



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**MECANISMO INERCIAL ELECTRÓNICO PARA ASISTENCIA A PERSONAS
CON DISCAPACIDAD FÍSICA**

Víctor Javier López Chacón

Asesorado por el Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez

Guatemala, abril de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MECANISMO INERCIAL ELECTRÓNICO PARA ASISTENCIA A PERSONAS
CON DISCAPACIDAD FÍSICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

VÍCTOR JAVIER LÓPEZ CHACÓN

ASESORADO POR EL ING. BYRON ODILIO ARRIVILLAGA MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, ABRIL DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. María Magdalena Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MECANISMO INERCIAL ELECTRÓNICO PARA ASISTENCIA A PERSONAS CON DISCAPACIDAD FÍSICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 23 de mayo de 2013.



Víctor Javier López Chacón

Guatemala, 17 de noviembre de 2017

Señor Coordinador
Ing. Julio César Solares Peñate
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

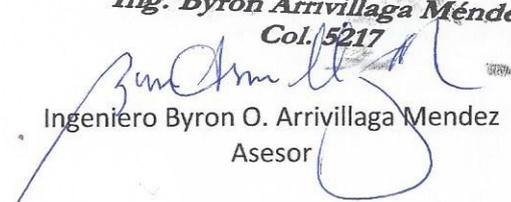
Señor Coordinador:

Por este medio me dirijo a usted para informarle que habiendo asesorado al estudiante Victor Javier López Chacón con carné No. 2003-12434 en el trabajo de graduación "Mecanismo inercial electrónico para asistencia a personas con discapacidad física", y llenando éste los objetivos trazados, extendiendo la aprobación del mismo.

Por lo tanto, el autor de este trabajo y yo como asesor, nos hacemos responsables del contenido y las conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me suscribo atentamente.

Ing. Byron Arrivillaga Méndez
Col. 5217


Ingeniero Byron O. Arrivillaga Méndez
Asesor



REF. EIME 10. 2018.

30 DE NOVIEMBRE 2017.

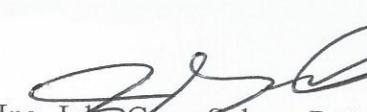
Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**MECANISMO INERCIAL ELECTRÓNICO PARA
ASISTENCIA A PERSONAS CON DISCAPACIDAD FÍSICA,**
del estudiante Victor Javier López Chacón, que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio Cesar Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

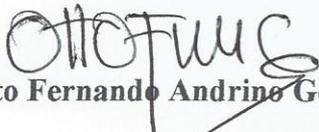


S/O



REF. EIME 10. 2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; VICTOR JAVIER LÓPEZ CHACÓN titulado: MECANISMO INERCIAL ELECTRÓNICO PARA ASISTENCIA A PERSONAS CON DISCAPACIDAD FÍSICA, ,
procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andriño González

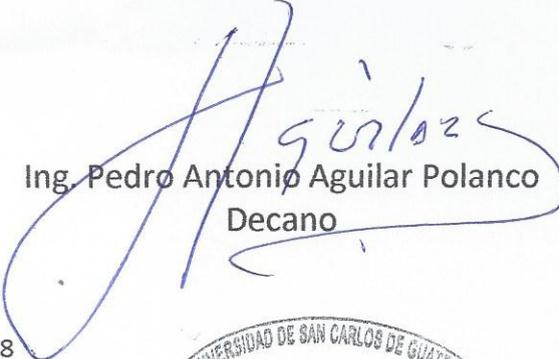


GUATEMALA, 1 DE MARZO 2018.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **MECANISMO INERCIAL ELECTRÓNICO PARA ASISTENCIA A PERSONAS CON DISCAPACIDAD FÍSICA**, presentado por el estudiante universitario: **Víctor Javier López Chacón**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, abril de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser una importante influencia en mi carrera, por permitir conocer, estudiar y trabajar con todas las personas maravillosas con quienes cada día comparto la grandeza de tu existencia.

Mis padres

Por todo el apoyo que me prestaron, el ejemplo a seguir y ser siempre la luz que guiaba mi camino.

Carolina Villatoro

En ti encontré una compañera, amiga y el amor de mi vida, por apoyarme desde un inicio, invirtiendo tu valioso tiempo y conocimiento, por ser siempre una de las personas en quien encontré valores y comprensión, quien me ayudó a seguir adelante.

Dra. Dorita

Por enseñarme lo que es luchar por amor, con cada respirar me diste un ejemplo de perseverancia.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por ser una importante influencia en mi carrera, por darme las herramientas que me permiten retribuir al pueblo un poco de lo tanto que me ha dado.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme un lugar donde el conocimiento, la experiencia y lo científico existen en armonía para que profesionales se formen.

Mis hermanos

Evelyn y David López, por apoyarme en todas las cosas; desde pequeño me guiaron a lo que hoy puedo compartir con ustedes.

Mis amigos

Por todas las experiencias que comparten que, al día de hoy, nos hacen profesionales dentro de la sociedad guatemalteca.

Ing. Byron Arrivillaga

Por demostrarme con actos lo que un verdadero profesional en nuestra carrera es; además, por el apoyo por el cual es posible presentar este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
HIPÓTESIS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. FUNDAMENTOS TEÓRICO-TÉCNICOS.....	1
1.1. Sensores	1
1.1.1. Conceptos básicos	2
1.1.2. Tipos de sensores	3
1.1.3. Sensores inerciales	6
1.2. MEMS.....	7
1.2.1. Concepto	7
1.2.2. Marcas y modelos.....	9
1.2.3. Interface de comunicación.....	11
1.2.4. MPU-6050.....	17
1.2.5. DMP.....	18
1.3. Microcontrolador PIC.....	18
1.3.1. Juego de instrucciones y entorno de programación.....	18
1.3.2. Arquitectura central.....	20
1.3.3. Características.....	21
1.4. UART.....	22
1.4.1. Concepto	22
1.4.2. Conexión	22

1.4.3.	Velocidades de transmisión.....	23
1.5.	Wifi	24
1.5.1.	Concepto	24
1.5.2.	Tipos de redes.....	25
1.5.3.	Módulos disponibles para microcontroladores	26
1.6.	Bluetooth	29
1.6.1.	Concepto	29
1.6.2.	Módulos disponibles para microcontroladores	30
1.7.	USB.....	33
1.7.1.	Concepto	33
1.7.2.	Velocidades de transmisión.....	34
1.7.3.	Conectores	35
1.7.4.	Módulos disponibles para microcontroladores	37
2.	SENSOR MPU-6050.....	39
2.1.	Características	39
2.2.	Acelerómetro y giroscopio.....	39
2.3.	DMP	41
2.4.	I2C en MPU-6050.....	45
2.5.	Configuraciones	47
2.6.	Inicialización	48
2.7.	Lectura de datos de aceleración y giro.....	50
2.8.	Lectura de cuaterniones.....	53
3.	CIRCUITO DE CONTROL CON MICROCONTROLADOR.....	55
3.1.	Requisitos básicos	55
3.2.	Diseño	55
3.3.	Compilador HI-TECH	56
3.4.	Compilador C18	57

3.5.	Programación	57
3.5.1.	PIC16F877A	57
3.5.2.	PIC18F4550.....	58
4.	INTERFACE	59
4.1.	UART-USB	59
4.2.	UART- Bluetooth	60
4.3.	UART-Wifi.....	61
5.	DRIVER.....	63
5.1.	Java	63
5.2.	Linux.....	64
5.2.1.	Raspberry Pi.....	65
5.3.	Windows	67
	CONCLUSIONES	69
	RECOMENDACIONES.....	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sensor HC-SR04	4
2.	Sensor de distancia infrarrojo Sharp GP2Y0A02YK0F	4
3.	Dht11 Sensor de humedad y temperatura	5
4.	Sensor de presión Bosch BMP085	6
5.	Los cinco movimientos básicos asociados a la aceleración de un objeto	8
6.	STMicroelectronics.....	10
7.	Invensense.....	11
8.	Configuración eléctrica básica del bus	14
9.	Entorno de programación MPLAB versión 8.92.00.00, compilador C30.....	20
10.	Diagrama de conexión entre un cable de datos y un módulo UART	22
11.	Cálculo de frecuencia de reloj UART	23
12.	Velocidades de UART	24
13.	Logotipo Wifi	25
14.	Módulo RN-XV	27
15.	Módulo MRF24WB0MA.....	28
16.	Módulo CC3000	29
17.	Módulo HC-05.....	31
18.	Módulo CC256x Bluetooth®.....	32
19.	Módulo RN42XVP	33
20.	Tipo de conector USB	36
21.	Módulo CP210x USB a UART.....	37

22.	Módulo MCP2200	38
23.	Orientación de los ejes	42
24.	Los cinco movimientos básicos asociados a la aceleración de un objeto	42
25.	Diagrama de flujo de la función DMP ().	44
26.	Encapsulado MPU-6050	45
27.	Diagrama de módulo genérico MPU-6050	46
28.	Condición START STOP	47
29.	Página I2C devlib	48
30.	Registro 58, MPU-6050	50
31.	Registros de lectura de acelerómetro, MPU-6050	51
32.	Escalas y sensibilidad de acelerómetro en MPU-6050	51
33.	Registros de lectura de giroscopio en MPU-6050	52
34.	Escalas y sensibilidad de giroscopio en MPU-6050	52
35.	Mapa de registros, MPU-6050	53
36.	Registros de lectura FIFO	54
37.	Registro MPU-6050, datos de FIFO	54
38.	Modelo de PCB flexible	56
39.	PIC16F877A	57
40.	PCI18F4550	58
41.	Tarjeta de desarrollo CP210x.	59
42.	Tarjeta de desarrollo HC-06	60
43.	Tarjeta de desarrollo RN-171	61
44.	NetBeans IDE 8.1	63
45.	Captura de driver diseñado	64
46.	Logo de Linux TM	64
47.	Ubuntu 14.04 LTS	65
48.	Raspberry Pi	66
49.	Raspbian	66

50. Logo de Windows® 7	67
------------------------------	----

TABLAS

I. Grados de desempeño para sensores inerciales	7
II. Freescale semiconductor	9
III. Pines del módulo I2C	45

RESUMEN

Dado que las personas que están dentro de un cuadro clínico de discapacidad física requieren dispositivos especializados para manejar un computador, equipo esencial en el mundo actual para mantenerse comunicados, es necesario el desarrollo de tales dispositivos con el uso de la tecnología actual.

El desarrollo puede llevarse a cabo utilizando sensores inerciales de última generación para reducir costos y expandir la funcionalidad; el soporte multiplataforma es esencial en la actualidad para estar en la vanguardia de los cambios tecnológicos.

OBJETIVOS

General

Brindar apoyo y asistencia en el uso de computadoras, o sistemas compatibles, en diferentes plataformas a personas con discapacidades físicas, en la implementación de sensores inerciales y microcontroladores para el desarrollo de un mecanismo inercial electrónico.

Específicos

1. Integrar en el proyecto diferentes puertos estándares de computadora.
2. Optimizar su funcionamiento en sistemas operativos Windows y Linux.
3. Adaptar la funcionalidad del prototipo para que posteriormente sea utilizado en diferentes partes del cuerpo.

HIPÓTESIS

Con el uso de la tecnología disponible se puede desarrollar un dispositivo que brinde asistencia en el uso de un computador a las personas con discapacidad física; dicho sensor se puede diseñar haciendo uso de MEMS (*microelectromechanical systems*), microcontroladores, con diferentes interfaces; el dispositivo deberá adaptarse a diferentes movimientos del cuerpo según las necesidades.

Con el uso del lenguaje de programación Java será posible utilizar el mismo software en varios sistemas operativos sin restar capacidades.

INTRODUCCIÓN

La siguiente tesis explora la hipótesis de utilizar dispositivos MEMS para prestar apoyo a las personas con discapacidades físicas en el manejo de equipos electrónicos de uso diario.

El circuito integrado en el cual se hace enfoque es el MPU-6050, de Invensense; consta de un giroscopio y un acelerómetro en un mismo encapsulado; esto permite ahorrar espacio y peso.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICO-TÉCNICOS

1.1. Sensores

Un sensor es un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud exterior y transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, que sea capaz de cuantificar y manipular.

Normalmente, estos dispositivos se encuentran realizados mediante la utilización de componentes pasivos (resistencias variables, PTC, NTC, LDR) o mediante la utilización de componentes activos.

Los sensores tienen una serie de características:

- **Exactitud.** Hace referencia a que se debe poder detectar el valor verdadero de la variable sin errores sistemáticos. Sobre varias mediciones, la media de los errores cometidos debe tender a cero.
- **Precisión.** Una medida será más precisa que otra si los posibles errores aleatorios en la medición son menores. Se debe procurar la máxima precisión posible.
- **Rango de funcionamiento.** El sensor debe tener un amplio rango de funcionamiento, es decir, debe ser capaz de medir de manera exacta y precisa un amplio abanico de valores de la magnitud correspondiente.

- Velocidad de respuesta. El sensor debe responder a los cambios de la variable a medir en un tiempo mínimo. Lo ideal sería que la respuesta fuera instantánea.
- Calibración. La calibración es el proceso mediante el cual se establece la relación entre la variable medida y la señal de salida que produce el sensor. La calibración debe poder realizarse de manera sencilla; además, el sensor no debe precisar una recalibración frecuente.
- Fiabilidad. El sensor debe ser fiable, es decir, no debe estar sujeto a fallos inesperados durante su funcionamiento.
- Coste. El coste para comprar, instalar y manejar el sensor debe ser lo más bajo posible.
- Facilidad de funcionamiento. Sería ideal que la instalación y funcionamiento del sensor no necesitara de un aprendizaje excesivo.

1.1.1. Conceptos básicos

En electrónica, los sensores se pueden clasificar en dos tipos diferentes:

- Analógicos

Proporcionan una señal continua: voltaje o corriente eléctrica. Esta señal es proporcional al valor de la variable física que se mide.

- Digitales

Proporcionan una señal discreta en la forma de un conjunto de bits en paralelo o formando una serie de pulsaciones que pueden ser contadas; estas señales digitales representan el valor de la variable medida en diferentes formatos. Los sensores digitales ofrecen la ventaja de ser más compatibles con los sistemas digitales que los sensores analógicos.

1.1.2. Tipos de sensores

En esta tesis se clasifican los sensores según el tipo de variable medida; los sensores tienen una diversidad muy amplia, por lo cual se mencionarán los más utilizados en la industria.

- Sensores ultrasónicos

Son sensores que trabajan a distancia; utilizan el mismo principio del sonar puede detectar objetos sin contacto alguno; los objetos a detectar pueden ser metálicos o no metálicos. Un módulo ultrasónico muy popular es el HC-SR04 el cual es compatible con varios sistemas digitales y por su uso muy simplificado.

Figura 1. **Sensor HC-SR04**



Fuente: *Robotshop*. http://www.robotshop.com/letsmakerobots/files/field_primary_image/HC-SR04-Ig.jpg? Consulta: 12 de julio de 2017.

- **Sensores infrarrojos**

La optoelectrónica es la integración de los principios ópticos y la electrónica de semiconductores. Los componentes optoelectrónicos son sensores fiables y económicos. Se incluyen diodos emisores de infrarrojos (IREDS), sensores y montajes.

Figura 2. **Sensor de distancia infrarrojo Sharp GP2Y0A02YK0F**

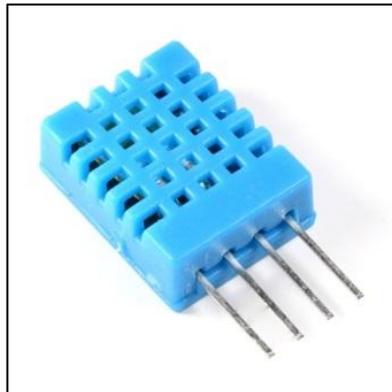


Fuente: *Sparkfun*. <https://cdn.sparkfun.com//assets/parts/2/2/6/0/08958-03-L.jpg>. Consulta: 12 de julio de 2017.

- **Sensores de humedad**

Los sensores de humedad relativa/temperatura y humedad relativa están configurados con circuitos integrados que proporcionan una señal acondicionada. Estos sensores contienen un elemento sensible capacitivo en base de polímeros que interacciona con electrodos de platino. Están calibrados por láser y tienen una intercambiabilidad de +5 % HR, con un rendimiento estable y baja desviación.

Figura 3. **Dht11 Sensor de humedad y temperatura**

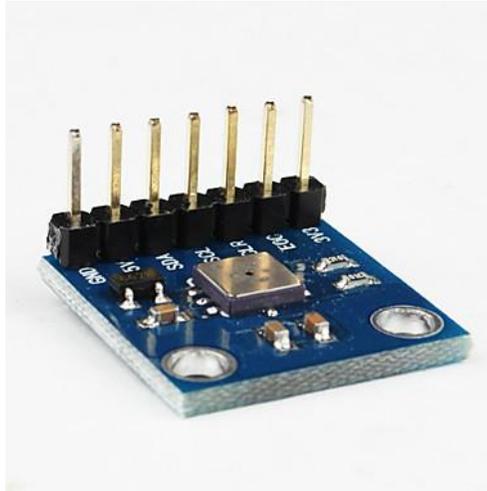


Fuente: *Hellasdigital*. <http://www.hellasdigital.gr/images/detailed/5/dht11.jpg>. Consulta: 12 de julio de 2017.

- **Sensores de presión y fuerza**

Los sensores de presión son pequeños, fiables y de bajo coste. Ofrecen una excelente repetitividad y una alta precisión y fiabilidad bajo condiciones ambientales variables. Además, presentan unas características operativas constantes en todas las unidades y una intercambiabilidad sin recalibración.

Figura 4. **Sensor de presión Bosch BMP085**



Fuente: *Madrigalelectronics*. <http://madrigalelectronics.com/images/watermarked/1/detailed/1/BMP085.jpg>. Consulta: 12 de julio de 2017.

1.1.3. Sensores inerciales

Un sensor inercial es un dispositivo capaz de convertir o transducir los efectos de una fuerza en una señal registrable, normalmente, de tipo eléctrico. Los efectos provocados por la fuerza y registrados por los sensores inerciales, generalmente, son la aceleración lineal; en el caso de los acelerómetros, y el movimiento angular, sobre uno o varios ejes, en el caso de los giroscopios. Dichos efectos físicos se transforman en una salida de voltaje linealmente proporcional y se cuida que el proceso de transducción tenga una sensibilidad específica en función de la aplicación en la que son incluidos.

Los grados de desempeño de este tipo de sensores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla I. Grados de desempeño para sensores inerciales

Grado	Resolución para acelerómetros	Resolución para giroscopios
Estratégico	< 1 μg	< 0,0001 $^{\circ}/\text{h}$
Navegación	10 - 50 μg	0,001 – 0,01 $^{\circ}/\text{h}$
Táctico	0,1 - 1 mg	1 – 10 $^{\circ}/\text{h}$
Instrumentación	10 -100 mg	30 – 100 $^{\circ}/\text{h}$

Fuente: elaboración propia.

1.2. MEMS

MEMS o sistemas microelectromecánicos (*microelectromechanical systems*, MEMS), se refieren a la tecnología electromecánica, micrométrica y sus productos, y a escalas relativamente más pequeñas (escala manométrica) se fusionan en sistemas nanoelectromecánicos (*nanoelectromechanical systems*, NEMS) y nanotecnología. MEMS también se denominan microMáquinas (en Japón) o tecnología de microsistemas - MST (en Europa).

1.2.1. Concepto

“Los MEMS son independientes y distintos de la hipotética visión de la nanotecnología molecular o electrónica molecular. Los MEMS, en general, varían en tamaño desde un micrómetro (una millonésima parte de un metro) a un milímetro (milésima parte de un metro). En este nivel de escala de tamaño, las construcciones de la física clásica no son siempre ciertas. Debido a la gran superficie en relación al volumen de los MEMS, los efectos de superficie como electrostática y viscosidad dominan los efectos de volumen como la inercia o la masa térmica. El análisis de elementos finitos es una parte importante del diseño de los MEMS. La tecnología de sensores ha hecho progresos significativos debido a los MEMS. La complejidad y el rendimiento avanzado de los sensores MEMS han ido evolucionando con las diferentes generaciones de sensores MEMS”¹.

¹ *Sistemas microelectromecánicos (MEMS)*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/213/4/A4.pdf>. Consulta: 12 de julio de 2017.

La tecnología MEMS (*micro-electro-mechanical systems*) se utiliza desde hace más de dos décadas para manejar el despliegue de los *airbags* de un automóvil y para sensores de presión de todo tipo; en esta tesis se utilizarán sensores inerciales los cuales se caracterizan por medir la aceleración y velocidad angular, se utilizan en aplicaciones de captura y análisis de movimiento. Está compuesto por acelerómetros, giróscopos y magnetómetros. Los acelerómetros miden la aceleración lineal con que se mueve el sensor, los giróscopos la velocidad angular y los magnetómetros dan información acerca del norte magnético. Con estos tres sensores es posible estudiar el movimiento del sensor inercial completo en el plano o el espacio (esto depende de los ejes que posean los sensores).

Figura 5. **Los cinco movimientos básicos asociados a la aceleración de un objeto**



Fuente: *Amazonaws* http://newimgwp.s3.amazonaws.com/CDBB_1024_44537.jpg. Consulta: 12 de julio de 2017.

Beneficios de los MEMS:

- Bajo costo
- Bajo consumo de energía
- Miniaturización
- Alto desempeño

- Fácil integración

1.2.2. Marcas y modelos

Entre las diferentes marcas que fabrican MEMS se pueden mencionar:

Tabla II. Freescale semiconductor

Product	Description	Axis	Acceleration (g)	Accelerometer output	Sensitivity – Typ (mV/g)	Frequency - Typ(Hz)	Zero G Output - Typ(V)	Supply Voltage	Package
MMA1270KEG (4)	±2.5g, Z-Axis, Analog Acceleration Sensor	Z	2,5	Analog	750	50	2,5	4,75 to 5,25	SOIC 16
MMA1254EG (4)	±5g, Z-Axis, Analog Acceleration Sensor	Z	5	Analog	400	50	2,5	4,75 to 5,25	SOIC 16
MMA1220 (6)	±8g, Z-Axis, Analog Acceleration Sensor	Z	8	Analog	250	250	2,5	4,75 to 5,25	SOIC 16
FXLS8471Q (2)	FXLS8471Q Xtrinsic Accelerometer	-	-	-	-	-	-	-	QFN 16
MMA1250KEG (2)	±5g, Z-Axis, Analog Acceleration Sensor	Z	5	Analog	400	50	2,5	4,75 to 5,25	SOIC 16
MMA1251 (2)	+5g, Z Axis, Analog Accelerometer	Z	5	Analog	400	50	2,5	4,75 to 5,25	SOIC 16
MMA2240 (6)	±7g, X-Axis, Analog Acceleration Sensor	X	7,10	Analog	-	400	2.5	4,75 to 5,25	SOIC 16
MMA2244 (2)	±20g, X-Axis, Analog Acceleration Sensor	X	20	Analog	100	400	2.5	4,75 to 5,25	SOIC 16
MMA690xQ (8)	±3.5g/±5.0g, Dual-Axis, Analog Acceleration Sensor	XY	3,5,5	SPI	-	400	2.5	3,15 to 3,45,4,75 to 5,25	QFN 16
MMA745xL (3)	±2g/±4g/±8g, 3-Axis, Digital Acceleration Sensor	XYZ	2	I2C,SPI	-	-	0	2,4 to 3,6	LGA 14
MMA7660FC (2)	±1.5g, 3-Axis, Digital Accelerometer	XYZ	1.5	I2C	-	-	0	2,4 to 3,6	DFN 10
MMA8450Q (2)	±2g/±4g/±8g, 3-Axis, Digital Accelerometer	XYZ	2	I2C	-	-	0	1,71 to 1,89	QFN 16
MMA8451Q (2)	±2g/±4g/±8g, 3-Axis, 14-bit Digital Accelerometer	XYZ	2,4,8	I2C	-	-	0	1,95 to 3,6	QFN 16

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. STMicroelectronics

Products : 24												
Part Number	Marketing Status	Package	Sensing Axes	Angular Rate Range(FS) typ	Output Type	Supply Voltage(VDD) min(V)	Supply Voltage(VDD) typ(V)	Supply Voltage(VDD) max(V)	Angular Rate Noise Density(Ra) typ(\sqrt{Hz})	Current Consumption typ(mA)	Current Consumption (Low Power Mode)	Current Consumption (Power Down Mode)
ASG4250D	Active	LGA 16 4x4x1.1	yaw, pitch, roll	245	Digital	2.4	3	3.6	.03	6.1	1.5	.005
L2G31S	Active	TFLGA 3.5X3X1 16L PIT..	pitch, roll	-	Digital	2.42	3.3	3.6	-	6.4	2.5	.02
L3G3200P	Active	TFLGA 3X3.5X1 16L	yaw, pitch, roll	2000	Digital	2.4	3	3.6	.03	6.1	2	.005
L3G31S	Active	TFLGA 3.5X3X1 16L PIT..	yaw, pitch, roll	-	Digital	2.42	3.3	3.6	-	6.4	2.5	.02
L3G4200D	Active	LGA 16 4x4x1.1	yaw, pitch, roll	2000	Digital	2.4	3	3.6	.03	6.1	1.5	.005
L3G41S	Active	LGA 16 4x4x1.0	yaw, pitch, roll	-	Digital	2.4	2.8	3.6	-	-	-	.02
L3GD20	Active	LGA 16 4x4x1.0	yaw, pitch, roll	-	Digital	2.4	3	3.6	-	6.1	2	.005
L3GD20H	Active	LLGA 16 3x3x1.0	yaw, pitch, roll	2000	Digital	2.2	3	3.6	.011	6.1	2.5	1
LPR402AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, roll	30	Analog	2.7	3	3.6	.01	6.8	2.1	.001
LPR410AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, roll	100	Analog	2.7	3	3.6	.014	6.8	2.1	.001
LPR4150AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, roll	1500	Analog	2.7	3	3.6	.075	6.8	2.1	.001
LPR420AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, roll	300	Analog	2.7	3	3.6	.018	6.8	2.1	.001
LPR430AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, roll	500	Analog	2.7	3	3.6	.025	6.8	2.1	.001
LPR432AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, yaw	30	Analog	2.7	3	3.6	.01	6.8	2.1	.001
LPR410AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, yaw	100	Analog	2.7	3	3.6	.014	6.8	2.1	.001
LPR4150AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, yaw	1500	Analog	2.7	3	3.6	.075	6.8	2.1	.001
LPR430AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, yaw	300	Analog	2.7	3	3.6	.018	6.8	2.1	.001
LPR432AL	Active	LGA 28 4x5x1.1	pitch, yaw	500	Analog	2.7	3	3.6	.025	6.8	2.1	.001
LY3100ALH	Active	LGA 10 3x5x1.1	yaw	1000	Analog	2.7	3	3.6	.016	4.2	2.2	.005
LY3200ALH	Active	LGA 10 3x5x1.1	yaw	2000	Analog	2.7	3	3.6	.074	4.2	2.2	.005
LY330ALH	Active	LGA 10 3x5x1.1	yaw	300	Analog	2.7	3	3.6	.014	4.2	2.2	.005
L3G462S	Evaluation	LGA 16 4x4x1.1	yaw, pitch, roll	625	Analog	2.4	3	3.6	.017	6.9	2	.005
L3G3250A	Preview	TFLGA 3X3.5X1 16L	yaw, pitch, roll	2000	Analog	2.4	3	3.6	.015	6.3	2	.005
L2G21S	Target	WFLGA 2.3X2.3X0.65 1..	pitch, roll	200	Digital	1.71	2.8	3	-	-	-	-

Fuente: *InvenSense*. <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/>. Consulta:

12 de julio de 2017.

Figura 7. **Invensense**

Six Axis MEMS Motion Processor - 3-Axis Gyroscope & 3-Axis Accelerometer

Part #	Gyro Full Scale Range	Gyro Sensitivity	Accel Full Scale Range	Accel Sensitivity	Digital Output	Logic Supply Voltage	Operating Voltage Supply	Package Size
UNITS:	(°/sec)	(LSB/°/sec)	(g)	(LSB/g)		(V)	(V +/-5%)	(mm)
 MPU-61N1	±250 ±500 ±1000 ±2000	131 65.5 32.8 16.4	±2 ±4 ±8 ±16	16384 8192 4096 2048	I ² C or SPI	VDD	2.375V–3.46V	4x4x0.9
 MPU-61N2	±56 ±113 ±225 ±450	585 290 145.6 72.8	±2 ±4 ±8 ±16	16384 8192 4096 2048	I ² C or SPI	VDD	2.375V–3.46V	4x4x0.9
 MPU-61N3	±56 ±113 ±225 ±450	585 290 145.6 72.8	±2 ±4 ±8 ±16	16384 8192 4096 2048	I ² C or SPI	VDD	2.375V–3.46V	4x4x0.9
 MPU-6500	±250 ±500 ±1000 ±2000	131 65.5 32.8 16.4	±2 ±4 ±8 ±16	16384 8192 4096 2048	I ² C or SPI	VDD	1.71V–3.5V	3x3x0.9
 MPU-6000	±250 ±500 ±1000 ±2000	131 65.5 32.8 16.4	±2 ±4 ±8 ±16	16384 8192 4096 2048	I ² C or SPI	VDD	2.375V–3.46V	4x4x0.9
 MPU-6050	±250 ±500 ±1000 ±2000	131 65.5 32.8 16.4	±2 ±4 ±8 ±16	16384 8192 4096 2048	I ² C	1.8V±5% or VDD	2.375V–3.46V	4x4x0.9
 MPU-6150	±250 ±500 ±1000 ±2000	131 65.5 32.8 16.4	±2 ±4 ±8 ±16	16384 8192 4096 2048	I ² C	1.8V±5% or VDD	2.375V–3.46V	4x4x0.9

Fuente: *InvenSense*. <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/>. Consulta: 12 de julio de 2017.

1.2.3. Interface de comunicación

Para la transmisión de una cadena de bits desde un dispositivo a otro a través de una línea de transmisión significa un alto grado de cooperación entre ambos extremos.

El receptor debe saber la velocidad a la que está recibiendo los datos para muestrear la línea a intervalos constantes de tipo; para así determinar cada uno de los bits recibidos, además, debe conocer la duración y la separación entre los bits; a todas estas características se les conoce como temporización.

Para transmitir a través de un medio, todo dispositivo lo hará mediante alguna interfaz; esta interfaz especifica también la conexión física. Para la transmisión se utilizan dos técnicas: asíncrona y síncrona.

En la transmisión asíncrona se busca evitar el problema de temporización mediante el envío interrumpido de cadenas de bits que no sean muy largas. Cada carácter se trata independientemente; es decir, se envía carácter por carácter; dicho carácter puede tener una longitud de 5 a 8 bits. Esta transmisión asíncrona es sencilla y barata, si bien requiere 2 o 3 bits suplementarios para cada carácter.

Esta técnica puede no funcionar correctamente para bloques de datos largos debido a que el reloj podría salir de sincronización para evitar esto se utiliza la transmisión síncrona.

En la transmisión síncrona se envía en bloques de bits (de gran longitud) como una cadena estacionaria sin utilizar código de comienzo o parada. Para prevenir la desincronización entre el emisor y receptor, sus relojes deberán sincronizarse de alguna manera.

- Una posibilidad puede ser proporcionar la señal de reloj a través de una línea independiente. (uno de los extremos enviará regularmente un pulso de corta duración y el otro extremo utilizará esta señal a modo de reloj;

esta técnica funciona a distancias cortas ya que a distancias largas puede aparecer errores de sincronización).

- La otra alternativa consiste en incluir la información relativa a la sincronización en la propia señal de datos.

En la transmisión síncrona se requiere además un nivel de sincronización adicional para que el receptor pueda determinar dónde está el comienzo llamado preámbulo y el fin llamado final. Además de estos bits, se incluirán otros bits que se utilizan en los procedimientos de control de enlace.

Estos bloques de datos forman una trama que son los datos más el preámbulo, más los bits de final junto con la información de control, que dependerá del procedimiento de control del enlace que se utilice.

- Bus I2C

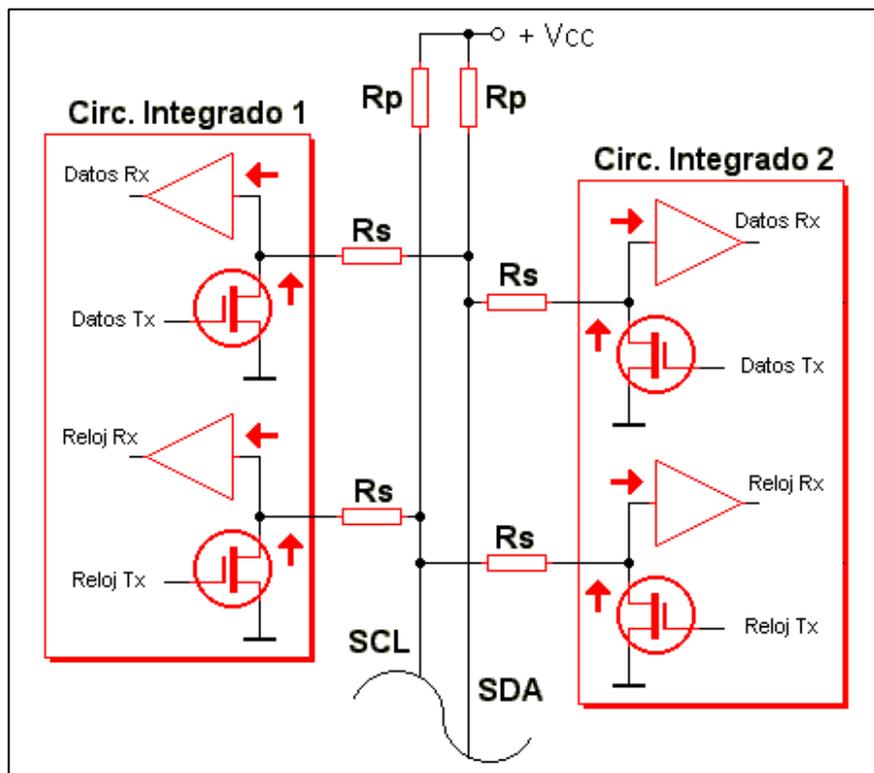
Diseñado por Philips, este sistema de intercambio de información a través de tan solo dos cables permite a circuitos integrados interactuar entre sí a velocidades relativamente lentas. Emplea comunicación serie, utilizando un conductor para manejar los pulsos de reloj y otro para intercambiar datos. Este bus se basa en tres señales:

- SDA (*system data*) por la cual viajan los datos entre los dispositivos.
- SCL (*system clock*) por la cual transitan los pulsos de reloj que sincronizan el sistema.

- GND (*ground*) Interconectada entre todos los dispositivos 'enganchados' al bus.

Las líneas SDA y SCL son del tipo drenador abierto, similares a las de colector abierto pero asociadas a un transistor de efecto de campo (FET). Se deben poner en estado alto (conectar a la alimentación por medio de resistores *pull-up*) para construir una estructura de bus tal que se permita conectar en paralelo múltiples entradas y salidas.

Figura 8. **Configuración eléctrica básica del bus**



Fuente: *Pablin*. <http://www.pablin.com.ar/electron/cursos/i2c/diag01.gif>. Consulta: 12 de julio de 2017.

En el diagrama se observa la configuración eléctrica básica del bus. Las dos líneas de comunicación disponen de niveles lógicos altos cuando están inactivas. Inicialmente, el número de dispositivos que se puede conectar al bus es ilimitado, pero obsérvese que las líneas tienen una especificación máxima de 400pF en lo que respecta a capacidad de carga.

Las definiciones o términos utilizados en relación con las funciones del bus I2C son las siguientes:

- Maestro (*master*): dispositivo que determina la temporización y la dirección del tráfico de datos en el bus. Es el único que aplica los pulsos de reloj en la línea SCL. Cuando se conectan varios dispositivos maestros a un mismo bus la configuración obtenida se denomina multi-maestro.
- Esclavo (*slave*): cualquier dispositivo conectado al bus incapaz de generar pulsos de reloj. Reciben señales de comando y de reloj proveniente del dispositivo maestro.
- Bus desocupado (*bus free*): estado en el cual ambas líneas (SDA y SCL) están inactivas, presentando un estado lógico alto. Únicamente en este momento es cuando un dispositivo maestro puede comenzar a hacer uso del bus.
- Comienzo (*start*): sucede cuando un dispositivo maestro hace ocupación del bus, generando esta condición. La línea de datos (SDA) toma un estado bajo mientras que la línea de reloj (SCL) permanece alta.

- Parada (*stop*): un dispositivo maestro puede generar esta condición dejando libre el bus. La línea de datos toma un estado lógico alto mientras que la de reloj permanece también en ese estado.
- Dato válido (*valid data*): sucede cuando un dato presente en la línea SDA es estable mientras la línea SCL está a nivel lógico alto.
- Formato de datos (*data format*): la transmisión de datos a través de este bus consta de 8 bits de datos (o 1 byte). A cada byte le sigue un noveno pulso de reloj durante el cual el dispositivo receptor del byte debe generar un pulso de reconocimiento, conocido como ACK (del inglés, *acknowledge*). Esto se logra situando la línea de datos a un nivel lógico bajo mientras transcurre el noveno pulso de reloj.
- Dirección (*address*): cada dispositivo diseñado para funcionar en este bus dispone de su propia y única dirección de acceso, que viene pre-establecida por el fabricante. Hay dispositivos que permiten establecer externamente parte de la dirección de acceso. Esto permite que una serie del mismo tipo de dispositivos se puedan conectar en un mismo bus sin problemas de identificación. La dirección 00 es la denominada 'de acceso general', por la cual responden todos los dispositivos conectados al bus.
- Lectura/escritura (bit R/W): cada dispositivo dispone de una dirección de 7 bits. El octavo bit (el menos significativo o LSB) enviado durante la operación de direccionamiento corresponde al bit que indica el tipo de operación a realizar. Si este bit es alto el dispositivo maestro lee información proveniente de un dispositivo esclavo. En cambio, si este bit

fuese bajo el dispositivo maestro escribe información en un dispositivo esclavo.

1.2.4. MPU-6050

El MPU-6050 es un MEMS fabricado por Invensense el cual contiene las siguientes características:

- MEMS: Tri-Axis giroscopio, Tri-Axis acelerómetro
- Voltaje mínimo: 2,5 V
- Voltaje Máximo: 3,6 V
- Encapsulado: QFN
- No. de pines: 24
- Rango del giroscopio: ± 250 °/s, ± 500 °/s, $\pm 1\ 000$ °/s, $\pm 2\ 000$ °/s
- Rango del acelerómetro: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g
- Interface: I2C

La elección de este MEMS sobre otros se basa en sus características únicas; es el primer MEMS en incorporar acelerómetro, giroscopio, sensor de temperatura y DMP (*digital motion processor*[™]) en un mismo encapsulado; consta de dos buses: I2C uno esclavo, con el cual se comunica a un sistema digital, y un bus master, con este bus es capaz de manejar un sensor adicional; contiene 3 convertidores análogos-digitales de 16 bits internos con los cuales digitaliza la salida del acelerómetro y tres convertidores análogos-digitales de 16 bits para digitalizar la salida del giroscopio.

Una memoria de 1024 Byte tipo FIFO, primero en entrar, primero en salir (En inglés *first in, first out*) está incluida en el encapsulado ayudando a bajar el consumo de potencia y permite al sistema digital leer los datos del sensor al

'vuelo', toda comunicación con el sensor se realiza mediante un bus I2C a 400kHz.

1.2.5. DMP

Digital motion processor (DMP) o procesador digital de movimiento; es una unidad de procesamiento que se encarga de fusionar la información de varios sensores; en el caso del MPU-6050 sería un máximo de 3 sensores, se le denomina 9-Axis dado que cada sensor proporciona datos en 3 ejes.

Para activar esta función es necesario seguir una serie de pasos y cargar configuraciones específicas recolectadas por ingeniería inversa; consultar capítulo 2 para más información.

1.3. Microcontrolador PIC

Se seleccionó el microcontrolador Pic por ser un dispositivo ampliamente utilizado en la universidad y la disponibilidad de algunos modelos en el país.

1.3.1. Juego de instrucciones y entorno de programación

El juego de instrucciones es una especificación que detalla las instrucciones que una CPU de un ordenador puede entender y ejecutar, o el conjunto de todos los comandos implementados por un diseño particular de una CPU. El término describe los aspectos del procesador generalmente visibles a un programador, incluyendo los tipos de datos nativos, las instrucciones, los registros, la arquitectura de memoria y las interrupciones, entre otros aspectos.

Existe principalmente de 3 tipos: CISC (*complex instruction set computer*), RISC (*reduced instruction set computer*) y SISC (*simple instruction set computing*).

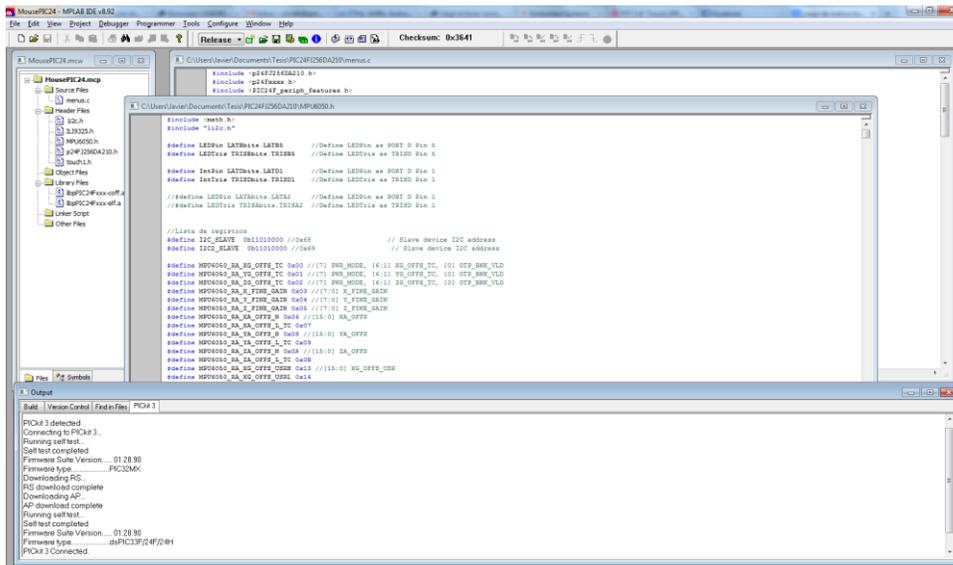
Procesadores con diferentes diseños internos pueden compartir un conjunto de instrucciones; por ejemplo, el Intel Pentium y AMD Athlon implementan versiones casi idénticas del conjunto de instrucciones x86, aunque tienen diseños diferentes.

El PIC usa un juego de instrucciones tipo RISC, cuyo número puede variar desde 35 para PIC de gama baja a 70 para los de gama alta. Las instrucciones se clasifican entre las que realizan operaciones entre el acumulador y una constante, entre el acumulador y una posición de memoria, instrucciones de condicionamiento y de salto/retorno, implementación de interrupciones y una para pasar a modo de bajo consumo llamada *sleep*.

Microchip proporciona un entorno de desarrollo *freeware* llamado MPLAB que incluye un simulador software y un ensamblador. Otras empresas desarrollan compiladores C y BASIC. Microchip también vende compiladores para los PIC de gama alta ("C18" para la serie F18 y "C30" para dsPICs, 24F, 30F) y se puede descargar una edición para estudiantes de C18 que inhabilita algunas opciones después de un tiempo de evaluación.

En esta tesis se hace uso de compiladores C30.

Figura 9. Entorno de programación MPLAB versión 8.92.00.00, compilador C30



Fuente: elaboración propia.

1.3.2. Arquitectura central

El alto desempeño de los dispositivos PICmicro™ puede ser atribuida al número de prestaciones de la arquitectura comúnmente encontradas en microprocesadores RISC, estas incluyen:

- Instrucciones Pipeline.
- Instrucciones en un ciclo de reloj.
- Un reducido número de instrucciones de longitud fija.
- Todas las posiciones de la RAM funcionan como registros de origen y/o de destino de operaciones matemáticas y otras funciones.

A diferencia de la mayoría de otros CPU, no hay distinción entre los espacios de memoria y los espacios de registros, ya que la RAM cumple ambas funciones.

1.3.3. Características

Los PIC actuales vienen con una amplia gama de mejoras hardware incorporados:

- Núcleos de CPU de 8/16/32 bits con arquitectura Harvard modificada.
- Memoria flash y ROM disponible desde 256 bytes a 2 048 kilobytes.
- Puertos de E/S (típicamente 0 a 5,5 voltios).
- Temporizadores de 8/16/32 bits.
- Tecnología nanowatt para modos de control de energía.
- Periféricos serie síncronos y asíncronos: USART, AUSART, EUSART.
- Conversor analógico/digital de 8-10-12-16 bits.
- Comparadores de tensión.
- Módulos de captura y comparación PWM.
- Controladores LCD, TFT.
- Periférico MSSP para comunicaciones I²C, SPI, y I²S.
- Memoria EEPROM interna con duración de hasta un millón de ciclos de lectura/escritura.
- Periféricos de control de motores.
- Soporte de interfaz USB.
- Soporte de controlador CAN.
- Soporte de controlador IrDA.

1.4. UART

Los UART pueden ser *full-dúplex*, asincrónicos que se comunican con dispositivos periféricos y computadoras personales; usan protocolos como RS-232, RS-485, LIN 1.2 e IrDA.

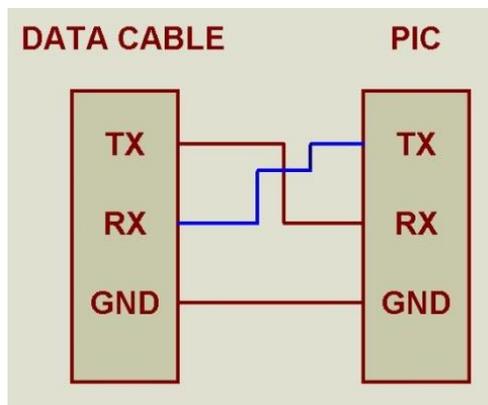
1.4.1. Concepto

UART son las siglas de *universal asynchronous receiver-transmitter* (en español, transmisor-receptor asíncrono universal). Es parte de los módulos seriales de I/O disponibles en las diferentes familias de PIC.

1.4.2. Conexión

La conexión de los módulos UART se realiza mediante tres conexiones: Tx, Rx, *ground* (referencia o tierra).

Figura 10. **Diagrama de conexión entre un cable de datos y un módulo UART**



Fuente: elaboración propia.

1.4.3. Velocidades de transmisión

El módulo UART tiene una diversidad amplia de velocidades a las cuales puede trabajar; es muy importante que los dispositivos involucrados en una comunicación UART cuenten con la misma velocidad para recibir la información de manera correcta.

En los microcontroladores, la velocidad del módulo UART está estrechamente relacionada con la velocidad de reloj; en la página 4 en el manual de usuario del PIC24FJ256DA210 está la siguiente formula:

Figura 11. **Cálculo de frecuencia de reloj UART**

Equation 21-1: UART Baud Rate with BRGH = 0

$$\text{Baud Rate} = \frac{\text{FCY}}{16 \cdot (\text{UxBRG} + 1)}$$

$$\text{UxBRG} = \frac{\text{FCY}}{16 \cdot \text{Baud Rate}} - 1$$

Note: FCY denotes the instruction cycle clock frequency (FOSC/2).

Fuente: Microchip. *Nota de aplicación DS39708B*. <https://www.microchip.com/wwwcategory/TaxonomySearch.aspx?show=Application%20Notes&ShowField=no> Consulta: 12 de julio de 2017.

En la siguiente tabla se observa el cálculo para diferentes velocidades:

Figura 12. **Velocidades de UART**

Table 21-1: UART Baud Rates (BRGH = 0)

BAUD RATE	Fcy = 16 MHz			Fcy = 12 MHz		
	Actual Baud Rate	% Error	BRG Value (Decimal)	Actual Baud Rate	% Error	BRG Value (Decimal)
110	110.0	0.00	9090	110.0	0.00	6817
300	300.0	0.01	3332	300.0	0.00	2499
1200	1200.5	0.04	832	1200.0	0.00	624
2400	2398.1	-0.08	416	2403.8	0.16	311
9600	9615.4	0.16	103	9615.3	0.16	77
19.2K	19230.8	0.16	51	19230.7	0.15	38
38.4K	38461.5	0.16	25	37500.0	-2.34	19
56K	55555.6	-0.79	17	57692.3	-3.02	12
115K	111111.1	-3.38	8			
250K	250000.0	0.00	3			
300K						
500K	500000.0	0.00	1			
Min.	15.0	0.00	65535	11.0	0.00	65535
Max.	1000000.0	0.00	0	480000.0	0.00	0

Fuente: Microchip. *Nota de aplicación DS39708B*. <https://www.microchip.com/wwwcategory/TaxonomySearch.aspx?show=Application%20Notes&ShowField=no> Consulta: 12 de julio de 2017.

1.5. Wifi

1.5.1. Concepto

La especificación IEEE 802.11 (ISO/IEC 8802-11) es un estándar internacional que define las características de una red de área local inalámbrica (WLAN). Wifi (que significa fidelidad inalámbrica, a veces incorrectamente abreviado Wifi) es el nombre de la certificación otorgada por la Wifi Alliance, anteriormente WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), grupo que garantiza la compatibilidad entre dispositivos que utilizan el estándar 802.11. Por el uso indebido de los términos (y por razones de *marketing*) el nombre del estándar se confunde con el nombre de la certificación. Una red Wifi es en

realidad una red que cumple con el estándar 802.11. A los dispositivos certificados por la Wifi Alliance se les permite usar este logotipo:

Figura 13. **Logotipo Wifi**



Fuente: WIFI. *Fotos y vectores*. <https://www.freepik.es/fotos-vectores-gratis/wifi>. Consulta: 12 de julio de 2017.

1.5.2. Tipos de redes

Una red inalámbrica Wifi puede funcionar de dos modos:

- El modo Ad-Hoc: con este modo no necesitamos un punto de acceso que se encargue de la gestión de la red, aquí cada miembro de la red retransmite la información que recibe a los otros miembros. El problema con este tipo de red es que, de una parte, el ancho de banda de la red está basado en la velocidad del *host* más lento; de otra parte, el ancho de banda de la red es dividido entre el número de *host* de la red, lo que puede convertirse rápidamente en una dificultad. No obstante, este modo puede ser utilizado en el hogar en el caso de una red simple; además, tiene la ventaja de no ser caro.
- El modo infraestructura: con este modo, la gestión está centralizada en un punto de acceso; así los datos que un *host* emite llegan al punto de acceso y éste los transfiere a los otros miembros de la red. De este modo se economiza el ancho de banda. Además, se pueden conectar puntos

de acceso entre sí (por cable o Wifi) para aumentar el alcance de la red Wifi. Este modo es el más utilizado porque además es más seguro.

1.5.3. Módulos disponibles para microcontroladores

Los módulos Wifi para microcontroladores disponibles se caracterizan por tener una interface de control y de envío de datos en común, UART por ejemplo, para lograr un óptimo desempeño y una complejidad baja.

Entre estos módulos están los siguientes:

- RN-XV
 - Fabricante: Microchip.
 - Certificación Wifi 2.4 GHz IEEE 802.11 b/g.
 - Certificados FCC, CE, IC y cumple con norma RoHs.
 - Consumo energético Ultra-low.
 - Inteligente, administrador de consumo incluido con encendido programable.
 - Acepta 3.3V de fuente de voltaje o batería de 2- a 3-V.
 - Módulo RN171: 4 μ A sleep, 35 mA Rx, 185 mA Tx at 12 dBm (Potencia de Tx configurable).
 - Antena de cerámica incorporada.
 - Memoria flash de 8-Mbit y RAM de 128-Kbyt, 2-Kbyte de ROM.
 - Pines digitales I/O de propósito general (RN131: 10 GPIO pines, RN171: 14 GPIO pines).
 - Interface UART.

Figura 14. **Módulo RN-XV**



Fuente: *Sparkfun*. <https://cdn.sparkfun.com/assets/parts/5/8/1/7/10822-01.jpg>. Consulta: 12 de julio de 2017.

- MRF24WB0MA
 - Fabricante: Microchip
 - Soporta *low-power*, baja tasa de transmisión Wifi
 - FCC (USA), IC (Canadá), certificado ETSI (Europa)
 - Antena integrada
 - Interface simple de 4 cables SPI para microcontroladores
 - WEP, WPA-PSK, WPA2-PSK Security
 - Módulo de superficie con 36-pines

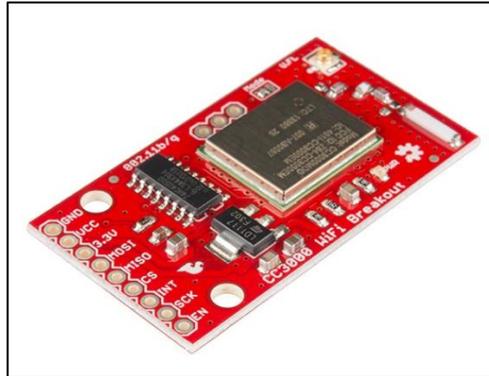
Figura 15. **Módulo MRF24WB0MA**



Fuente: *Microchip*. http://www.microchip.com/_images/ics/medium-MRF24WB0MA-MODULE-36.png. Consulta: 12 de julio de 2017.

- CC3000
 - Fabricante: Texas Instrument
 - Wireless network processor
 - IEEE 802.11 b/g
 - Embedded IPv4 TCP/IP stack
 - Óptimo rendimiento
 - TX potencia: +18,0 dBm at 11 Mbps, CCK
 - RX sensibilidad: -88 dBm, 8 % PER, 11 Mbps
 - Trabaja con pocas MIPS y MCUs de bajo costo
 - FCC, IC, y certificación CE con antena de chip
 - Cristal integrado y administrador de consume de potencia
 - Dimensiones pequeñas: 16,3 mm x 13,5 mm x 2 mm
 - Rango de temperaturas: -20 °C a 70 °C

Figura 16. **Módulo CC3000**



Fuente: *Sparkfun*. <https://cdn.sparkfun.com//assets/parts/8/6/8/5/12072-01.jpg>. Consulta: 12 de julio de 2017.

1.6. Bluetooth

Bluetooth es una especificación para la industria de la Informática y telecomunicaciones que describe cómo se pueden interconectar dispositivos como teléfonos celulares, asistentes personales digitales (o sus siglas en inglés, PDA), ordenadores (y muchos otros dispositivos).

1.6.1. Concepto

Con el uso de una conexión inalámbrica de corto alcance, que no necesita de visión directa entre los dispositivos que se conectan. Los principales objetivos de esta norma son:

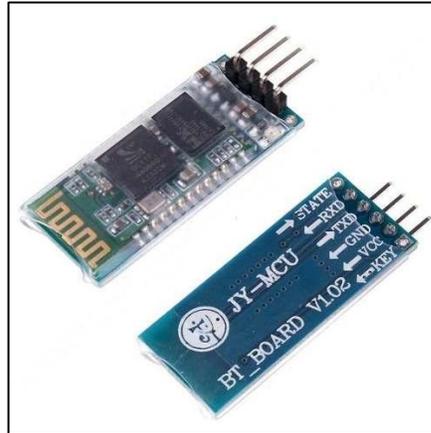
- Facilitar las comunicaciones entre equipos móviles.
- Eliminar los cables y conectores entre estos.

- Ofrecer la posibilidad de crear pequeñas redes inalámbricas y facilitar la sincronización de datos entre equipos personales.

1.6.2. Módulos disponibles para microcontroladores

- Módulo Bluetooth HC-05
 - Fabricante HC.
 - Interface UART.
 - Chipset CSR BC417143.
 - Bluetooth versión V2.0+EDR.
 - Tensión de alimentación: 3.3V.
 - Frecuencia: 2.4GHz banda ISM.
 - Modulación: GFSK (*gaussian frequency shift keying*).
 - Seguridad: autenticación y encriptación.
 - Velocidad-> asíncrono: 2.1Mbps (Max) / 160 kbps; síncrono: 1 Mbps/1 Mbps.
 - Soporta comandos AT para configuración a través de un puerto serie.
 - Configuración por defecto para el puerto COM: 9600, N, 8,1.
 - Temperatura de trabajo: -20 °C a +75 °C .
 - Dimensiones: 26,9 mm x 13 mm x 2.2 mm.

Figura 17. **Módulo HC-05**



Fuente: *Teslabem*. http://teslabem.com/media/catalog/product/cache/1/image/636x/602f0fa2c1f0d1ba5e241f914e856ff9/b//bluetooth-modulo-serial-microcontrolador-pic-arduino-atmel_mlm-o-2636188463_042012-500x500.jpg. Consulta: 12 de julio de 2017.

- CC256x Bluetooth®

Características

- Fabricante: Texas Instrument
- Bluetooth especificación v4.0
- Modo dual –Bluetooth & Bluetooth low energy o ANT
- StoneStreet One Bluetopia stack con muchos perfiles
- Otros perfiles disponibles a pedido
- Certificados FCC, IC, CE
- Alta sensibilidad (-93 dBm typ.)
- UART interface
- PCB de 4 capas PCB

Figura 18. **Módulo CC256x Bluetooth®**



Fuente: CC256XQFNEM Dual-mode Bluetooth®. http://www.ti.com/diagrams/med_cc256xqfnem_img_6176_final_small.jpg. Consulta: 12 de julio de 2017.

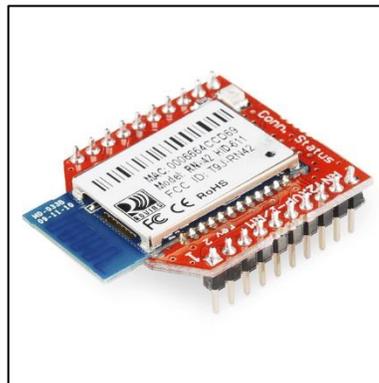
- RN42XVP

Características

- Módulo certificado Bluetooth® versión 2.1, soporta versión 2.1 + *enhanced data rate* (EDR).
- Compatible con Bluetooth versión 2.0, 1.2, y 1.1.
- Pines compatibles con 2 x 10 2-mm *socket typically used for 802.15.4 applications*.
- Bajo consumo: 26 μ A sleep, 3 mA conectado, 30 mA en transmisión.
- UART (SPP o HCI) y USB (HCI solo) interface de conexión de datos interfaces.
- SPP tasa de datos sostenida de: 240 Kbps (esclavo), 300 Kbps (maestro).
- Certificado Bluetooth SIG.
- Certificaciones: FCC, IC, CE.

- RoHS.
- 2 opciones de antenas disponibles: PCB trace (RN42XVP-I/RM) and U.FL conector para antena externa (RN42XVU-I/RM).

Figura 19. **Módulo RN42XVP**



Fuente: Sparkfun. <https://cdn.sparkfun.com/assets/parts/7/6/1/7/11601-01.jpg>. Consulta: 13 de julio de 2017.

1.7. USB

USB es la sigla de *universal serial bus* (bus universal en serie). Se trata de un concepto de la informática para nombrar al puerto que permite conectar periféricos a una computadora.

1.7.1. Concepto

Un puerto USB funciona como dispositivo que facilita la conexión de periféricos y accesorios a un ordenador que permite el fácil intercambio de datos y la ejecución de operaciones. Típicamente, los dispositivos que utilizan USB pueden ser teclado, mouse, impresora, teléfonos móviles, cámaras

fotográficas o de video, discos duros externos, reproductores multimedia, tarjetas de sonido y de video, escáneres y variedad de otros.

Para su uso en ocasiones es necesaria la instalación de un software que ayuda a que la computadora reconozca el nuevo dispositivo y lo utilice a discreción. En otros casos, se les llama *plug-n-play*; es decir, que con solo enchufarlos el aparato con puerto USB ya se encuentra en funcionamiento y conectado al ordenador.

El puerto USB está presente en casi todos los dispositivos electrónicos de uso diario, el incluir esta interface es vital para que el proyecto de tesis sea accesible.

1.7.2. Velocidades de transmisión

Los dispositivos USB se clasifican en cuatro tipos según su velocidad de transferencia de datos:

- Baja velocidad (1.0): tasa de transferencia de hasta 1,5 Mbit/s (188 kB/s). Utilizado en su mayor parte por dispositivos de interfaz humana (*human interface device*, en inglés) como los teclados, los ratones (mouse), las cámaras web, etc.
- Velocidad completa (1.1): tasa de transferencia de hasta 12 Mbit/s (1,5 MB/s) según este estándar. Esta fue la más rápida antes de la especificación USB 2.0. Estos dispositivos dividen el ancho de banda de la conexión USB entre ellos, basados en un algoritmo de impedancias LIFO.

- Alta velocidad (2.0): tasa de transferencia de hasta 480 Mbit/s (60 MB/s) pero con una tasa real práctica máxima de 280 Mbit/s (35 MB/s). El cable USB 2.0 dispone de cuatro líneas, un par para datos, y otro par de alimentación. Casi todos los dispositivos fabricados en la actualidad trabajan a esta velocidad
- Súper alta velocidad (3.0): tiene una tasa de transferencia de hasta 4,8 Gbit/s (600 MB/s). La velocidad del bus es diez veces más rápida que la del USB 2.0.

1.7.3. Conectores

Los cables USB son un tipo de cable de transferencia de datos por computadora. Se utilizan para conectar dispositivos periféricos, como reproductores de MP3, a dichos equipos. Los datos se transfieren a través del cable mientras que la computadora y los periféricos se comunican unos con otros. Hay un número de diferentes tipos de conectores USB, que varían de un dispositivo a otro y entre fabricantes.

- Tipo A: un conector de tipo A es el conector USB estándar. Se trata de un conector plano que, por lo general, se conecta al puerto o en el equipo.
- Tipo B: los conectores tipo B son conectores de seis caras que son cuadrados en la parte inferior y ligeramente inclinados en la parte superior. Estos se utilizan para grandes dispositivos, como impresoras y escáneres.

- Los mini: los mini conectores son versiones pequeñas de los conectores de tipo A y B. El mini A estándar no es tan común como el mini B, pero ambos son comunes en las cámaras digitales y reproductoras de MP3.
- Los micros: el micro A es la versión más pequeña del tipo A y un micro B es un conector invertido y aplanado tipo B. Estos son muy populares en los teléfonos móviles y PDA.

Figura 20. **Tipo de conector USB**

	Tipo A		Tipo B	
	Macho	Hembra	Macho	Hembra
USB estándar				
Mini USB 5 pines				
Mini USB 8 pines				
Micro USB				
USB 3.0 estándar				
Micro USB 3.0				

Fuente: E-abaco. *Diferencias entre conectores USB*. http://www.e-abaco.net/wp-content/uploads/2010/08/TODOS_USB.jpg. Consulta: 13 de julio de 2017.

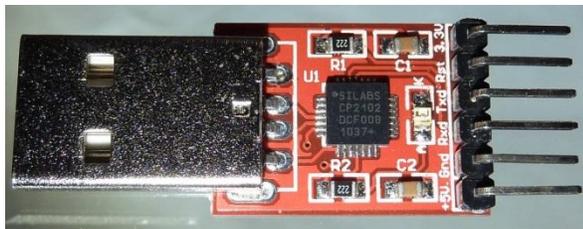
1.7.4. Módulos disponibles para microcontroladores

- CP210x USB a UART

Características

- Fabricante: Silabs
- Convertidor USB 2.0 a UART
- Transmisión USB A RS232
- Conector USB macho
- Temperatura de trabajo: -40 °C a +85 °C

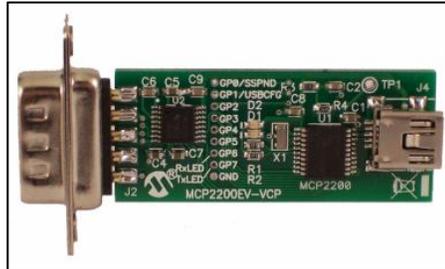
Figura 21. Módulo CP210x USB a UART



Fuente: Osmocm. *HardwareCP210xTutorial*. <https://osmocom.org/projects/baseband/wiki/HardwareCP210xTutorial>. Consulta: 13 de julio de 2017.

- MCP2200
 - Fabricante: Microchip
 - Soporta velocidades de: 300 – 1 000 k (baud)
 - Interface UART
 - USB 2.0
 - Puertos I/O de propósito general, 8 pines

Figura 22. **Módulo MCP2200**



Fuente: *Microchip application*. http://www.microchip.com/_ImagedCopy/MCP2200EV-VCP.png.

Consulta: 13 de julio de 2017.

2. SENSOR MPU-6050

2.1. Características

Es un avanzado procesador de movimiento basado en informática MEMS (sistemas-micro-electro-mecánicos) mediante la combinación de un giroscopio de 3 ejes y un acelerómetro de 3 ejes en la misma matriz de silicio junto con un procesador digital de movimiento™ (DMP™); es capaz de procesar complejos algoritmos MotionFusion de 9 ejes. A través del bus I2C se puede conectar directamente con un amplio surtido de microcontroladores.

- Características Chipset: MPU-6050
 - Alimentación: 3V a 5V
 - Comunicación: protocolo I2C
 - Conversor AD de 16bit incorporado, salida de datos de 16bit
 - Rango de giroscopio: +/- 250 500 1 000 2 000 grados/seg
 - Rango de aceleración: +/- 2 g, +/- 4 g, +/- 8 g, +/- 16 g

2.2. Acelerómetro y giroscopio

El giroscopio MEMS de eje triple MPU-6050 incluye una amplia gama de funciones:

- Salida digital de la tasa angular en los ejes X-, Y- y eje Z (giroscopios) con un rango de escala completa programable por el usuario de ± 250 , ± 500 , $\pm 1,000$ y $2,000 \pm$ °/seg.

- Señal de sincronización externa conectada al pin FSYNC la cual soporta sincronización de imagen, vídeo y GPS.
- ADC de 16 bits integrados que permiten el muestreo simultáneo de giroscopios.
- Una estabilidad y sensibilidad de la temperatura reduce la necesidad de calibración de parte del usuario.
- Mejora en el rendimiento de ruido de baja frecuencia.
- Filtro de paso bajo digitalmente programables.
- Corriente de giroscopio operativo: 3.6 mA.
- Corriente de espera: 5 μ A.
- Factor de escala de sensibilidad calibrada de fábrica.
- Self-test

El acelerómetro MEMS de eje triple MPU-6050 incluye una amplia gama de funciones:

- Digital-salida del acelerómetro de triple eje con un rango de escala programable de ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g y ± 16 g.
- ADC de 16 bits integrados que permiten el muestreo simultáneo de acelerómetros y no requieren de multiplexor externo.

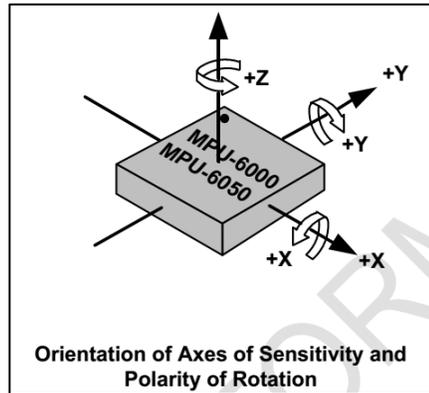
- Corriente normal de funcionamiento del acelerómetro: 500 μ A.
- Modos de baja potencia: 10 μ A en 1.25 Hz, 20 μ A a 5 Hz, 60 mA a 20 Hz, a 110 μ A 40 Hz.
- Detección de Orientación y señalización.
- Detección de golpes.
- Interrupciones programables por el usuario.
- Interrupción High-G.
- Self-Test.

2.3. DMP

Digital motion processor (DMP) o procesador digital de movimiento es una unidad de procesamiento que se encarga de fusionar la información de varios sensores, en el caso del MPU-6050 sería un máximo de 3 sensores, se le denomina 9-Axis dado que cada sensor proporciona datos en 3 ejes.

El DMP entrega una salida en cuaterniones, en el cual indica hacia donde está inclinado el chip usando como referencia el eje Z en dirección contraria a la gravedad, como se puede apreciar en la siguiente imagen.

Figura 23. **Orientación de los ejes**



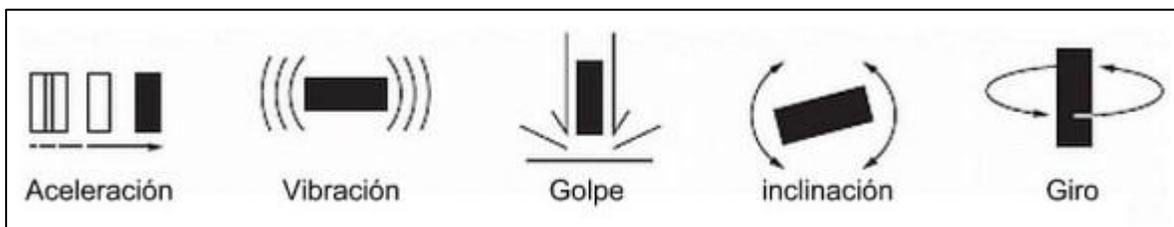
Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.*

<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

Las magnitudes medidas por del DMP se puede apreciar en la siguiente imagen:

Figura 24. **Los cinco movimientos básicos asociados a la aceleración de un objeto**



Fuente: *Amazonaws*. http://newimgwp.s3.amazonaws.com/CDBB_1024_44537.jpg. Consulta:

13 de julio de 2017.

En el giro se pueden observar una aceleración angular lo cual se mide con un giroscopio; mientras que en la aceleración se puede ver que es lineal por lo que se debe usar un acelerómetro.

Para explicar el funcionamiento del DMP es necesario establecer primero algunos conceptos sobre cuaterniones.

Los cuaterniones (también llamados cuaternios) son una extensión de los números reales, similar a la de los números complejos. Mientras que los números complejos son una extensión de los reales por la adición de la unidad imaginaria i , tal que $i^2 = -1$, los cuaterniones son una extensión generada de manera análoga añadiendo las unidades imaginarias: i , j y k a los números reales y tal que $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$. Esto se puede resumir en esta tabla de multiplicación: la tabla de Cayley (inglés).

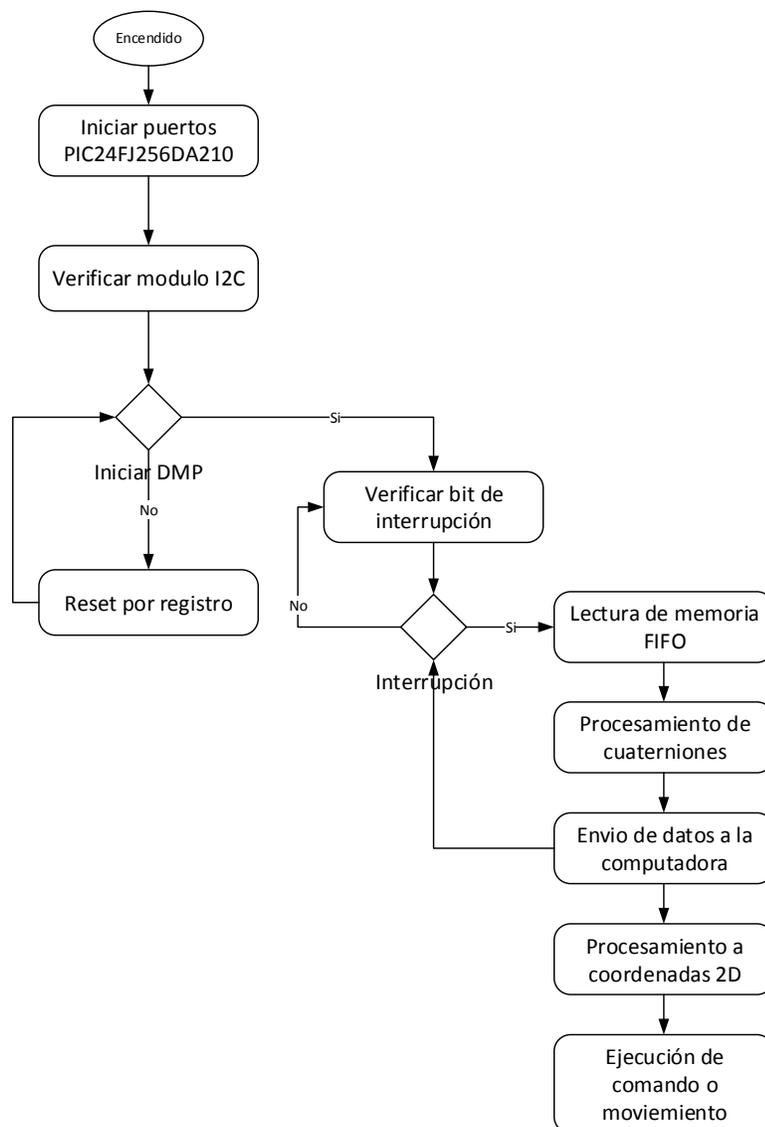
El DMP puede generar datos en cuaterniones haciendo uso de los datos obtenidos en los 6 ejes, que son los datos fusionados del acelerómetro y el giroscopio. Con la adición de una brújula de tres ejes, una fusión de datos que contenga 9 ejes pueden ser alcanzados.

Si se toma en cuenta que el MPU-6050 contiene un acelerómetro y un giroscopio integrado con los cuales se puede obtener información sobre los cambios realizados en la velocidad lineal y la velocidad angular las cuales son representadas en forma digital en cada eje (X, Y, Z), se obtienen datos sobre 6 ejes y dado que el MPU-6050 puede manejar un sensor adicional, el cual puede ser un magnetómetro de 3 ejes se obtendrían 9 ejes que es el número máximo de ejes que puede fusionar el DMP.

Dentro del programa del microcontrolador PIC24F256DA210 la rutina para activar el DMP se llama DMP ().

La rutina tiene el siguiente diagrama de flujo:

Figura 25. Diagrama de flujo de la función DMP ().



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

2.4. I2C en MPU-6050

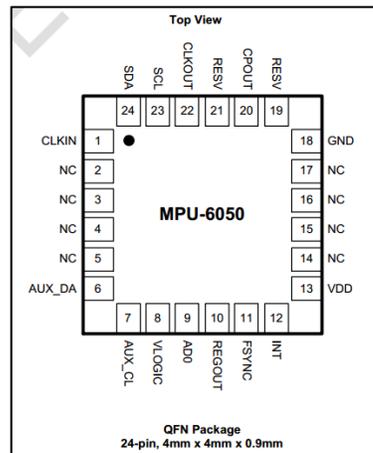
Como podemos apreciar en la tabla III los pines para comunicarnos en protocolo I2C son los siguientes:

Tabla III. Pines del módulo I2C

Numero de Pin	Función
23	SCL
24	SDA

Fuente: Microchip. *Nota de aplicación DS39708B*. <https://www.microchip.com/wwwcategory/TaxonomySearch.aspx?show=Application%20Notes&ShowField=no> Consulta: 12 de julio de 2017.

Figura 26. Encapsulado MPU-6050

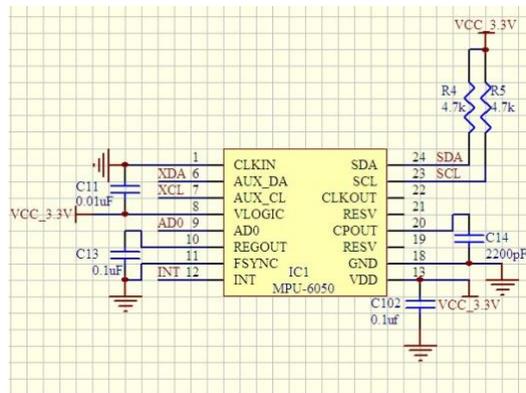


Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2*. <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

Los pines I2C necesitan resistencias *pull-up* hacia la fuente de voltaje, la cual no debe exceder el voltaje permitido en las terminales del MPU-6050. En la Figura 27 se pueden observar las conexiones necesarias para el microcontrolador.

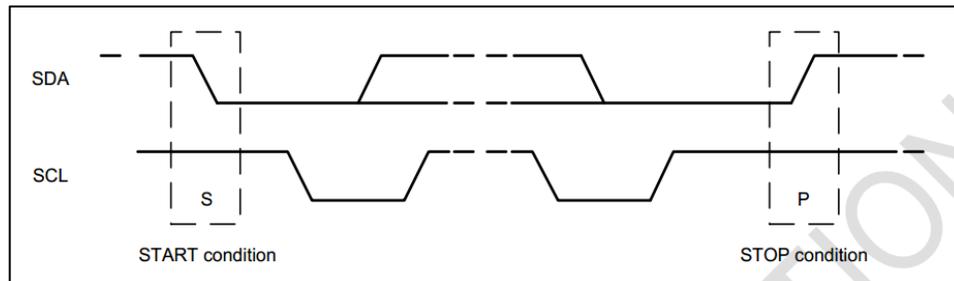
Figura 27. **Diagrama de módulo genérico MPU-6050**



Fuente: elaboración propia.

Según el manual del circuito integrado proporcionado por el fabricante, se ven las diferentes condiciones de los comandos I2C los cuales se utilizaron para realizar una librería I2C específica para el MPU-6050 utilizando el módulo I2C integrado del PIC24FJ256DA210.

Figura 28. **Condición START STOP**



Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.*

<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

2.5. Configuraciones

La tabla de registros del circuito integrado MPU-6050 se puede apreciar en la Figura 35; al momento de escribir la presente tesis estos datos no eran de conocimiento público por lo cual fueron consultados de la página <http://www.i2cdevlib.com/tools/analyzer/17> en la cual se publicó el tráfico I2C entre un MPU-6050 y el programa de demostración del fabricante.

Figura 29. Página I2C devlib

The screenshot shows the I2Cdevlib website's I2C analyzer tool. At the top, there is a navigation menu with links for Home, Usage, Forums, Contribute, Devices, Tools, and Contact. The main content area displays the configuration for a dump titled "DMP Fifo still empty". The configuration includes the device "MPU-6050 6-axis accelerometer/gyroscope @ 0x68" and a register map. Below the configuration, there are checkboxes for showing various types of operations and hints. The main part of the page is a table of I2C transactions, with columns for #, Time, Device, Mode, Register, Length, and Data. The table lists 22 transactions, including writes to PMW_MGMT_1, BANK_SEL, MEM_START_ADDR, and MEM_R_W, and reads from AUX_VDDIO, YG_OFFS_TC, and ZG_OFFS_TC.

#	Time	Device	Mode	Register	Length	Data
1	0.75e-005	0x68 (MPU6050)	Write	0x68 (PMW_MGMT_1)	1	0xc0 (DEVICE_RESET=1, SLEEP=1, CYCLE=0, TEMP_DIS=0, CLK_SEL=0)
2	0.00039325	0x68 (MPU6050)	Write	0x6c (PMW_MGMT_2)	1	0x00 (LP_WAKE_CTRL=0, STBY_ZG=0, STBY_YA=0, STBY_ZA=0, STBY_XG=0, STBY_YG=0, STBY_ZG=0)
3	0.000689	0x68 (MPU6050)	Write	0x68 (PMW_MGMT_1)	1	0x00 (DEVICE_RESET=0, SLEEP=0, CYCLE=0, TEMP_DIS=0, CLK_SEL=0)
4	0.00098475	0x68 (MPU6050)	Write	0x6d (BANK_SEL)	1	0x70 (PRFTCH_EN=1, CFG_USER_BANK=1, MEM_SEL=16)
5	0.0012805	0x68 (MPU6050)	Write	0x6e (MEM_START_ADDR)	1	0x06 (START_ADDR=6)
6	0.0017755	0x68 (MPU6050)	Read	0x6f (MEM_R_W)	1	0x40 (MEM_R_W=77)
7	0.00198025	0x68 (MPU6050)	Write	0x6d (BANK_SEL)	1	0x00 (PRFTCH_EN=0, CFG_USER_BANK=0, MEM_SEL=0)
8	0.002475	0x68 (MPU6050)	Read	0x00 (AUX_VDDIO)	1	0x89 (AUX_VDDIO=1, XG_OFFS_TC=4, OTP_BNK_VLD=1)
9	0.00287925	0x68 (MPU6050)	Read	0x01 (YG_OFFS_TC)	1	0x79 (YG_OFFS_TC=60)
10	0.00328325	0x68 (MPU6050)	Read	0x02 (ZG_OFFS_TC)	1	0x81 (ZG_OFFS_TC=0)
11	0.00368725	0x68 (MPU6050)	Read	0x6a (USER_CTRL)	1	0x00 (DMP_EN=0, FIFO_EN=0, I2C_MST_EN=0, I2C_IF_DIS=0, DMP_RESET=0, FIFO_RESET=0, I2C_MST_RESET=0, SIG_COND_RESET=0)
12	0.003892	0x68 (MPU6050)	Write	0x37 (INT_PIN_CFG)	1	0x32 (INT_LEVEL=0, INT_OPEN=0, LATCH_INT_EN=1, INT_RD_CLEAR=1, FSYNC_INT_LEVEL=0, FSYNC_INT_EN=0, I2C_BYPASS_EN=1, CLKOUT_EN=0)
13	0.004387	0x68 (MPU6050)	Read	0x68 (PMW_MGMT_1)	1	0x40 (DEVICE_RESET=0, SLEEP=1, CYCLE=0, TEMP_DIS=0, CLK_SEL=0)
14	0.0045915	0x68 (MPU6050)	Write	0x6d (BANK_SEL)	1	0x00 (PRFTCH_EN=0, CFG_USER_BANK=0, MEM_SEL=0)
15	0.00488725	0x68 (MPU6050)	Write	0x6e (MEM_START_ADDR)	1	0x00 (START_ADDR=0)
16	0.00518275	0x68 (MPU6050)	Write	0x6f (MEM_R_W)	16	0xfb 0x00 0x00 0x3e 0x00 0x00 0x00 0x36 8 more...
17	0.0068605	0x68 (MPU6050)	Write	0x6e (MEM_START_ADDR)	1	0x10 (START_ADDR=16)
18	0.007156	0x68 (MPU6050)	Write	0x6f (MEM_R_W)	16	0x00 0x65 0x00 0x54 0xff 0xef 0x00 0x00 8 more...
19	0.00885425	0x68 (MPU6050)	Write	0x6e (MEM_START_ADDR)	1	0x20 (START_ADDR=32)
20	0.00914975	0x68 (MPU6050)	Write	0x6f (MEM_R_W)	16	0x00 0x02 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 8 more...
21	0.0108275	0x68 (MPU6050)	Write	0x6e (MEM_START_ADDR)	1	0x30 (START_ADDR=48)
22	0.011123	0x68 (MPU6050)	Write	0x6f (MEM_R_W)	16	0x00 0x28 0x00 0x00 0xff 0xff 0x45 0x81 8 more...

Fuente: *I2cdevlib*. <http://www.i2cdevlib.com/tools/analyzer/17>. Consulta: 14 de julio de 2017.

2.6. Inicialización

La inicialización de la interface I2C se puede realizar a través de la función `I2C()`.

Para utilizar el módulo I2C del PIC24FJ256DA210 es necesario iniciarlo con el siguiente código al inicio del programa.

```
ConfigIntI2C1(MI2C_INT_OFF & SI2C_INT_OFF);
```

```
config1 = (I2C_ON & I2C_IDLE_CON & I2C_CLK_HLD & I2C_IPMI_DIS  
& I2C_7BIT_ADD & I2C_SLW_DIS & I2C_SM_DIS & I2C_GCALL_DIS &  
I2C_STR_DIS &  
I2C_NACK & I2C_ACK_DIS & I2C_RCV_DIS & I2C_STOP_DIS &  
I2C_RESTART_DIS & I2C_START_DIS);
```

```
OpenI2C1(config1,config2);  
IdleI2C1();
```

Las etiquetas utilizadas son declaradas por Microchip PIC24F Peripheral Library y tienen las siguientes descripciones según el manual de usuario proporcionado por el fabricante, [16bit_Language_Tool_Libraries_51456c](#).

- ConfigIntI2C1: configura las funciones de interrupción del módulo 1 del I2C.
- MI2C_INT_OFF: deshabilita las interrupciones para el maestro.
- SI2C_INT_OFF: deshabilita las interrupciones para el esclavo.
- config1: es una etiqueta que se utilizó para facilitar la configuración I2C.
- I2C_ON: enciende el módulo I2C.
- I2C_IDLE_CON: módulo I2C en modo Idle.
- I2C_CLK_HLD: retenet reloj.
- I2C_IPMI_DIS: modo IPMI no habilitado.
- I2C_7BIT_ADD: I2CADD es una dirección de 7-bit.
- I2C_SLW_DIS: deshabilitar control para 100 KHz.
- I2C_SM_DIS: deshabilitar especificaciones del bus SM.
- I2C_GCALL_DIS: *disable general call address*.

- I2C_STR_DIS: *disable SCL clock stretch I2C_NACK.*
- I2C_NACK: transmit 0 to send ACK as acknowledge.
- I2C_ACK_DIS: ACK deshabilitado.
- I2C_RCV_DIS: recepción deshabilitada.
- I2C_STOP_DIS: stop deshabilitado.
- I2C_RESTART_DIS: deshabilitar repetición de condición *start*.
- I2C_START_DIS: deshabilitar condición de *start*.

2.7. Lectura de datos de aceleración y giro

Los datos de aceleración y giro se pueden encontrar en la memoria de tipo FIFO del MPU-6050 o en los registros asignados, según el manual del fabricante; estos datos se encuentran de la siguiente forma:

Para tener una lectura estable se espera que el registro DATA_RDY_INT, indica que una interrupción de datos listos se generó, esté en un valor lógico de 1 para realizar una lectura en los registros.

Figura 30. **Registro 58, MPU-6050**

4.17 Register 58 – Interrupt Status INT_STATUS									
Type: Read Only									
Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
3A	58	-	MOT_INT	-	FIFO_OFLOW_INT	I2C_MST_INT	-	-	DATA_RDY_INT

Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.*
<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

La lectura de datos del acelerómetro se realiza en los siguientes registros:

Figura 31. **Registros de lectura de acelerómetro, MPU-6050**

4.18 Registers 59 to 64 – Accelerometer Measurements
ACCEL_XOUT_H, ACCEL_XOUT_L, ACCEL_YOUT_H, ACCEL_YOUT_L, ACCEL_ZOUT_H, and ACCEL_ZOUT_L

Type: Read Only

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
3B	59	ACCEL_XOUT[15:8]							
3C	60	ACCEL_XOUT[7:0]							
3D	61	ACCEL_YOUT[15:8]							
3E	62	ACCEL_YOUT[7:0]							
3F	63	ACCEL_ZOUT[15:8]							
40	64	ACCEL_ZOUT[7:0]							

Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.*

<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

Se puede observar que primero se encuentran los datos más significativos seguidos por los menos significativos.

La sensibilidad del acelerómetro se puede variar según la siguiente tabla:

Figura 32. **Escalas y sensibilidad de acelerómetro en MPU-6050**

AFS_SEL	Full Scale Range	LSB Sensitivity
0	±2g	16384 LSB/g
1	±4g	8192 LSB/g
2	±8g	4096 LSB/g
3	±16g	2048 LSB/g

Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.*

<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

La lectura de los datos del giroscopio se realiza en los siguientes registros:

Figura 33. **Registros de lectura de giroscopio en MPU-6050**

4.20 Registers 67 to 72 – Gyroscope Measurements

GYRO_XOUT_H, GYRO_XOUT_L, GYRO_YOUT_H, GYRO_YOUT_L, GYRO_ZOUT_H, and GYRO_ZOUT_L

Type: Read Only

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
43	67	GYRO_XOUT[15:8]							
44	68	GYRO_XOUT[7:0]							
45	69	GYRO_YOUT[15:8]							
46	70	GYRO_YOUT[7:0]							
47	71	GYRO_ZOUT[15:8]							
48	72	GYRO_ZOUT[7:0]							

Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.*

<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

La sensibilidad del giroscopio se puede ajustar en los siguientes registros:

Figura 34. **Escala y sensibilidad de giroscopio en MPU-6050**

FS_SEL	Full Scale Range	LSB Sensitivity
0	± 250 °/s	131 LSB/°/s
1	± 500 °/s	65.5 LSB/°/s
2	± 1000 °/s	32.8 LSB/°/s
3	± 2000 °/s	16.4 LSB/°/s

Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.*

<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

Los registros AFS_SEL y FS_SEL se encuentran en las siguientes direcciones:

Figura 35. Mapa de registros, MPU-6050

3 Register Map

The register map for the MPU-60X0 is listed below.

Addr (Hex)	Addr (Dec.)	Register Name	Serial I/F	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
0D	13	SELF_TEST_X	R/W	XA_TEST[4-2]			XG_TEST[4-0]				
0E	14	SELF_TEST_Y	R/W	YA_TEST[4-2]			YG_TEST[4-0]				
0F	15	SELF_TEST_Z	R/W	ZA_TEST[4-2]			ZG_TEST[4-0]				
10	16	SELF_TEST_A	R/W	RESERVED		XA_TEST[1-0]	YA_TEST[1-0]		ZA_TEST[1-0]		
19	25	SMP_LRT_DIV	R/W	SMP_LRT_DIV[7:0]							
1A	26	CONFIG	R/W	-	-	EXT_SYNC_SET[2:0]			DLPF_CFG[2:0]		
1B	27	GYRO_CONFIG	R/W	-	-	-	FS_SEL [1:0]		-	-	-
1C	28	ACCEL_CONFIG	R/W	XA_ST	YA_ST	ZA_ST	AFS_SEL[1:0]				
1F	31	MOT_THR	R/W	MOT_THR[7:0]							

Fuente: InvenSense. MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.

<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

2.8. Lectura de cuaterniones

Para obtener lecturas con cuaterniones es necesario inicializar el DMP, consultar capítulo 2.3, al tener el DMP activo; la rutina activa la memoria FIFO del MPU-6050 con el cual se puede realizar una lectura rápida.

Cuando los registros en la FIFO llegan a 42 bytes se realiza una lectura para obtener los datos y el MPU-6050 de manera automática borra los datos. El número de registros que están en la memoria FIFO se pueden consultar en los siguientes registros, tomando en cuenta que el más significativo se encuentra en la primera posición:

Figura 36. Registros de lectura FIFO

Addr (Hex)	Addr (Dec.)	Register Name	Serial I/F	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
65	101	I2C_SLV2_DO	RW	I2C_SLV2_DO[7:0]							
66	102	I2C_SLV3_DO	RW	I2C_SLV3_DO[7:0]							
67	103	I2C_MST_DELAY_CTRL	RW	DELAY_ES_SHADOW	-	-	I2C_SLV4_DLY_EN	I2C_SLV3_DLY_EN	I2C_SLV2_DLY_EN	I2C_SLV1_DLY_EN	I2C_SLV0_DLY_EN
68	104	SIGNAL_PATH_RESET	RW	-	-	-	-	-	GYRO_RESET	ACCEL_RESET	TEMP_RESET
69	105	MOT_DETECT_CTRL	RW	-	-	ACCEL_ON_DELAY[1:0]		-	-	-	-
6A	106	USER_CTRL	RW	-	FIFO_EN	I2C_MST_EN	I2C_IF_DIS	-	FIFO_RESET	I2C_MST_RESET	SIG_COND_RESET
6B	107	PWR_MGMT_1	RW	DEVICE_RESET	SLEEP	CYCLE	-	TEMP_DIS	CLKSEL[2:0]		
6C	108	PWR_MGMT_2	RW	LP_WAKE_CTRL[1:0]		STBY_XA	STBY_YA	STBY_ZA	STBY_XG	STBY_YG	STBY_ZG
72	114	FIFO_COUNTH	RW	FIFO_COUNT[15:8]							
73	115	FIFO_COUNTL	RW	FIFO_COUNT[7:0]							
74	116	FIFO_R_W	RW	FIFO_DATA[7:0]							
75	117	WHO_AM_I	R	-	WHO_AM_I[6:1]					-	

Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.*
<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

Los datos de la memoria FIFO se pueden leer en la siguiente dirección, cada registro es de 8 bits.

Figura 37. Registro MPU-6050, datos de FIFO

Addr (Hex)	Addr (Dec.)	Register Name	Serial I/F	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
65	101	I2C_SLV2_DO	RW	I2C_SLV2_DO[7:0]							
66	102	I2C_SLV3_DO	RW	I2C_SLV3_DO[7:0]							
67	103	I2C_MST_DELAY_CTRL	RW	DELAY_ES_SHADOW	-	-	I2C_SLV4_DLY_EN	I2C_SLV3_DLY_EN	I2C_SLV2_DLY_EN	I2C_SLV1_DLY_EN	I2C_SLV0_DLY_EN
68	104	SIGNAL_PATH_RESET	RW	-	-	-	-	-	GYRO_RESET	ACCEL_RESET	TEMP_RESET
69	105	MOT_DETECT_CTRL	RW	-	-	ACCEL_ON_DELAY[1:0]		-	-	-	-
6A	106	USER_CTRL	RW	-	FIFO_EN	I2C_MST_EN	I2C_IF_DIS	-	FIFO_RESET	I2C_MST_RESET	SIG_COND_RESET
6B	107	PWR_MGMT_1	RW	DEVICE_RESET	SLEEP	CYCLE	-	TEMP_DIS	CLKSEL[2:0]		
6C	108	PWR_MGMT_2	RW	LP_WAKE_CTRL[1:0]		STBY_XA	STBY_YA	STBY_ZA	STBY_XG	STBY_YG	STBY_ZG
72	114	FIFO_COUNTH	RW	FIFO_COUNT[15:8]							
73	115	FIFO_COUNTL	RW	FIFO_COUNT[7:0]							
74	116	FIFO_R_W	RW	FIFO_DATA[7:0]							
75	117	WHO_AM_I	R	-	WHO_AM_I[6:1]					-	

Fuente: InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.*
<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Consulta: 13 de julio de 2017.

3. CIRCUITO DE CONTROL CON MICROCONTROLADOR

3.1. Requisitos básicos

El programa total requiere una capacidad de ROM de 128 kB y de RAM de 128 kB; la velocidad de reloj del microcontrolador debe ser suficientemente alta para leer la memoria FIFO del MPU-6050 la cual consta de 1 024 bytes en modo burst (protocolo de comunicación I2C) para obtener datos de manera fiable y que todos sean censados en el mismo ciclo de reloj del MPU-6050, el error de leer datos en diferente tiempo de muestreo agrega ruido al proceso disminuyendo la fiabilidad de toma de datos a un punto en que el prototipo dejaría de ser practico.

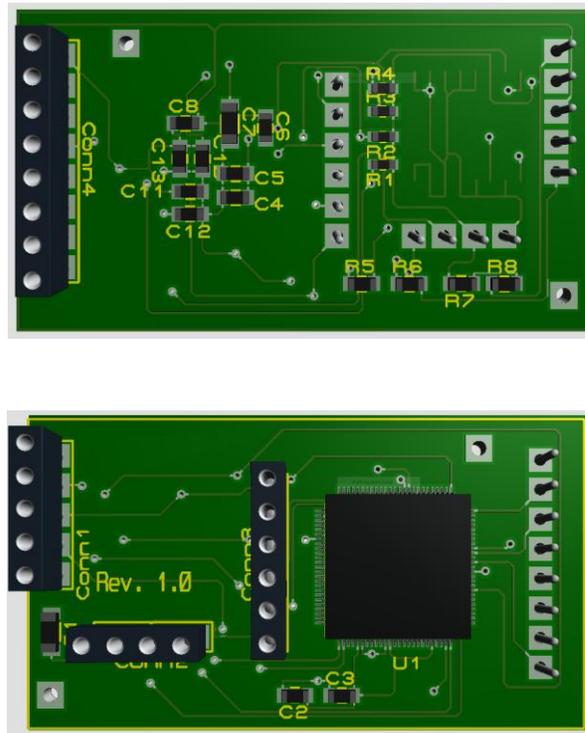
- Incluir cálculo de reloj

El número de terminales necesarias para el óptimo funcionamiento es de 4, lo cual es relativamente bajo, excluyendo los pines necesarios para el funcionamiento del microcontrolador.

3.2. Diseño

El diseño básico del prototipo se puede apreciar en la siguiente gráfica:

Figura 38. **Modelo de PCB flexible**



Fuente: elaboración propia.

3.3. **Compilador HI-TECH**

HI-TECH C es una marca de clase mundial de los compiladores que ofrecen Omniscient Code Generation™ para microcontroladores marca Microchip de 8, 16, y 32 bits PIC® y dsPIC®.

Por el tipo de microcontrolador utilizado en el prototipo el compilador HI-TECH no se utilizó.

3.4. Compilador C18

C18 es un compilador de C para la familia de microcontroladores PIC18, microcontroladores de 8 bits. Los microcontroladores PIC18 mostraron ser capaces para manejar la cantidad de datos entregada por la FIFO del circuito integrado MPU-6050; pero la poca capacidad que tienen en memoria ROM no hicieron posible que contuviera el *firmware* para la activación del DMP por lo cual se descartó en el proceso de programación de dicho *firmware*.

3.5. Programación

La programación de los microcontroladores se realizó con diferentes lenguajes de programación para determinar cuál es el más apropiado para los cálculos y puertos de comunicación.

3.5.1. PIC16F877A

Con este microcontrolador solo se logró leer los datos del acelerómetro y giroscopio dada sus limitadas capacidades de RAM y ROM. El proceso de diseño se detuvo en este modelo al llenar su memoria.

Figura 39. **PIC16F877A**



Fuente: *Microchip*. http://www.microchip.com/_images/ics/medium-PIC16F877A-PDIP-40.png.

Consulta: 14 de julio de 2017.

3.5.2. PIC18F4550

Aunque de mayores capacidades que el anterior modelo, la familia de microcontroladores PIC18 no fue capaz de almacenar el *firmware* de activación del DMP; aunque el desarrollo con este modelo avanzó más que la familia del PIC16, su desarrollo se detuvo cuando el compilador indicó que se agotó la memoria ROM.

Figura 40. **PIC18F4550**



Fuente: *Microchip*. http://www.microchip.com/_images/ics/medium-PIC18F4550-PDIP-40.png.

Consulta: 14 de julio de 2017.

4. INTERFACE

4.1. UART-USB

La conversión está realizada a través de una interface serial UART la cual se encuentra en la mayoría de los microcontroladores PIC, la parte de hardware utilizada es la placa de desarrollo CP210x, la cual es reconocida por los sistemas operativos como un puerto serial.

Figura 41. Tarjeta de desarrollo CP210x.



Fuente: *Maxembeddeb*. <https://maxembedded.files.wordpress.com/2013/09/cp2102-based-usb-uart-bridge.jpg>. Consulta: 15 de julio de 2017.

Los datos utilizados para la transmisión de datos son los siguientes:

- Baud rate: 112,000
- Stop bit: 1
- Parity: par
- Imagen Linux

- Imagen Windows

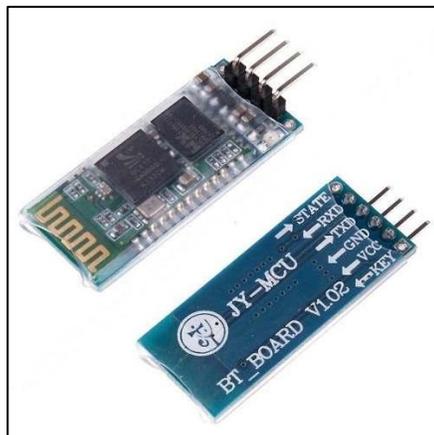
Un dato importante es asignar siempre el mismo puerto para que el *driver* desarrollado pueda detectar la placa y establecer una comunicación óptima.

4.2. UART- Bluetooth

La conversión de UART A Bluetooth se realiza utilizando la tarjeta de desarrollo HC-06 la cual se puede conseguir a bajo costo en tiendas en línea; los cambios requeridos para implementar este protocolo de comunicación es que la computadora en la cual se instaló el *driver* tenga un dispositivo Bluetooth con un emulador a puerto serial.

Los pasos a seguir son los mismos que la conexión anterior.

Figura 42. Tarjeta de desarrollo HC-06



Fuente: *Teslabem*. http://teslabem.com/media/catalog/product/cache/1/image/636x/602f0fa2c1f0d1ba5e241f914e856ff9/b/l/bluetooth-modulo-serial-microcontrolador-pic-arduino-atmel_mlm-o-2636188463_042012-500x500.jpg. Consulta: 15 de julio de 2017.

4.3. UART-Wifi

Para realizar una interface Wifi se utilizó una tarjeta de desarrollo de Microchip, RN-171; esta tarjeta es de bajo consumo energético, cuenta con una interface UART para la transmisión de datos que utiliza un microcontrolador.

Al ser Wifi, se requiere de otro tipo de driver o variante, en la cual el canal de comunicación no sea serial; en cambio es un *driver* que debe utilizar *sockets* direccionado a una IP, la cual se asigna a la tarjeta de desarrollo RN-171 de manera estática, ya sea a través de su configuración interna o por medio de un servidor DHCP.

Figura 43. **Tarjeta de desarrollo RN-171**

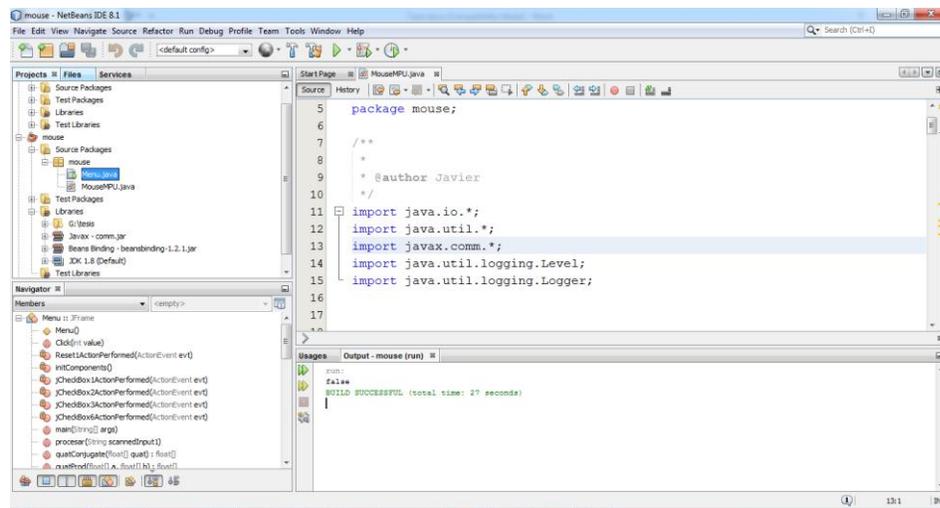


Fuente: *Sparkfun*. <https://cdn.sparkfun.com//assets/parts/5/8/1/7/10822-01.jpg>. Consulta: 16 de julio de 2017.

5. DRIVER

En esta tesis *driver* se le denomina al programa que se ejecuta en la computadora que se desea operar con el proyecto de tesis; fue escrito en Java utilizando el IDE Netbeans; existen diferentes versiones dependiendo de la interface de comunicación a utilizar.

Figura 44. NetBeans IDE 8.1

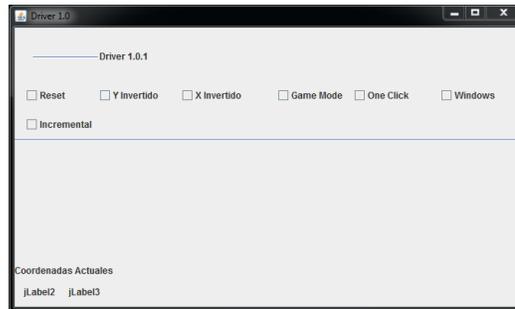


Fuente: elaboración propia.

5.1. Java

Lenguaje de programación utilizado por varios sistemas operativos, esta fue la característica por la cual fue seleccionado; ya permite usarlo en sistemas operativos Windows y sistemas Linux sin realizar cambios drásticos en el código.

Figura 45. **Captura de driver diseñado**



Fuente: elaboración propia.

5.2. Linux

En estos sistemas la interface serial se habilita como ttyX donde X es el número de emulador serial asignado al convertidor UART-USB.

El programa automáticamente detecta el sistema operativo y consulta la interface.

Figura 46. **Logo de Linux™**



Fuente: *Vivaelsoftwarelibre*. <https://i2.wp.com/vivaelsoftwarelibre.com/wp-content/uploads/2016/03/linux-penguin-logo.jpg?fit=468%2C279&resize=350%2C200>. Consulta:

16 de julio de 2017.

La versión de Linux que se utilizó fue Ubuntu 14.04 LTS de 64 bits.

Figura 47. **Ubuntu 14.04 LTS**



Fuente: *Jovenclub*. https://gutl.jovenclub.cu/wp-content/uploads/2014/04/718x479xubuntu-14.04-lts.jpg.pagespeed.ic_mfilDmhe51.jpg. Consulta: 16 de julio de 2017.

5.2.1. Raspberry Pi

Contiene un sistema operativo compilado para su hardware que utiliza un Kernel de Unix, lo cual la hace muy eficiente; la compatibilidad con el *driver* del proyecto de tesis es completa; por lo cual el driver operará como si se tratará de un sistema Linux. La versión utilizada es la Raspberry Pi B, la cual se puede apreciar en la siguiente imagen.

Figura 48. **Raspberry Pi**



Fuente: *Jovenclub*. https://gutl.jovenclub.cu/wp-content/uploads/2014/04/718x479xubuntu-14.04-lts.jpg.pagespeed.ic_mfilDmhe51.jpg. Consulta: 16 de julio de 2017.

El sistema operativo a utilizar en las pruebas fue Raspbian.

Figura 49. **Raspbian**



Fuente: *Raspberrypi*. <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian>. Consulta: 17 de julio de 2017.

5.3. Windows

En Windows el *driver* opera con una interface denominada COMX donde X es el número de puerto serial el cual está asignado a la tarjeta UART-USB. El driver por estar escrito en Java es compatible con este sistema sin ningún cambio.

La versión de Windows que se utilizó es Windows 7.

Figura 50. Logo de Windows® 7



Fuente: *Bltt*. <https://bltt.org/wp-content/uploads/2009/07/win7.png>. Consulta: 17 de julio de 2017.

CONCLUSIONES

1. El prototipo demostró en las diferentes pruebas de campo, realizadas por personas con discapacidades físicas, un óptimo funcionamiento al utilizar computadoras con diferentes sistemas operativos con el circuito integrado MPU-6050 como sensor inercial.
2. El mecanismo inercial electrónico está compuesto del circuito integrado MPU-6050 como sensor inercial y el microcontrolador PIC24FJ256DA210 como procesador de señales e interface.
3. Se diseñó el prototipo para funcionar con las interfaces USB, Bluetooth y Wifi, todas se comunican por medio del puerto UART del microcontrolador PIC24FJ256DA210.
4. El circuito integrado MPU-6050 es capaz de medir el movimiento utilizando cuaterniones y el microcontrolador PIC24FJ256FDA210 procesar los datos de forma suficiente para no depender del sistema operativo del computador; esto, combinado al *driver* escrito en Java, otorga la capacidad de funcionar en diferentes plataformas.
5. Con un diseño liviano, PCB flexible, y de dimensiones reducidas, 5 cm x 2 cm, el prototipo es lo suficientemente adaptable para acoplarlo a diferentes partes del cuerpo; el *driver* personalizado aumenta la flexibilidad de crear nuevos procesos según las necesidades.

RECOMENDACIONES

A los futuros diseñadores:

1. Estar consciente sobre la flexibilidad y los límites del software y del hardware para no crear falsas expectativas; es de suma importancia entender la situación clínica y psicológica de las personas para establecer alcances reales que estén dentro de los límites del proyecto.
2. Si el paciente está recluido en un centro médico, se deben obtener los permisos por escrito con las autoridades pertinentes para evitar problemas o malos entendidos que puedan dar paso a una situación legal adversa.
3. Consultar precios y servicios a proveedores de PCB chinos por ser más económicos, especialmente, si se desea la versión flexible.
4. Utilizar módulos prefabricados puede bajar considerablemente los costos de investigación, sin afectar en gran medida las dimensiones del dispositivo o el código; estos se pueden encontrar en distintos proveedores y tiendas en línea.

BIBLIOGRAFÍA

1. LEUTHOLD, H.; RULDOLF, F. *An ASIC for high-resolution capacitive microaccelerometers. Sensors and Actuators*. Alemania: HSTFM, 2006. 281 p.
2. *Microchip Architecture*. [En línea]. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/31004a.pdf>>. [Consulta: 16 de julio de 2017].
3. SMITH, Jacob. *Sistema microelectromecánico*. [En línea]. <[http://books.google.es/books?id=20j7laDKIOUC&printsec=frontcover&dq=Microelectromechanical+systems&hl=ca&sa=X&ei=3L1T9edJuT80QXYjtC5Bw&ved=0CEEQ6AEwAQ"v=onepage&q=Microelectromechanical%20systems&f=false](http://books.google.es/books?id=20j7laDKIOUC&printsec=frontcover&dq=Microelectromechanical+systems&hl=ca&sa=X&ei=3L1T9edJuT80QXYjtC5Bw&ved=0CEEQ6AEwAQ)>. [Consulta: 17 de julio de 2017].
4. *UART PIC24FJ*. [En línea]. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/en026583.pdf>>. [Consulta: 17 de julio de 2017].

