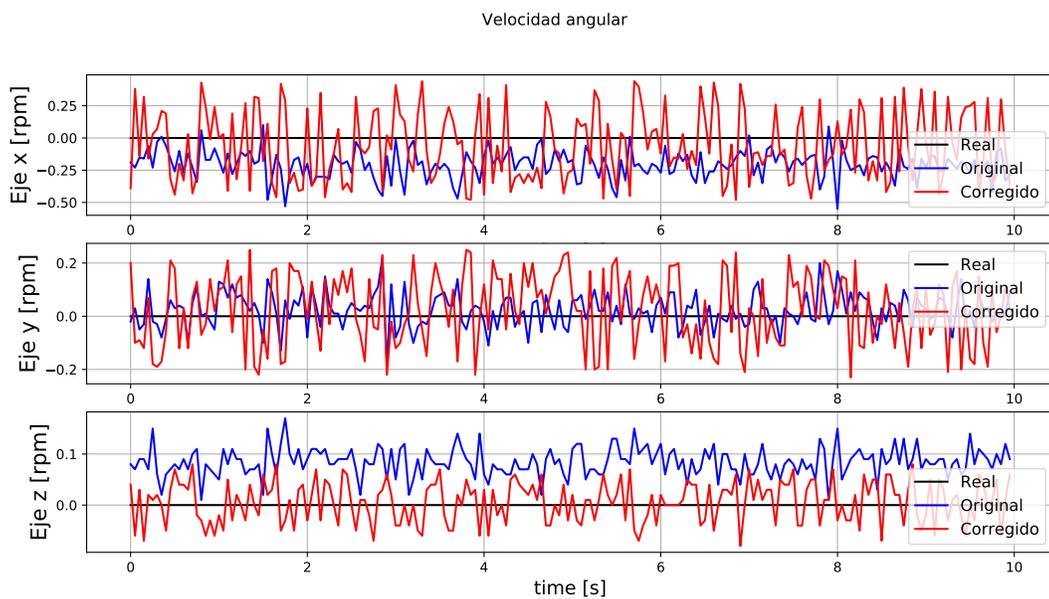


Figura 55. Gráfica de comparación de las velocidades angulares obtenidas con y sin ajuste de sesgo.

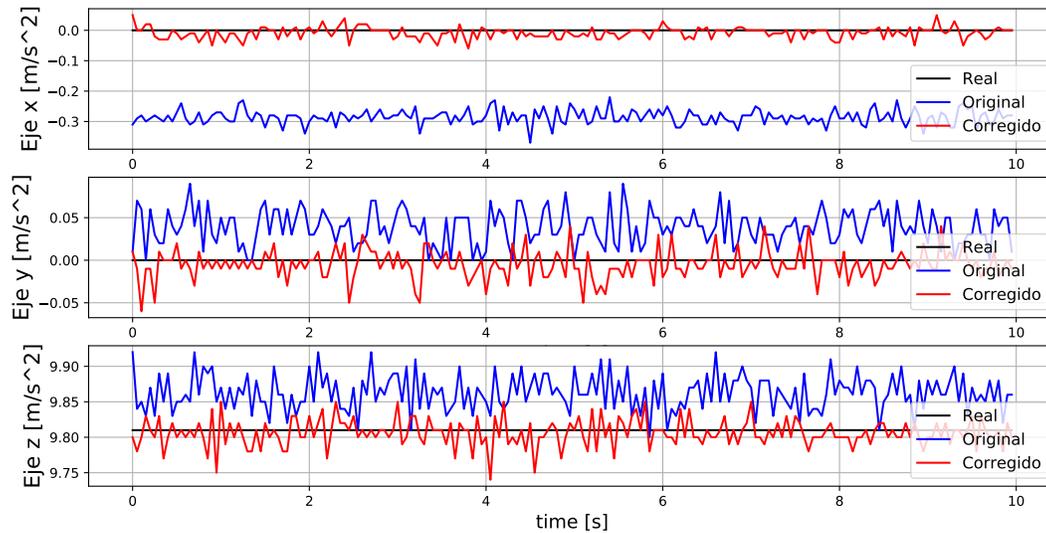


Figura 56. Gráfica de comparación de las aceleraciones obtenidas con y sin ajuste de sesgo.

Al igual que en las gráficas de velocidad angular, las gráficas de la aceleración presentan una mejoría en la exactitud de las mediciones para cada eje, ya que las mediciones obtenidas están más cercanas al valor real, como se aprecia en la Figura 56. Para el eje x la señal original (línea azul) tiene una media alrededor $-0.3m/s^2$ en cambio la señal con las mediciones corregidas (línea roja) tiene una media cercana a cero.

Una vez hecha la corrección de sesgo, lo cual es parte del proceso de calibración, se procedió a caracterizar la tarjeta MMAVA haciendo una serie de mediciones iniciando con el motor apagado y tomando las mediciones del controlador del motor y la tarjeta MMAVA. Después se aumentó la velocidad angular del motor en $10rpm$ y se volvió a registrar las mediciones. Este proceso se repitió hasta que el motor se alcanzó la velocidad de $370rpm$.

Observando la Figura 57 podemos decir que ambas señales el error es mínimo del rango $(0 - 50)rpm$. Idealmente la señal del controlador del motor (color rojo) debería ser una línea recta con una pendiente constante de 10, pero observando la gráfica notamos que esto no es así. Dentro del rango $(60 - 110)rpm$ el motor no gira a la velocidad que se le indica desde el programa de configuración, sino que presenta un comportamiento oscilatorio, esto no se ve en la gráfica ya que solo se tomó una muestra por decena de rpm. También se notó que este comportamiento solo aparece cuando la tarjeta está montada en el motor ya que en una prueba sin montar la tarjeta

MMAVA no existieron estas oscilaciones, sin embargo como lo que se busca es caracterizar son las mediciones de la tarjeta MMAVA y no el comportamiento del motor no se profundizó en este comportamiento del motor.

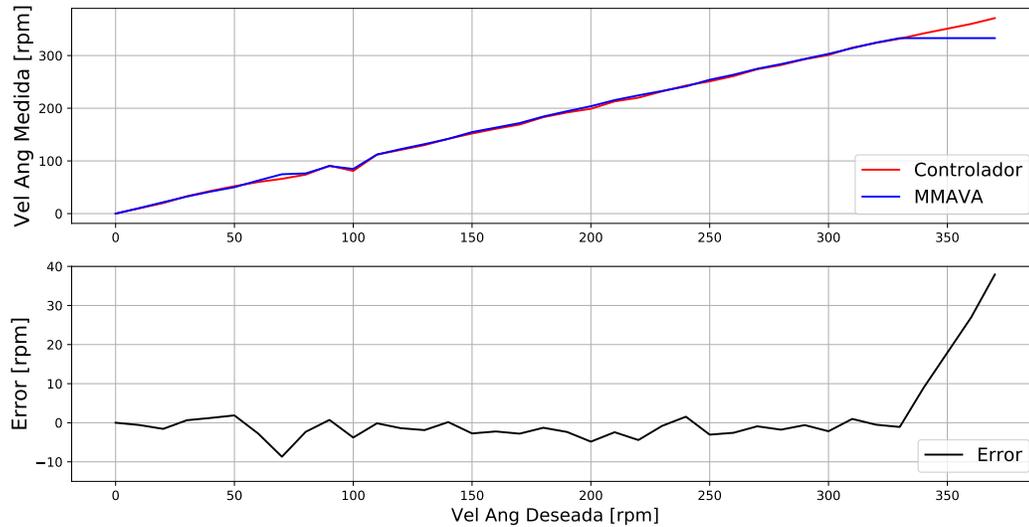


Figura 57. Curva de calibración de la tarjeta MMAVA.

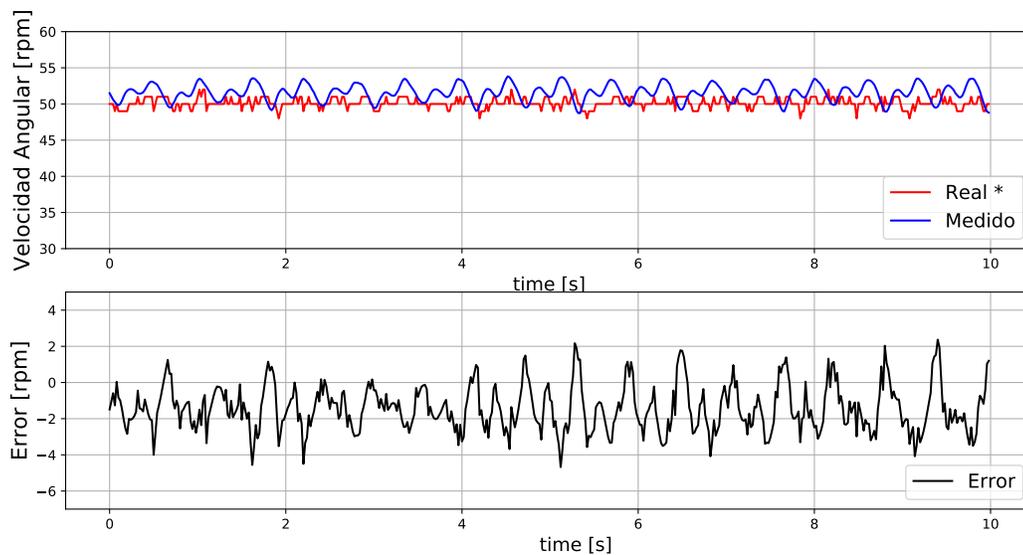
Por último vemos que alrededor de las $330rpm$ las señales se separan. Es decir, la velocidad angular medida del controlador sigue aumentando conforme aumenta la velocidad angular del motor mientras que la velocidad angular de la tarjeta MMAVA (línea azul) llega a un punto de saturación, ya que se mantiene constante aunque la velocidad del motor siga incrementando.

Capítulo 7. Análisis de resultados

En el capítulo 6 se explicó el funcionamiento de la maqueta de pruebas de la tarjeta MMAVA para velocidad angular en un eje. A continuación se muestran los resultados obtenidos de las diferentes pruebas que se realizaron en las que se hizo girar el motor a diferentes velocidades angulares.

Prueba 1: 50rpm.

La primera prueba consiste en hacer girar el motor a una velocidad de 50rpm durante un periodo de 10 segundos, en los cuales se guardarán las mediciones hechas por el MMAVA y por el controlador del motor, el cual es nuestra referencia de velocidad angular.



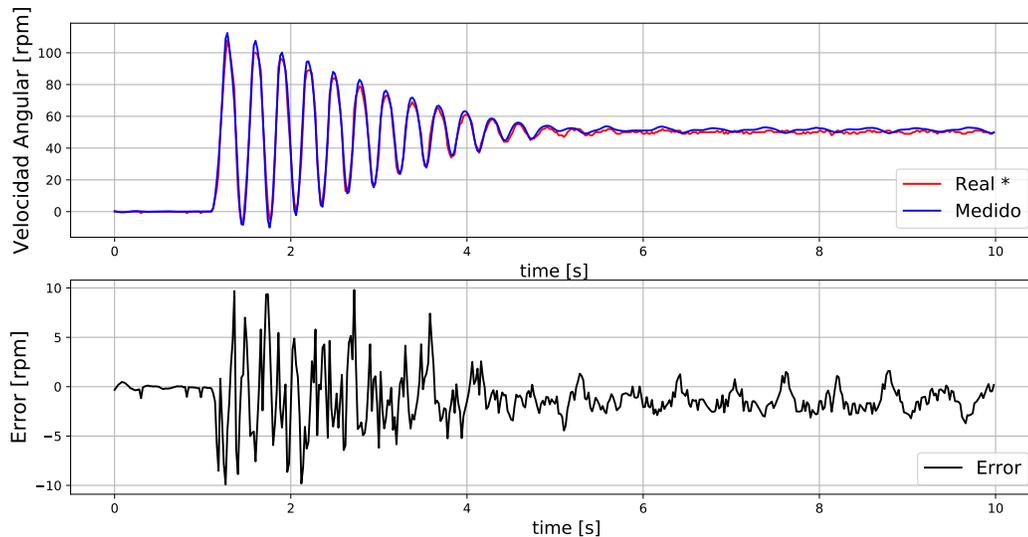
* Se toma como real (referencia) a los datos obtenidos por el controlador del motor.

Figura 58. Señales capturadas en prueba de velocidad angular con valor de 50rpm.

Como puede verse en la Figura 58, la señal obtenida por las mediciones del MMAVA (línea azul) es muy cercana a la señal obtenida por el controlador del motor (línea roja). Ambas señales varían en un rango de 50 a 53rpm. De hecho si observamos la gráfica del error en la parte inferior nunca hay una diferencia de 3rpm. El error se encuentra entre $(-2, 2)$ rpm.

Prueba 2: 50rpm con motor inicialmente apagado.

La segunda prueba consiste en hacer girar el motor a la misma velocidad (50rpm) pero con la diferencia en que esta vez el motor se encuentra apagado en un inicio. Por lo tanto, en esta prueba se apreciara el transitorio para que el motor llegue a la velocidad indicada.



* Se toma como real (referencia) a los datos obtenidos por el controlador del motor.

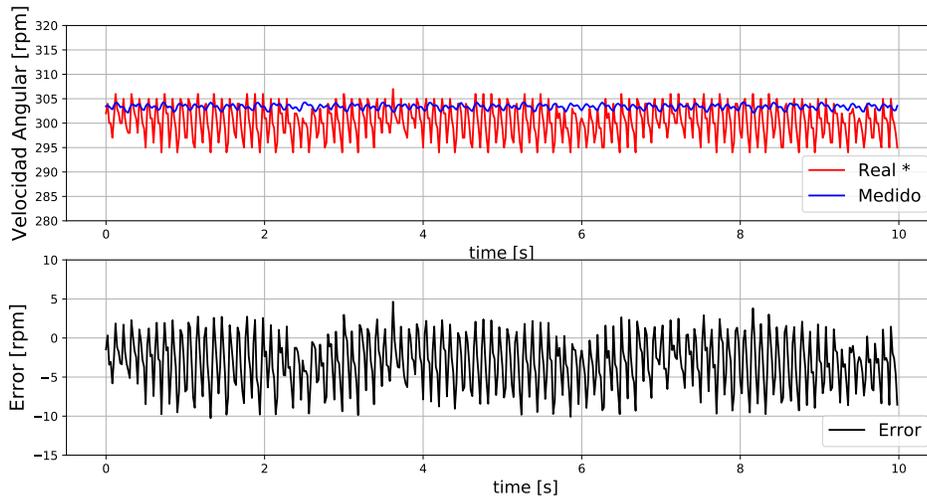
Figura 59. Prueba de velocidad angular con valor de 50rpm con motor inicialmente apagado.

De la Figura 59, podemos observar que el motor no llega a la velocidad deseada inmediatamente, sino que presenta un transitorio con una respuesta subamortiguada hasta mantenerse con pequeñas oscilaciones contiguas al valor deseado. Ambas señales presentan la misma forma y se mantienen cercanas durante toda la prueba. La señal del controlador (línea roja) presenta un valor máximo de 108rpm y un valor mínimo de $-7rpm$, mientras que el MMAVA (línea azul) tiene un valor máximo de 112.5rpm y un valor mínimo de $-10.01rpm$.

Analizando la gráfica del error, podemos observar que el error incrementa cuando la velocidad angular cambia. De manera que el error es mayor en el transitorio, registrando valores cercanos a 10rpm y a medida a que el motor va alcanzando mantener la velocidad a 50rpm el error decrece, quedando en un rango aproximado de $(-3, 1)rpm$.

Prueba 3: 300rpm.

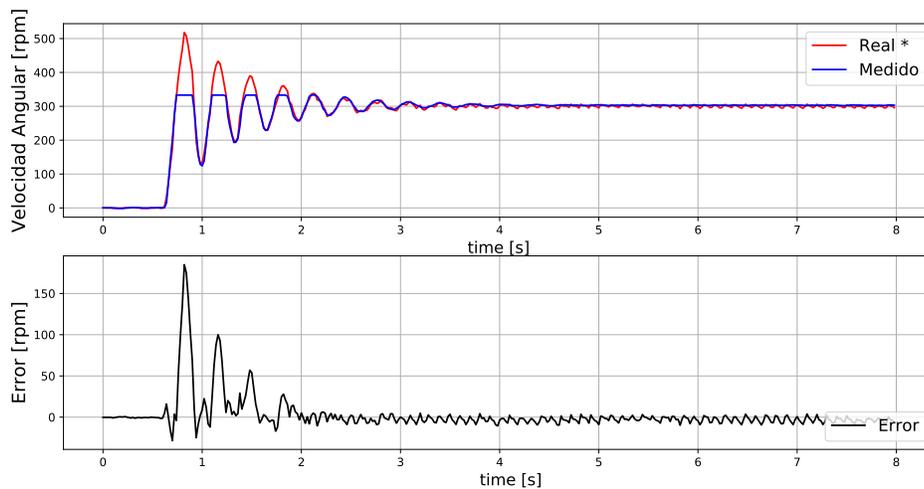
La primera prueba consiste en hacer girar el motor a una velocidad de 50rpm durante un periodo de 10 segundos, en los cuales se guardaran las mediciones hechas por el MMAVA y por el controlador del motor, el cual es nuestra referencia de velocidad angular.



* Se toma como real (referencia) a los datos obtenidos por el controlador del motor.

Figura 60. Señales capturadas en prueba de velocidad angular con valor de 300 RPM.

Prueba 4: 300rpm con motor inicialmente apagado.



* Se toma como real (referencia) a los datos obtenidos por el controlador del motor.

Figura 61. Señales capturadas en prueba de velocidad angular con valor de 300 RPM.

Al igual que en la prueba 2 (Figura 59), la prueba 4 (Figura 61) presenta errores de

mayor magnitud durante el transitorio que cuando la velocidad angular ha sido estabilizada. Sin embargo al observar la señal de las mediciones de la tarjeta MMAVA (línea azul) nos percatamos que la señal pareciera estar cortada alrededor de los $330rpm$ y no registra ningún valor por encima de este límite incluso cuando el controlador registra valores por arriba de los $400rpm$. Esto se debe al rango de mediciones que maneja la MMAVA, ya que el valor máximo que puede medir el sensor utilizado en la medición es de $320rpm$.

Prueba 5: Señal sinusoidal.

Para esta prueba, haremos que la magnitud de la velocidad angular varíe continuamente con respecto al tiempo. La señal deseada es una función seno con $50rpm$ de amplitud pico con una frecuencia de $3.3Hz$.

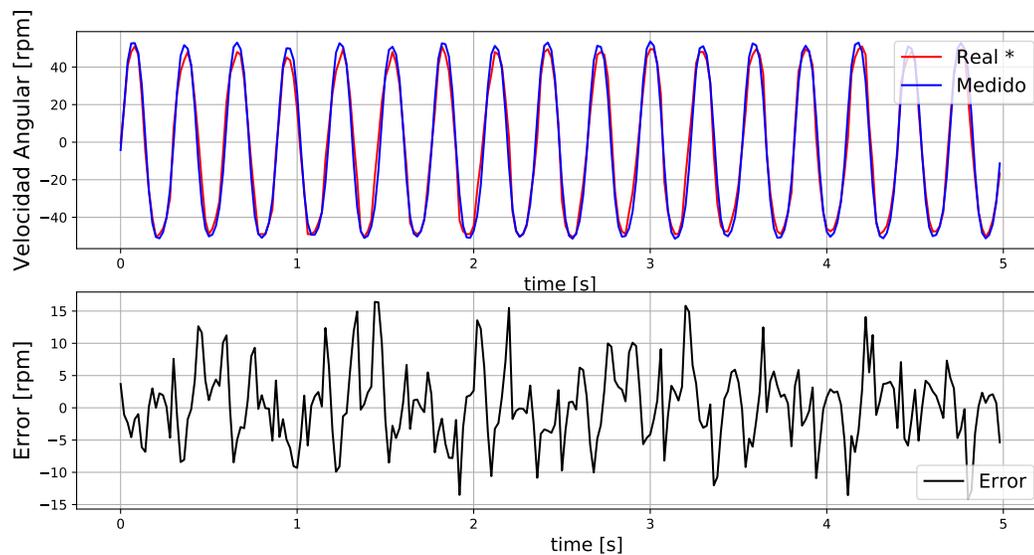
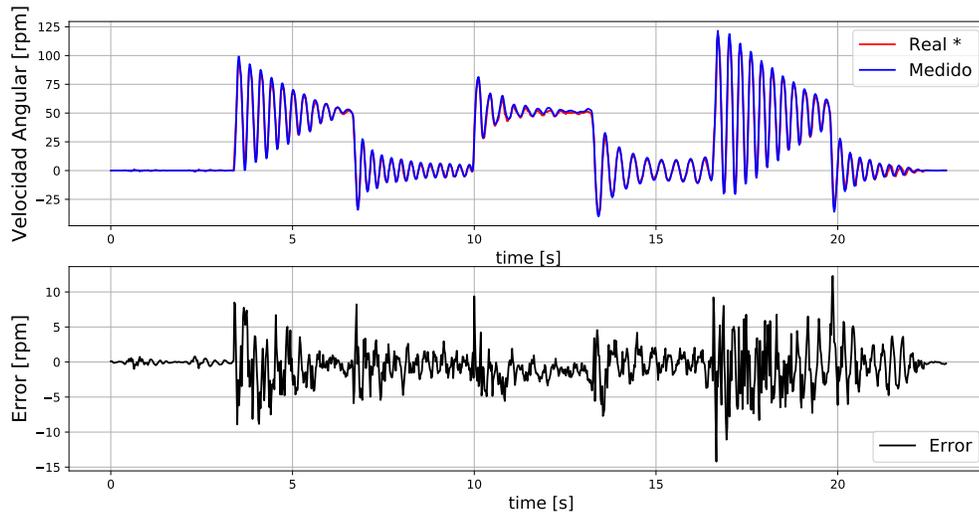


Figura 62. Prueba de velocidad angular con una función sinusoidal de $50rpm$ de amplitud pico.

Tanto la medición del controlador como la del MMAVA tienen la misma forma y son muy parecidas durante los 5 segundos que dura la prueba. Las mediciones del controlador (línea roja) registran un valor máximo de $50.98rpm$ y un valor mínimo de $-50.45rpm$, mientras que el MMAVA (línea azul) registra un valor máximo de $53.62rpm$ y un valor mínimo de $-51.43rpm$. El error máximo registrado es de $16.4rpm$, en un instante de tiempo mientras que el promedio del error es de $0.358rpm$.

Prueba 6: Señal cuadrada.

La siguiente prueba consiste en alternar la velocidad angular entre $0rpm$ y $50rpm$ con una duración de 3 segundos por valor, generando así una señal cuadrada, con una duración de 23 segundos.



* Se toma como real (referencia) a los datos obtenidos por el controlador del motor.

Figura 63. Señales capturadas en prueba de velocidad angular con una forma cuadrada.

De la Figura 63 podemos señalar que la gráfica de la velocidad angular (parte superior) no es precisamente una señal cuadrada sino que la señal cuadrada está deformada, ya que presenta oscilaciones en cada cambio de valor. Y aunque las oscilaciones son decrecientes acercándose al valor deseado ($0rpm$ ó $50rpm$) no alcanzan a estabilizarse cuando ocurre el cambio de valor de velocidad angular. Dando como resultado una señal con oscilaciones decrecientes en ($0rpm$ y $50rpm$).

Independientemente de la forma de la señal de la velocidad angular de referencia (línea roja), se puede observar que la velocidad angular medida (línea azul) es muy parecida a la velocidad real tanto que en algunas partes de la gráfica solo se ve la línea azul. Sin embargo de la gráfica del error (parte inferior) muestra que si hay diferencia entre ambas señales. Analizando las gráficas podemos notar que en los cambios de velocidad angular se presentan los picos de la señal de error y una vez que la velocidad angular va estabilizándose el error va decreciendo. El error máximo registrado es de $-14.21rpm$, en un instante de tiempo mientras que el promedio del error es de $-0.58rpm$.

Precisión

Para determinar la precisión (repetibilidad en las mediciones) de la tarjeta MMAVA, se realizó el siguiente procedimiento. Se configura el motor con una velocidad angular de 150rpm después se configura la tarjeta MMAVA para medir cada 20ms durante 5 segundos, transcurridos los 5 segundos se detiene el motor y se guardan las mediciones en un archivo. Este proceso se repitió 5 veces.

La Figura 64 muestra las 5 señales de las mediciones guardadas. Por ejemplo la señal $m1$ es la primera trama de datos medidos, así la señal $m5$ fue la quinta trama de datos medidos.

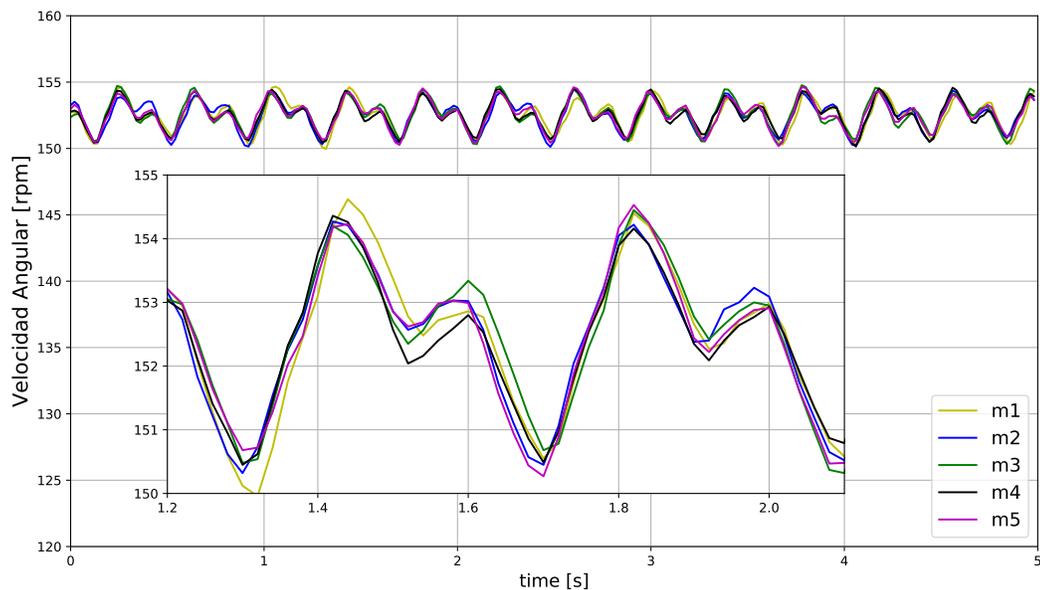


Figura 64. Gráfica con 5 mediciones diferentes.

De la gráfica anterior podemos observar que aunque el motor se encuentra girando a la misma velocidad todas las mediciones son diferentes. Para poder calcular la precisión en las mediciones, el primer paso es obtener el promedio de las mediciones.

$$\bar{m} = \frac{m_i + m_{i+1} + \dots + m_N}{N} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5}{5} \quad (40)$$

Donde N es el número de mediciones hechas.

\bar{m} es el promedio o media de las mediciones.

m_i es el vector de datos medidos.

Después de obtener el promedio de las 5 señales, debemos calcular el error de cada señal con respecto al promedio:

$$e_i = m_i - \bar{m} \quad (41)$$

Quedando así el error para cada una de las mediciones:

$$e_1 = m_1 - \bar{m}$$

$$e_2 = m_2 - \bar{m}$$

$$e_3 = m_3 - \bar{m}$$

$$e_4 = m_4 - \bar{m}$$

$$e_5 = m_5 - \bar{m}$$

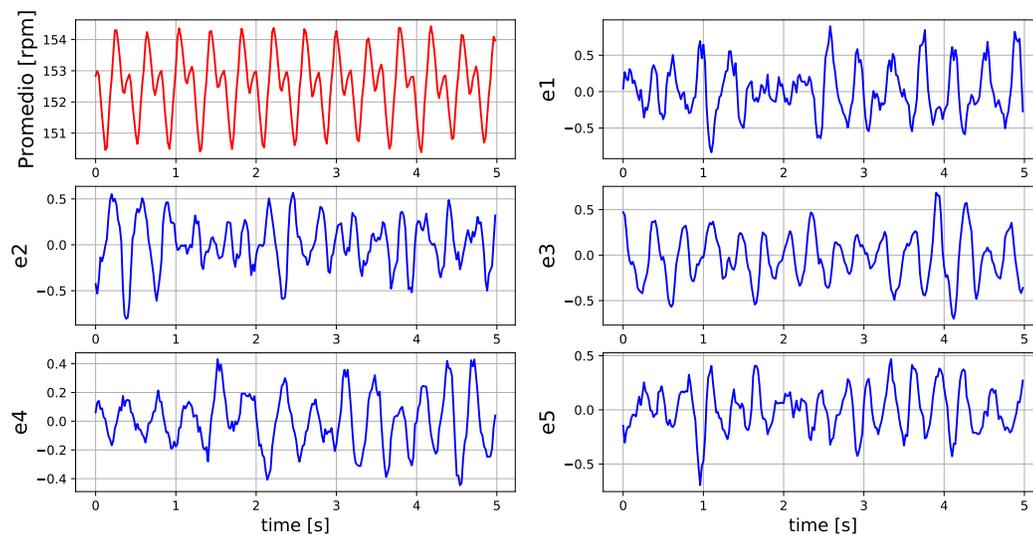


Figura 65. Gráfica de los errores de las señales con respecto al promedio.

De la Figura 65, el promedio (línea roja) se obtuvo usando la ecuación (40) y los errores se obtuvieron usando la ecuación (41). Observando las gráficas de cada error, podemos notar que su valor es muy pequeño alrededor $0.5rpm$.

Una forma de expresar la variación entre las mediciones es usar la desviación estándar.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}{N - 1}} \quad (42)$$

Para calcular este parámetro tomaremos la muestras donde el error es mayor. Haciendo esto nos aseguraremos que la incertidumbre siempre sea menor que el valor que obtengamos. El mayor error detectado es de $0.898rpm$. Con el cual calcularemos la siguiente tabla:

Tabla 3. Desviación de cada medición.

Medición	Muestra (m_i)	Promedio (\bar{m})	Desviación $ m_i - \bar{m} $	Desviación promedio
m1	152.82		0.898	
m2	153.82		0.102	
m3	154.02	153.718	0.302	0.3576
m4	153.89		0.172	
m5	154.04		0.322	

Sustituyendo la desviación de cada medición en (42) obtendremos el valor de la desviación estándar.

$$S = \sqrt{\frac{(0.898)^2 + (0.102)^2 + (0.302)^2 + (0.172)^2 + (0.322)^2}{4}} \quad (43)$$

$$S = 0.501 \approx 0.5$$

De manera que la precisión de la tarjeta MMAVA es de $0.5rpm$. Lo que significa que entre de una medición a otra puede haber una diferencia no mayor a $0.5rpm$.

Exactitud

La exactitud a menudo se expresa cuantitativamente mediante el uso de un error absoluto:

$$e_{abs} = |\text{valor}_{real} - \text{valor}_{med}| \quad (44)$$

Donde $error_{abs}$ es el error absoluto.

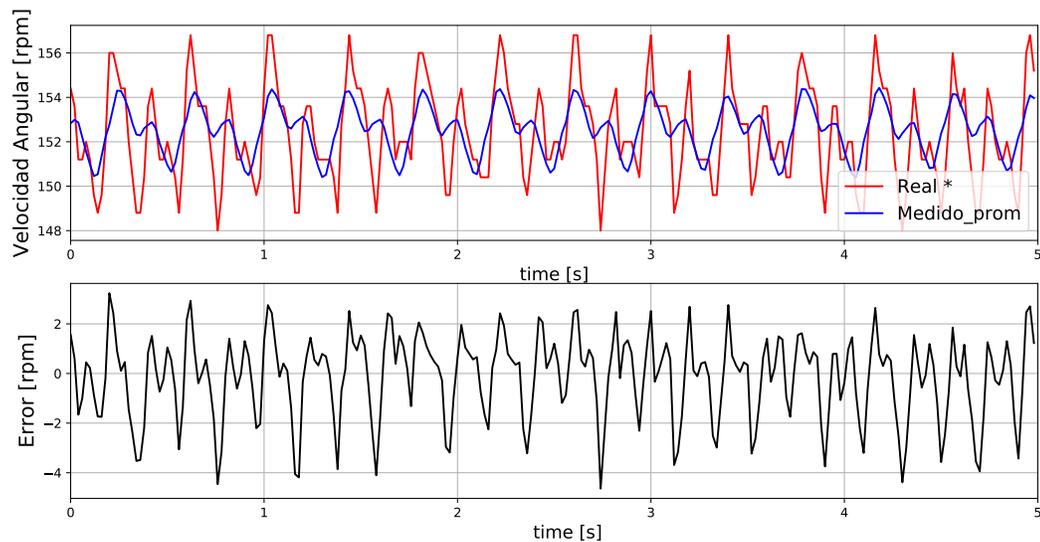
$valor_r$ es el valor real en cierto instante de tiempo.

$valor_m$ es el valor medido en cierto instante de tiempo.

También puede expresarse en mediante el error relativo:

$$error_{rel} = \frac{error_{abs}}{valor_{real}} * 100 \quad (45)$$

Para determinar la exactitud de la tarjeta MMAVA usaremos las mediciones que utilizamos para determinar la precisión del mismo, además de una medición por parte del motor hecha al mismo tiempo que se hicieron esas mediciones.



* Se toma como real (referencia) a los datos obtenidos por el controlador del motor.

Figura 66. Gráfica del error de la señal del motor y el promedio de las señales de la tarjeta MMAVA.

De la Figura 66 (parte superior), la línea roja es la medición hecha por el controlador del motor y la línea azul son el promedio de las 5 mediciones distintas. Y en la parte superior tenemos la diferencia entre ambas señales. Al igual que en la precisión, para calcular el error relativo tomaremos la muestras donde el error es mayor.

Sustituyendo los valores de las mediciones en (44) y (45), tenemos:

$$e_{abs} = |148 - 152.64| = 4.64 \text{ [rpm]} \quad (46)$$

$$error_{rel} = \frac{4.64}{148} * 100 = 3.13\% \quad (47)$$

Con base a los valores de precisión y exactitud obtenidos y con las características físi-

cas de la tarjeta MMAVA como peso y tamaño, podemos generar la siguiente tabla.

Tabla 4. Características operacionales de la tarjeta MMAVA.

Parámetro	Valor
Alimentación	2.5-5.5 VDC
Consumo	45mA
Periodo de sensado	Ajustable (10ms - 1s)
Tamaño	62mm x 62mm
Peso	35g
Rangos de medicion	Acelerómetro: $\pm 16g$ Giroscopio: $\pm 333rpm$
Exactitud	$\pm 3.5 \%$
Precisión	$\pm 0.5rpm$

Capítulo 8. Conclusiones y trabajo futuro

8.1. Conclusiones

En este proyecto de tesis se presentó el diseño de la tarjeta MMAVA (Modulo de Medición de Aceleración y Velocidad Angular), así como su desarrollo, validación y pruebas de funcionamiento. Siendo el objetivo principal el estudio teórico-experimental de sensores inerciales, así como su implementación en un sistema de medición de velocidad angular. Por lo que se trabajo en los siguientes puntos:

- Se propuso un sistema para medir la velocidad angular y aceleración a la que se encuentre sometido capaz de operar de manera remota y autónoma.

- Se diseño una tarjeta de circuito impreso implementando los componentes electrónicos (microcontrolador, reguladores, sensores) en la menor área posible, ya que el costo de fabricación depende en mayor parte del área de la tarjeta. Así como el programa lógico en lenguaje c++ para el microcontrolador con el que ejecutará cada una de las tareas esperadas.

- Se valido el diseño de la tarjeta MMAVA verificando que no hubiera cortos circuitos y que las conexiones estuvieran bien hechas. Además se probo la tarjeta operara en todo el rango de voltaje de alimentación planeados en el diseño y las pruebas fueron satisfactorias.

- Se verificó su funcionamiento tanto en la capacidad de poder cargar el archivo de instrucciones desde la computadora donde se desarrollo el código a la memoria flash del microcontrolador, así como que el microcontrolador siga las tareas programadas tales como: generar interrupciones por temporizador, leer sensores inerciales, enviar las mediciones inalámbricamente a la computadora.

Se desarrollo una interfaz gráfica de usuario para poder configurar y operar el MMAVA, además de visualizar y graficar los valores aceleración y velocidad angular. Posteriormente se hicieron pruebas de operación demostrando que ambos sistemas funcionan adecuadamente y se comunican entre si.

Por último se realizaron pruebas de velocidad angular para validar que las mediciones obtenidas por la tarjeta MMAVA sean confiables, con las cuales se pudo determinar

la exactitud, precisión y rango de operación.

Rango de operación: $\pm 330rpm$

Exactitud: $\pm 3.5\%$

Precisión: $\pm 0.5rpm$

Por lo anterior se puede concluir que el MMAVA desarrollado en este tema de tesis es un sistema operacional, de bajo costo en comparación con otros productos ofrecido en el mercado, útil y confiable para medir la velocidad angular. (aceleración.)

8.2. Trabajo futuro

Como trabajo a futuro se proponen los siguientes puntos:

- Caracterizar las mediciones de aceleración de la tarjeta MMAVA.
- Una vez tenido la confiabilidad de las mediciones de aceleración y velocidad angular trabajar en un algoritmo para obtener la posición de algún mecanismo.
- Trabajar en el desarrollo de un controlador de velocidad angular o posición de algún mecanismo como péndulo, robot móvil o cuadricóptero usando las mediciones de la tarjeta MMAVA.

Literatura citada

- Alonso, M. y Finn, E. J. (1967). *Fundamental university physics*, Vol. 2. Addison-Wesley Reading, MA.
- Armenise, M. N., Ciminelli, C., Dell'Olio, F., y Passaro, V. M. (2010). *Advances in gyroscope technologies*. Springer Science & Business Media.
- Chau, K. (2015). *Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application*. John Wiley & Sons.
- Coombs, C. F. y Holden, H. T. (2001). *Printed circuits handbook*, Vol. 1. McGraw-Hill New York.
- De Silva, C. W., Khoshnoud, F., Li, M., y Halgamuge, S. K. (2015). *Mechatronics: Fundamentals and applications*. CRC Press.
- Goto, K., Oguma, T., y Fukuoka, Y. (1998). High density printed circuit board using b/sup 2/it/sup tm/technology. En: *2nd 1998 IEMT/IMC Symposium (IEEE Cat. No. 98EX225)*. IEEE, pp. 316–320.
- Halliday, D., Resnick, R., y Walker, J. (2013). *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons.
- Horowitz, P. y Hill, W. (1989). *The art of electronics*. Cambridge Univ. Press.
- Kok, M., Hol, J. D., y Schön, T. B. (2017). Using inertial sensors for position and orientation estimation. *arXiv preprint arXiv:1704.06053*.
- Naduvanamani, S. y Iyer, N. C. (2016). Design and simulation of pzt based mems piezoelectric accelerometer. En: *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. IEEE, pp. 3715–3721.
- Ogata, K. y Yang, Y. (2002). *Modern control engineering*, Vol. 4. Prentice hall India.
- Raghavendra, N. y Krishnamurthy, L. (2013). *Engineering metrology and measurements*. Oxford University Press Oxford.
- Teslyuk, V., Karkulovskiy, B., y Kernytsky, A. (2010). Modeling of capacitive accelerometer constructions. En: *2010 Proceedings of VIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*. IEEE, pp. 208–208.
- Valvano, J. W. (2011). *Embedded microcomputer systems: real time interfacing*. Cengage Learning.
- Webster, J. G. (1999). *The Measurement, Instrumentation, and Sensors: Handbook*. Springer Science & Business Media.
- Young, H. D., Freedman, R. A., Sandin, T., y Ford, A. L. (1996). *University physics*, Vol. 9. Addison-Wesley Reading, MA.
- Younis, M. I. (2011). *MEMS linear and nonlinear statics and dynamics*, Vol. 20. Springer Science & Business Media.