



# UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

---

---

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*“Diseño e implementación de un prototipo de sistema de navegación semi-autónoma para una silla de ruedas eléctrica”*

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.**  
(Opción: Instrumentación y Sistemas Digitales)

PRESENTA:  
***Ing. Correa Caicedo Pedro José***

ASESORES:  
*Dr. Estrada García Héctor Javier*  
*Dr. Rostro González Horacio*

Salamanca, Gto., a 22 de enero del 2018.

M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTÍN  
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
P R E S E N T E.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) Pedro José Correa Caicedo del Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica (Control e Instrumentación) y cuyo número de NUA es: 74577 del cual soy director. El título de la tesis es: Diseño e instrumentación de un prototipo de sistema de navegación semi-autónoma para una silla de ruedas eléctrica.

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE

  
Héctor Javier Estrada García  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS  
SECRETARIO

\_\_\_\_\_  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS

  
Dr. Rocío Castro Sánchez  
NOMBRE Y FIRMA  
PRESIDENTE

Dr. Oscar Oscar Ibarrá Muro  
  
NOMBRE Y FIRMA  
VOCAL

# Dedicatoria

A Doña María y Don Pedro.

# Agradecimientos institucionales

Este trabajo de tesis ha sido soportado con la ayuda de varias instituciones y a las cuales quisiera hacer una mención especial y agradecerles por haber hecho posible la realización de este trabajo.

- Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo al desarrollo del proyecto “Diseño e implementación de un prototipo de sistema de navegación semi-autónoma para una silla de ruedas eléctrica” de acuerdo a lo estipulado en las convocatorias de sus becas nacionales.



- A la **División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca** de la Universidad de Guanajuato por brindarme las instalaciones y recursos tanto materiales como humanos para desarrollar este proyecto.



# Índice general

<b>Dedicatoria</b>	<b>III</b>
<b>Agradecimientos institucionales</b>	<b>IV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	2
1.1.1. General . . . . .	2
1.1.2. Específicos . . . . .	3
1.2. Justificación . . . . .	3
1.3. Estructura de la tesis . . . . .	4
<b>2. Antecedentes y Marco Teórico</b>	<b>6</b>
2.1. Avances en sistemas de asistencia para personas en condición de discapacidad. .	6
2.2. Medición de distancia y ángulos de inclinación. . . . .	14

## ÍNDICE GENERAL

---

2.2.1. Medición de distancia. . . . .	14
2.3. Conceptos de navegación. . . . .	19
2.4. Medición de señales cerebrales. . . . .	21
2.4.1. Posicionamiento de los electrodos en la cabeza . . . . .	22
2.4.2. Adquisición de las señales. . . . .	24
2.4.3. Diadema Emotiv Epoc. . . . .	25
<b>3. Diseño del sistema de adquisición de datos</b>	<b>28</b>
3.1. Introducción . . . . .	28
3.2. Módulo MPU6050 . . . . .	28
3.2.1. Comunicación I2C ( <i>Inter Integrated Circuit</i> ) . . . . .	29
3.2.2. Acelerometro . . . . .	30
3.2.3. Giroscopio . . . . .	33
3.3. Memoria SD . . . . .	36
3.3.1. Protocolo de Comunicación SPI . . . . .	36
3.4. HC SR04 . . . . .	37
3.5. Módulo Puente H Dual L298N . . . . .	39
3.6. Módulo MUX CD74HC4067 . . . . .	41
3.7. Sistema de adquisición de datos . . . . .	43

## ÍNDICE GENERAL

---

3.7.1. Descripción del sistema . . . . .	43
3.8. Diseño del sistema . . . . .	47
<b>4. Software del sistema</b>	<b>51</b>
4.1. Introducción . . . . .	51
4.2. Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G . . . . .	51
4.2.1. Software y Librerías . . . . .	53
4.2.2. Lógica de control de los módulos del sistema. . . . .	54
4.2.3. Diagramas de Flujo. . . . .	58
4.3. Rapberry Pi 3 Modelo B. . . . .	67
4.3.1. Raspbian Jessie. . . . .	68
4.3.2. Entorno de Programación y Librerías. . . . .	69
4.3.3. Comunicación con los periféricos. . . . .	73
4.4. Manejo de datos. . . . .	73
<b>5. Pruebas al prototipo.</b>	<b>75</b>
5.1. Introducción . . . . .	75
5.2. Sistema de adquisición de datos. . . . .	75
5.2.1. Pruebas de caracterización. . . . .	76

## ÍNDICE GENERAL

---

5.3. Procesamiento de datos. . . . .	92
5.3.1. Adquisición datos de la diadema Emotiv Epor. . . . .	92
5.3.2. Interfaz de usuario: . . . . .	95
<b>6. Conclusiones. . . . .</b>	<b>99</b>
6.1. Introducción . . . . .	99
6.2. Análisis de resultados y Conclusiones. . . . .	99
6.2.1. Sistema de Adquisición de datos. . . . .	100
6.2.2. Procesamiento de datos. . . . .	105
6.2.3. Diseño modular del sistema. . . . .	106
6.3. Observaciones y recomendaciones. . . . .	109

# Índice de figuras

2.1. Detección de guiños: a) sensores ópticos, b) interfaz de detección de patrones y c) sensores de vibración. . . . .	8
2.2. Colocación del sensor de reflexión en las gafas. . . . .	8
2.3. Sistema completo conducción de la silla de ruedas. . . . .	9
2.4. Ubicación de los sensores ultrasónicos en la silla de ruedas. . . . .	10
2.5. Diagrama de bloque del control difuso. . . . .	11
2.6. Geometría del diseño. . . . .	12
2.7. Reconocimiento de objetos en movimiento. . . . .	13
2.8. Matriz de transmisión. . . . .	13
2.9. Comparativa entre el movimiento del robot móvil y el objeto en movimiento. . .	14
2.10. Sensor de reflexión directa. . . . .	15
2.11. Reflexión con reflector. . . . .	16
2.12. Sensor del tipo TRHU-Beam. . . . .	16

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.13. Sensor capacitivo. . . . .	17
2.14. Sensor Inductivo. . . . .	18
2.15. Señales comunes en encefalogramas . . . . .	22
2.16. Posición de los electrodos en la cabeza (vista de perfil) . . . . .	23
2.17. Posición de los electrodos en la cabeza, vista superior. . . . .	23
2.18. Montaje Bipolar de electrodos. . . . .	24
2.19. Montaje Monopolar de electrodos. . . . .	25
2.20. Diadema Emotiv v 1.1. . . . .	25
3.1. Acelerómetro piezoeléctrico. . . . .	31
3.2. Composición interna del acelerómetro. . . . .	31
3.3. Posición de referencia del sensor. . . . .	32
3.4. Suma vectorial de la aceleración de la gravedad. . . . .	32
3.5. Efecto Coriolis. . . . .	34
3.6. Giroscopio de tres ejes. . . . .	34
3.7. Estructura del giroscopio MEMS. . . . .	35
3.8. Rotación sobre el eje x. . . . .	36
3.9. Conexión protocolo SPI. . . . .	37
3.10. Características de tiempo del HC SR04. . . . .	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.11. Medición de distancia. . . . .	38
3.12. Integrado L298N. . . . .	39
3.13. Esquemático del módulo L298N. . . . .	40
3.14. Módulo L298N. . . . .	41
3.15. Disposición de los sensores ultrasónicos en la silla de ruedas. . . . .	44
3.16. Medición de inclinación de la silla de ruedas con el sensor MPU6050; a) Inclinación en el eje x; b) Inclinación en el eje y. . . . .	44
3.17. Posibles casos de medición. a) y b) casos para una superficie plana; c) y d) casos para superficie con inclinación. . . . .	45
3.18. Características <i>Stellaris Launchpad</i> TM4C123X . . . . .	47
3.19. Empleo de pines de la tarjeta de desarrollo <i>Stellaris Launchpad</i> . . . . .	48
3.20. Esquema eléctrico de conexión del sistema. . . . .	49
3.21. Layout PCB sistema de adquisición de datos. . . . .	49
4.1. Movimientos de la silla de ruedas. . . . .	55
4.2. Lógica de precedencia de los bloques del prototipo. . . . .	56
4.3. Función Void Setup. . . . .	59
4.4. Inicialización SD. . . . .	60
4.5. Inicialización MPU6050. . . . .	60
4.6. Inicialización joystick. . . . .	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.7. Bandera del joystick. . . . .	62
4.8. Función void loop. . . . .	63
4.9. Función motores. a) AdelanteAB; b)AdelanteA; c)AdelanteB . . . . .	64
4.10. Función Sensores Ultrasónicos. a)Llamado a funciones de sensores; b)Activar sensores y medir . . . . .	65
4.11. Función guardar en SD. . . . .	66
4.12. Función enviar USB. . . . .	66
4.13. Función medir MPU6050. . . . .	67
4.14. Características técnicas Raspberry Pi 3 Modelo B. . . . .	68
4.15. Entorno gráfico Raspbian Jessie basado en GTK+3. . . . .	69
5.1. Curva característica sensor ultrasónico HC-SR04. . . . .	76
5.2. Curva característica giroscopio MPU6050. . . . .	77
5.3. Curva característica acelerómetro MPU6050. . . . .	78
5.4. Curva característica filtro complementario MPU6050. . . . .	79
5.5. Esquema prueba de puntos ciegos. a) Frontal izquierdo; b) Trasero izquierdo. . . . .	80
5.6. Prueba de puntos ciegos bloque frontal izquierdo. . . . .	81
5.7. Prueba de puntos ciegos bloque trasero izquierdo. . . . .	82
5.8. Esquema puntos ciegos en intersecciones. . . . .	83



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

5.9. Puntos ciegos en intersecciones frontal. . . . .	83
5.10. Puntos ciegos en intersecciones lateral. . . . .	84
5.11. Puntos ciegos en intersecciones trasero. . . . .	85
5.12. Esquema de prueba de rangos de recepción de los sensores ultrasónicos. . . . .	86
5.13. Rangos de recepción bloques de sensores frontales izquierdos. . . . .	86
5.14. Rangos de recepción bloques de sensores frontales derechos. . . . .	87
5.15. Rangos de recepción bloques de sensores traseros izquierdos. . . . .	88
5.16. Rangos de recepción bloques de sensores traseros derechos. . . . .	88
5.17. Superficies inclinadas. a) Eje X positivo; b) Eje X negativo; c) Eje Y positivo; d) Eje Y negativo. . . . .	89
5.18. Superficie inclinada eje X (Ángulo $\pm 45^\circ$ ). . . . .	90
5.19. Superficie inclinada eje Y (Ángulo $\pm 45^\circ$ ). . . . .	91
5.20. Superficies particulares. caso b) Obstáculo inclinado; caso c) Superficie y obs- táculos con inclinación. . . . .	92
5.21. Adquisición de datos a través de la Raspberry Pi 3. . . . .	93
5.22. Datos transmitidos por la diadema Emotiv Epoc al aire. . . . .	94
5.23. Datos transmitidos por la diadema Emotiv Epoc con usuario activo. . . . .	94
5.24. Inicialización interfaz gráfica Raspberry Pi 3. . . . .	95
5.25. Conexión de electrodos Raspberry Pi 3. . . . .	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

5.26. Conexión Emotiv Epoc con PC (Windows). . . . .	97
5.27. Interfaz de entrenamiento Emotiv Epoc. . . . .	97
5.28. Acción de entrenamiento <i>push</i> diadema Emotiv Epoc. . . . .	98
6.1. Diseño modular del sistema de adquisición de datos. . . . .	107
6.2. Sensores ultrasónicos y cableado. . . . .	108
6.3. Prototipo acoplado a la silla de ruedas (Vista trasera). . . . .	109

# Índice de tablas

2.1. Tipos de señales del cerebro . . . . .	21
3.1. Rangos de operación del MPU6050 . . . . .	29
3.2. Registros del módulo MPU6050. . . . .	30
3.3. Lógica de funcionamiento L298N . . . . .	41
3.4. Tabla de verdad CD74HC4067 . . . . .	42
4.1. Librerías Python 2.7.X . . . . .	70
6.1. Distancia mínima de guarda. . . . .	101
6.2. Distancias de guarda intersecciones 1. . . . .	102
6.3. Distancias de guarda intersecciones 2. . . . .	102
6.4. Distancias de guarda en planos inclinados. . . . .	104

# Capítulo 1

## Introducción

Actualmente se desarrollan muchos dispositivos de asistencia para personas que padecen algún tipo de discapacidad; en especial la pérdida de motricidad para lo cual existen desde sillas de ruedas manuales, sillas de ruedas eléctricas y de navegación autónoma hasta exoesqueletos que se acoplan a las extremidades del cuerpo. En el presente trabajo se desarrolla la adaptación de un sistema de adquisición de datos a una silla de ruedas convencional con el propósito de identificar amenazas en el movimiento de la silla y establecer el inicio de un sistema más complejo que cuente con movimiento semi autónomo de la misma.

Mediante el uso de sensores de proximidad, como los ultrasónicos, es posible determinar la posición de obstáculos que podrían representar un peligro para el usuario de la silla de ruedas; estas variaciones en el entorno pueden no ser percibidas por el usuario debido a su condición o por diseño de la misma silla de ruedas; para lograr un mejor desplazamiento se propone que el control de la silla sea semi-autónomo, es decir, que el usuario comparta el control del vehículo de asistencia con un sistema de adquisición de datos, de manera que el sistema advierta al usuario de zonas que representen un peligro para él.

Sin embargo, solamente con el uso de este tipo de sensores de distancia no es suficiente para garantizar una movilización segura y confiable de la silla de ruedas, sobre todo en superficies que tengan cambios de nivel; para hacer más seguro el desplazamiento es necesario comple-

## 1.1 Objetivos

---

mentar el sistema con otro tipo de sensores, como un giroscopio de tres ejes el cual suministra información acerca del estado de la inclinación de la silla de ruedas en dos dimensiones. Las mediciones anteriores dan información suficiente para enviar señales de advertencia para que el usuario de la silla de ruedas cambie la dirección del movimiento.

También es necesario realizar una medición adicional que indique las condiciones actuales de movimiento de la silla y que sirva como señal de retroalimentación del sistema, para esto se utiliza un sensor acelerómetro de tres ejes para medir la velocidad que lleva la silla en un determinado instante de tiempo y en una determinada dirección; de esta forma, se podrá ejercer mayor control sobre los motores. Lo que se hace con este proyecto es generar un prototipo de sistema de navegación semi autónoma que se pueda acoplar fácilmente a una silla de ruedas eléctrica para facilitar la locomoción de personas con movilidad reducida y con capacidad de que se integren algoritmos de navegación automática.

Adicionalmente, se cuenta con la diadema Emotiv EPOC V1.1 la cual puede medir las señales cerebrales del usuario y entregar datos que se pueden operar para ser usada como control de los movimientos de la silla de ruedas; teniendo de esta forma un pilotaje mixto o compartido de la silla.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. General

Diseñar e implementar un prototipo de sistema de navegación semi-autónoma para una silla de ruedas que sirva como sistema de apoyo y asistencia a personas en condición de discapacidad motriz y que a su vez permita que su movilización sea más segura.

El funcionamiento de este prototipo será compartido, es decir, el usuario podrá controlar la silla de forma manual (con una palanca o joystick, por ejemplo) y por otro lado tendrá un sistema de navegación semiautónoma que consta de un arreglo de sensores que suministrarán los datos necesarios para el control de los motores, así como de la silla misma, para los casos

## 1.2 Justificación

---

en los que el usuario no tenga una buena capacidad para la conducción manual ante escenarios o terrenos complicados.

### 1.1.2. Específicos

I. Diseñar e instrumentar el sistema de adquisición de datos del entorno, esto mediante el uso de sensores ultrasónicos, giroscopio y acelerómetro y así como una tarjeta de adquisición de señales (p.e. TM4C123 Stellaris Launchpad de Texas Instruments).

II. Implementar el sistema de adquisición de señales cerebrales Emotiv Epoc para adaptarlo al funcionamiento del prototipo.

III. Diseñar un prototipo modular que se pueda acoplar fácilmente a las dimensiones y geometría de una silla de ruedas convencional.

## 1.2. Justificación

Para la aplicación propuesta se justifica el uso de sensores ultrasónicos para la detección de obstáculos como una solución económica (en comparación a otro tipo de sensores) que a pesar de no ser tan precisos ofrecen mediciones de distancia sin interrupciones. El trabajo de diseño del sistema de adquisición de datos radica precisamente en encontrar la forma de lidiar con las imprecisiones de estos dispositivos inherentes al tipo de señales que emplean para su funcionamiento.

En el caso de los sensores infrarrojos son muy buenos para la detección de objetos, pero estos necesitan un ambiente poco contaminado para su buen funcionamiento, por ejemplo, si al haz de luz se le atraviesa una ráfaga de viento con polvo o humo la medición se falsea (deja de medir), cosa que no pasa con los sensores ultrasónicos que en este caso entregarían una medición equivocada que puede ser corregida mediante software.

El uso de cámaras de alta velocidad para la diferenciación de objetos estáticos y detec-

### 1.3 Estructura de la tesis

---

ción de objetos en movimiento en tiempo real también son una buena opción para este tipo de dispositivos, pero su elevado costo hace más difícil su integración en proyectos de esta naturaleza.

Adicionalmente es necesario tener medidas de la inclinación del prototipo cuando se movilice por los diferentes escenarios, para lo cual se utilizan módulos de giroscopios y acelerómetros con el fin de poder entregar al usuario la información suficiente para su movilización y al mismo tiempo hacer un mapeo más completo del terreno.

### 1.3. Estructura de la tesis

#### Capítulo 2

En este capítulo se muestra todo el marco teórico que sirve como base para este trabajo del proyecto y se presentan algunos trabajos previos importantes para la implementación del dispositivo desarrollado como antecedentes.

#### Capítulo 3

Se describe el principio de funcionamiento de todas las etapas y componentes del sistema de adquisición de datos; también se muestra la disposición del sistema sobre la silla de ruedas y la forma en que interactúa el prototipo con el entorno.

#### Capítulo 4

Se realiza la descripción explícita del funcionamiento de la diadema Emotiv EPOC, así como de todos los componentes que se requieren para ponerla en funcionamiento, como el uso de la tarjeta Raspberry Pi 3 Modelo B, las librerías de Python necesarias para el manejo de los datos y la composición del algoritmo que controla todo el sistema.

### 1.3 Estructura de la tesis

---

#### **Capítulo 5**

En esta sección del trabajo se registran los resultados del funcionamiento tanto del sistema de adquisición de datos, de la diadema Emotiv EPOC, como del sistema completo como forma de validación de los objetivos propuestos.

#### **Capítulo 6**

Se presenta un análisis de los resultados obtenidos de cada prueba realizada en el prototipo, también se dan recomendaciones para futuras aplicaciones e integrar las conclusiones de este trabajo de tesis.



## Capítulo 2

# Antecedentes y Marco Teórico

En este capítulo se muestran los avances más relevantes para el desarrollo del prototipo y que sirvieron para su implementación; también se hace una recopilación de los conceptos necesarios para la construcción y puesta en funcionamiento de cada una de las etapas del dispositivo.

### **2.1. Avances en sistemas de asistencia para personas en condición de discapacidad.**

Para contribuir al libre desarrollo de la vida de personas que padecen alguna limitación física, se han desarrollado desde hace décadas una gran cantidad de aplicaciones y dispositivos de asistencia que con la evolución de la tecnología se han venido mejorando para ofrecer mayores beneficios, comodidad y economía. Las aplicaciones son muy variadas, desde la creación de mecanismos y equipos para la recuperación de lesiones, hasta sistemas electrónicos que permiten la comunicación de forma virtual (o digital), de personas que están completamente inmóviles.

En México, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [17], en el Censo

## **2.1 Avances en sistemas de asistencia para personas en condición de discapacidad.**

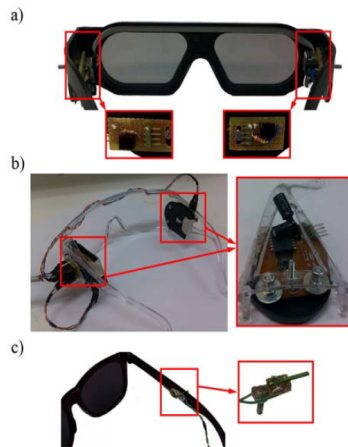
de población y vivienda del 2010, existían 5 millones 739 mil personas en el territorio nacional que manifestaron tener problemas para alguna de las siguientes actividades: caminar, moverse, subir o bajar escaleras, ver, oír, comer, poner atención, limitaciones mentales. Principalmente las dificultades para caminar es el principal problema que presentan las personas con un 58,3 % según [18].

Por lo anterior, es necesario encaminar esfuerzos en las áreas de ingeniería para la creación de aplicaciones que ayuden a mejorar la calidad de vida de estas personas, es por eso que se toman como referencia y punto de partida algunos dispositivos desarrollados para crear un prototipo propio.

Del estudio de las señales internas y externas que maneja el cuerpo humano se derivan las aplicaciones para tratar numerosas patologías; por ejemplo, en [3] se hace un compendio de diversos dispositivos, constituidos como sistemas o interfaz Máquina-Humano, que sirven para tratar diferentes discapacidades. De este documento se extraen las que son más relevantes para el desarrollo e implementación del prototipo propuesto.

Se propone en [3], la adaptación del sistema compuesto por los siguientes elementos: por un joystick que controla los movimientos de una silla de ruedas eléctrica, un sistema de detección de guiños del ojo mediante tres tipos de sensores colocados de forma estratégica sobre el marco de unos lentes, como se muestra en la Figura 2.1, de los cuales se dará una breve explicación a continuación.

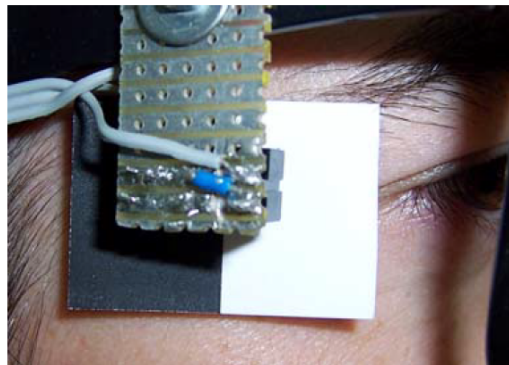
## 2.1 Avances en sistemas de asistencia para personas en condición de discapacidad.



**Figura 2.1.** *Detección de guiños: a) sensores ópticos, b) interfaz de detección de patrones y c) sensores de vibración.*

### a) Sensores de reflexión:

En el trabajo hecho en [3] se usó el sensor CNY70, compuesto por un diodo emisor de luz infrarroja y un fototransistor sensible a la luz. Este sensor detecta la reflexión de la luz emitida por sí mismo cuando impacta con un obstáculo. Para detectar el guiño se añadió una filmina blanca y negra como se muestra en la Figura.2.2.



**Figura 2.2.** *Colocación del sensor de reflexión en las gafas.*

## 2.1 Avances en sistemas de asistencia para personas en condición de discapacidad.

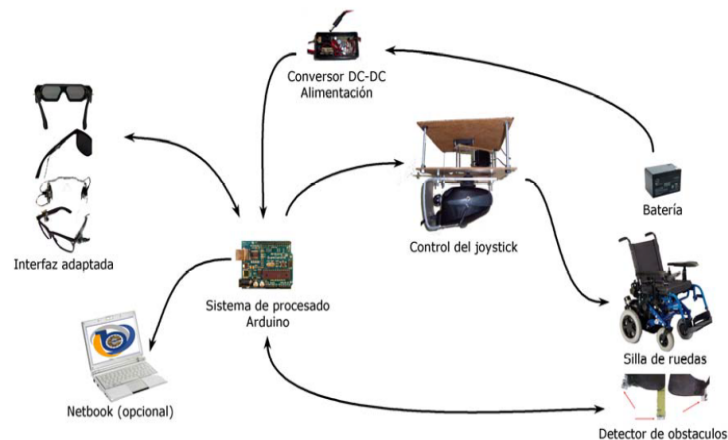
### b) Sensores ópticos:

Estos sensores se basan en el mismo sistema que está integrado en los ratones ópticos de los PC, lo que hacen es enviar señales de un patrón detectado a una unidad de procesamiento de señales donde se compara el nuevo patrón con los anteriores y determinar la posición del puntero en la pantalla. Este sensor debe estar muy próximo a la piel permitiendo su desplazamiento sobre la misma. El sistema detecta los cambios en la superficie de la piel y el procesador de datos realiza la comparación para determinar cuándo se produjo un guiño.

### c) Sensores de vibración:

Mediante el sensor piezoeléctrico BM15015-06HC, el cual responde a las deformaciones con un diferencial de potencial, para el prototipo se usaron sensores cerámicos. El propósito de estos sensores es detectar los movimientos de la piel alrededor de los parpados para saber cuándo se produce un guiño.

El prototipo completo propuesto en [3] se muestra en la Figura 2.3, donde se propone que el manejo o conducción de la silla de ruedas sea compartido entre el Joystick y en las gafas de detección de guiño.



**Figura 2.3.** Sistema completo conducción de la silla de ruedas.

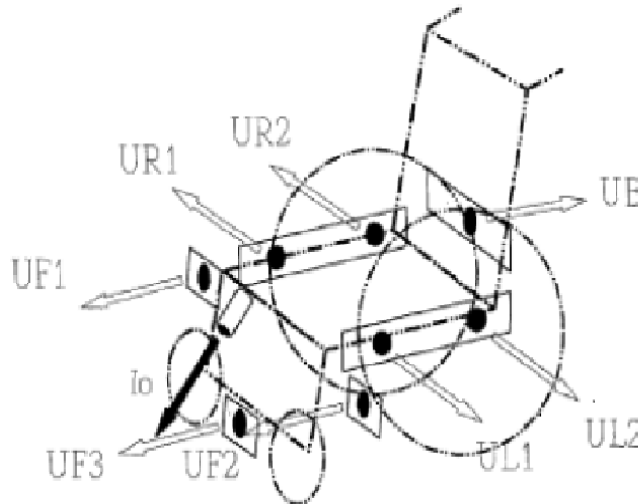
## 2.1 Avances en sistemas de asistencia para personas en condición de discapacidad.

De esta forma se plantea un control mixto o semi autónomo de la silla de ruedas mediante la medición del movimiento de los músculos alrededor del ojo del usuario de la silla de ruedas.

Se han desarrollado otros dispositivos para complementar o compartir la conducción de las sillas de ruedas eléctricas, como son los sistemas de reconocimiento de ordenes por voz, como se muestra en [12], el cual facilita el desplazamiento de personas que no cuentan con reflejos en sus manos, en dicho artículo se muestra la creación de una aplicación de comandos vocales para el control de la silla de ruedas.

Una aplicación más completa se presenta en [13], donde se desarrolla un sistema de navegación para una silla de ruedas eléctrica compuesta por sensores ultrasónicos para la detección de obstáculos alrededor de la silla de ruedas y sensores infrarrojos para la detección de escalones; nuevamente la conducción del prototipo es mixta, es decir, que la dirección del movimiento de la silla de ruedas se da mediante un joystick y el uso de comandos de voz.

Del documento [13] lo más relevante es la disposición de los sensores ultrasónicos alrededor de la silla de ruedas (ver Figura 2.4), ya que sirven como base o punto de partida para la colocación de los 16 sensores ultrasónicos que son utilizados en esta propuesta de tesis.



**Figura 2.4.** *Ubicación de los sensores ultrasónicos en la silla de ruedas.*

## 2.1 Avances en sistemas de asistencia para personas en condición de discapacidad.

En este dispositivo son utilizados ocho sensores de alto rango de medición y muy robustos, similares a los que componen los sistemas anticollisión en automóviles, pero tienen también un alto precio, elevando así los costos para la construcción de dispositivos similares. Estos sensores pueden medir distancias desde los 30 cm hasta los 1000 cm  $\pm$  4cm con un ancho de haz de 20 grados.

Se propone, en el artículo [13], para el control de los sensores ultrasónicos, así como del infrarrojo; e uso de lógica difusa para la clasificación de los datos recibidos del entorno en conjuntos difusos y enviar las respectivas advertencias hacia una pantalla que avisa al usuario de posibles amenazas. El diagrama de bloques de este control se muestra en la Figura 2.5[13].

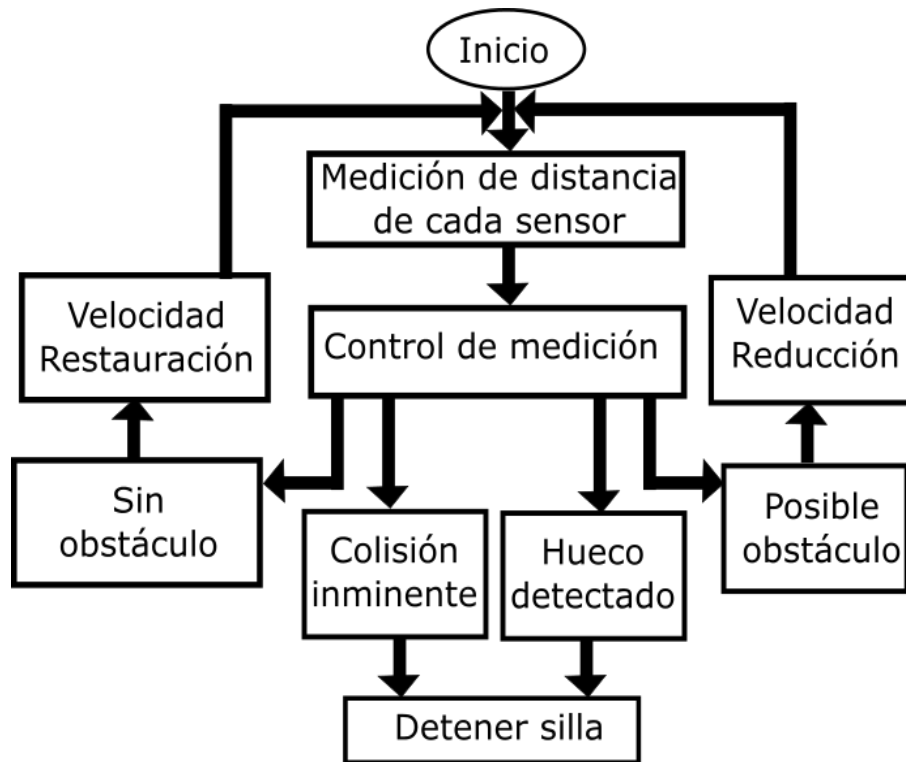
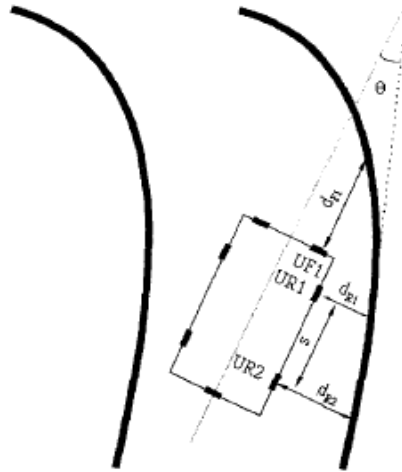


Figura 2.5. Diagrama de bloque del control difuso.

El control difuso se plantea de tal forma que se va teniendo como referencia el cambio del ángulo de reflexión de las ondas ultrasónicas a medida que la silla de ruedas esta en

## 2.1 Avances en sistemas de asistencia para personas en condición de discapacidad.

movimiento. Como se observa en la Figura 2.6.



**Figura 2.6.** Geometría del diseño.

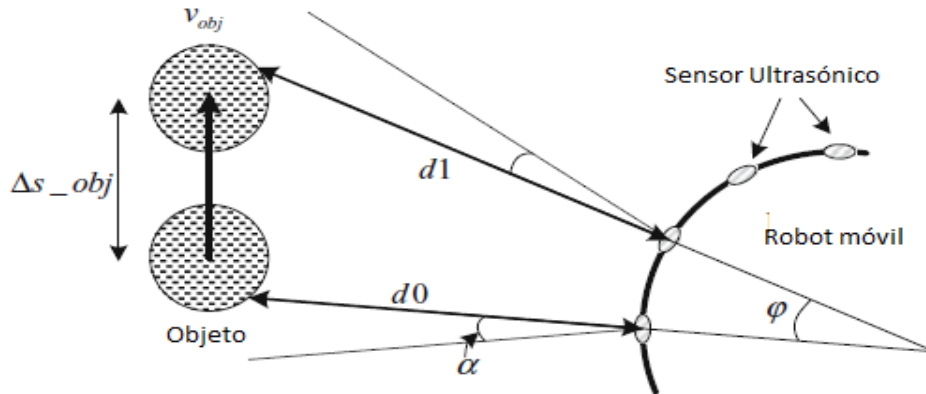
De la geometría del diseño y para los sensores frontal 1 UF1 ( $d_f$ ), sensores derecho 1 y 2: UR1 ( $d_r$ ) y UR2 ( $d_r$ ) se desprende la ecuación 2.1 [13], la cual entrega el valor del ángulo en el que se orienta el vehículo móvil.

$$\theta = \arctan\left(\frac{d_r2 - d_r1}{S}\right) \quad (2.1)$$

Un vehículo, como una silla de ruedas está sometido a muchas situaciones impredecibles en cualquier ambiente en el que se encuentre, ya sea doméstico o urbano, como los objetos en movimiento. En el artículo [11], se muestra el diseño de un sistema de sensores ultrasónicos, para un robot móvil, el cual es capaz de reaccionar ante objetos que se mueven alrededor de él para estimar su posición.

La localización se realiza mediante la detección de los cambios en las mediciones de los sensores y la geometría del rebote de las señales ultrasónicas, como se muestra en la Figura 2.7[11].

## 2.1 Avances en sistemas de asistencia para personas en condición de discapacidad.



**Figura 2.7.** Reconocimiento de objetos en movimiento.

La posición del objeto en movimiento se determina mediante los sistemas coordenados dados por los vectores  $p_{obj}=[x_{obj},y_{obj},\theta_{obj}]$ , si  $x=[x_R,y_R,\theta_R]$  y que representan la posición del robot, la matriz de transmisión entre las coordenadas se da como:

$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \end{pmatrix}_{Robot} = \begin{pmatrix} \cos \hat{\theta}_R & \sin \hat{\theta}_R \\ -\sin \hat{\theta}_R & \cos \hat{\theta}_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_W - \hat{x}_R \\ y_W - \hat{y}_R \end{pmatrix}_{World}$$

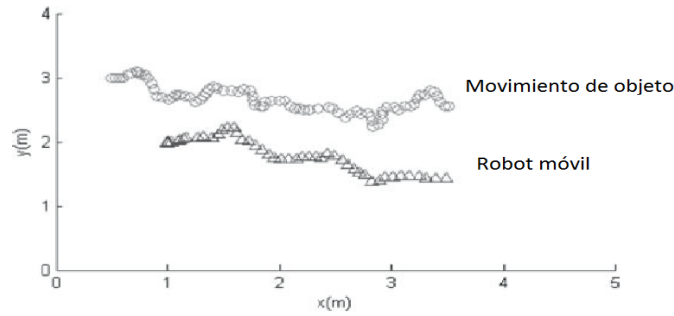
**Figura 2.8.** Matriz de transmisión.

Como resultado de la operación de estas ecuaciones, así como la implementación de un filtro Kalman para discriminar los datos y agregar un factor de corrección, se obtienen resultados satisfactorios en los que se muestra cómo la trayectoria del objeto en movimiento es similar a la trayectoria del robot móvil en su forma, como se observa en la Figura 2.9[11].



## 2.2 Medición de distancia y ángulos de inclinación.

---



**Figura 2.9.** Comparativa entre el movimiento del robot móvil y el objeto en movimiento.

Existen muchas formas de buscar la automatización del control de las sillas de ruedas eléctricas, gracias a los avances en la tecnología que han permitido la creación de una amplia gama de sensores precisos, robustos y no tan costosos, así como también a la aparición de software más versátil y con una alta velocidad de procesamiento de datos que se consiguen hoy en día. A continuación, se explican las maneras más comunes y efectivas que existen actualmente para medir distancias y ángulos de inclinación, ya que son estos dos parámetros los relevantes para la tesis.

## 2.2. Medición de distancia y ángulos de inclinación.

### 2.2.1. Medición de distancia.

También llamados sensores de proximidad, tienen como principal objetivo la detección de objetos que físicamente no se pueden tocar, es decir, obstáculos que se interponen en la trayectoria de algún vehículo. También son utilizados en sistemas de producción para medir nivel o para detectar la proximidad de alguna pieza sobre bandas transportadoras. Existen cinco principales familias de sensores que realizan la tarea de medir distancia.

## 2.2 Medición de distancia y ángulos de inclinación.

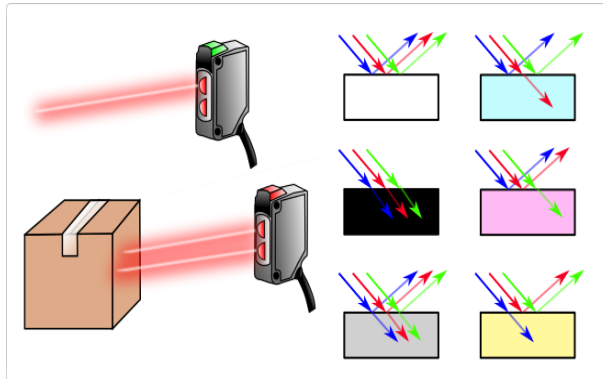
---

### a) Sensores de Reflexión:

Utilizan las propiedades de la luz infrarroja [22] para determinar la distancia a la que se encuentra un objeto, de los cuales se derivan cuatro tipos dependiendo de la aplicación y construcción.

- Reflexión directa:

En estos, el emisor de la luz infrarroja y el receptor se encuentran en la misma estructura paralelos de tal forma que la luz sale del emisor e impacta hasta un obstáculo, la reflexión de la luz que representa la superficie del objeto es captada por el receptor del sensor y así se puede estimar la distancia a la que se encuentra.



**Figura 2.10.** *Sensor de reflexión directa.*

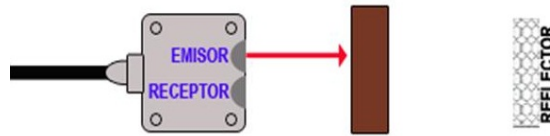
Como se muestra en la Figura 2.10[22] la medida de distancia que entrega este sensor depende del color: si la superficie del objeto es opaca (negra, por ejemplo) la luz tenderá a ser absorbida por el objeto y la distancia que mide el sensor será errónea; en contraste, si la superficie es blanca (o brillante) habrá reflexión total de la luz y la medida de distancia solo se afectará negativamente por la geometría del objeto.

- Reflexión con reflector: Igual que en el caso anterior se tienen el emisor y el receptor de forma paralela con la diferencia que el emisor proyecta la luz hacia un reflector, normalmente es blanco opaco, que refleja totalmente el haz hacia el receptor, la detección

## 2.2 Medición de distancia y ángulos de inclinación.

---

se hace cuando un objeto pasa en medio del sensor y el reflector e interrumpe el haz que regresa al receptor (ver Figura 2.11 [22])



*El objeto interrumpe el haz luminoso.*

Figura 2.11. Reflexión con reflector.

- Reflexión polarizada con reflector: Similar al anterior, agregando un dispositivo anti-reflejo con el fin de filtrar el haz que va al receptor cuando impacta contra objetos demasiado brillantes, haciendo que sean más precisos.
- TRHU-Beam: En este caso se tiene el emisor y el receptor por separado colocados uno enfrente del otro, de tal forma que cuando un objeto pasa entre los dos, interrumpiendo el haz de luz, se detecta el objeto.

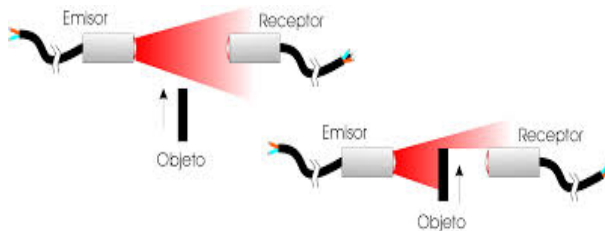


Figura 2.12. Sensor del tipo TRHU-Beam.

### b) Sensor ultrasónico:

Se valen de las propiedades de las ondas ultrasónicas, las cuales oscilan a más de 20 mil Hertz (no son audibles por el ser humano), para determinar la posición de un objeto en determinado momento. Básicamente estos sensores envían una onda ultrasónica por el emisor la cual rebota en los objetos cercanos y son captados en el receptor del sensor. La medida que

## 2.2 Medición de distancia y ángulos de inclinación.

---

entrega este sensor es el tiempo de vuelo de las ondas desde el momento que salen del emisor hasta que llegan al receptor y se convierte a distancia, conociendo que la velocidad del sonido en el aire es de: 343,2 [m/s], mediante la siguiente relación:

$$v = \frac{Distancia(m)}{tiempo(s)} \quad (2.2)$$

De este tipo de sensores existen una gran variedad de diseños, unos más robustos que otros dependiendo del entorno en que sean utilizados, pero en general el único factor que influye en las mediciones es la geometría de la superficie del obstáculo con el que impacten las ondas y también la superficie donde se movilice el vehículo, ya que el valor de distancia varía dependiendo del ángulo de reflexión de las ondas.

### c) Sensor capacitivo:

Mediante la diferencia de capacitancia entre el sensor[23] y el objeto que se quiere encontrar; cuando el objeto se encuentra dentro del rango sensible del sensor, un circuito integrado en el sensor inicia la oscilación, la variación de estas oscilaciones entregan la señal de referencia a un amplificador el cual proporciona el valor de la distancia a la que se encuentra el objeto.

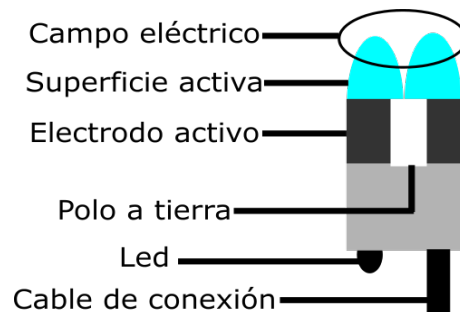


Figura 2.13. Sensor capacitivo.

Estos sensores se utilizan más comúnmente para la detección de materiales específicos

---

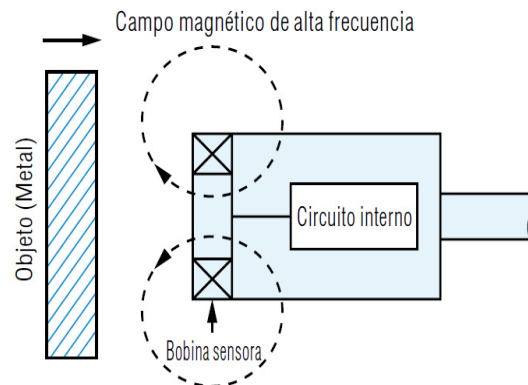
## 2.2 Medición de distancia y ángulos de inclinación.

---

metálicos o no metálicos.

### d) Sensor inductivo:

Se usan para detectar la proximidad de objetos que están hechos de materiales metálicos[24]. Estos sensores están compuestos por una bobina y un oscilador que crean un campo magnético que se irradia hacia los objetos que se quieren detectar, debido al material metálico de los objetos se produce una reducción en la amplitud de la onda electromagnética que es detectada por un amplificador que convierte estas señales a tensión para conocer que tan lejano está un objeto.



**Figura 2.14.** *Sensor Inductivo.*

### e) Sensor magnético:

Están compuestos por una lengüeta de contactos, que se encuentra en una ampolla de vidrio con gas inerte y que esta sellada herméticamente; cuando existe un campo magnético, las láminas se tocan haciendo que haya un contacto eléctrico, su funcionamiento se asemeja al de los interruptores convencionales.

### 2.3. Conceptos de navegación.

Se define navegación autónoma [19], como la capacidad de ir de un punto a otro evitando los obstáculos que presente el medio ambiente al que esté sometido un vehículo o robot, que cuente con algún sistema de adquisición de datos y de procesamiento de información. Existen varias etapas que componen el proceso de navegar, que puede ser autónoma o semi autónoma dependiendo de la aplicación desarrollada.

#### a) Localización:

Consiste en determinar la posición actual de un robot o vehículo, respecto al entorno que lo rodea; para esto, pueden ser utilizadas tres formas de adquirir del ambiente que rodea al vehículo, las coordenadas necesarias para ubicarlo.

- *Odometra*: al medir la distancia que recorre el vehículo hasta un punto definido, es posible determinar su posición inicial y las siguientes. Este método tiene un error acumulado mayor.
- *Observaciones*: se hacen mediante el uso de sensores que extraen información del entorno y la envían al vehículo para estimar mediante algoritmos su posición actual.
- *Mapeo*: se trata de la construcción de un mapa o bitmap posterior a las observaciones hechas por los sensores. Idealmente debería contarse con un mapa del ambiente al que se quiere someter un vehículo, pero no es tan eficiente cuando se quiere trabajar en tiempo real.

#### b) Mapeo:

Debe extraerse del entorno los datos necesarios con los que se pueda obtener una representación entendible para el vehículo y construir finalmente un mapa que servirá como medio para la navegación.

## 2.3 Conceptos de navegación.

---

### c) Planificador de rutas:

Aquí se construye un algoritmo con la capacidad de generar una trayectoria por la que se movilizará un vehículo, sin que se encuentre con obstáculos o superficies riesgosas; todo con base en información recopilada por sensores. Para lograr esto, se debe tener claro el concepto de trayectoria el cual consta de una secuencia de posiciones (o puntos intermedios) que unen el inicio del movimiento con el fin.

### d) Seguimiento de rutas:

Finalmente, es necesario establecer los mecanismos por los cuales el vehículo va a recorrer la ruta establecida, es decir, la manera como se enviarán las señales a los motores y el control físico de la silla de ruedas, así como también el gasto de energía de la batería. En este punto de la navegación los parámetros más relevantes son las velocidades en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  conocidas como  $v_x, v_y, v_\theta$ , o también llamadas como velocidad traslacional, lateral y de rotación.

El prototipo desarrollado llega, por el momento, a la etapa de la navegación, la cual consta únicamente de la localización de la silla de ruedas; es decir, mediante el sistema de adquisición de datos compuesto por los sensores ultrasónicos, el acelerómetro y giroscopio se determina la posición del prototipo en determinado entorno, haciendo un mapeo de la zona para identificar los posibles obstáculos que se presentan en el recorrido de la silla de ruedas.

El sistema contará con los medios para la detección de obstáculos y trayectorias y quedará listo para la implementación o validación de algoritmos de inteligencia artificial. La implementación de la diadema Emotiv EPOC permite que el pilotaje de la silla de ruedas, a la que se le acople la instrumentación diseñada, pueda darse de manera semiautónoma gracias a los algoritmos con los que cuenta la librería EDK para el control de la misma. Para lograr esto es necesario tener en cuenta algunos conceptos sobre señales cerebrales y electroencefalogramas.

### 2.4. Medición de señales cerebrales.

El cerebro es el órgano que gobierna todos los movimientos y acciones que realiza el cuerpo humano, de forma coordinada y eficiente; por eso, para el desarrollo de dispositivos de asistencia para personas que poseen alguna limitación física se hace necesario caracterizar y estudiar los procesos que el cerebro realiza y buscar estrategias de integración de los procesos naturales del cuerpo humano con los dispositivos artificiales. El cerebro utiliza diferentes secciones para realizar tareas específicas, por ejemplo, el lóbulo prefrontal (parte delantera) controla algunas funciones motoras especiales como el movimiento de los ojos; también el occipital en la parte trasera de la cabeza controla la visual donde se proyectan las imágenes extraídas del mundo exterior. La forma de visualizar las señales del cerebro y sus propiedades es el uso de los encefalogramas (EEG); existen varias formas de extraer las señales del cerebro mediante los procedimientos [1]:

- Sobre el cuero cabelludo.
- En la base del cráneo.
- En cerebro expuesto.
- En localizaciones cerebrales profundas.

Es de especial interés, para el desarrollo del prototipo que se propone, los procedimientos concernientes al uso de electrodos para extraer los encefalogramas sobre el cuero cabelludo y en la base del cráneo. Las señales del cerebro se clasifican según su frecuencia y amplitud en cuatro principales grupos, Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** *Tipos de señales del cerebro*

Tipo de señal	Frecuencia [Hz]	Amplitud [ $\mu$ V]
Alpha	8-13	20-200
Beta	13-30	5-10
Delta	1-5	20-200
Theta	4-8	10

Estas señales en su mayoría tienen las formas que se muestran en la Figura 2.15 y son tomadas de mediante electrodos posicionados cuidadosamente en la cabeza.



## 2.4 Medición de señales cerebrales.

---

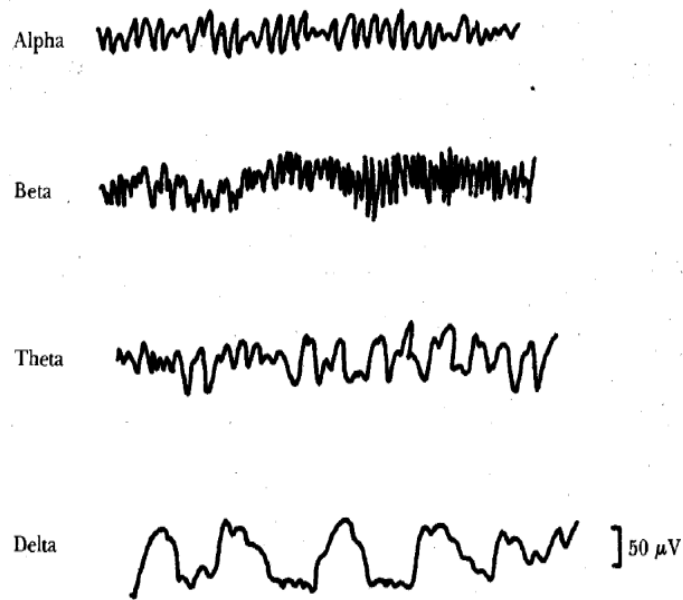


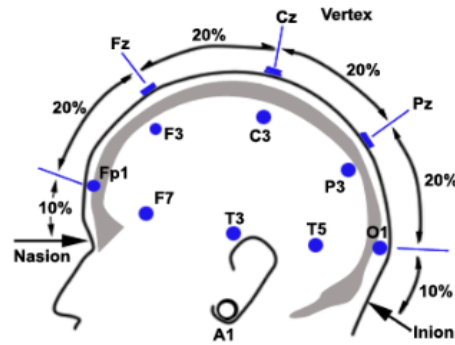
Figura 2.15. Señales comunes en encefalogramas

### 2.4.1. Posicionamiento de los electrodos en la cabeza

De los muchos métodos que existen para el posicionamiento de los electrodos en la cabeza, el más usado es el sistema internacional 10-20 el cual la diadema Emotiv Epoc utiliza. Se debe medir la distancia entre el Nasion (punto de unión entre los huesos frontales del cráneo y los nasales), pasando por el Vertex (coronilla del cráneo) hasta finalmente parar en el Inion (parte más prominente del hueso occipital del cráneo). En el 10 % de esta distancia sobre el Nasion se marca el punto Fp (frontal polar) y en el 10 % sobre el Inion se encuentra el punto O (Ocipital). Luego sobre esa misma línea se sube 20 % de la distancia para encontrar el punto Fz (Frontal), 20 % más se tiene el punto Cz (central o vertex) y si se baja 20 % más se halla el punto Pz (Parietal). Lo anterior se ilustra en la Figura 2.16.

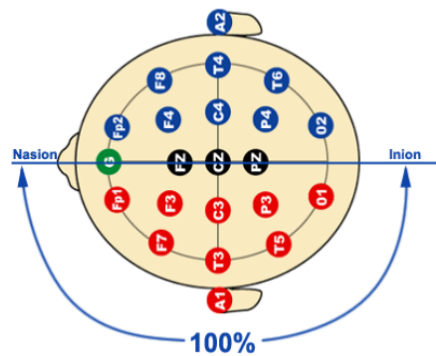
## 2.4 Medición de señales cerebrales.

---



**Figura 2.16.** Posición de los electrodos en la cabeza (vista de perfil)

Para determinar la posición de los demás electrodos en la cabeza se utiliza un criterio similar, midiendo la distancia desde el punto preauricular derecho (justo frente de la oreja) donde está el punto T3 y el preauricular izquierdo (en el punto T4) y desde el vertex bajando 20 % de esa distancia hacia ambos lados se encuentran C3 y C4; los electrodos frontales F3 y F4 se ubican paralelamente al electrodos Fz; de igual forma los electrodos P3 y P4 se ubican paralelos al punto Pz. Finalmente, se ubican los electrodos FP1, FP2, O1 y O2 a 10 % de la distancia hacia los lados del punto Nasion y Inion respectivamente, de igual forma desde los puntos preauriculares se agrega 10 % de la distancia hacia adelante y atrás para posicionar los electrodos F7 y T5 para el lado izquierdo y F8 y T6 para el derecho. En la Figura 2.17 se ilustra la distribución de los electrodos en la cabeza.



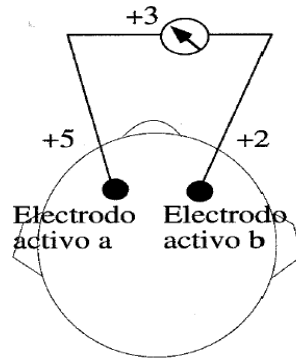
**Figura 2.17.** Posición de los electrodos en la cabeza, vista superior.

## 2.4 Medición de señales cerebrales.

---

### 2.4.2. Adquisición de las señales.

Existen diferentes formas de adquirir las señales del cerebro como los montajes transversales, los montajes longitudinales, de cortas y largas distancias. Pero existen dos tipos de montaje principales, y que son los más utilizados, que son los montajes unipolares y los bipolares. Los montajes bipolares [1] miden el potencial existente entre dos electrodos contiguos (Figura 2.18 [1]), llamados electrodos activos; con este método se pueden obtener tantas mediciones como combinaciones entre parejas de electrodos.

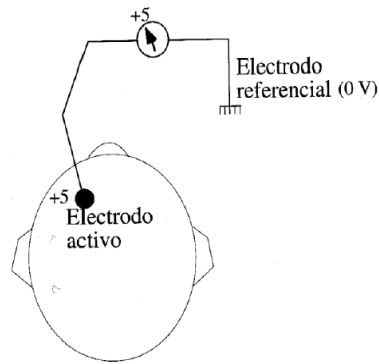


**Figura 2.18.** *Montaje Bipolar de electrodos.*

La configuración de electrodos más común, por su facilidad de conexión y economía, es el montaje monopolar; en este se establece un punto de referencia para todos los electrodos que normalmente se ubica justo debajo del lóbulo de la oreja, este punto de referencia tiene un potencial cercano al 0 V, lo que hace que la señal que llega a cada uno de los electrodos sea la total.

## 2.4 Medición de señales cerebrales.

---

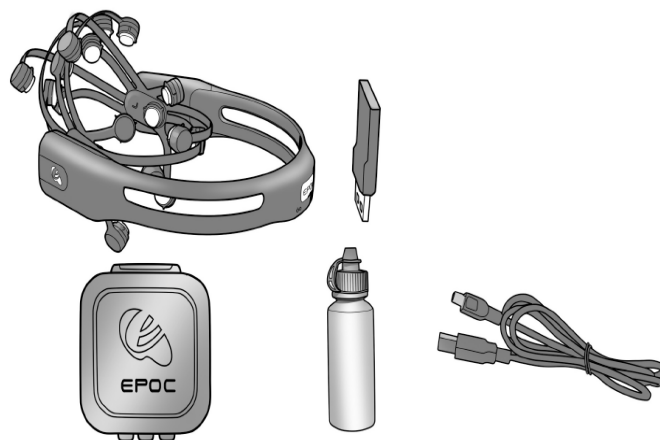


**Figura 2.19.** *Montaje Monopolar de electrodos.*

Esta última configuración es importante para la aplicación desarrollada, ya que la diadema Emotiv Epoc cuenta con 14 sensores monopoles cuya referencia está situada detrás de la oreja en la parte baja.

### 2.4.3. Diadema Emotiv Epoc.

La diadema utilizada para el desarrollo del prototipo es la Emotiv Epoc V1.1 (Figura 2.20) la cual cuenta con un software suministrado por el fabricante a modo de interfaz gráfica con la que se puede acceder a todas las funciones del producto [15].



**Figura 2.20.** *Diadema Emotiv v 1.1.*

## 2.4 Medición de señales cerebrales.

---

La diadema está hecha para trabajar bajo el sistema operativo de Windows, pero existen librerías gratuitas que permiten su uso en otras plataformas como Mac, Linux o Android; las especificaciones técnicas se describen a continuación:

Tiene 14 canales para la medición de señales EGG: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4. Las referencias de los electrodos se establecen en los puntos P3 y P4 y están conectados de modo común CMS/DRL para la cancelación de ruido.

Contiene conversores simples analógico/digital ADC (por sus siglas en inglés) de 16 bits de resolución, pudiendo medir una tensión mínima de  $0.51 \mu V$ . tiene implementados filtros para eliminar los ruidos de la red de 50 Hz y 60 Hz y un filtro digital *sinc* de quinto orden. El dispositivo envía los datos de forma inalámbrica mediante el protocolo *BluetoothSmart* (de banda 2.4 GHz) hacia un receptor que se conecta mediante USB a cualquier computadora.

Cuenta con una batería de litio de 640 mAh, que alcanza para mantener en funcionamiento la diadema por 12 horas usando la comunicación inalámbrica prioritaria y 6 horas usando *BluetoothSmart*.

Para el desarrollo del prototipo es necesario el uso de los sistemas operativos de Windows y Linux, los cuales deben tener los siguientes requerimientos mínimos para que la diadema funcione correctamente:

### a) Requerimientos para sistemas Windows:

- Procesador: Intel Pentium G o similar.
- Microsoft Windows 7, 8 o 10.
- Memoria RAM 2GB.
- Memoria ROM 200MB
- Puertos USB 2.0

## 2.4 Medición de señales cerebrales.

---

### b) Requerimientos para sistemas Linux:

- Ubuntu versión 16.04 o superior, Fedora 20, Rasbian Jessie.
- Microsoft Windows 7, 8 o 10.
- Memoria RAM 2GB.
- Memoria ROM 200MB
- Puertos USB 2.0

Para usar la diadema se deben hidratar muy bien [16], todos y cada uno de los electrodos que están compuestos por un contacto eléctrico y una espuma absorbente, debe hacerse con una solución salina que favorece a la transmisión de las señales del cuero cabelludo a los electrodos de la diadema.

## Capítulo 3

# Diseño del sistema de adquisición de datos

### 3.1. Introducción

Para el desarrollo de una aplicación de navegación autónoma o semi-autónoma para cualquier tipo de vehículo es fundamental la implementación de la instrumentación necesaria para mapear o caracterizar el entorno que rodea al prototipo. El sistema de adquisición de datos es el encargado de tomar del ambiente, al que estará sometido el prototipo, los datos necesarios para su operación, el cual está compuesto por 16 sensores ultrasónicos y una unidad IMU para la medición de ángulos de inclinación.

### 3.2. Módulo MPU6050

Es una unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés *-Inertial Measurement Units-*), contiene un giroscopio de tres ejes y acelerómetro de tres ejes, para un total de seis grados de libertad (6DOF -6 *Degrees Of Freedom*). Este módulo de sensores está basado

## 3.2 Módulo MPU6050

---

en la tecnología MEMS (*Micro Electro Mechanical System*); puede ser controlado mediante los protocolos de comunicación serial SPI (*Serial Peripheral Interface*) y/o I2C (*Inter Integrated Circuit*).

El modulo utilizado en esta aplicación debe ser alimentado a 3,3 v (aunque algunos tienen reguladores que posibilitan su uso a 5 V) y se manipula mediante comunicación serial I2C; las especificaciones eléctricas y los rangos de trabajo del módulo empleado en la aplicación se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Rangos de operación del MPU6050

Escalas Giroscopio	Sensibilidad Giroscopio	Escalas Acelerómetro	Sensibilidad Acelerómetro
±250	131	±2	16384
±500	65.5	±4	8192
±1000	32.8	±8	4096
±2000	16.4	±16	2048

### 3.2.1. Comunicación I2C (*Inter Integrated Circuit*)

La comunicación entre el microcontrolador de la *Stellaris LUNCHPAD* (maestro) y el sensor MPU6050 (esclavo) se realiza mediante el protocolo I2C, el cual requiere del establecimiento de dos líneas para el paso de información; el SCL (*System Clock*) el cual lleva el reloj del maestro para dar paso a la comunicación y el SDA (*System Data*) el cual se encarga de enviar y recibir los datos.

Para el uso del módulo MPU6050, primero debe haber una secuencia de reseteo (accediendo a los registros asignados para esta tarea), luego se tienen que leer los registros correspondientes a los sensores, teniendo en cuenta que a cada eje le corresponden dos registros de 8 bit tanto para el acelerómetro como para el giroscopio, debido a que cada medición se realiza con 16 bits. En la tabla 3.2 se muestran las direcciones de los registros necesarios.

Adicionalmente, el módulo cuenta con un sensor que obtiene la temperatura del ambiente



## 3.2 Módulo MPU6050

---

**Tabla 3.2.** *Registros del módulo MPU6050.*

Dirección (Hex)	Función	Dirección (Hex)	Función
68	Resetea el sensor acelerómetro, giroscopio y el sensor de temperatura	41	Sensor temperatura, bits más significativos
6B	Resetea el dispositivo y controla el modo durmiente del módulo	42	Sensor temperatura, bits menos significativos
3B	Acelerómetro eje X, bits más significativos	43	Giroscopio eje X, bits más significativos
3C	Acelerómetro eje X, bits menos significativos	44	Giroscopio eje X, bits menos significativos
3D	Acelerómetro eje Y, bits más significativos	45	Giroscopio eje Y, bits más significativos
3E	Acelerómetro eje Y, bits menos significativos	46	Giroscopio eje Y, bits menos significativos
3F	Acelerómetro eje Z, bits más significativos	47	Giroscopio eje Z, bits más significativos
40	Acelerómetro eje Z, bits menos significativos	48	Giroscopio eje Z, bits menos significativos

también en 16 bits y le corresponden los registros 41 y 42, como se muestra en la anterior tabla.

### 3.2.2. Acelerometro

El acelerómetro embebido en el MPU6050 utiliza los principios del efecto piezoeléctrico; específicamente el producido por la unión de cristales piezoeléctricos (como el cuarzo) y una masa, haciendo que al haber movimiento la masa se acerque al cristal en la dirección del movimiento, apretándolo (como se muestra en la Figura 3.1) y generando al mismo tiempo pequeños tensiones eléctricas que determinan la aceleración producida con el movimiento en ese determinado instante de tiempo.

### 3.2 Módulo MPU6050

---

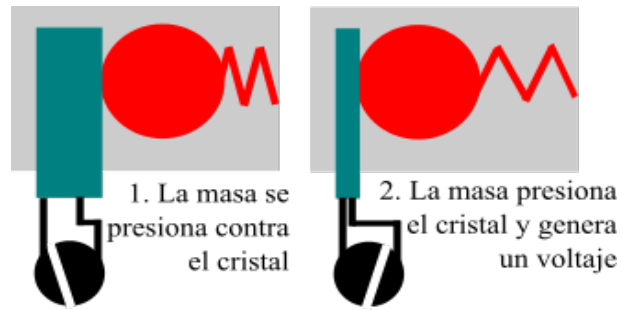


Figura 3.1. Acelerómetro piezoeléctrico.

Para el caso en que se tienen tres ejes, la masa está contenida en una caja cubica cuyas paredes están hechas de cristal piezoeléctrico y la masa choca con cada una de ellas dependiendo de la dirección del movimiento. En la Figura 3.2 se ilustra de mejor forma esta estructura.

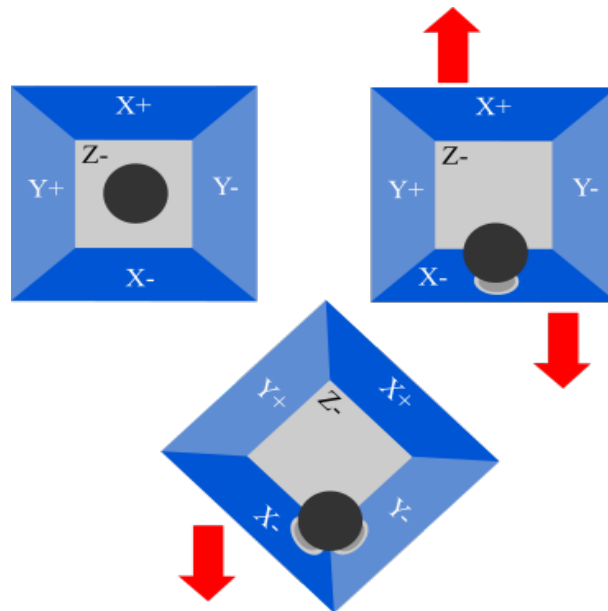
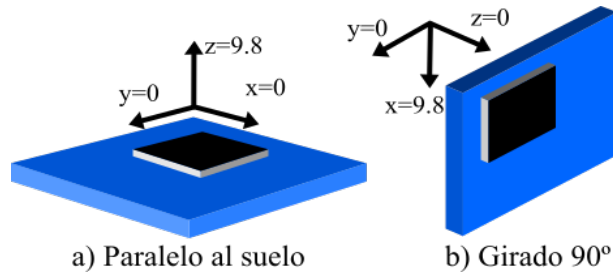


Figura 3.2. Composición interna del acelerómetro.

De esta forma cuando la masa golpee (o apriete) una pared del cubo el máximo valor que se obtendrá será la aceleración producida por la gravedad de la tierra ( $9.8m/s^2$ ). La Figura 3.3 muestra dos ejemplos en los que el sensor se posiciona de forma vertical y de forma horizontal para ver la medición de aceleración que habría en cada eje.

### 3.2 Módulo MPU6050

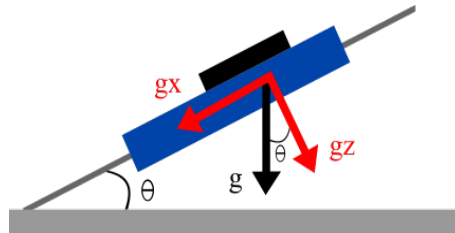
---



**Figura 3.3.** Posición de referencia del sensor.

Para obtener los valores de aceleración de cada eje es necesario operar el valor entregado por el sensor por un factor correspondiente a la escala de trabajo, el cual es  $1/8192$ , obteniendo resultados en función de la aceleración de la gravedad.

De la medición de la aceleración en los tres ejes se infiere que la única fuerza que actúa sobre el módulo es la gravedad, por lo tanto, cada eje representa una porción de esta aceleración cuya suma vectorial dará como resultado la aceleración de la gravedad; es decir, que al inclinar el sensor el ángulo producido entre la horizontal y el módulo será el correspondiente al ángulo entre el vector resultante de la gravedad y una de sus componentes, como se ilustra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Suma vectorial de la aceleración de la gravedad.

De esta forma, si el módulo del sensor se posiciona horizontalmente de manera que el eje Z corresponda a la resultante de la suma vectorial ( $9.8m/s^2$ ), es posible obtener los ángulos de inclinación del módulo en los otros dos ejes mediante el empleo de la tangente:

$$\theta_x = \arctan \left( \frac{g_x}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}} \right), \quad (3.1)$$

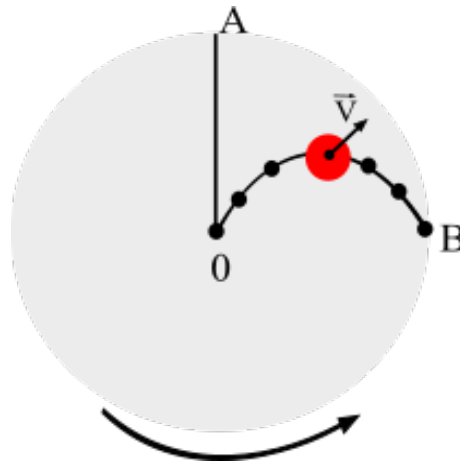
$$\theta_y = \arctan \left( \frac{g_y}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}} \right) \quad (3.2)$$

### 3.2.3. Giroscopio

Los giroscopios utilizan como principio de funcionamiento el efecto Coriolis, el cual se puede explicar básicamente como una esfera pequeña que se mueve sin fricción sobre un disco que está girando a velocidad constante, la gravedad tira de la esfera hacia el centro del disco; gracias a la conservación del momento angular, la velocidad de la esfera cambia cuando se dirige al centro (acelera) y hacia el borde del disco (frena), esto quiere decir, que para conservar la velocidad lineal la esfera debe cambiar su velocidad angular haciendo variar la distancia que existe entre la esfera y el eje de rotación del disco (ver Figura 3.5).

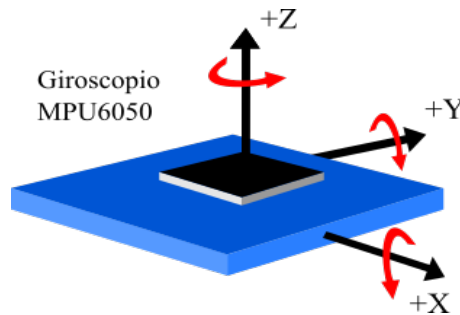
### 3.2 Módulo MPU6050

---



**Figura 3.5.** *Efecto Coriolis.*

El giroscopio integrado dentro del MPU6050 funciona mediante la detección del cambio de ángulo de rotación en los tres ejes respecto al tiempo; es decir, estos sensores miden la velocidad angular (dada en  $^{\circ}/s$  o revoluciones por segundo -RPS-) que aparece cuando hay movimiento en torno a un eje (ver Figura 3.5).



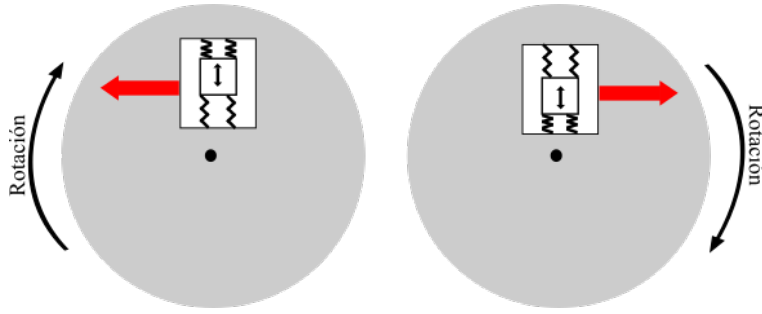
**Figura 3.6.** *Giroscopio de tres ejes.*

Estos dispositivos utilizan la velocidad angular (o de rotación) para calcular la rotación de un objeto cuando sale de su posición de equilibrio; estos módulos necesitan solo unos pocos grados de cambio en cada eje para hacer una detección.

El giroscopio embebido en el módulo MPU6050 consiste en un sensor MEMS muy pequeño (entre  $1\ \mu m$  y  $100\ \mu m$ ) y cuando se hace girar, una diminuta masa de resonancia (ver Figura 3.6) se pone en movimiento respondiendo a los cambios de la velocidad angular generando señales eléctricas que pueden ser leídas por un micro controlador.

### 3.2 Módulo MPU6050

---



**Figura 3.7.** Estructura del giroscopio MEMS.

Conociendo la posición inicial del módulo es posible calcular el cambio del ángulo, al girarlo en cualquiera de sus ejes, sumándole el valor medido por el giroscopio en un determinado instante de tiempo según la relación mostrada en la ecuación 3.3:

$$\theta_{x,i} = \theta_{x,0} + G_{x,i} * \Delta_t, \quad (3.3)$$

$$\theta_{y,i} = \theta_{y,0} + G_{y,i} * \Delta_t \quad (3.4)$$

donde:

$\Delta_t$ : tiempo que transcurre al calcular la ecuación 3.3 y 3.4.

$\theta_{x,i}, \theta_{y,i}$  : ángulo calculado (nueva posición eje x e y respectivamente)

$\theta_{x,0}, \theta_{y,0}$ : ángulo inicial (eje x e y respectivamente)

$G_{x,i}, G_{y,i}$ : lectura del giroscopio (eje x e y respectivamente)

Se debe tener en cuenta que los ángulos  $\theta_{x,i}, \theta_{y,i}$  corresponden al cambio de ángulo del eje x e y respectivamente cuando giran sobre sí mismos. En la Figura 3.8 se ilustra el cambio de ángulo para la rotación del eje x:

### 3.3 Memoria SD

---

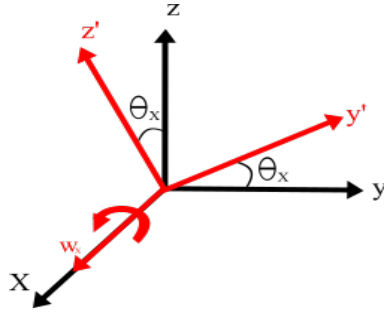


Figura 3.8. Rotación sobre el eje  $x$ .

### 3.3. Memoria SD

Para el manejo de los datos (externo al dispositivo desarrollado) y la creación de la base de datos para su análisis y el entrenamiento del algoritmo es necesario utilizar un módulo micro SD para almacenar los resultados de las diferentes pruebas que se realicen. Normalmente estos módulos funcionan mediante el protocolo de comunicación SPI (*Serial Peripheral Interface Bus*) el cual es un método de comunicación síncrono.

#### 3.3.1. Protocolo de Comunicación SPI

Esta comunicación usa la arquitectura de único maestro para controlar varios esclavos (como se muestra en la Figura 3.9) los cuales son controlados desde un bus de datos compuesto por cuatro líneas de comunicación: un MOSI (*Master Output, Slave Input*) el cual envía las ordenes desde el maestro (microcontrolador) hacia el esclavo (módulo *SD Card*), luego está el MISO (*Master Input, Slave Output*) donde el esclavo conduce su respuesta hasta el maestro; una tercera línea SS (*Slave Selector*) encargada enviar una señal de habilitación cuando existen varios esclavos.

### 3.4 HC SR04

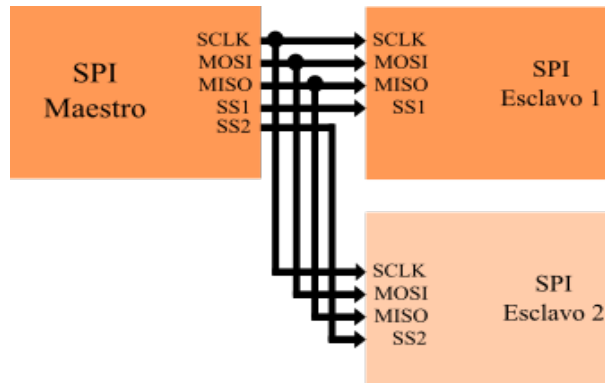


Figura 3.9. Conexión protocolo SPI.

### 3.4. HC SR04

Este sensor es el más barato que se puede encontrar actualmente en el mercado, para la medición de distancia y/o nivel mediante el uso de ondas sónicas. Estos sensores pueden ser controlados mediante comunicación serial (I2C y UART) o a través de interfaz de pulso y eco (como es el caso del sensor HC SR04).

El sensor ultrasónico debe recibir del maestro (microcontrolador) una señal de excitación llamada trigger, o gatillo, el cual debe durar al menos  $10 \mu s$  en alto y  $50 \mu s$  en bajo (ver Figura 3.10); el sensor contiene un circuito integrado que genera un tren de pulsos (*timer*) compuesto por ocho pulsos con frecuencia de 40KHz como señal interna que activa la bocina que transmite la señal ultrasónica.

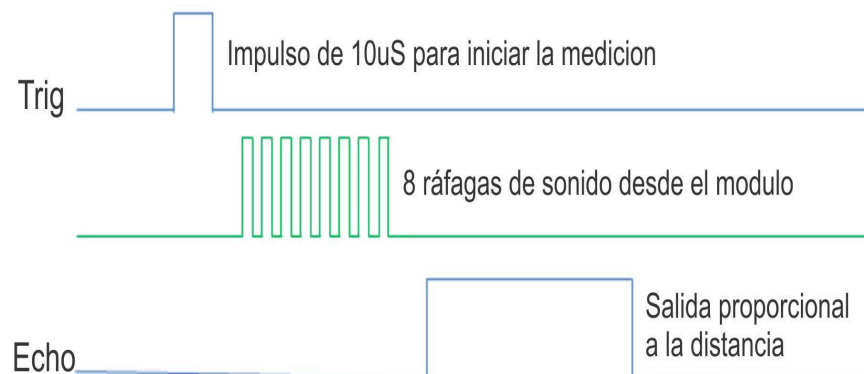


Figura 3.10. Características de tiempo del HC SR04.



### 3.4 HC SR04

---

En el intervalo de tiempo restante, cuando el tren de pulsos interno está completamente en bajo, el sensor espera el rebote de la señal y contabiliza el tiempo, con el número de pulsos, que se demora la señal ultrasónica en salir del transmisor y llegar al receptor del sensor. Cuando las ondas ultrasónicas salen del transmisor del sensor, estas impactan en los objetos y regresan hacia el receptor con un ángulo determinado, dependiendo de la superficie del obstáculo, el tiempo que tardan las ondas en hacer este recorrido determina la distancia recorrida (ver Figura 3.11).

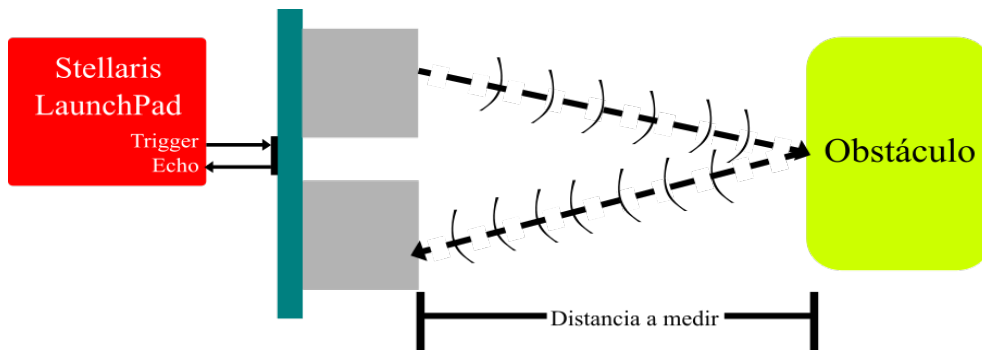


Figura 3.11. Medición de distancia.

Sabiendo que la velocidad del sonido es de  $343,2 \text{ m/s}$  (a condiciones normales, es decir,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura y  $50 \%$  de humedad sobre el nivel del mar) se puede calcular la distancia recorrida por las ondas ultrasónicas, gracias a la ecuación 3.5:

$$v = \frac{\text{Distancia} \left[ \frac{cm}{\mu_s} \right]}{\text{tiempo}} \quad (3.5)$$

Para el prototipo desarrollado es conveniente realizar la medición de distancia en centímetros para poder percibir los pequeños cambios en los datos, por eso es necesario hacer las respectivas conversiones de unidades:

$$V = 343.2 \left[ \frac{m}{s} \right] * 100 \left[ \frac{cm}{m} \right] * \frac{1}{1000000} \left[ \frac{s}{\mu_s} \right] = \frac{1}{29.2} \left[ \frac{cm}{\mu_s} \right] \quad (3.6)$$

### 3.5 Módulo Puente H Dual L298N

Para obtener la distancia que existe desde el sensor hasta un obstáculo se debe dividir la medición en dos, ya que las ondas ultrasónicas hacen este recorrido dos veces: una desde el transmisor hasta el obstáculo y otra desde el obstáculo hasta el receptor del sensor. De esta forma se calcula la distancia como se muestra a continuación:

$$Distancia(cm) = \frac{tiempo(\mu_s)}{29.2 \left[ \frac{cm}{\mu_s} \right] * 2} \quad (3.7)$$

### 3.5. Módulo Puente H Dual L298N

El modulo utiliza el integrado L298N (ver Figura 3.12) que permite el control de dos motores de corriente continua con rangos tensión y corriente de 5 a 16 V y hasta 2 A respectivamente. La lógica de funcionamiento de este circuito integrado es básicamente la misma que la de su antecesor el L293D (más comúnmente utilizado) además el diseño del módulo permite manejar motores paso a paso con más facilidad.

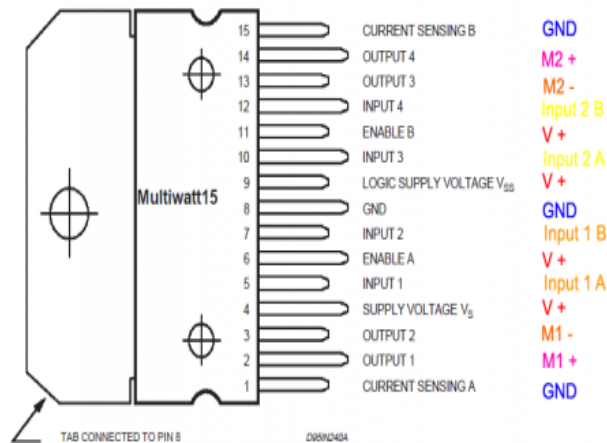


Figura 3.12. Integrado L298N.

### 3.5 Módulo Puente H Dual L298N

El módulo, como la mayoría, está hecho para acoplarse de forma rápida y fácil a cualquier tarjeta de desarrollo basada en microcontroladores, cuenta con diodos de protección de rebotes de corriente para los cambios de dirección en la rotación de los motores, además tiene un regulador con filtros capacitivos (disminuyendo el ruido de la red) para la alimentación del integrado. La Figura 3.13 muestra el circuito que compone el módulo:

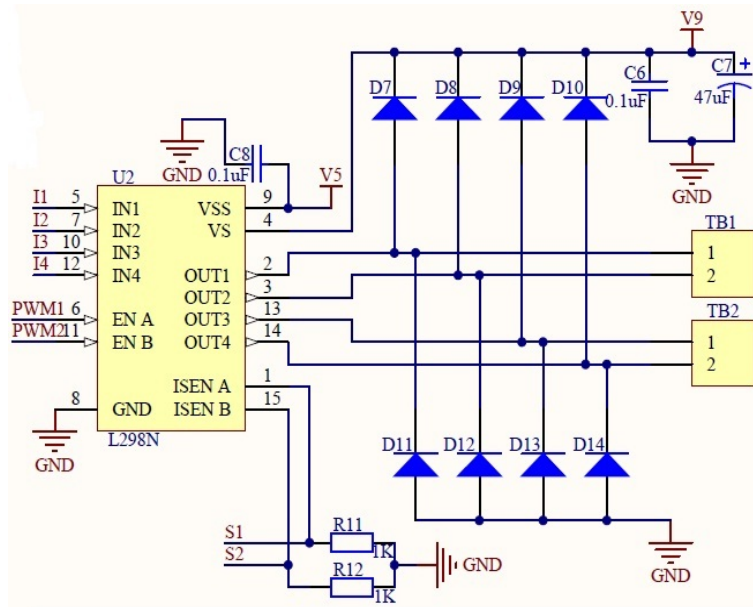


Figura 3.13. Esquemático del módulo L298N.

Finalmente, el módulo queda construido, como se ve en la Figura 3.14, de forma tal que es muy rápido y fácil el acoplamiento con los motores y el microcontrolador que se utilice.

### 3.6 Módulo MUX CD74HC4067

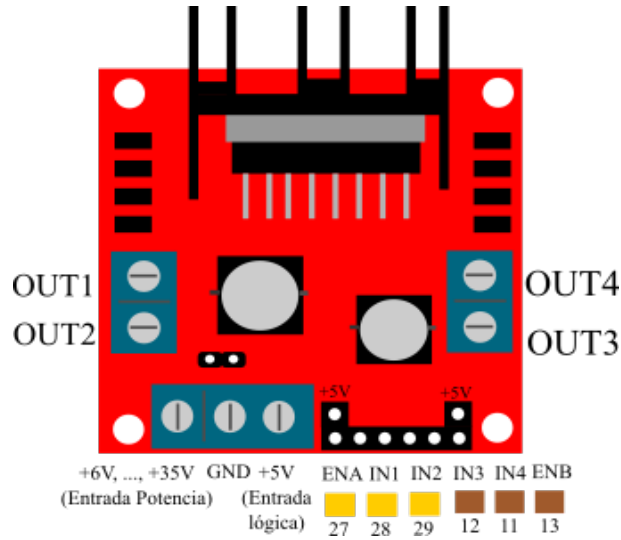


Figura 3.14. Módulo L298N.

Las combinaciones de señales digitales que se deben enviar desde el microcontrolador al módulo y la tarea que desempeñan se muestran en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3. Lógica de funcionamiento L298N

Motor A/Motor B			
ENA/ENB	IN1/IN3	IN2/IN4	Descripción
0	X	X	Deshabilitado
1	0	0	Motor A/B Detenido
1	0	1	Hacia Atrás
1	1	0	Hacia Adelante
1	1	1	Motor A/B Detenido

### 3.6. Módulo MUX CD74HC4067

Este módulo es un Multiplexor/Demultiplexor de 16 canales controlado por un selector digital de cuatro bits. Los interruptores internos usan la tecnología de *Silicon – Gate* (puerta de silicio) CMOS, con bajo consumo de potencia puede operar a gran velocidad (similar a la LSTTL).

Este módulo es bidireccional, es decir, tanto los 16 canales como el común, pueden ser entradas o salidas; esto da pie a la posibilidad de tener una entrada y multiplexarla a 16

### 3.6 Módulo MUX CD74HC4067

---

salidas, así como de tener 16 entradas y (en el caso contrario) multiplexarlas a una salida. El cambio de canal debe hacerse con el uso de un selector que está compuesto por cuatro pines digitales, a ser: S0, S1, S2 y S3, que dependiendo de la combinación de sus estados (alto o bajo) se seleccionará un determinado canal. La secuencia de selección se muestra en la Tabla 3.4 y es la misma tanto para el funcionamiento como multiplexor o demultiplexor.

**Tabla 3.4.** *Tabla de verdad CD74HC4067*

S0	S1	S2	S3	E	Canal
X	X	X	X	1	Ninguno
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	2
1	1	0	0	0	3
0	0	1	0	0	4
1	0	1	0	0	5
0	1	1	0	0	6
1	1	1	0	0	7
0	0	0	1	0	8
1	0	0	1	0	9
0	1	0	1	0	10
1	1	0	1	0	11
0	0	1	1	0	12
1	0	1	1	0	13
0	1	1	1	0	14
1	1	1	1	0	15

El módulo tiene un habilitador etiquetado con la letra E, el cual se activa cuando está en bajo, es decir, cuando recibe un cero lógico. Como se registra en la hoja de datos del integrado CD74HC4067 un cero lógico o bajo se reconoce hasta un máximo de 0.8V y un uno lógico o alto desde un mínimo de 2V. Este multiplexor trabaja con señales unipolares de -0.5V a 7V (la tensión de alimentación Vcc debe estar también en este rango) y la corriente de salida de cada canal  $\pm 25$  mA.

## 3.7. Sistema de adquisición de datos

Se busca que el sistema implementado pueda suministrar, al usuario, información suficiente del entorno que rodea a la silla de ruedas para posibilitar una mejor conducción de la misma y amplificar su capacidad de reacción; para lograr este objetivo es casi obligatorio medir la mayor cantidad de área alrededor del vehículo de asistencia para detectar los posibles obstáculos, planos y/o superficies con inclinaciones, diferenciar todos los peligros potenciales y tomar al final acciones correctivas. Para cumplir con esta meta se dispone de 16 sensores ultrasónicos HC SR04, una unidad MPU6050 que contiene un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio (también de tres ejes).

### 3.7.1. Descripción del sistema

La instrumentación del sistema se compone de cuatro unidades o etapas fundamentales, una estructura de medición de distancia para la detección de obstáculos, una etapa de medición de inclinación de la silla de ruedas, un tercer bloque compuesto por la combinación de las dos etapas anteriores y finalmente una fase de almacenamiento y transmisión de la información obtenida de las tres etapas anteriores.

#### **Etapa 1: Detección de obstáculos**

Para detectar obstáculos que estén ubicados alrededor de la silla de ruedas, se tienen 16 sensores colocados en grupos de cuatro en cada esquina del vehículo; La distancia y ángulos existentes entre sensores deben ser ajustados dependiendo de las dimensiones de las ruedas de la silla, así como de los resultados empíricos para encontrar el mejor punto de intersección entre las zonas de transmisión y recepción de las ondas ultrasónicas.

En la Figura 3.15 se muestra de forma general la distribución de los sensores sobre la silla de ruedas, así como las etiquetas que lleva cada sensor para facilitar su reconocimiento.

### 3.7 Sistema de adquisición de datos

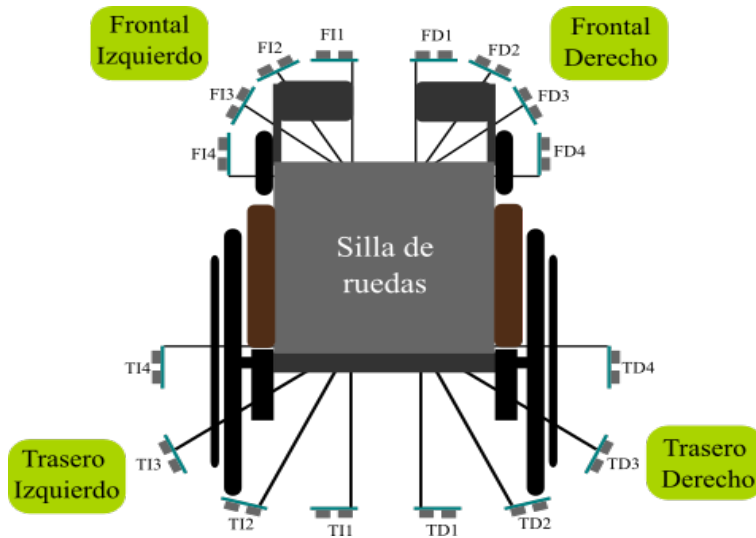


Figura 3.15. Disposición de los sensores ultrasónicos en la silla de ruedas.

#### Etapa 2: Medición de Inclinación

La medición de inclinación de la silla de ruedas es vital, principalmente para determinar cuándo la silla se moviliza por un terreno con inclinaciones y poder aplicar los respectivos cambios a los motores o la dirección del movimiento. Para este propósito pone en funcionamiento el sensor MPU6050 del cual se utilizan dos de sus tres ejes de medición para determinar la posición de la silla respecto a la horizontal (como se muestra en la Figura 3.16).

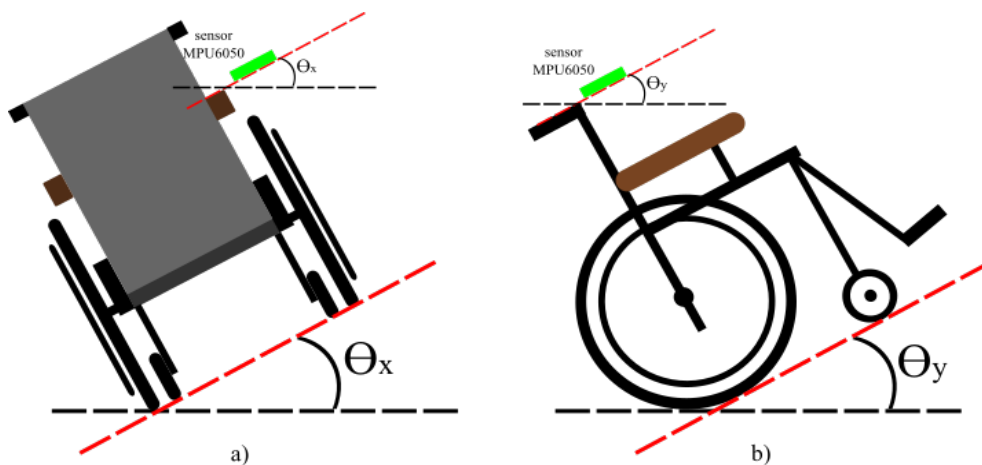


Figura 3.16. Medición de inclinación de la silla de ruedas con el sensor MPU6050; a) Inclinación en el eje x; b) Inclinación en el eje y.

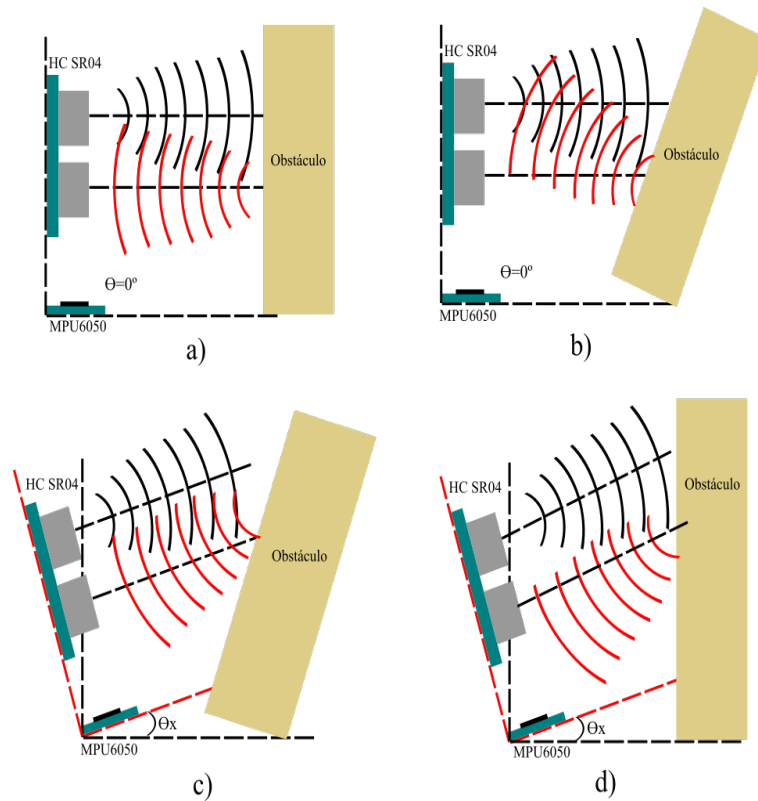
### 3.7 Sistema de adquisición de datos

---

El sensor se ubica en un lugar específico de la silla, cuidando que esté completamente nivelado con respecto al plano horizontal; así cuando la silla se enfrenta a una inclinación el sensor también girará de forma directamente proporcional y el ángulo medido por él corresponderá al de la silla en ese momento.

#### **Etapa 3: Correlación de medición de distancia y ángulos de inclinación**

La combinación de las mediciones, de distancia de la silla a los obstáculos y ángulos de inclinación, brinda varias ventajas al momento de identificar el tipo de obstáculos y superficies a los que se enfrenta la silla de ruedas en un determinado movimiento.



**Figura 3.17.** Posibles casos de medición. a) y b) casos para una superficie plana; c) y d) casos para superficie con inclinación.



### 3.7 Sistema de adquisición de datos

---

Como se ejemplifica en la Figura 3.17, el gráfico a) muestra como sería el recorrido de las ondas ultrasónicas emitidas por el sensor HC SR04 cuando el prototipo se movilice por una superficie sin inclinaciones (como registraría el sensor MPU6050); para el caso del gráfico b) cuando la superficie por donde pasa el prototipo no tiene inclinaciones, pero el obstáculo sí, las ondas se reflejarán hacia el sensor ultrasónico de forma diferente y deberá existir algún factor de corrección. En los gráficos c) y d) se muestran los dos casos anteriores, pero cuando el terreno por donde se moviliza la silla de ruedas tiene algún tipo de desnivel o inclinación.

La unión o intersección de las mediciones de distancia y ángulos permite identificar de mejor forma cuando la silla circula en terrenos intrincados o cuando los obstáculos tienen formas irregulares de las que pueden resultar datos confusos para el sistema de medición. Así, es posible obtener una mejor clasificación de los datos obtenidos, así como la diferenciación entre de los obstáculos y terrenos a los que se enfrente el prototipo.

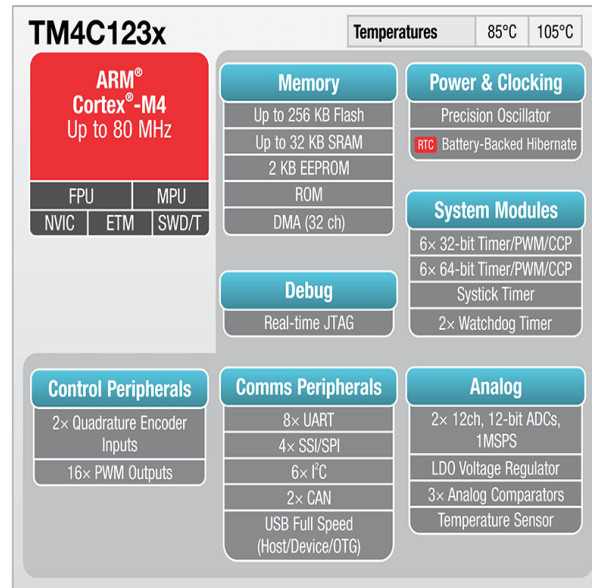
#### **Etapa 4: Almacenamiento y transmisión de datos**

La última etapa de la instrumentación es la recolección de datos, sumamente importante para el entrenamiento y aprendizaje de los algoritmos que ayudarán al pilotaje de la silla de ruedas. El almacenamiento de la información se hace enviándola a través del protocolo SPI a una memoria micro SD donde estarán disponibles para su posterior análisis a modo de base de datos.

Finalmente, los datos deben ser transmitidos desde el microcontrolador hasta la unidad de procesamiento, la Raspberry Pi 3, donde está contenido el algoritmo que los analizará y retornará al microcontrolador las respectivas acciones correctivas al pilotaje de la silla de ruedas.

## 3.8. Diseño del sistema

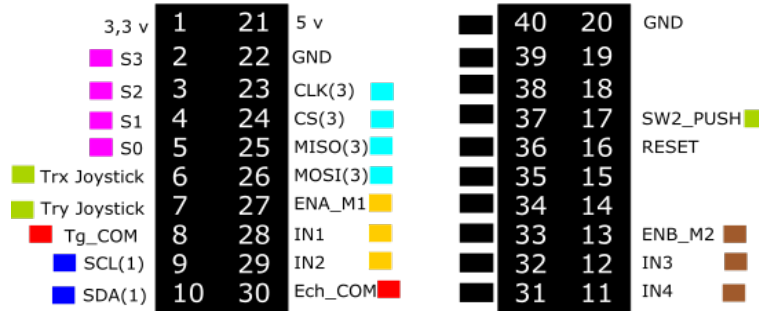
Para el monitoreo de los sensores y control los multiplexores, la memoria micro SD, el módulo puente, el *joystick* y demás periféricos que se necesiten, se emplea la tarjeta de desarrollo *Stellaris Launchpad* de *Texas Instruments*, la cual puede ser programada con el software libre y de código abierto Energia IDE. La tarjeta tiene embebido el microcontrolador LM4F123G, contando con 40 pines de propósito general, con procesador ARM Cortex M4 de velocidad de reloj de 80 MHz y 32 bits y cuyas características principales se muestran en la Figura 18.



**Figura 3.18.** Características Stellaris Launchpad TM4C123X

El manejo del sensor MPU6050 (Acelerómetro-Giroscopio) se hace por medio del bloque I2C, específicamente el módulo uno, así mismo, el módulo tres del bloque SPI para la comunicación con la tarjeta micro SD, además de los conversores analógicos a digital (ADC) de 12 bits para medir la variación de impedancia de los potenciómetros del *Joystick*; y finalmente, para el control del módulo L298N, el selector para el multiplexor, el demultiplexor y la señal de *echo* y *trigger* para los ultrasónicos se emplearon varios pines digitales del microcontrolador, como se muestra en la Figura 19.

## Stellaris Launchpad LM4F123GH6PM



**Figura 3.19.** Empleo de pines de la tarjeta de desarrollo Stellaris Launchpad.

Se utiliza el pin número 8 como único *trigger*, el cual se conecta a la entrada común del multiplexor y espera a que el selector, compuesto por las cuatro entradas S0, S1, S2 y S3, reciba las señales correspondientes de los pines 2, 3, 4 y 5 respectivamente; al mismo tiempo las señales de selección llegan al demultiplexor que recibe las señales de echo de los sensores ultrasónicos y las lleva al microcontrolador a través de un pin común (pin 30) para su análisis, almacenamiento y transmisión a la tarjeta Raspberry Pi 3.

Adicionalmente, se dejan libres los pines del 31 al 40 (marcados con el color negro en la Figura 19) para añadir más funciones y/o módulos que ayuden a mejorar el prototipo desarrollado; además se debe tener especial cuidado al utilizar los protocolos SPI e I2C en una misma aplicación debido a que se pueden presentar interferencias en ciertos módulos de la tarjeta de desarrollo, por ejemplo: el módulo tres del bloque SPI utiliza los pines 23, 24, 25 y 26, al mismo tiempo que el módulo tres del bloque I2C usa el 23 y 24 para su interfaz, pero también, se puede acceder al módulo tres del protocolo I2C por los pines 15 y 14 de la tarjeta *Stellaris Launchpad*, esto significa que al utilizarse el módulo tres del bloque SPI los pines 14 y 15 no pueden ocuparse en ninguna actividad. Estas consideraciones deben tenerse en cuenta debido a la arquitectura de la misma tarjeta de desarrollo.

El sistema queda constituido entonces, con todos sus periféricos, como se expone en la Figura 20, donde se muestra el esquema de conexiones eléctricas del sistema de adquisición de datos.

### 3.8 Diseño del sistema

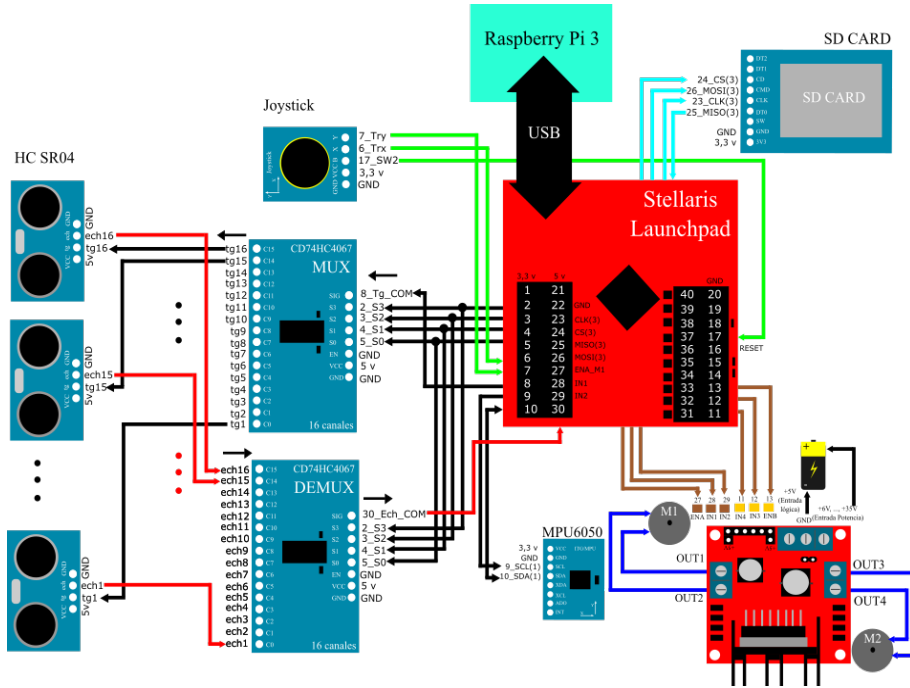


Figura 3.20. Esquema eléctrico de conexión del sistema.

Para la interconexión de todos los módulos y periféricos del sistema de adquisición de datos, es necesario el diseño de un circuito impreso (PCB del inglés *Print Circuit Board*) que cumpla con esta función.

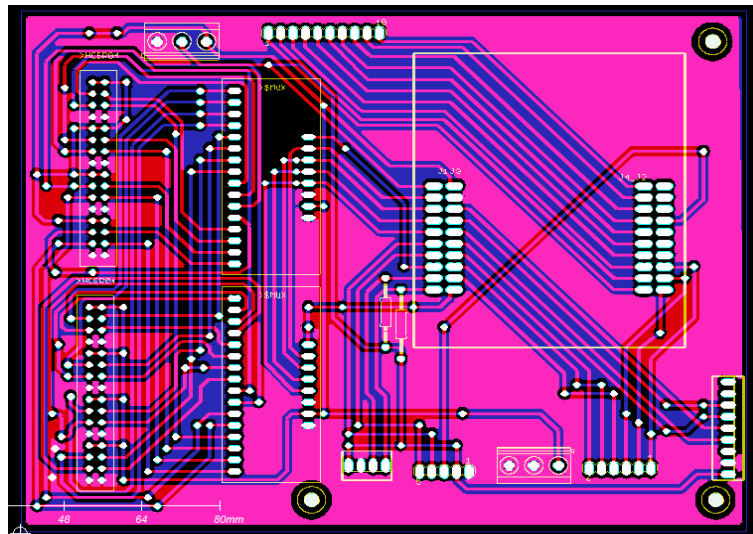


Figura 3.21. Layout PCB sistema de adquisición de datos.

### 3.8 Diseño del sistema

---

Para la reducción de ruido electrónico se agregó el apantallamiento de tierra para que los posibles arcos de corriente que se puedan generar se disipen en ese plano.

## Capítulo 4

# Software del sistema

### 4.1. Introducción

El prototipo está compuesto por dos grandes sistemas, el sistema en *Hardware* el cual comprende todas las etapas físicas del proyecto, es decir, la interconexión de módulos de los sensores y las tarjetas de desarrollo; y el sistema de *software* que contiene toda la lógica de programación y funcionamiento de todo el dispositivo. En esta sección se hace una descripción detallada del segundo sistema, el de *software*.

### 4.2. Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

La empresa de diseño y construcción de elementos electrónicos Texas Instruments, ofrece una vasta variedad de tarjetas de desarrollo con micro controladores embebidos que sirven para diferentes aplicaciones, en el caso del prototipo desarrollado se utiliza la versión Tiva C TM4C123G. Cuyas principales características se muestran en la Fig 3.18.

Existen muchos motivos por los cuales se prefirió el uso de esta tarjeta respecto a otras similares en el mercado del mismo u otros fabricantes, las cuales se exponen a continuación.

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

---

### a) Costo:

El kit de desarrollo TM4C123G tiene un valor de 12,99 \$USD, aproximadamente 231,19 MXN\$; siendo la tarjeta de desarrollo más barata del mercado, teniendo en cuenta las características técnicas que posee, comparada con dispositivos similares de otros fabricantes.

### b) Puertos de propósito general:

Una de las ventajas más notables del diseño de este kit es que tiene 40 pines de propósito general repartidos en dos puertos paralelos, facilitando de muchas formas el uso de la tarjeta en muchas aplicaciones diferentes, haciendo de esta la más idónea para el proyecto desarrollado.

### c) Programación:

El fabricante del kit, Texas Instruments (TI), tiene un software especializado para el control y programación de todos sus dispositivos llamado Code Composer Studio IDE (CCS) el cual puede descargarse desde su página web: [www.ti.com](http://www.ti.com).

El uso de microcontroladores, para el control de dispositivos como el desarrollado en este proyecto, ofrece grandes ventajas respecto a la forma de programación, ya que, actualmente existen muchas plataformas para cumplir con este propósito y la elección de cual usar depende en gran medida de la complejidad de la aplicación. A continuación, se enlistan las principales plataformas que se pueden usar con el kit de desarrollo TM4c123G:

- KEIL Tools: Herramienta creada para el control de micro procesadores de arquitectura ARM, maneja los lenguajes de programación C y C++, manejo de registros, depuradores de código, Kernels de emulación en tiempo real.
- IAR Embedded Systems: Compilador de C y C++ para arquitecturas ARM, versión de prueba gratuita, algunas librerías y funciones son de paga.

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

---

- Sourcery CodeBench: Software para arquitecturas multi-núcleo heterogéneas como la ARM, debe pagarse licencia para acceder a todas las funciones, contiene librerías para trabajar en sistemas basados en Linux.
- GNU Compiler Collection (GCC): Compilador para controladores de arquitecturas ARM, maneja los lenguajes C, C++, Objective-C, Fortran, Ada y Go. Es 100 % software libre.
- Energia IDE: Software libre y de código abierto, creado por los desarrolladores de la aplicación Arduino IDE, basado en el lenguaje de processing, usando llamados a librerías.

### 4.2.1. Software y Librerías

El software elegido para la programación es Energia IDE, debido a que no requiere licencia y por ser *opensource* (o de fuente abierta) permite modificar sus librerías de forma fácil y rápida. Se deben utilizar varias librerías especiales para el control de algunos periféricos del sistema de adquisición de datos.

En primer lugar, se deben guardar los datos en una memoria micro SD, para dejar registradas todas las pruebas que se realicen creando una base de datos que facilite su análisis; para esto, se emplea la librería *SD.h* la cual fue elaborada, originalmente, para la plataforma de Arduino IDE pero adaptada para las diferentes tarjetas de desarrollo de *Texas Instruments*.

Esta librería utiliza el protocolo de comunicación SPI de la tarjeta de desarrollo, o sea que, hace un llamado a la librería que controla estos bloques, los cuales pueden activarse o desactivarse modificando los archivos de la librería dependiendo de las necesidades de la aplicación. Por el diseño de estas tarjetas los bloques de periféricos (que son dos) comparten protocolos de comunicación o sirven para trabajar señales analógicas o digitales y se puede acceder a estos módulos desde diferentes pines de ambos bloques de puertos paralelos. Para la aplicación desarrollada, se modificó la librería SPI de tal forma que solo se habilita el bloque



## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

---

SPI (1) debido a que el conjunto de pines que usa no se comparte con ningún otro tipo de protocolo.

También, para el control del módulo MPU6050 se debe habilitar la librería *wire.h* que contiene los seis bloques de comunicación I2C; de igual forma para evitar incompatibilidades por el uso de diferentes tipos de comunicación en paralelo, se utiliza el bloque *wire* (1), el cual no comparte pines con ningún otro módulo de la tarjeta.

Finalmente, respecto a la transmisión de los datos entre la *Stellaris Launchpad* y la Raspberry Pi 3, se emplea la comunicación serial UART, para la cual la tarjeta emplea por defecto el bloque UART (0).

### 4.2.2. Lógica de control de los módulos del sistema.

Lo primero que debe hacer el micro controlador es esperar la orden de la *Raspberry Pi 3*, dado por el usuario, de cuál debe ser el módulo que controlará el movimiento de la silla de ruedas; es decir si será el joystick o la diadema Emotiv Epoc.

Luego del paso anterior, se deben activar todos los sensores en determinadas secuencias dependiendo de la dirección que la silla de ruedas tome, como se muestra en la Figura 4.1; por ejemplo, si la silla de ruedas debe hacer un giro hacia la derecha, se habilitan (en verde) los ocho sensores frontales para detectar obstáculos que puedan estar cerca de las esquinas del prototipo, además el grupo de sensores traseros derechos también se habilitan para cuidar que esa esquina no choque mientras se va completando el giro que tiene como eje la esquina trasera izquierda del prototipo, algo similar ocurre para el movimiento a la izquierda; cuando se debe hacer un giro completo en cualquier sentido, los 16 sensores deben habilitarse porque todas las esquinas estarán en movimiento y podrían chocar.

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

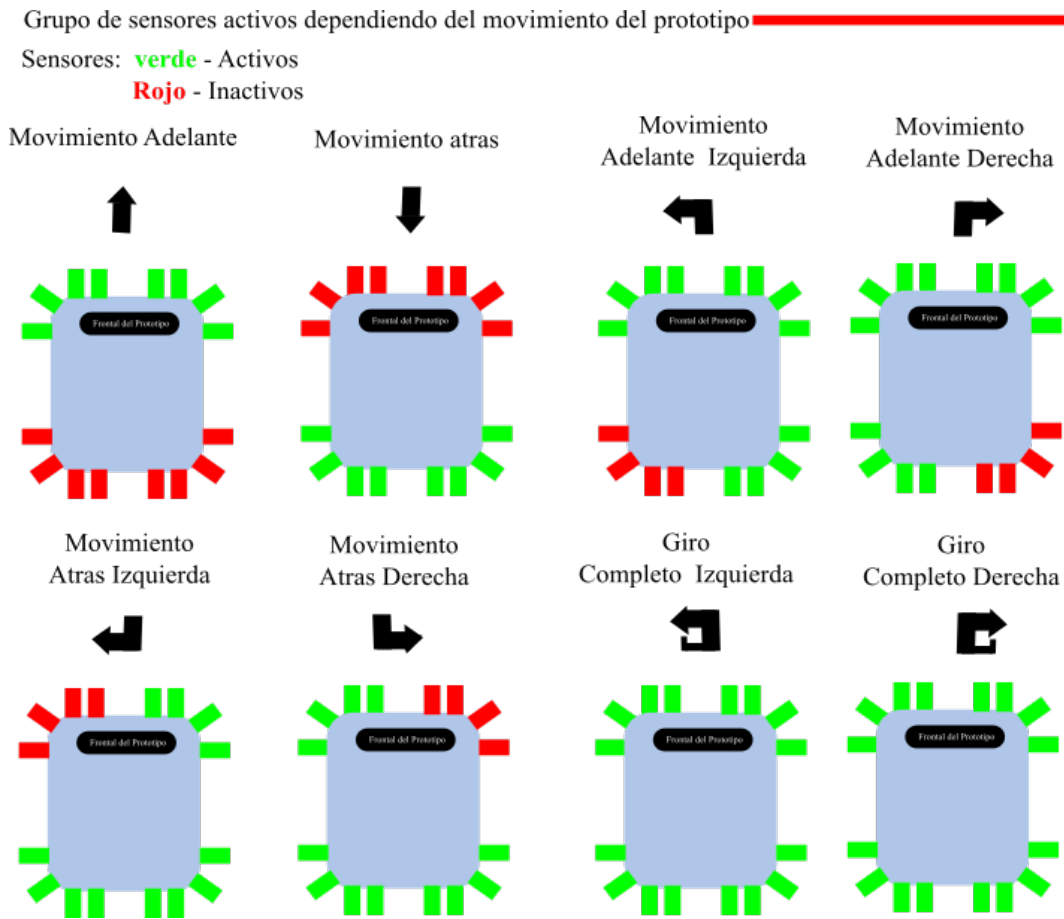


Figura 4.1. Movimientos de la silla de ruedas.

Durante el movimiento de la silla de ruedas, en el sentido que sea, el módulo MPU6050 debe estar midiendo constantemente para determinar la inclinación de la superficie por donde se mueve el prototipo; es por esto que se debe habilitar el giroscopio al mismo tiempo que los sensores ultrasónicos.

Una vez los sensores comienzan a cumplir su función, la información adquirida debe enviarse del microcontrolador hasta la tarjeta *Raspberry Pi 3* para su procesamiento, al mismo tiempo que debe almacenar en el módulo micro SD para la creación de la base de datos. En la Figura 4.2 se muestra el diagrama que contiene los grados de precedencia de cada uno de los bloques que componen el prototipo.

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

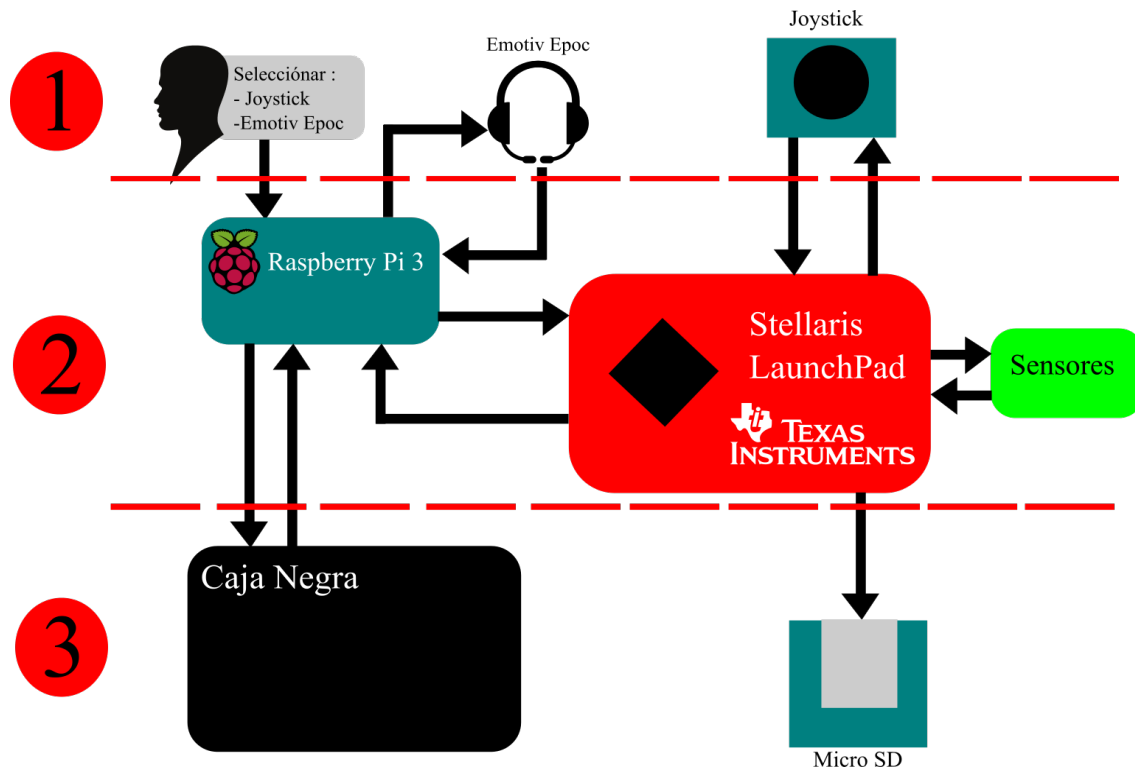


Figura 4.2. Lógica de precedencia de los bloques del prototipo.

### 1) Interfaz de usuario:

El primer nivel se compone por el control de todos los periféricos que hacen llegar las órdenes del usuario a las unidades de procesamiento de datos. Para este fin, simplemente se ha dejado un tiempo de espera (por ahora) y cuando alguno de los dos dispositivos se activa, comienza la operación de todo el sistema.

El Joystick está compuesto de dos potenciómetros cuyos cambios son registrados por los conversores analógico/digitales de la tarjeta TM4C123G, además cuenta con un pin adicional que sirve como habilitador del Joystick, el micro controlador espera el momento en que este pin habilitador cambie su valor de 0 a 1.

La diadema Emotiv Epoc se activa desde la Raspberry Pi 3, mediante el uso de las señales que miden los electrodos en la cabeza del usuario; por el momento, la forma de saber si el control del movimiento de la silla de ruedas se hace a través de la diadema es simplemente

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

---

enciéndola para que la Raspberry comience a recibir los datos.

### 2) Adquisición de datos:

El segundo nivel está compuesto por todas las funciones que habilitan los sensores ultrasónicos y el módulo MPU6050, desde las dos tarjetas de desarrollo utilizadas.

La *Raspberry Pi 3* debe mantener comunicación bidireccional primero con la diadema Emotiv Epoc; esta comunicación comienza con el encendido de la diadema que transmite datos de forma inalámbrica hacia un receptor conectado vía USB 2.0 a la tarjeta. Después de que son interpretados los datos, por la librería del fabricante de la diadema, se inicia una comunicación también bidireccional con la tarjeta TM4C123G donde se activa la bandera que da la orden de iniciar las mediciones y espera a que lleguen los datos del sistema de medición a través de comunicación serial.

La tarjeta *Stellaris Launchpad* mantiene primero una comunicación unidireccional con el joystick en la que espera la señal de habilitación y el valor de valor de los potenciómetros para determinar la dirección de la silla de ruedas; después, establece una comunicación bidireccional con la Raspberry en la que envía los datos de los sensores para su procesamiento. También la tarjeta de *Texas Instrument* mantiene constante comunicación (bidireccional) con el módulo MPU6050 y con los multiplexores que activan los sensores ultrasónicos dependiendo de la dirección que tome la silla de ruedas.

### 3) Procesamiento de datos:

En el último nivel, se encuentra la tarjeta micro SD donde se guardan todos los datos de las pruebas al prototipo, así como, la información de todos los movimientos de la silla de ruedas para establecer una base de datos para mejorar el diseño del prototipo, por ejemplo, estableciendo los principios de un mapeo.

Un aspecto importante de este nivel es que, por ahora, el prototipo solamente tiene la

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

---

función de adquirir los datos del ambiente que rodea a la silla de ruedas y de recibir la información de las señales cerebrales que vienen de la diadema Emotiv Epoc. La navegación semiautónoma que se propone en este proyecto hace referencia a la capacidad del prototipo de compartir el control de sus movimientos entre el *joystick* y la diadema Emotiv Epoc la cual cuenta con una librería que tiene un algoritmo embebido de clasificación de datos.

La caja negra representada en este nivel, como se muestra en la Figura 4.2, abre la posibilidad para que se desarrolle, en el futuro, un algoritmo propio para la clasificación de los datos tanto de la diadema como de los sensores; ya que, actualmente la *Raspberry* Pi 3 recibe todos estos datos en bruto.

Esta caja negra debe contener un bloque completo de procesamiento de datos que debe hacerse desde el procesador de la *Raspberry*, el cual tiene más capacidad, y debe enviar señales de habilitación al sistema de adquisición de datos controlado por la *Stellaris Launchpad*.

### 4.2.3. Diagramas de Flujo.

En primer lugar se debe crear la función `Void Setup()` la cual contiene básicamente la inicialización de todas las variables y constantes, así como la asignación de pines:

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

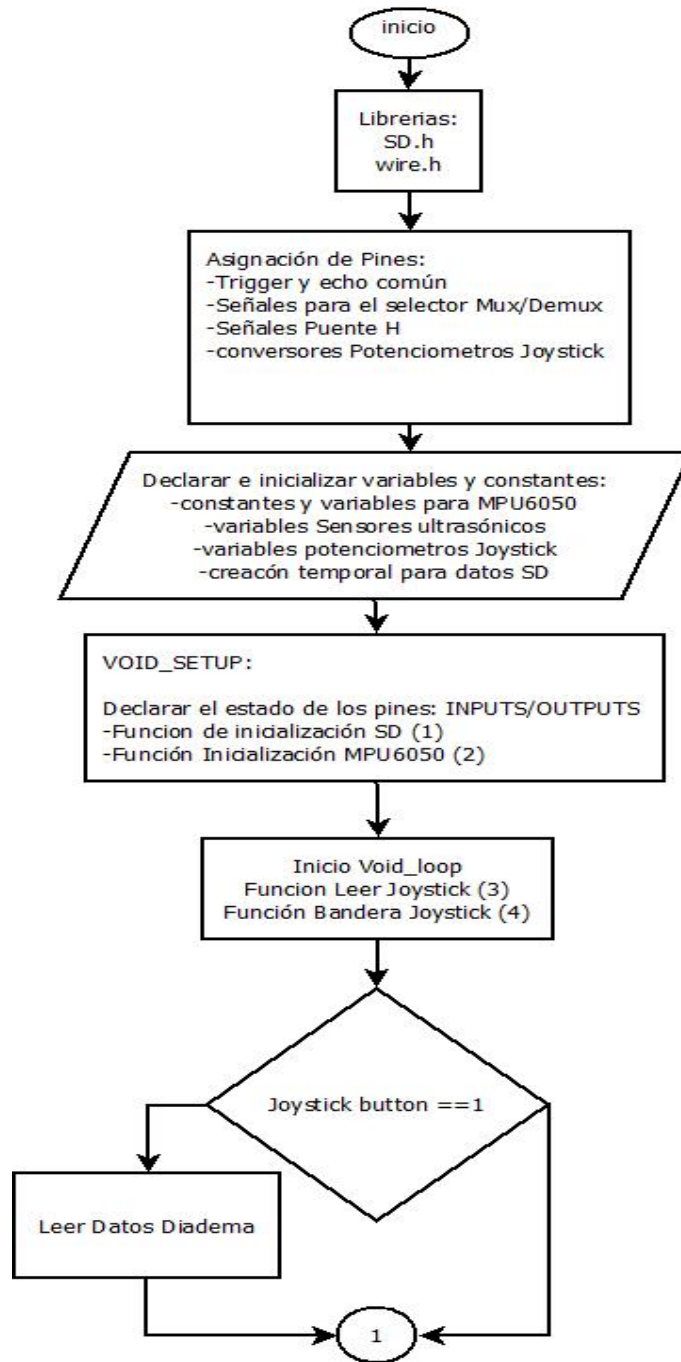
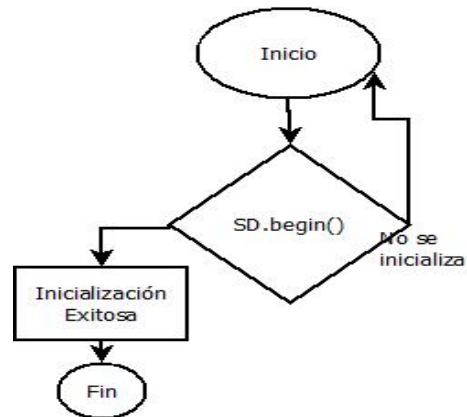


Figura 4.3. Función Void Setup.

En esta parte del programa se hacen llamados a algunas funciones como la inicialización de lo módulo SD y el módulo MPU6050.

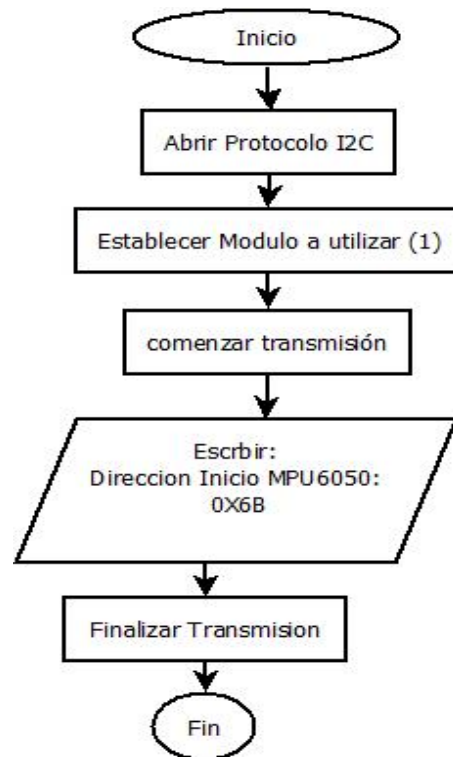
## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

---



**Figura 4.4.** *Iniciación SD.*

Como se muestra en la Figura 4.5 para iniciar el módulo MPU6050, se debe enviar el número 0x6B, el cual corresponde a la dirección de la unidad de movimiento inercial dentro del integrado.



**Figura 4.5.** *Iniciación MPU6050.*

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

---

También se debe iniciar la lectura de los potenciómetros del Joystick, para obtener un valor más estable se toman 200 mediciones y se promedian.

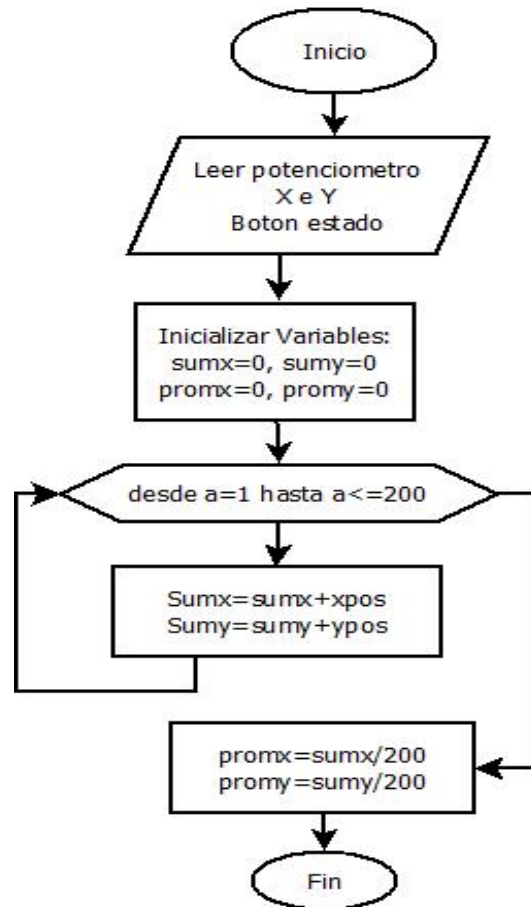
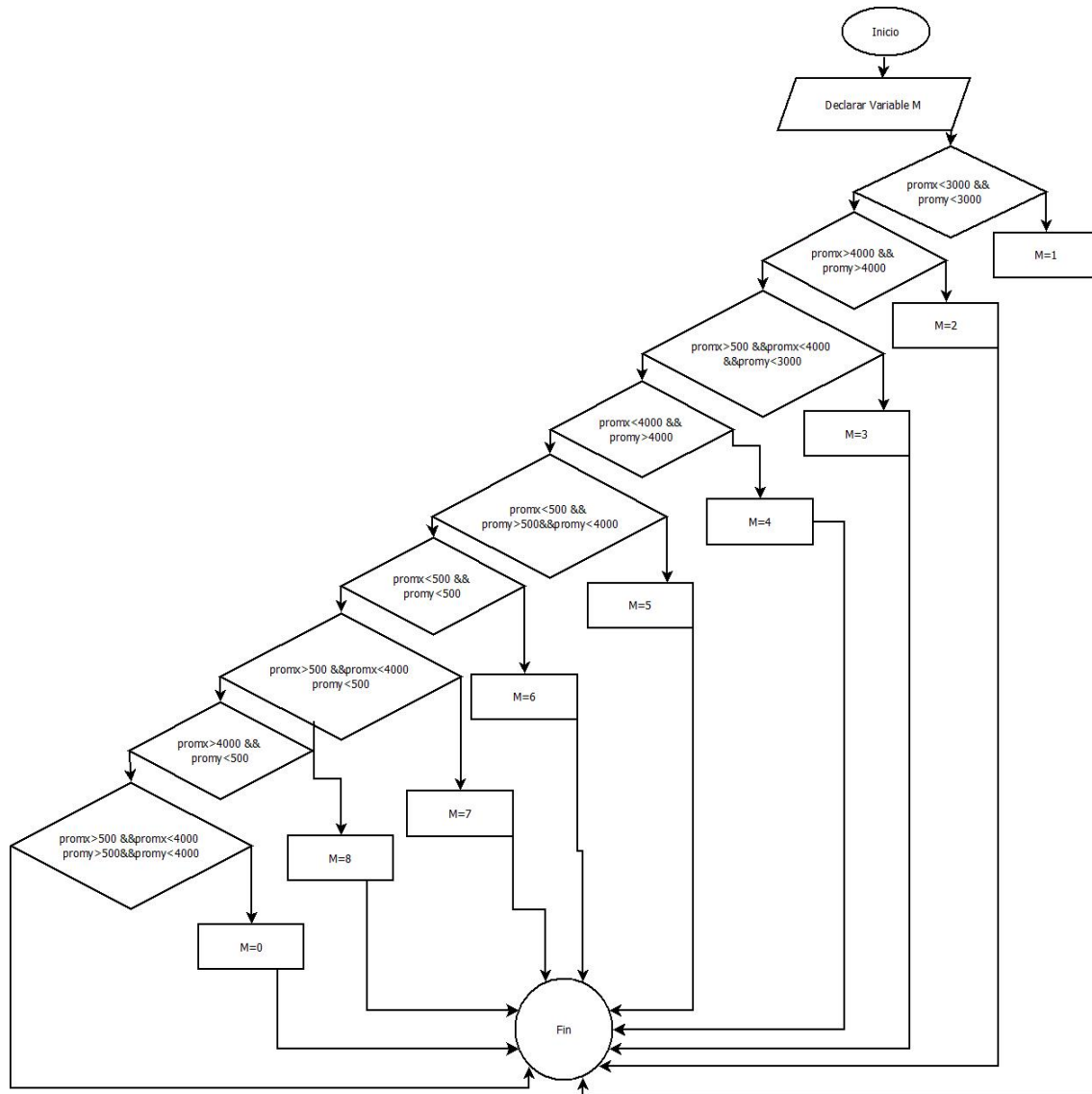


Figura 4.6. Inicialización joystick.

La parte final de esta etapa es determinar los valores de la bandera M dependiendo del valor de los potenciómetros.



## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G



**Figura 4.7.** Bandera del joystick.

Luego la estructura principal del programa está compuesta por una estructura de casos que dependen de la bandera M, esta bandera cambia de valor dependiendo del movimiento que este registrando la silla de ruedas a través del Joystick o la lectura de los pensamientos del usuario por medio de la diadema Emotiv Epoc.

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

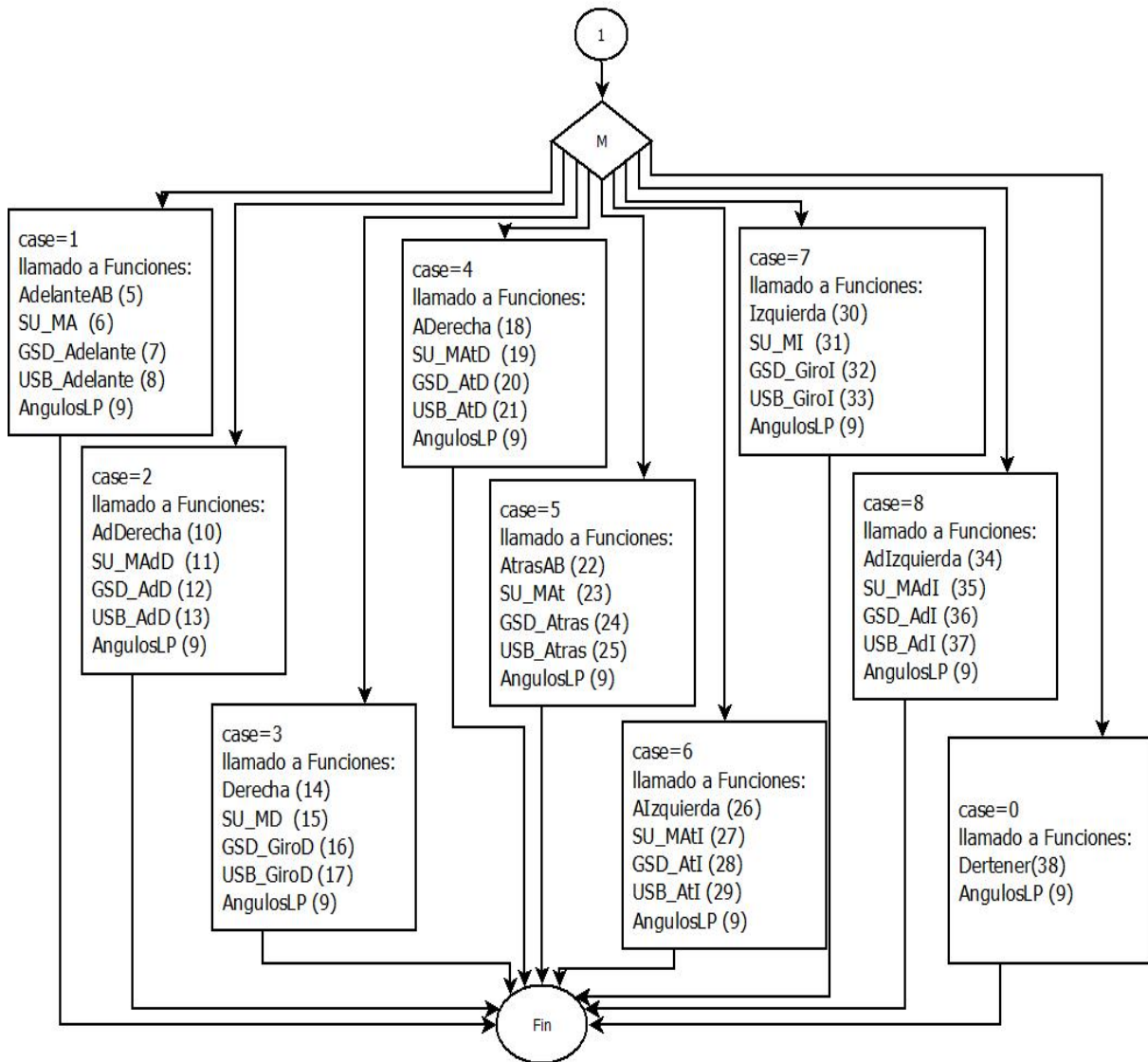
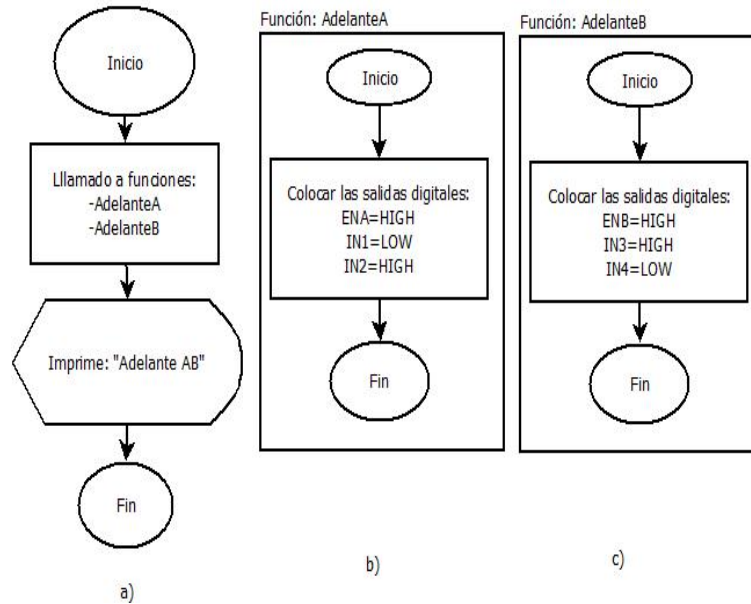


Figura 4.8. Función void loop.

En cada uno de estos casos se hacen llamados a cinco funciones básicas que componen el funcionamiento del prototipo, lo que cambia en cada caso es el movimiento que la silla de ruedas debe hacer, así como los sensores que deben medir.

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

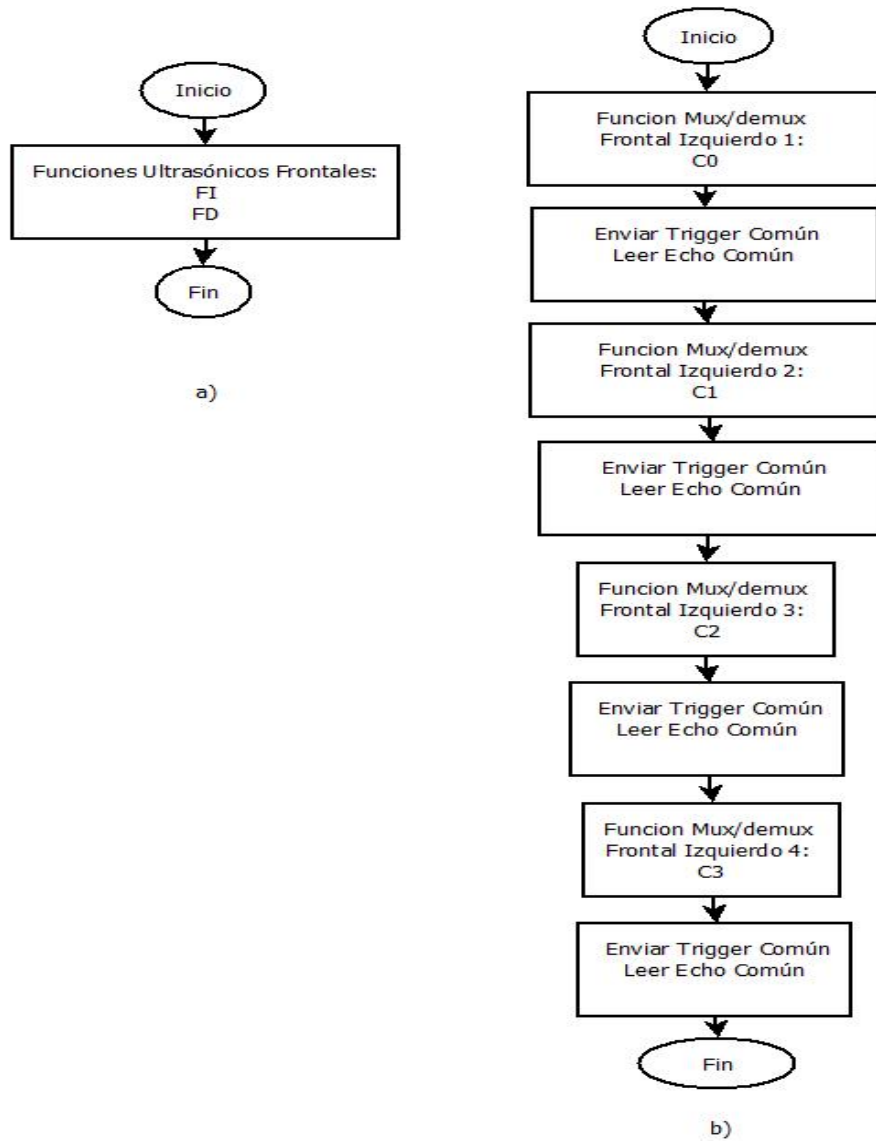


**Figura 4.9.** Función motores. a) AdelanteAB; b) AdelanteA; c) AdelanteB

En la Figura 4.9, se ejemplifica lo que debe hacerse con los motores cuando el movimiento es hacia adelante. Lo mismo debe hacerse para los demás casos teniendo en cuenta la Tabla 3.3.

La función que controla los sensores ultrasónicos (Figura 4.10) activa los bloques de sensores frontales derechos e izquierdos. En cada bloque se entregan las señales de activación para los MUX y DEMUX como se muestra en la Tabla 3.4 y se envía la señal del trigger común y se lee el Echo común.

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G



**Figura 4.10.** *Función Sensores Ultrasónicos. a) Llamado a funciones de sensores; b) Activar sensores y medir*

En la Figura 4.11, se muestra el proceso de guardado de los datos en la memoria micro SD.

## 4.2 Tiva C Stellaris Launchpad LM4C123G

---

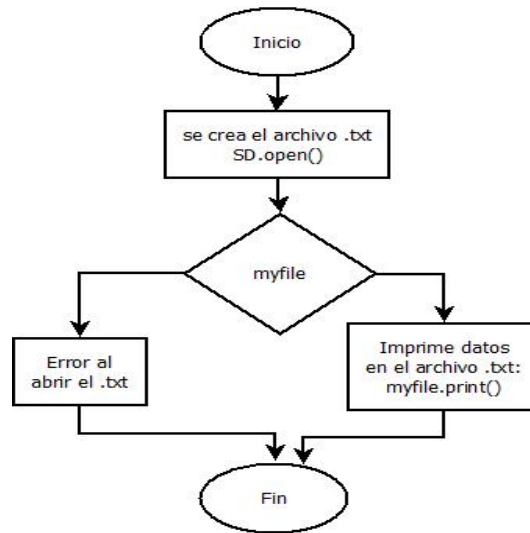


Figura 4.11. Función guardar en SD.

La transmisión de los datos de forma serial de la tarjeta Stellaris Launchpad hacia la Raspberry consiste simplemente en imprimir los datos en el puerto serial.

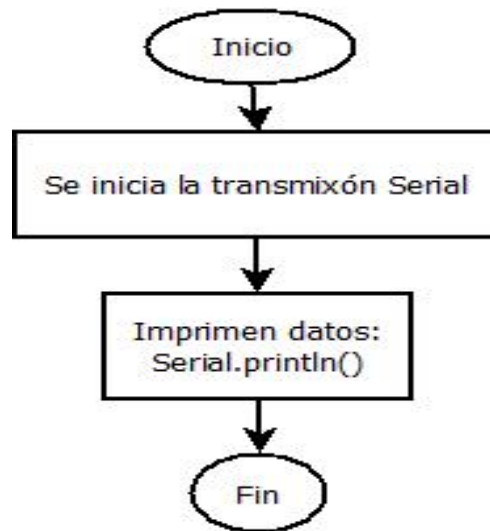


Figura 4.12. Función enviar USB.

Finalmente, está la función que toma los datos del módulo MPU6050 y los opera matemáticamente para entregar valores entendibles por el usuario.

### 4.3 Raspberry Pi 3 Modelo B.

---

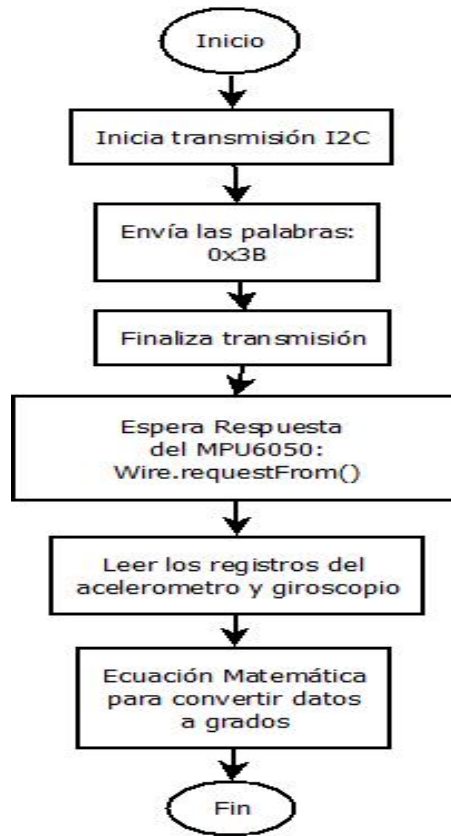


Figura 4.13. Función medir MPU6050.

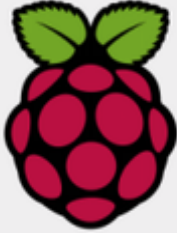
### 4.3. Raspberry Pi 3 Modelo B.

La *Raspberry Pi 3* funciona como una computadora simple (SBC), desarrollada por la Fundación Raspberry PI de la Universidad de Cambridge desde el 2011. El objetivo de este tipo de dispositivos es fomentar el desarrollo de aplicaciones de bajo costo (desde la academia) como soluciones a los problemas cotidianos.

Desde sus inicios se han creado varios modelos de tarjeta que se han mejorado con el avance de la tecnología, las características técnicas de la Raspberry Pi 3 Modelo B se muestran en la Figura 4.14.

### 4.3 Raspberry Pi 3 Modelo B.

---

	
Raspberry Pi 3 Model B	
Introduction Date	2/29/2016
SoC	BCM2837
CPU	Quad Cortex A53 @ 1.2GHz
Instruction set	ARMv8-A
GPU	400MHz VideoCore IV
RAM	1GB SDRAM
Storage	micro-SD
Ethernet	10/100
Wireless	802.11n / Bluetooth 4.0
Video Output	HDMI / Composite
Audio Output	HDMI / Headphone
GPIO	40
Price	\$35

**Figura 4.14.** Características técnicas *Raspberry Pi 3 Modelo B*.

El uso de esta tarjeta se hace necesario: En primer lugar, porque posee un procesador de 1.2 GHz garantizando un excelente procesamiento de datos, además de una alta capacidad de almacenamiento ya que se dedicó una memoria micro SD de 16 GB para contener el sistema operativo de la misma y los datos. En segundo lugar, las librerías existentes para el control de la diadema Emotiv Epoc están hechos para ser utilizadas en herramientas como el que brinda la *Raspberry Pi* con el uso del entorno de programación Python.

Además, el acoplamiento de la *Raspberry Pi 3*, en el prototipo, da pie para mejorar las funciones del mismo en el futuro usando de sensores y periféricos hechos para trabajar específicamente en esta tarjeta de desarrollo.

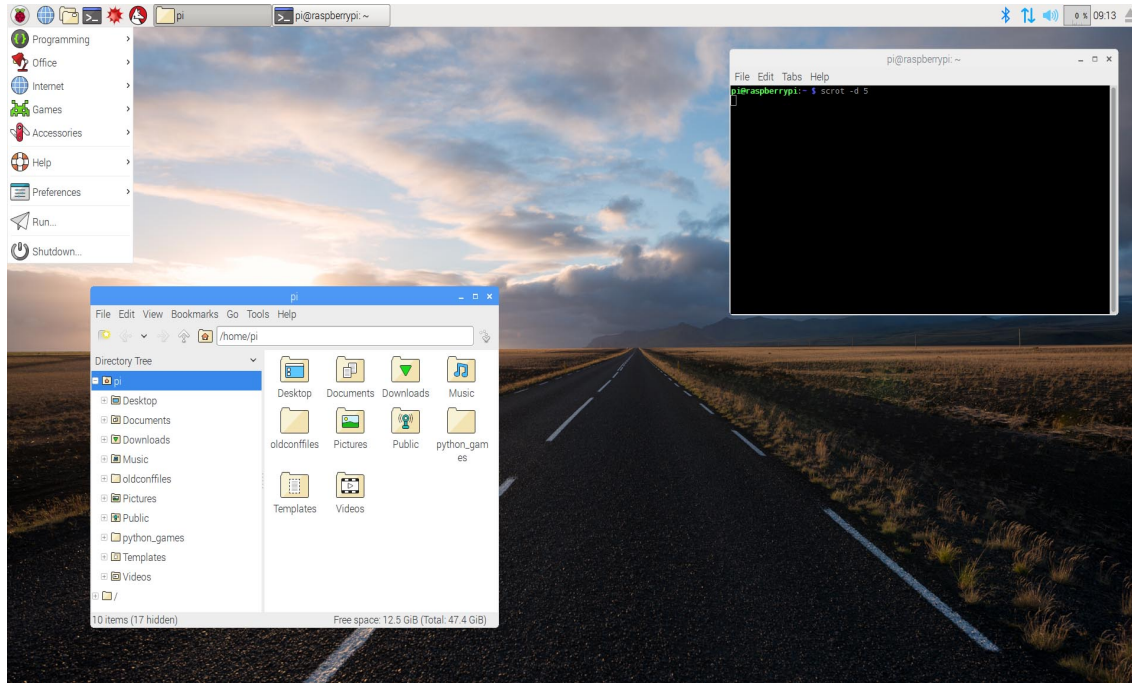
#### 4.3.1. Raspbian Jessie.

Raspbian es un sistema operativo, basado en la distribución de Linux, Debian, para ser usado en las tarjetas *Raspberry Pi*; La versión actual estable es la de junio de 2017, y cuenta con

### 4.3 Raspberry Pi 3 Modelo B.

---

los programas preinstalados: Python 2.7.9, Python 3.4, gestor para la instalación de librerías, control de puertos de propósito general.



**Figura 4.15.** Entorno gráfico Raspbian Jessie basado en GTK+3.

Este sistema operativo usa la interfaz gráfica GTK+2 con un tema soportado por el entorno de GTK+3 (como se muestra en la Figura 4.15), las cuales son herramientas graficas multi plataformas para crear la interfaz gráfica para el control de sistemas operativos basados en Linux; además, son compatibles con los lenguajes C y C++, Perl y Python.

#### 4.3.2. Entorno de Programación y Librerías.

Se debe usar Python 2.7.X el cual es compatible con las librerías existentes para la diadema Emotiv Epoc. Se deben instalar, además, algunas librerías específicas para poner en marcha todas las funciones del prototipo. A continuación, se enlistan todas las librerías:



### 4.3 Raspberry Pi 3 Modelo B.

---

**Tabla 4.1.** *Librerías Python 2.7.X*

Librería	Llamado	Descripción
SYS	<code>import sys</code>	Este módulo da acceso a todas las variables del sistema que usa el intérprete para interactuar. Debe estar siempre activo.
OS	<code>import os</code>	Herramienta utilizada por el sistema operativo para dar acceso de lectura o escritura de archivos, además permite la creación de directorios temporales y para consultar directorios de alto nivel.
Platform	<code>import platform</code>	Retorna información acerca de la arquitectura de los enlaces usados por los formatos ejecutables.
Time	<code>import time</code>	Siempre debe estar activo. Esta librería establece la base de tiempo para diferentes acciones de un programa; por ejemplo, para establecer la comunicación serial entre dos dispositivos.
Ctypes	<code>import ctypes</code>	Librería externa de Python, genera las compatibilidades necesarias para trabajar código C y funciones de archivos DLL.
Tkinter	<code>from Tkinter import</code>	Es una interfaz basada en TK GUI toolkit, sirve para la creación de interfaces gráficas desde el Código fuente de Python.
String	<code>From string import</code>	Permite hacer operaciones con cadenas de datos.
PIL	<code>from PIL import</code>	Permite el procesamiento de gráficos e imágenes en Python.
Threading	<code>from threading import Thread</code>	Sirve para crear interfaces de nivel superior tomando como base subprocesos de nivel inferior.
Numpy	<code>import numpy</code>	Es un paquete que sirve para trabajar sistemas de cómputo científicos como, contenedores multidimensionales de datos genéricos o arbitrarios.
Serial	<code>import serial</code>	Habilita el acceso a los puertos seriales del hardware desde Python.

Además, deben ser instaladas librerías adicionales para acceder al control de algunas funciones necesarias para poner en funcionamiento todas las características del prototipo.

#### **Librería pyUSB:**

Esta librería sirve para acceder de forma remota a los puertos USB de la Raspberry desde Python. No viene dentro de los paquetes predefinidos de Python, así que, puede ser instalado desde la terminal usando el siguiente procedimiento [1]:

### 4.3 Raspberry Pi 3 Modelo B.

---

- Ejecutar el explorador de internet en Raspbian, Chromium, y buscar:  
<https://walac.github.io/pyusb/>.
- Se debe descargar el archivo comprimido `pyusb-1.0.0-al.tar.gz`.
- Descomprimir el archivo y desde una terminal se accede al directorio donde están los Archivos y usar el código: `sudo python setup.py install`.
- Otra forma de instalar esta librería es usar el gestor de paquetes que viene incluido en el Raspbian Jessie.

#### Librería pyCrypto:

Esta librería contiene algoritmos para encriptar, necesarios para usar la diadema Emotiv Epoc, como AES, DES y otros más. Igualmente puede ser instalado mediante el gestor de paquetes del Raspbian Jessie; o por terminal, usando el siguiente procedimiento.

- Buscar por Chromium la librería `pycrypto`: <https://pypi.python.org/pypi/pycrypto>.
- Descargar el comprimido y descomprimir: `pycrypto-2.6.1.tar.gz`.
- Abrir el directorio desde una terminal y escribir: `sudo python setup.py install`.

#### Librería OpenCV:

Es una biblioteca (libre) para el uso en aplicaciones visión artificial desarrollada por Intel, estos paquetes son necesarios para la operación de la diadema y de cualquier interfaz de usuario que se desarrolle.

Para instalar esta librería es necesario hacerlo mediante una terminal de Raspbian:

Se debe escribir el siguiente código: `sudo apt-get install build-essential libavformat-dev ffmpeg libcv2.1 libcvaux2.1 libhighgui2.1 python-opencv opencv-doc libcv-dev libcvaux-dev libhighgui-dev`

### 4.3 Raspberry Pi 3 Modelo B.

---

#### Librería Emotiv:

Se han desarrollado varias librerías para utilizar la Emotiv Epoc en diferentes plataformas como Mac, Windows, Linux y para dispositivos controlados por procesadores con arquitectura *Armf* como la *Raspberry* Pi 3.

Existen varias versiones de la librería que se usan para diferentes cosas; para acceder a estas librerías se debe entrar al siguiente enlace: <https://github.com/Emotiv>. A continuación, se describen los paquetes que conciernen al desarrollo del prototipo.

La librería de Community-SDK ( <https://github.com/Emotiv/community-sdk> )

Esta librería se compone por varios scripts que sirven para realizar diferentes actividades con la diadema como: activar el giroscopio para medir los movimientos de la cabeza del usuario, leer los electrodos de la diadema, que entregan las señales cerebrales, y mediante un algoritmo de clasificación interpretar los datos y entregar una respuesta fácil de interpretar por el usuario. También hay un archivo de prueba de conexión de los datos y uno para el entrenamiento del algoritmo. La librería Master SDK, suministrada por Ozan Caglayan:

(<https://github.com/ozancaglayan/python-emotiv> )

Esta librería, a diferencia de la anterior, posee un algoritmo que obtiene las señales puras del cerebro que pasan por los electrodos de la diadema, pero no hace ningún procesamiento adicional para su interpretación. Esta librería fue creada con el propósito de que se puedan implementar otros algoritmos de clasificación de datos diferentes a los suministrados por el fabricante de la diadema.

La librería implementada es la Master SDK, ya que para los objetivos del prototipo solo se requiere la adquisición de los datos de los electrodos de la diadema para en el futuro agregar un algoritmo de clasificación que mejor convenga a la aplicación que se desarrolla.

## 4.4 Manejo de datos.

---

### 4.3.3. Comunicación con los periféricos.

Los datos de los sensores que componen el sistema de adquisición se envían por medio de comunicación serial. Para esta tarea se debe declarar el puerto serial que se activara de la Raspberry mediante el siguiente código en Python:

```
import serial # libreria serial
import time #libreria de tiempo
en=serial.Serial('/dev/ttyACM0', baudrate=9600) #abre el puerto serial
```

Para conocer los nombres de los puertos USB, disponibles, del dispositivo en el que se implemente la comunicación serial, en este caso la Raspberry Pi 3, en una terminal se debe usar el código:

```
dmesg | grep tty
```

La librería SDK de la diadema Emotiv Epoc utiliza este mismo método para comunicarse y transmitir los datos. Cabe mencionar que los algoritmos usados por esta librería no están especificados por el fabricante, ni pueden ser observados ya que los archivos están encriptados, pero se puede deducir que la comunicación es serial entre el receptor USB de la diadema y la Raspberry.

## 4.4. Manejo de datos.

Desde la diadema los datos llegan a la *Raspberry* de forma decimal en formato punto flotante listos para realizar operaciones matemáticas con ellos. Por otro lado, los datos que adquiere de los sensores la tarjeta *Stellaris Launchpad* deben ser enviados se forma serial como cadenas de datos.

Las cadenas de datos enviadas por la tarjeta de desarrollo de *Texas Instruments* contienen las mediciones de los 16 sensores ultrasónicos y los dos ejes (X e Y) del giroscopio separados por comas. Por ejemplo:

#### 4.4 Manejo de datos.

---

$$U1, U2, U3, U4, U5, U6, U7, U8, U9, U10, U11, U12, U13, U14, U15, U16, Gx, Gy \quad (4.1)$$

La cadena de datos (vista en la ecuación 4.1) se recibe en la Raspberry y debe hacerse un tratamiento para separar los datos y convertirlos a valores numéricos con los que se puedan realizar operaciones.

Primero se reciben los datos serial y mediante la función *split* de Python se separan los datos, como se muestra a continuación.

```
while True:
    while(en.inWaiting()==0):
        pass
    ens=en.readline() #leer linea de datos serial
    dat=ens.split(',') #dividir linea
```

Una vez dividida la cadena se guarda cada dato en una variable que sirve al mismo tiempo para transformarlo a un número con el uso de la función *float*.

```
fi1=float(dat[0])#seccion 1 de cadena serial
gy=float(dat[17])#seccion 18 de cadena serial
```

*dat* es la variable que contiene la cadena completa de datos, una vez aplicada la función *Split* se divide en 16 secciones que contiene de forma ordenada los valores de las mediciones de cada sensor. Cada sección se guarda, de forma correspondiente, en una variable de Python con el nombre del sensor y queda lista para realizar operaciones numéricas.

## Capítulo 5

# Pruebas al prototipo.

### 5.1. Introducción

Una vez diseñado los dos sistemas que componen el prototipo deben hacerse varias pruebas para caracterizar el funcionamiento y establecer los parámetros de desempeño del prototipo. En primer lugar, se deben obtener las curvas características de los sensores, además de que debe someterse el prototipo, ya acoplado en la silla de ruedas, a diferentes situaciones que se presentan en la vida real para identificar su comportamiento.

### 5.2. Sistema de adquisición de datos.

La meta principal de las pruebas de validación del sistema de adquisición es lograr obtener la mayor cantidad de muestras para establecer una base datos que permita caracterizar todos los posibles casos (o la mayoría) a los que se va a enfrentar el prototipo en situaciones de la vida real. Para esto se han diseñado varias pruebas que facilitaran encontrar los puntos fuertes y débiles del diseño propuesto.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---

### 5.2.1. Pruebas de caracterización.

Se debe identificar los rangos de transmisión y recepción del sistema de adquisición de datos de acuerdo con la distribución de los sensores ultrasónicos en la silla de ruedas.

#### a) Sensor ultrasónico HC-SR04:

En primer lugar, se debe obtener la curva característica del sensor ultrasónico. Para esto se coloca un obstáculo frente el sensor y se va alejando cada dos centímetros hasta los dos metros; luego se hace el mismo proceso, pero acercando el obstáculo. Se toman las mediciones correspondientes para obtener las siguientes curvas.

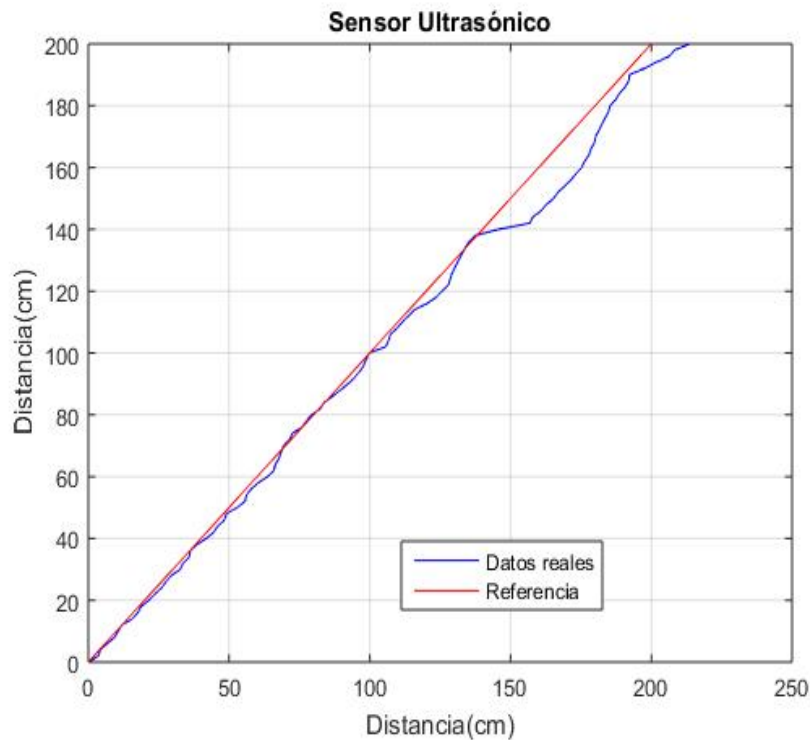


Figura 5.1. Curva característica sensor ultrasónico HC-SR04.

De las curvas obtenidas se puede extraer una ecuación que modele el comportamiento de

---

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

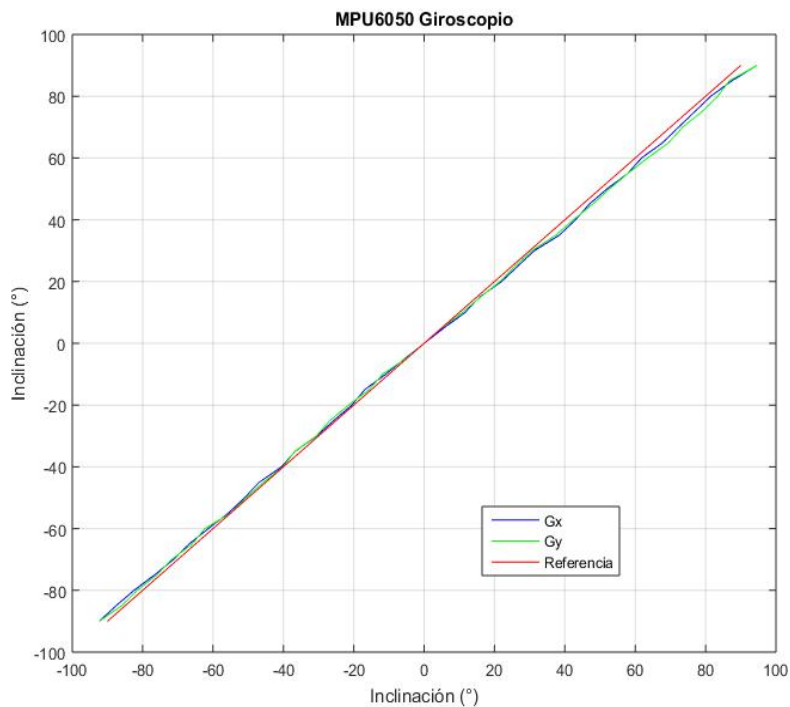
---

las ondas ultrasónicas en función de la distancia:

$$d = 1.06 * DistanciaMedida - 0.84501 \quad (5.1)$$

### b) Módulo MPU6050.

Para la unidad de movimiento inercial MPU6050 se debe establecer una referencia con la cual comparar, en este caso se usó un transportador, con el cual se activó tanto el giroscopio como el acelerómetro y se fue variando la inclinación de los mismos cada 5 grados empezando en  $-90^\circ$  a  $0^\circ$  y luego hasta  $90^\circ$  en los ejes x e y. Primero para el giroscopio:



**Figura 5.2.** Curva característica giroscopio MPU6050.

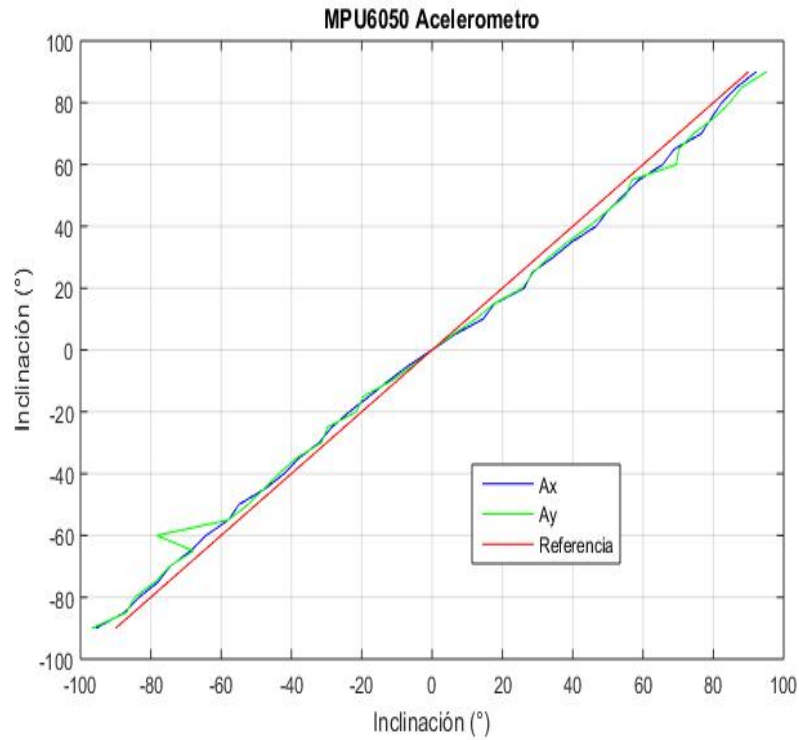
Luego debe repetirse el mismo proceso para el acelerómetro, teniendo en cuenta los cambios



## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---

que deben hacerse en el llamado a los registros a leer.

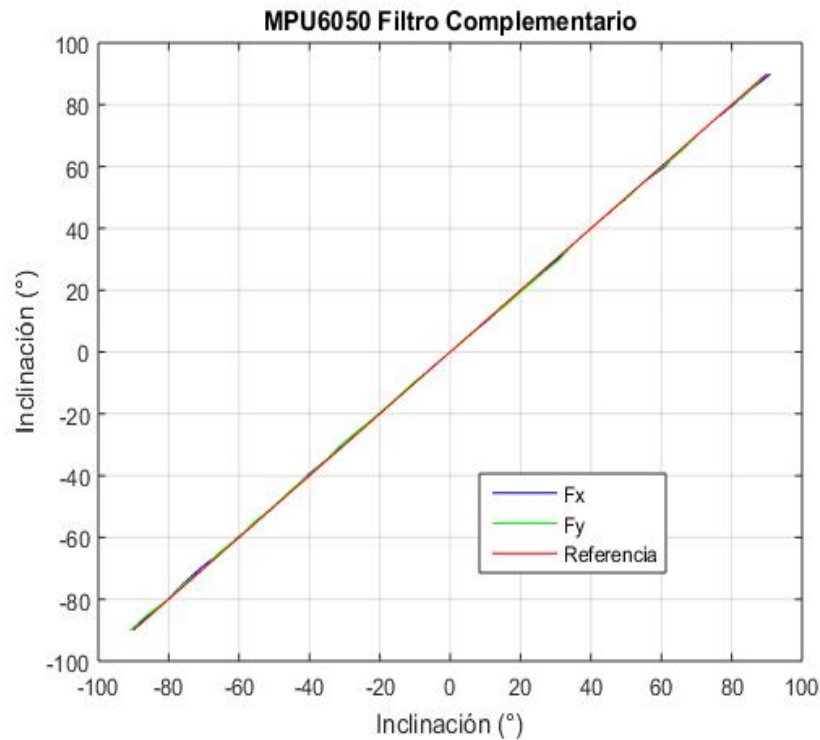


**Figura 5.3.** Curva característica acelerómetro MPU6050.

Normalmente, con el uso de la unidad MPU6050 se utiliza un filtro, llamado complementario, para obtener mediciones más precisas de las inclinaciones del módulo; para esto, se emplean ecuaciones que usan las mediciones de los ejes del acelerómetro y giroscopio de forma simultánea.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---



**Figura 5.4.** Curva característica filtro complementario MPU6050.

En la Figura 5.4 se muestra la curva que caracteriza el comportamiento del filtro. La caracterización de las mediciones dadas por el MPU6050 consta básicamente en conocer el grado de error que existe entre los datos registrados y la referencia, ya que las ecuaciones matemáticas usadas para obtener el valor de inclinación en grados están embebidas en el código que genera los datos.

### c) Sistema completo.

El sistema de adquisición de datos está compuesto por los 16 sensores ultrasónicos y el módulo MPU6050. Se deben realizar varias pruebas para precisar todas las características del sistema según la distribución de todos los sensores en la silla de ruedas y las diferentes situaciones que se puedan producir.

Es importante mencionar que el sistema de adquisición de datos fue acoplado en una silla de ruedas convencional que no está motorizada, por lo tanto, las pruebas se realizaron con la

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---

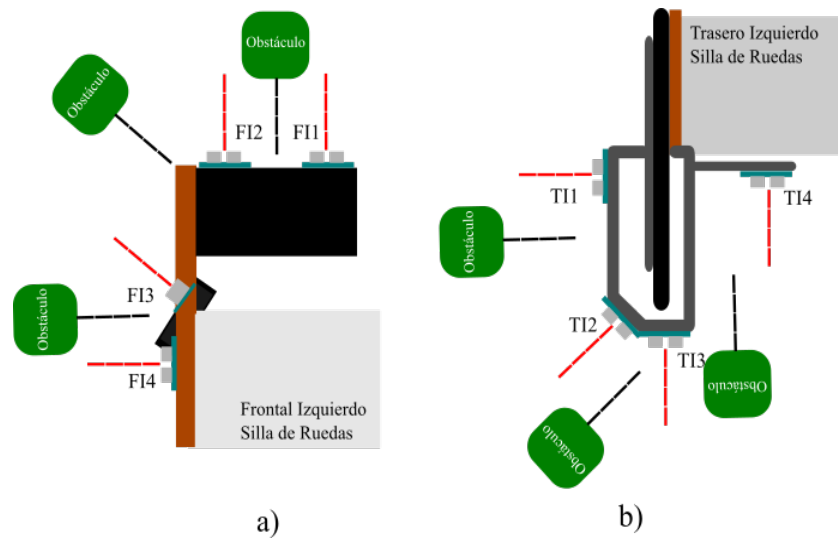
silla estática sin contemplar la componente de velocidad. De esta manera la caracterización del sistema sirve para sentar las bases de futuros desarrollos y mejoras para el prototipo.

El análisis de los resultados de las pruebas mostrados en todas las siguientes gráficas se presenta en el capítulo 6, donde se describe las principales características de los comportamientos de los datos obtenidos.

Es importante resaltar que para las gráficas, desde la 5.6 hasta la 5.16 y la 5.20, el eje horizontal representa la distancia de referencia por la que se movió el obstáculo frente a cada sensor y el eje vertical representa la distancia que cada sensor midió.

### -Prueba 1: Puntos ciegos:

Es necesario medir los puntos ciegos existentes debidos a la disposición de los sensores en la silla para establecer las fronteras desde donde debe tomarse la medición de la distancia sin que exista posibilidad de dejar espacios vacíos por donde un obstáculo pueda pasar desapercibido. Para este fin se dispusieron obstáculos de relativo tamaño entre los sensores del lado frontal izquierdo y del lado trasero izquierdo, como se muestra en la Figura 5.5.

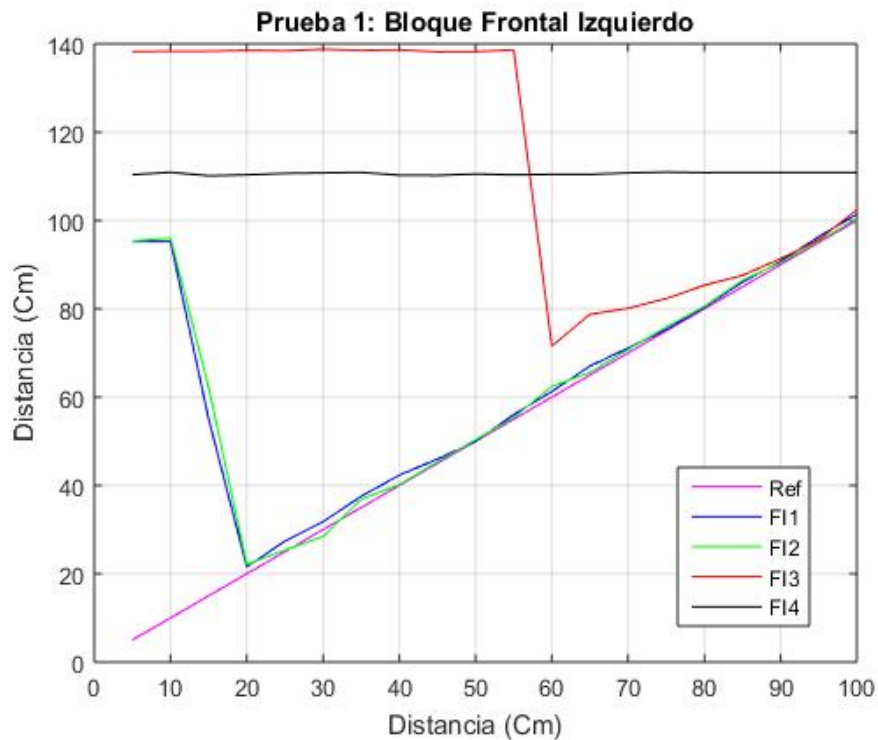


**Figura 5.5.** Esquema prueba de puntos ciegos. a) Frontal izquierdo; b) Trasero izquierdo.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---

La prueba consiste en colocar los obstáculos en medio de los sensores e ir alejándolos para detectar en que punto se intersectan los rangos de recepción de distancia de los sensores. de esta forma los puntos ciegos serán aquellos donde existan obstáculos y las intersecciones de los rangos no los detecten.

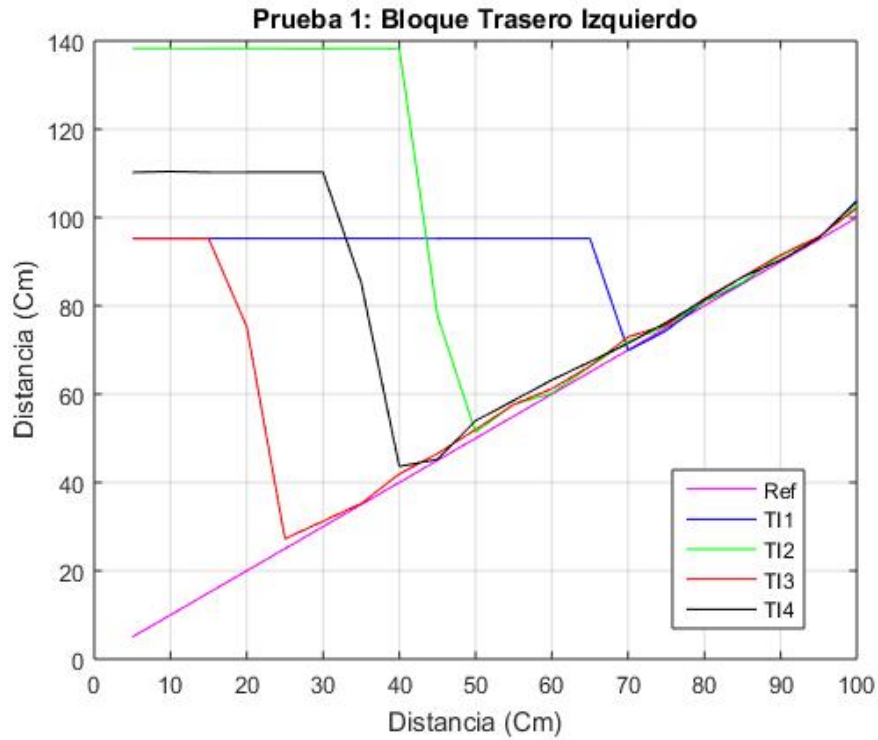


**Figura 5.6.** Prueba de puntos ciegos bloque frontal izquierdo.

Los resultados obtenidos de las pruebas se muestran en la Figura 5.6. para los sensores frontales izquierdos y en la Figura 5.7. para los sensores correspondientes al lado trasero izquierdo de la silla de ruedas.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---



**Figura 5.7.** Prueba de puntos ciegos bloque trasero izquierdo.

### -Prueba 2: Intersecciones:

En esta prueba se debe hacer algo similar a la prueba anterior, pero para las zonas que están entre bloque y bloque de sensores ultrasónicos, como se muestra en la Figura 5.8; de esta forma se conoce también la existencia de zonas en la geometría de la silla de ruedas donde no se detectan obstáculos y poder establecer fronteras de tolerancia.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

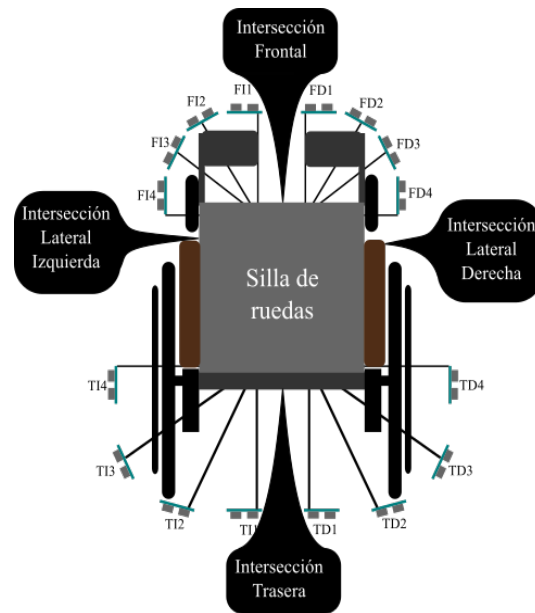


Figura 5.8. Esquema puntos ciegos en intersecciones.

Los resultados de las pruebas se muestran a continuación:

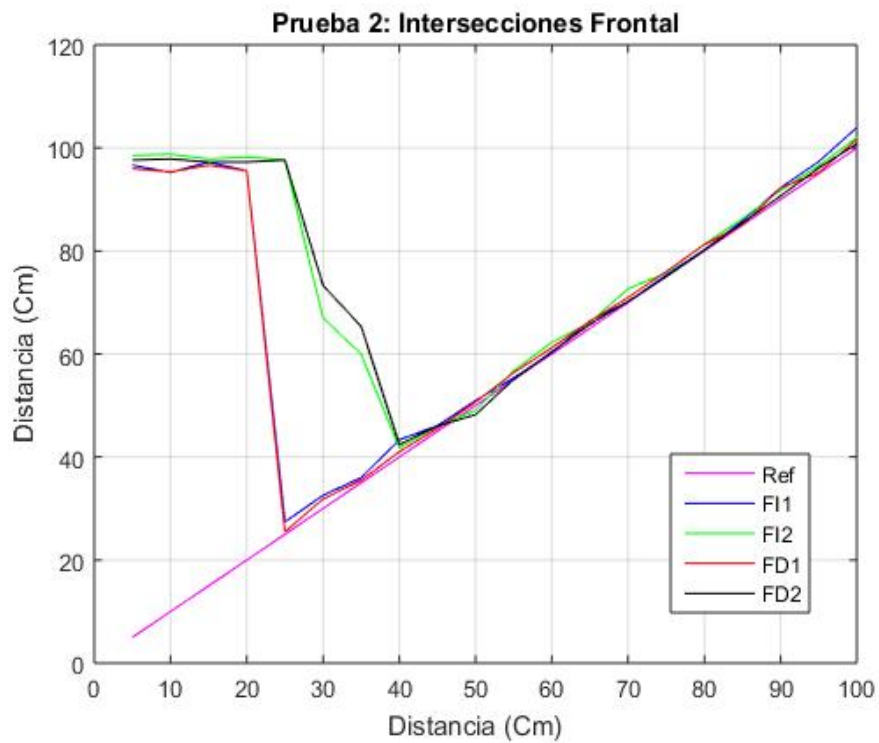
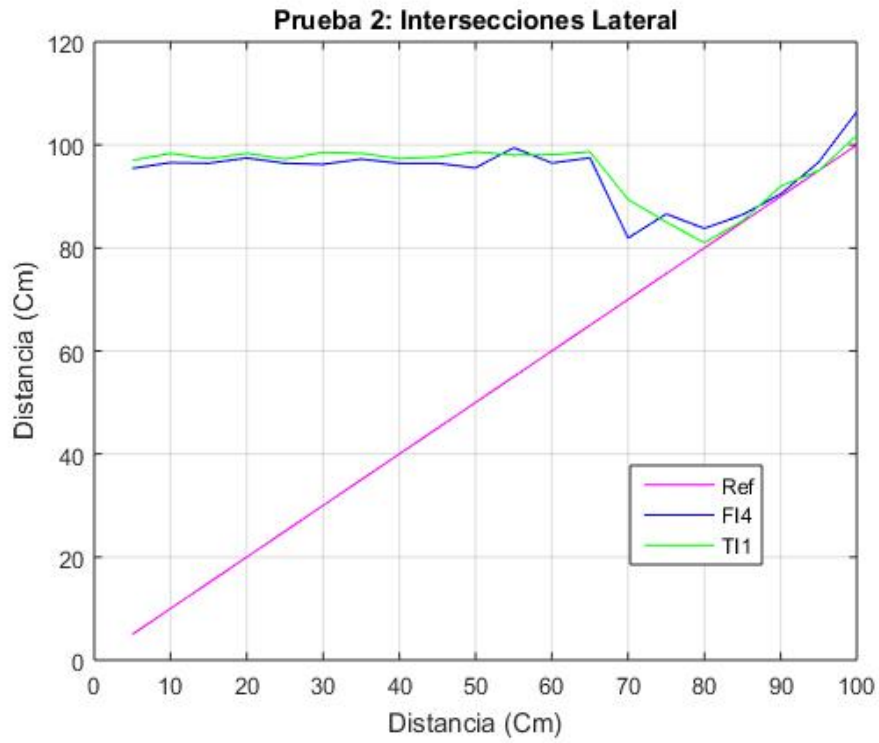


Figura 5.9. Puntos ciegos en intersecciones frontal.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---

Cabe resaltar que, para los laterales por la simetría de la silla de ruedas las pruebas que se hagan del lado izquierdo serán equivalentes al lado derecho.

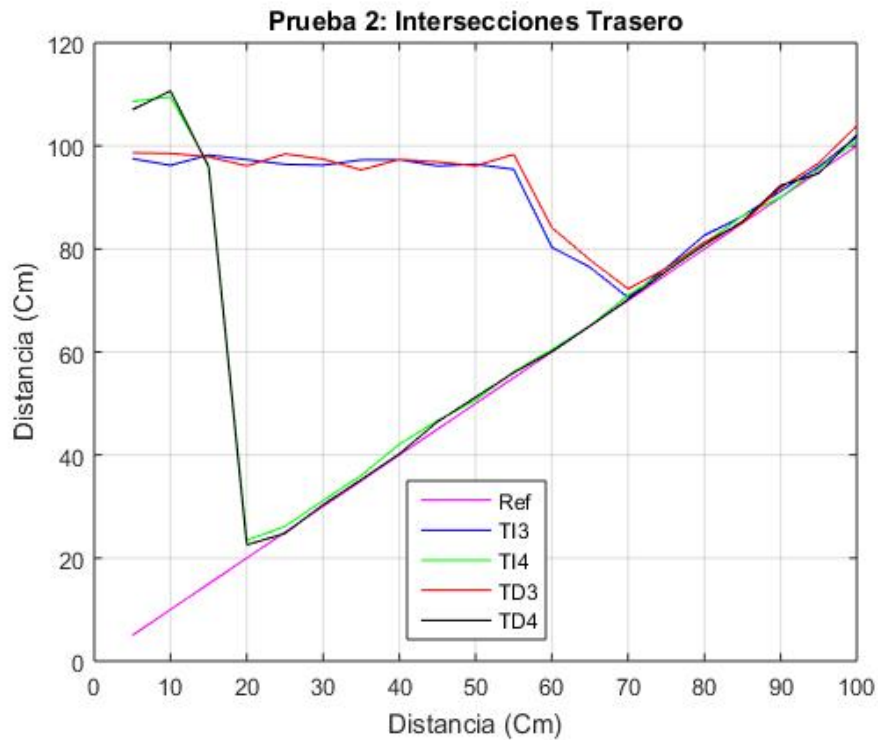


**Figura 5.10.** *Puntos ciegos en intersecciones lateral.*

Así mismo se observa el comportamiento de los sensores en la intersección trasera en la Figura 5.11.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---



**Figura 5.11.** *Puntos ciegos en intersecciones trasero.*

### **-Prueba 3: Rangos de transmisión y recepción:**

Una vez establecida la frontera donde inicia la medición de distancia, se debe determinar también la distancia máxima en la que los sensores comenzaran a detectar obstáculos que puedan convertirse en amenazas para el movimiento de la silla de ruedas.

Para este fin se ubicaron obstáculos alrededor de la silla de ruedas desde la distancia de guarda establecida anteriormente y se comenzaron a alejar hasta una distancia considerable, más o menos 2 metros, registrando las mediciones de cada sensor cada 5 centímetros.

En el esquema, mostrado en la Figura 5.12, se ilustra gráficamente la forma en que se ubicaron los obstáculos frente al prototipo en esta prueba.



## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

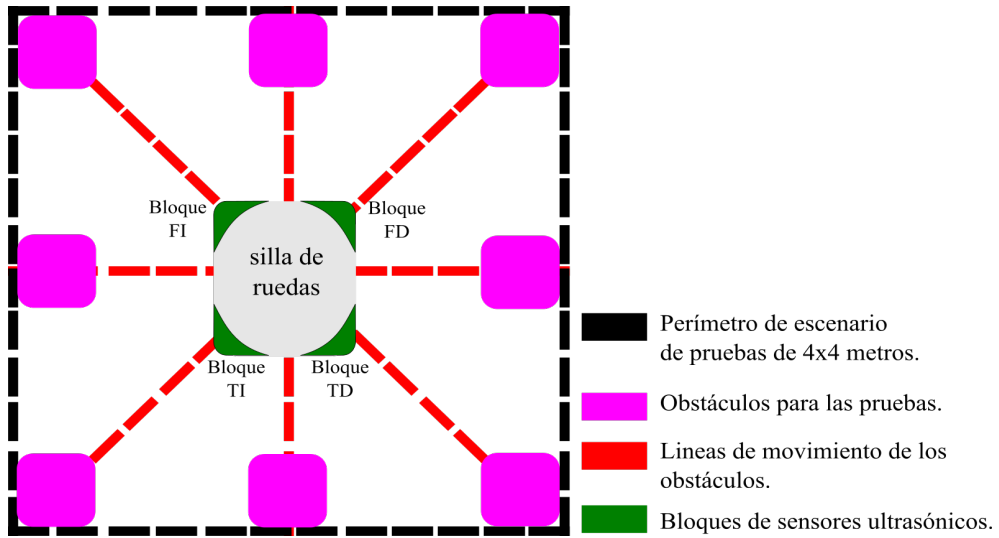


Figura 5.12. Esquema de prueba de rangos de recepción de los sensores ultrasónicos.

Los resultados de la prueba se muestran en la Figura 5.13. para los 4 sensores frontales Izquierdos.

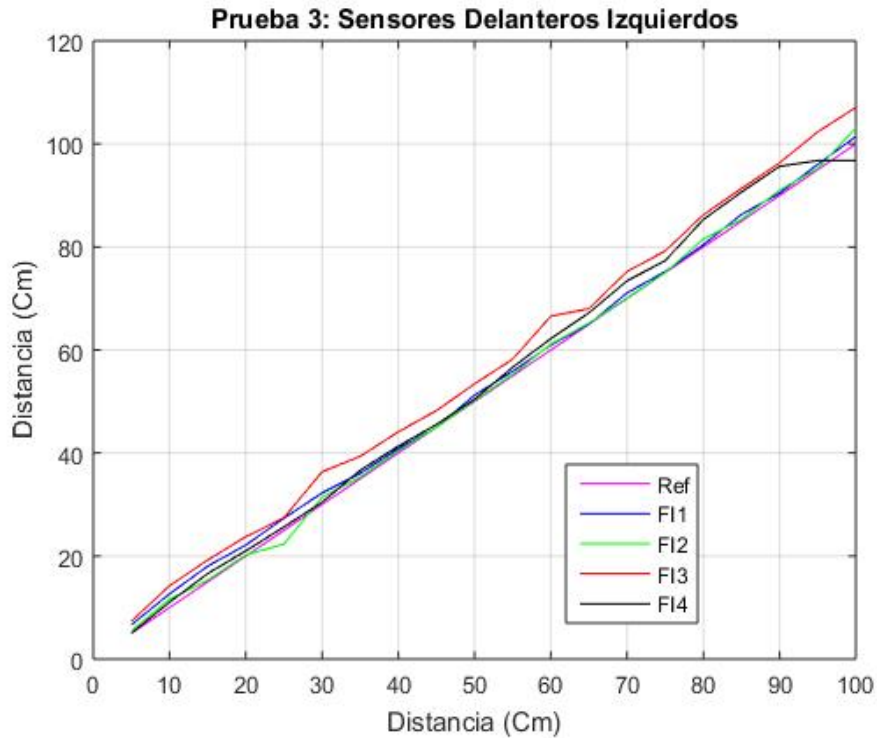
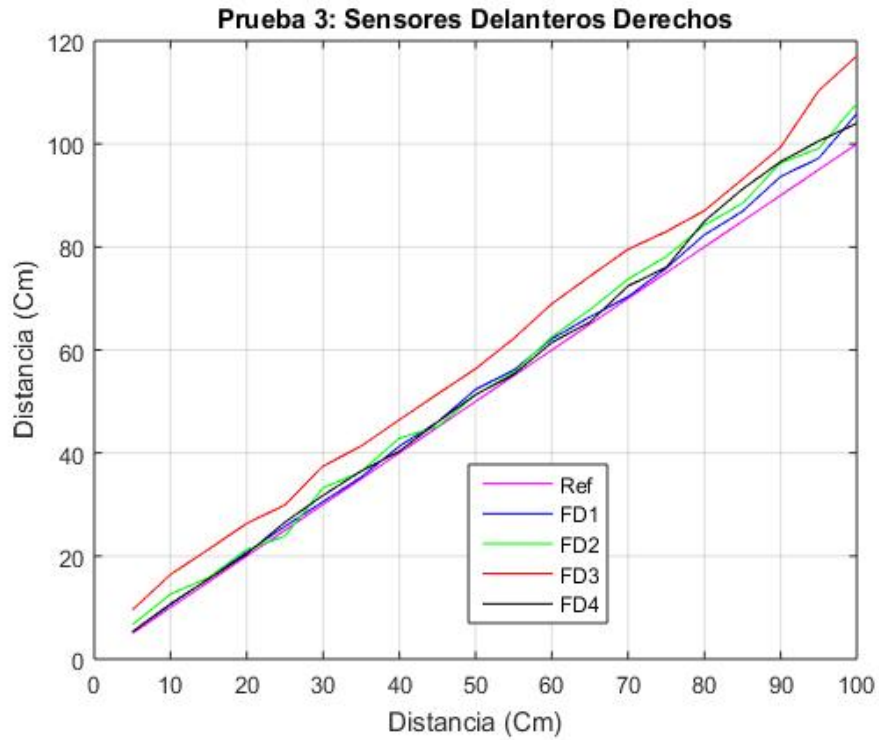


Figura 5.13. Rangos de recepción bloques de sensores frontales izquierdos.

Lo propio se muestra en la Figura 5.14. para los sensores delanteros derechos.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---

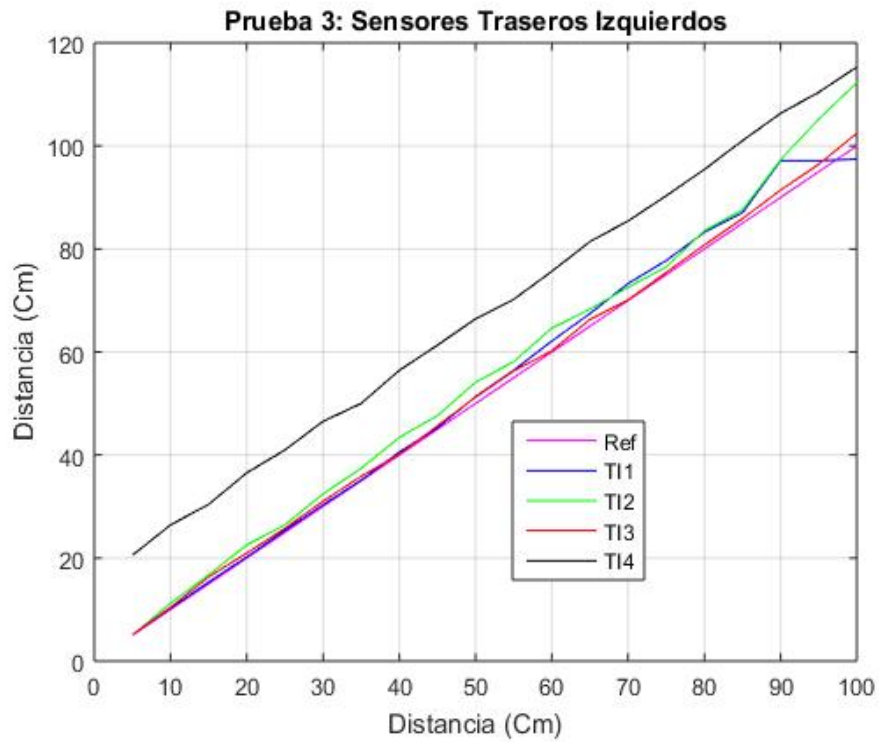


**Figura 5.14.** Rangos de recepción bloques de sensores frontales derechos.

También se muestra el comportamiento de los 8 sensores traseros en la Figura 5.15 y Figura 5.16; esta prueba se hizo con los 16 sensores ultrasónicos activos simultáneamente, esto para visualizar los rangos completos de recepción y transmisión de las ondas ultrasónicas.

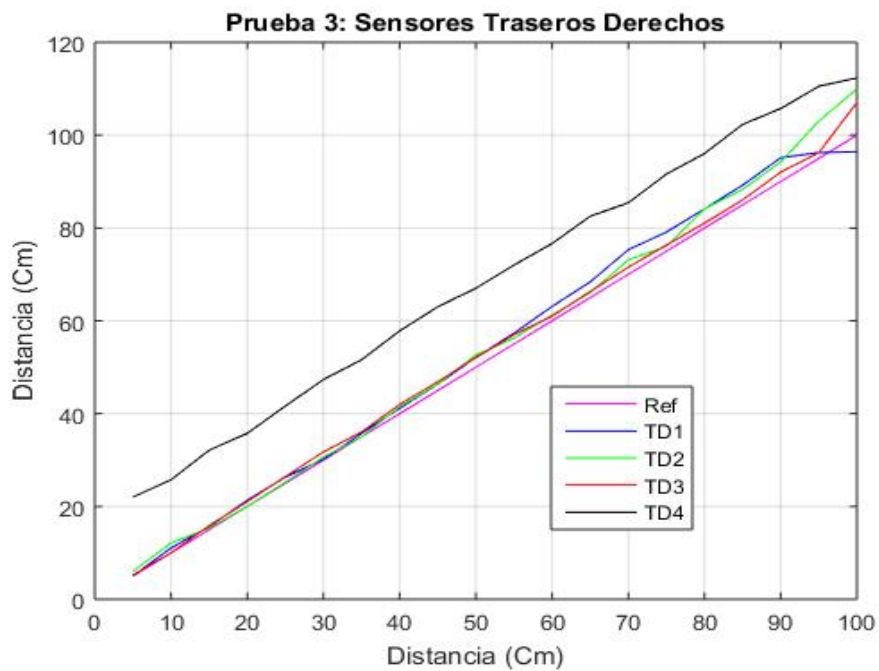
## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---



**Figura 5.15.** Rangos de recepción bloques de sensores traseros izquierdos.

Los sensores traseros derechos muestran su comportamiento en la Figura 5.16.



**Figura 5.16.** Rangos de recepción bloques de sensores traseros derechos.

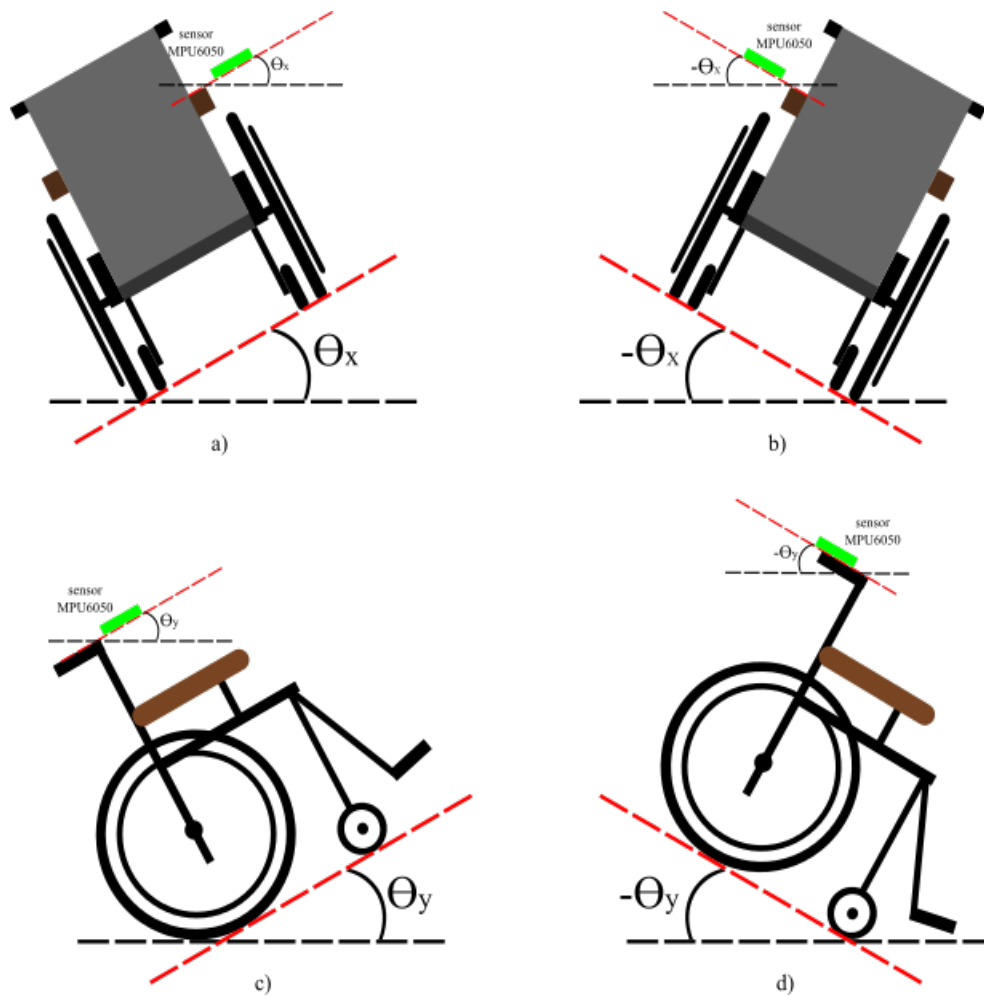
## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---

### -Prueba 4: Planos inclinados:

Es importante conocer la forma en que reaccionan los sensores ultrasónicos en simultaneo con el módulo MPU6050 cuando la silla de ruedas transita por superficies con inclinaciones. Para esto se dejaron activos los 16 sensores ultrasónicos y el módulo MPU6050 y se ubicó la silla de ruedas en una superficie como se muestra en la Figura 5.17.

Para las gráficas 5.18 y 5.19 el eje horizontal representa cada sensor y el eje vertical la distancia media por el sensor.

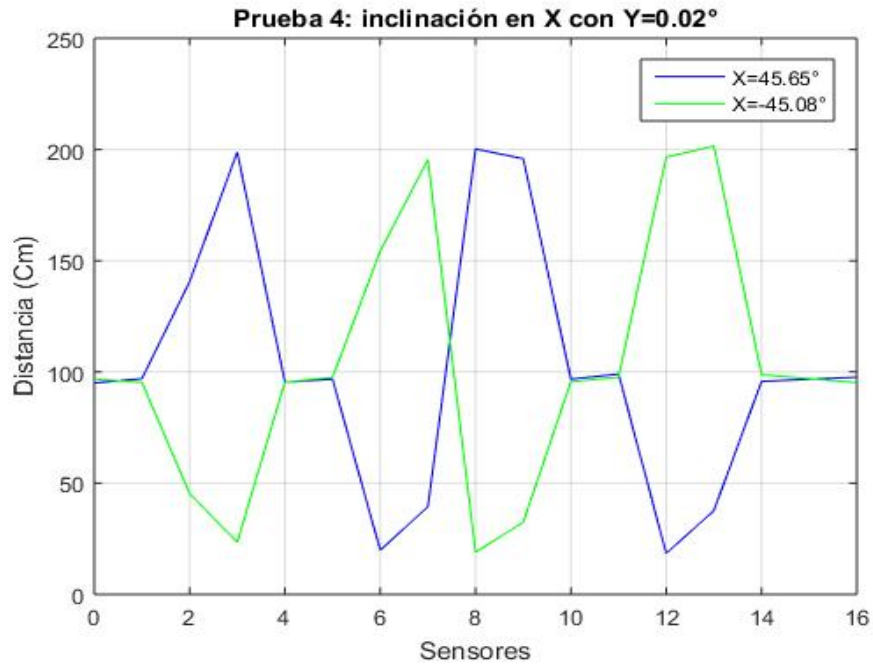


**Figura 5.17.** Superficies inclinadas. a) Eje X positivo; b) Eje X negativo; c) Eje Y positivo; d) Eje Y negativo.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---

Primero se presentan los resultados para un ángulo fijo en el eje X, en las Figura 5.18.

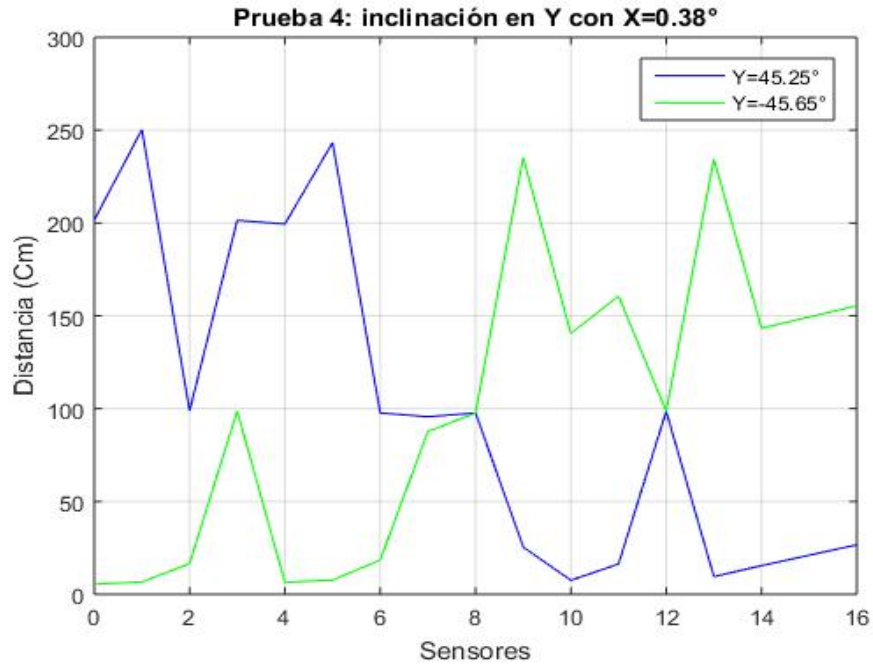


**Figura 5.18.** Superficie inclinada eje X (Ángulo  $\pm 45^\circ$ ).

Se repite el mismo proceso para variaciones de ángulos en el eje Y, ver Figura 5.19.

## 5.2 Sistema de adquisición de datos.

---



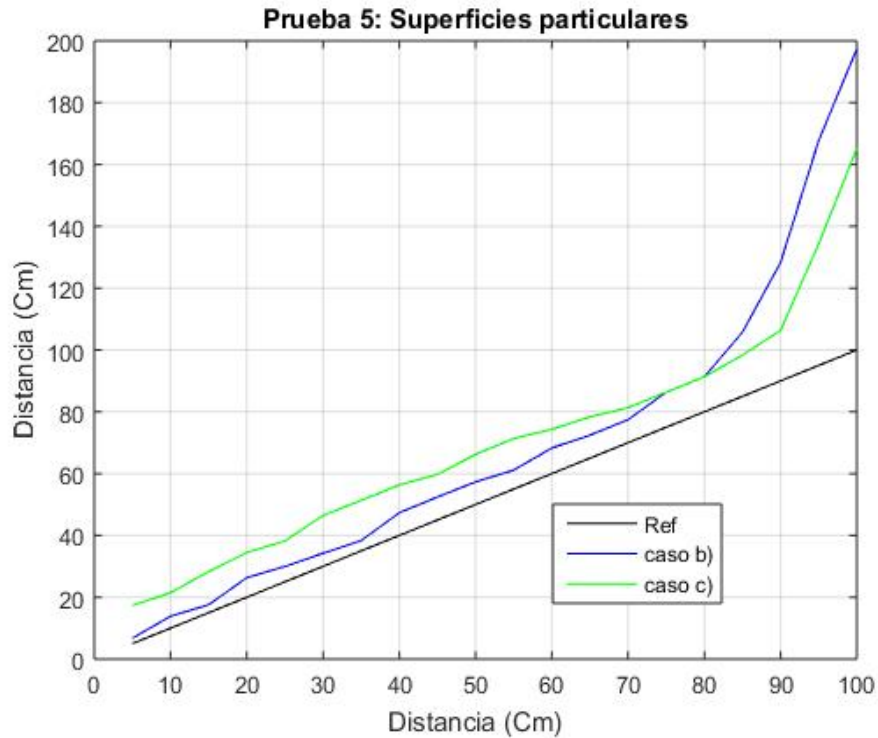
**Figura 5.19.** Superficie inclinada eje Y (Ángulo  $\pm 45^\circ$ ).

### -Prueba 5: Superficies particulares:

Finalmente es necesario caracterizar el comportamiento de los sensores cuando se presenten los casos b) y c) que se ilustran en la Figura 3.17. La prueba se hace únicamente para los sensores frontales del lado izquierdo de la silla de ruedas; ya que, lo que se quiere observar es el efecto que producen en las ondas ultrasónicas obstáculos con superficies de características especiales. Estos efectos sucederán de forma equivalente en los demás sensores ultrasónicos.

### 5.3 Procesamiento de datos.

---



**Figura 5.20.** *Superficies particulares. caso b) Obstáculo inclinado; caso c) Superficie y obstáculos con inclinación.*

### 5.3. Procesamiento de datos.

La segunda parte del prototipo consta en los procesos que deben desarrollarse en la Raspberry Pi 3 para el control de la diadema Emotiv Epoc y la comunicación con la tarjeta *Stellaris Launchpad*. Preparando todos los datos que generan los sensores dentro de la Raspberry para realizar operaciones matemáticas con ellos.

#### 5.3.1. Adquisición datos de la diadema Emotiv Epoc.

Para la adquisición de los datos puros de los 14 electrodos que posee la diadema Emotiv Epoc se usa la librería de Python suministrada por Ozan Caglayan, la cual entrega los datos en una tabla y van variando conforme las señales del cerebro varían a medida que el usuario piensa.

### 5.3 Procesamiento de datos.

En la Figura 5.21, se observa el funcionamiento de la librería a través de la interfaz gráfica del sistema operativo Raspbian mediante el uso de Python 2.7.

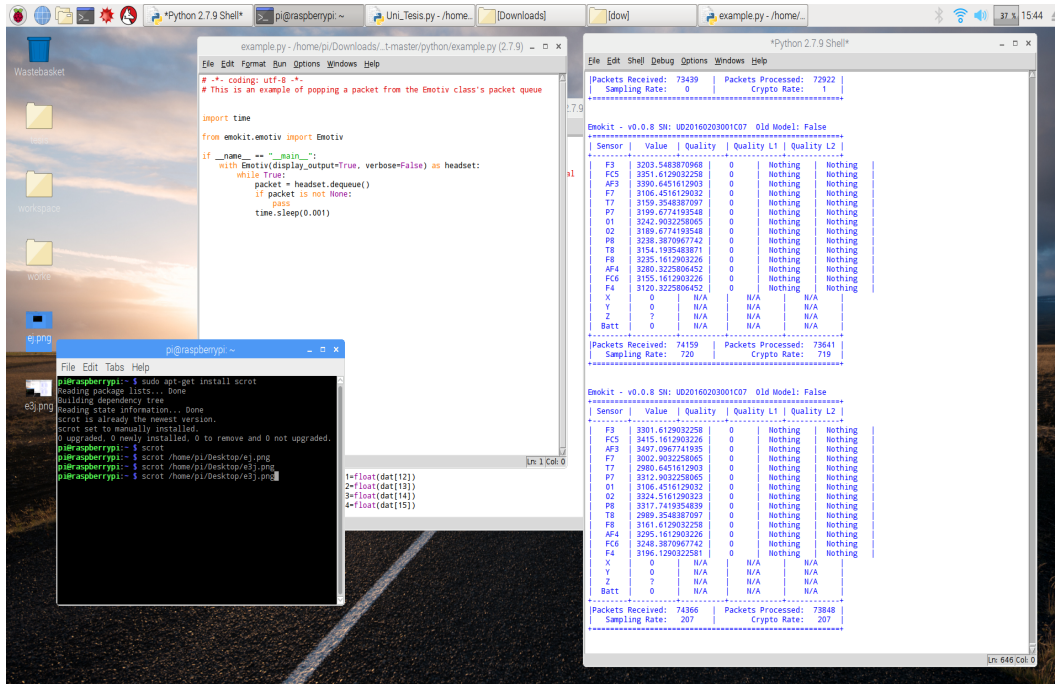


Figura 5.21. Adquisición de datos a través de la Raspberry Pi 3.

Cuando la diadema está conectada transmitiendo datos, pero con los electrodos al aire, los valores numéricos que se observan están entre los 3000 y 4000, como se puede ver en la Figura 5.22.



### 5.3 Procesamiento de datos.

```
Emokit - v0.0.8 SN: UD20160203001C07 Old Model: False
```

Sensor	Value	Quality	Quality L1	Quality L2
F3	3340.3225806452	0	Nothing	Nothing
FC5	4466.1290322581	0	Nothing	Nothing
AF3	3023.5483870968	0	Nothing	Nothing
F7	3959.6774193548	0	Nothing	Nothing
T7	4441.2903225806	0	Nothing	Nothing
P7	2720.0000000000	0	Nothing	Nothing
O1	3017.0967741935	0	Nothing	Nothing
O2	4078.3870967742	0	Nothing	Nothing
P8	3838.7096774194	0	Nothing	Nothing
T8	3710.3225806452	0	Nothing	Nothing
F8	3450.3225806452	0	Nothing	Nothing
AF4	3348.7096774194	0	Nothing	Nothing
FC6	4183.5483870968	0	Nothing	Nothing
F4	3904.8387096774	0	Nothing	Nothing
X	0	N/A	N/A	N/A
Y	0	N/A	N/A	N/A
Z	?	N/A	N/A	N/A
Batt	0	N/A	N/A	N/A

```

Packets Received: 86064 |   Packets Processed: 85547
Sampling Rate: 205     |   Crypto Rate: 206

```

Figura 5.22. Datos transmitidos por la diadema Emotiv Epoc al aire.

Una vez se hidratan los electrodos con la solución salina y el usuario se coloca la diadema en la cabeza, los datos comienzan a variar a media que el usuario comienza a pensar en una determinada acción, este comportamiento se muestra en la Figura 5.23.

```
Emokit - v0.0.8 SN: UD20160203001C07 Old Model: False
```

Sensor	Value	Quality	Quality L1	Quality L2
F3	810.3225806452	0	Nothing	Nothing
FC5	818.7096774194	0	Nothing	Nothing
AF3	810.3225806452	0	Nothing	Nothing
F7	818.7096774194	0	Nothing	Nothing
T7	819.0322580645	0	Nothing	Nothing
P7	2413.8709677419	0	Nothing	Nothing
O1	818.7096774194	0	Nothing	Nothing
O2	4054.1935483871	0	Nothing	Nothing
P8	3849.6774193548	0	Nothing	Nothing
T8	818.7096774194	0	Nothing	Nothing
F8	814.1935483871	0	Nothing	Nothing
AF4	2570.6451612903	0	Nothing	Nothing
FC6	4290.3225806452	0	Nothing	Nothing
F4	3962.2580645161	0	Nothing	Nothing
X	0	N/A	N/A	N/A
Y	0	N/A	N/A	N/A
Z	?	N/A	N/A	N/A
Batt	0	N/A	N/A	N/A

```

Packets Received: 85859 |   Packets Processed: 85341
Sampling Rate: 207     |   Crypto Rate: 207

```

Figura 5.23. Datos transmitidos por la diadema Emotiv Epoc con usuario activo.

### 5.3 Procesamiento de datos.

Los datos varían desde 600 cuando la señal de transmisión es buena hasta los 4000 cuando los electrodos están al aire. De los valores puros entregados por la diadema no es posible deducir cual acción es la que está pensando el usuario, para esto es necesario implementar un algoritmo de clasificación basado en el funcionamiento de las señales del cerebro.

#### 5.3.2. Interfaz de usuario:

Se diseñó una interfaz de usuario para la visualización de algunas funciones de la librería EDK de la diadema, fue posible usar en la Raspberry los módulos que verifican la señal de la diadema y la calidad de la conexión de los electrodos en la cabeza del usuario.

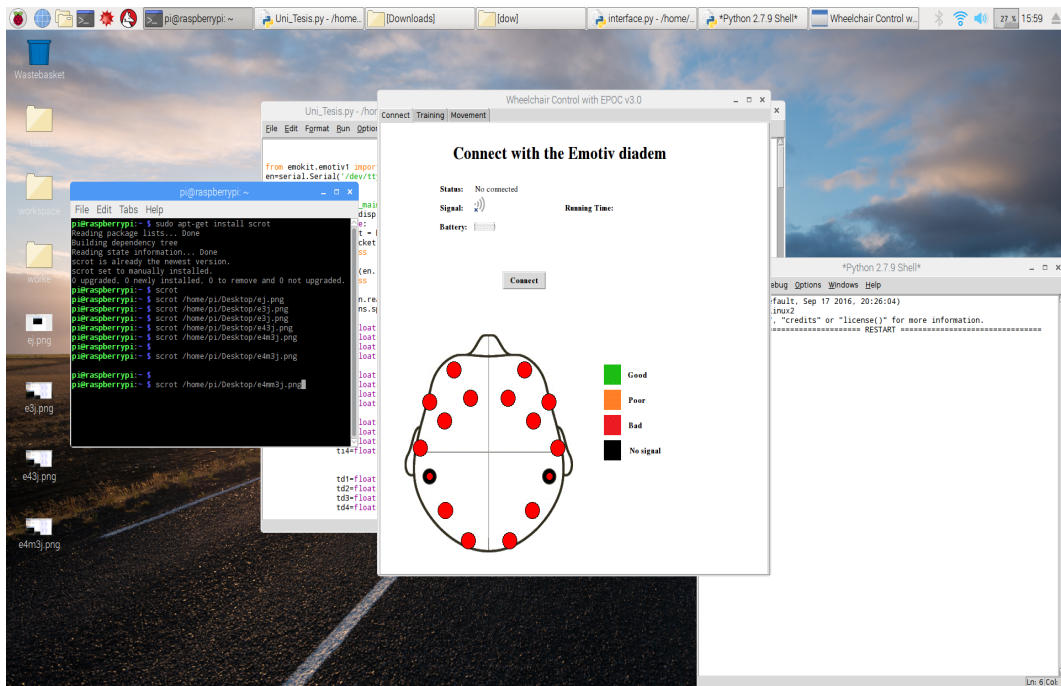
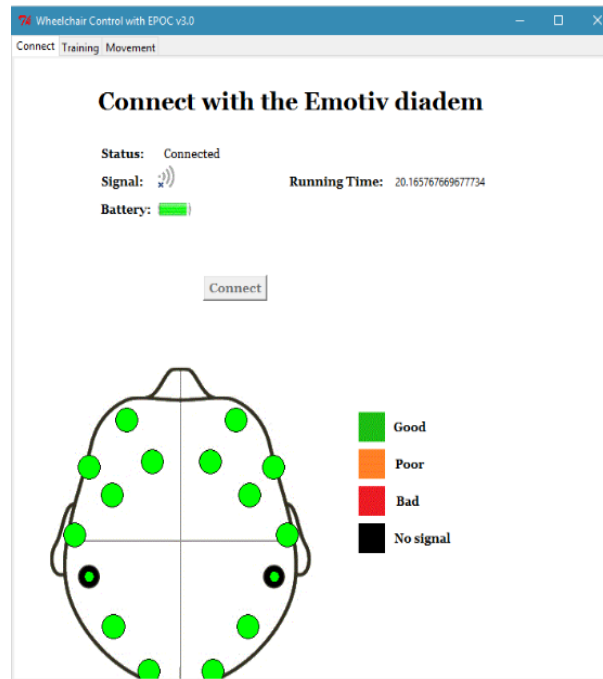


Figura 5.24. Inicialización interfaz gráfica Raspberry Pi 3.

Una vez el usuario sitúa la diadema en su cabeza, la interfaz se activa y comienza a detectar el nivel de carga de la batería de la diadema, la recepción de señal Bluetooth entre el transmisor y el receptor de la Emotiv EPOC. Como se expone en la Figura 5.25.

### 5.3 Procesamiento de datos.

---



**Figura 5.25.** *Conexión de electrodos Raspberry Pi 3.*

El color verde indica que los electrodos están muy bien ubicados sobre el cuero cabelludo del usuario, rojo cuando el electrodo está completamente mal posicionado y negro cuando no hay señal (puede ser por desconexión o porque la diadema está apagada); este módulo de la librería EDK también cuenta con un contador que da el tiempo que dura la diadema transmitiendo datos.

La librería también cuenta con módulos que contienen un algoritmo de clasificación de datos que sirve para reconocer cuando el usuario está pensando en empujar o jalar. Lastimosamente la librería tiene algunos problemas de compatibilidad con el sistema operativo Rasbian Jessie, por lo que se probó el funcionamiento de estas características usando un ordenador personal con Windows (ver Figura 5.26).

### 5.3 Procesamiento de datos.

---

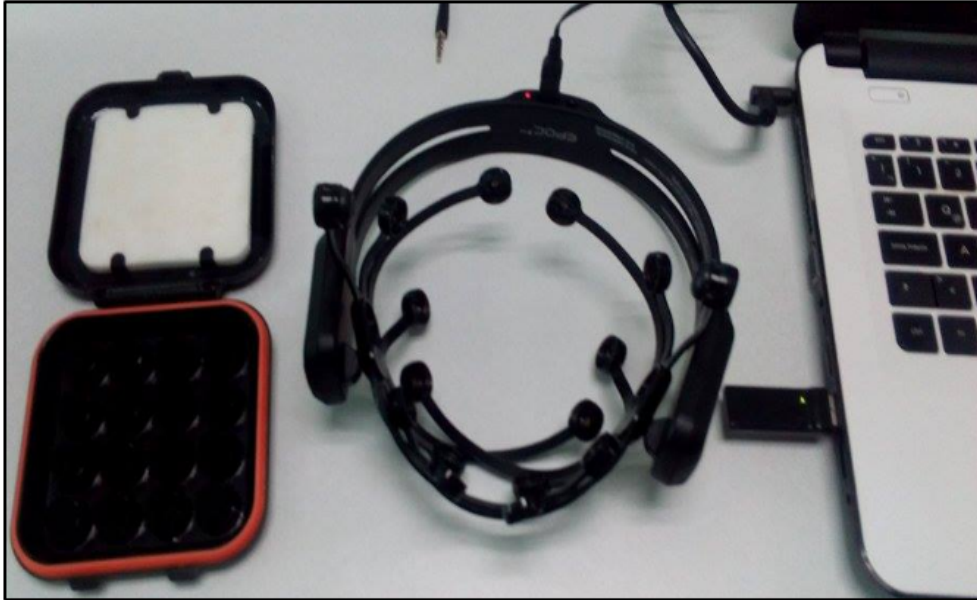


Figura 5.26. Conexión Emotiv EPOC con PC (Windows).

Una vez en Windows se continuo con el diseño de una interfaz que facilite entrenar la diadema para reconocer cuando el usuario está pensando en empujar o halar. En la Figura 5.27, se observa que en la interfaz están contenidos todos los pasos a seguir para la fase de entrenamiento de la diadema.

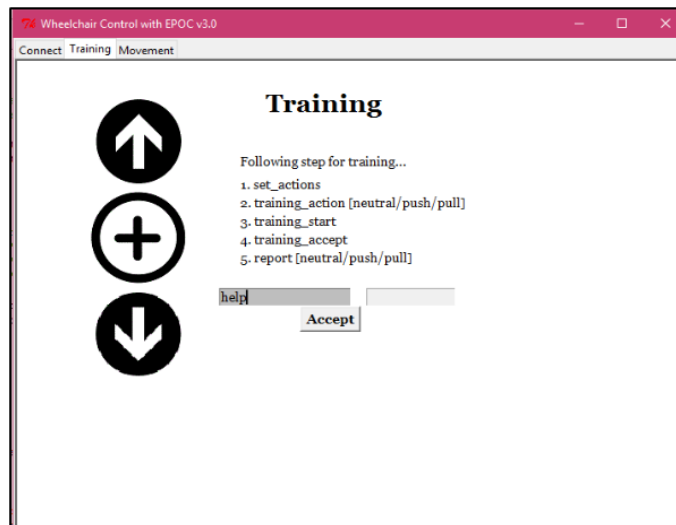


Figura 5.27. Interfaz de entrenamiento Emotiv EPOC.

Primero debe escribirse la orden *set – actions* para activar los módulos, luego se elige entre

---

### 5.3 Procesamiento de datos.

---

las tres opciones por ejemplo *training – action* para el primer recuadro de texto y *push* para el segundo. Enseguida debe escribirse *training – start* y se debe esperar entre tres y cuatro segundos mientras el usuario piensa en la acción elegida y se escribe *training – accept* para finalmente escribir *report* y *push* obteniendo el grado de entrenamiento de la acción que va de 0 a 7 (entre más se acerque al 7 mejor es el entrenamiento). El resultado se observa en la Figura 5.28.

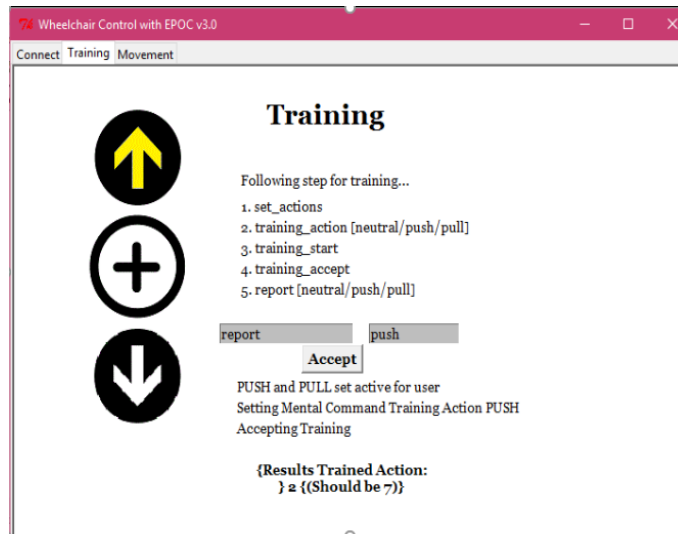


Figura 5.28. Acción de entrenamiento push diadema Emotiv Epoc.

## Capítulo 6

# Conclusiones.

### 6.1. Introducción

Debe hacerse el análisis de los datos obtenidos en las pruebas del prototipo desarrollado para poder establecer las particularidades que integran el diseño del sistema de medición. Además de enlistar las dificultades más relevantes que tuvieron que ser superadas para obtener un dispositivo funcional y a partir de ellas dar recomendaciones para futuras mejoras.

### 6.2. Análisis de resultados y Conclusiones.

El sistema se divide en dos grandes bloques. El primero, la adquisición de datos, compuesto por toda la instrumentación y el control de la misma y el segundo el que consta del sistema de procesamiento de datos integrado por la diadema Emotiv Epoc y la extracción de los datos del sistema total en la Raspberry Pi 3.

## 6.2 Análisis de resultados y Conclusiones.

---

### 6.2.1. Sistema de Adquisición de datos.

#### a) Caracterización de sensores.

Para obtener una medida más real de la distancia por medio de los sensores ultrasónicos no basta solo con la aplicación de la ecuación de velocidad (ecuación 3.7) con la que se puede convertir el tiempo de vuelo de las señales ultrasónicas a distancia, sino que, es necesario establecer de forma empírica una ecuación de ajuste para obtener una respuesta de los sensores más acorde con la realidad. Dicha formula se presenta en la ecuación 5.1 y se agregó en el código que controla los ultrasónicos para las mediciones posteriores. De la Figura 5.1 se puede observar que los datos se van alejando del valor de referencia a medida que la distancia del sensor al obstáculo aumenta; aproximadamente después de los 140 cm el error se hace notable.

En la Figura 5.4 se observa el resultado de implementar el filtro complementario para el módulo MPU6050, el cual está compuesto por dos ecuaciones recursivas y correlacionadas que necesitan varias iteraciones para dar un resultado final, lo cual a pesar de que entrega una respuesta muy similar a la referencia hace que la medición sea demasiado lenta (casi 10 veces más lenta) comparado con el uso del puro giroscopio o el puro acelerómetro; por eso, para el desarrollo del prototipo se eligió el giroscopio del módulo MPU6050 ya que comparando su respuesta (Figura 5.2) con la del acelerómetro (Figura 5.3) es el menos se aleja de la referencia.

#### b) Prueba 1: Puntos ciegos.

La prueba de los puntos ciegos se hizo para determinar las distancias mínimas en que los sensores, distribuidos por la geometría de la silla de ruedas, miden de manera efectiva la presencia de un obstáculo y establecer una región mínima en la que se puede garantizar la detección. De la Figura 5.6 y Figura 5.7 se puede extraer para cada sensor las distancias mínimas para la detección de un obstáculo, las cuales se muestran en la Tabla 6.1. Estas pruebas se hicieron con inclinación de  $0^\circ$  en ambos ejes, es decir, para superficies planas.

## 6.2 Análisis de resultados y Conclusiones.

---

**Tabla 6.1.** *Distancia mínima de guarda.*

Sensor	Distancia [Cm]
FI1	20
FI2	21
FI3	60
FI4	100
TI1	70
TI2	50
TI3	25
TI4	40

Por simetría de la silla de ruedas y la ubicación de los sensores se tienen las mismas distancias para los bloques de sensores ubicados en la parte derecha de la silla. Las distancias mostradas en la Tabla 6.1 dan cuenta de la distancia más cercana posible en la que se puede garantizar que los sensores detecten de forma efectiva un obstáculo; de esta tabla, por ejemplo, para el sensor frontal 4 (y como se puede ver también en la Figura 5.6) la distancia es muy grande debido a que su ubicación en la silla no permite que su región de recepción de señal se intercepte con las de los demás sensores, para solucionar este problema se diseñó la segunda prueba.

Se puede concluir que los datos obtenidos en la Tabla 6.1 delimitan la región de guarda mínima en la que se logrará una efectiva detección de obstáculos tanto para los bloques de sensores izquierdos como para los derechos.

### c) Prueba 2: Intersecciones.

Esta prueba se hizo para complementar la prueba anterior; se mide en los puntos intermedios entre bloques de sensores para obtener las distancias en que los rangos de recepción se intersecan. De igual forma, se obtiene una zona de guarda delimitada por las distancias en que cada bloque encuentra el obstáculo.

Para estas pruebas se usó un obstáculo de forma cubica de dimensiones 32[cm]x54[cm]x10[cm]



## 6.2 Análisis de resultados y Conclusiones.

---

**Tabla 6.2.** *Distancias de guarda intersecciones 1.*

Zona frontal	Distancia [Cm]
FI1	25
FI2	40
FD1	25
FD2	40
Zona lateral	
FI4	80
TI1	80
Zona trasera	
TI3	70
TI4	20
TD3	70
TD4	20

y su lado más corto se colocó en la línea media entre bloques de sensores (algo similar se hizo para la prueba 1 entre cada sensor). De las Tablas 6.1 y 6.2 se puede tener una zona de guarda mínima más completa en la que es posible garantizar la detección de obstáculos alrededor de todo el perímetro que rodea la silla de ruedas.

**Tabla 6.3.** *Distancias de guarda intersecciones 2.*

Sensores frontales	Distancia [Cm]	Sensores traseros	Distancia [Cm]
FI1	25	TI1	70
FI2	40	TI2	50
FI3	60	TI3	70
FI4	80	TI4	40
FD1	25	TD1	70
FD2	40	TD2	50
FD3	60	TD3	70
FD4	80	TD4	40

Las distancias vistas en la Tabla 6.3 a simple vista parecen grandes, pero no lo son teniendo en cuenta las dimensiones de la silla de ruedas. En la Tabla 6.1 se consignan las distancias más cercanas a la silla de ruedas en las que los sensores de cada bloque entregan mediciones confiables acerca de la posición de los obstáculos frente a ellos; mientras que, en la Tabla 6.3 se presenta una frontera de guarda en la que se cubre todo el perímetro que rodea la

## 6.2 Análisis de resultados y Conclusiones.

---

silla de ruedas. En conclusión, se obtienen dos fronteras de medición de detección efectiva de obstáculos.

### d) Prueba 3: Rangos de transmisión y recepción.

Esta prueba se realizó colocando el obstáculo frente a cada sensor y se alejó hasta los dos metros; esto se hizo para caracterizar la medición de cada sensor en distancias más largas. En las Figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 se observa la respuesta para cada sensor hasta los 100 [cm] ya que al obtener los datos se vio que no se alejan demasiado de la referencia. La idea principal es mostrar el rango medición de cada sensor.

Para los sensores traseros TI4 (izquierdo 4) y TD4 (derecho 4), mostrados en las Figuras 5.15 y 5.16, las distancias aparecen más de 10 [cm] arriba de la referencia, esto se debe a que están ubicados debajo del asiento de la silla en medio de las ruedas traseras, es decir, alrededor de 16 [cm] atrás de los demás sensores. El sensor ultrasónico HC SR04 puede medir hasta 4 [m] según su hoja de datos [16], pero para la aplicación diseñada se toma como distancia máxima de detección 2 [m]; esto por los escenarios en los que normalmente se moviliza una silla de ruedas en la vida real.

### e) Prueba 4: Planos inclinados.

La prueba de planos inclinados se realizó con los 16 sensores ultrasónicos y el giroscopio activos, con inclinaciones  $45^\circ$  para evaluar la forma en que los sensores detectan la distancia en una situación extrema como esta y también la confiabilidad del giroscopio.

Para las Figuras 5.18 y 5.19 el eje horizontal representa el número de sensores ultrasónicos como se muestra en la Tabla 6.4 y el eje vertical muestra la distancia que midió cada sensor. De las Figuras se puede ver que los sensores ubicados del lado opuesto al ángulo de inclinación miden distancias muy grandes, mientras que, los demás muestran distancias alrededor de los 20 [cm]; el comportamiento del sistema para la inclinación de  $-45^\circ$  es básicamente el inverso.

## 6.2 Análisis de resultados y Conclusiones.

---

**Tabla 6.4.** *Distancias de guarda en planos inclinados.*

		<b>X=45.65°</b>	<b>X=-45.25°</b>	<b>Y=45.25°</b>	<b>X=-45.65°</b>
Número sensor	Sensor	Distancia[Cm]	Distancia[Cm]	Distancia[Cm]	Distancia[Cm]
1	FI1	98	99	250	7
2	FI2	120	49	100	10
3	FI3	200	25	201	100
4	FI4	98	97	200	6
5	FD1	98	98	245	6
6	FD2	25	197	99	10
7	FD3	40	120	96	90
8	FD4	200	25	98	98
9	TI1	195	33	250	235
10	TI2	99	96	6	145
11	TI3	100	99	10	98
12	TI4	25	197	100	98
13	TD1	40	201	10	240
14	TD2	97	100	15	145
15	TD3	98	97	20	150
16	TD4	99	96	25	153

Todos los datos presentados en la Tabla 6.4 fueron redondeados para entregar un valor exacto que pueda ser usado como referencia para establecer zonas limites cuando se presenten caso como los simulados en esta prueba. Como se evidencia en la prueba 4 al usar un ángulo de inclinación tan pronunciado el comportamiento de los sensores se lleva al extremo. Con esta medición se deja caracterizado el tipo de información que se puede obtener cuando la silla de ruedas se enfrenta superficies con inclinaciones.

### f) Prueba 5: Superficies particulares.

También, es necesario dejar una base de datos que contenga el comportamiento del sensor ultrasónico cuando se presenten los casos b) y c) de la Figura 3.17; para esto se probó cada caso y se obtuvo la información mostrada en la Figura 5.20. En ambos casos se evidencia que la superficie irregular agrega distorsión a la detección del obstáculo que va creciendo a medida que la distancia aumenta; este es un factor que debe tenerse muy en cuenta al momento de realizar una discriminación de los datos cuando intente agregarse algún algoritmo

## 6.2 Análisis de resultados y Conclusiones.

---

de navegación autónoma.

Como se evidencia en los resultados, se puede diseñar y construir un prototipo funcional de sistema de adquisición de datos capaz de suministrar valores de la distancia a la que se encuentra algún obstáculo que represente un riesgo para el movimiento de una silla de ruedas, así como también, medir los ángulos de inclinación (en los ejes X e Y) de las superficies por donde se moviliza la silla de ruedas; todo controlado por la tarjeta de desarrollo *Stellaris Launchpad* de *Texas Instruments*.

### 6.2.2. Procesamiento de datos.

Para implementar la diadema Emotiv EPOC es necesario incluir las librerías EDK para Python diseñadas para varios sistemas operativos, entre ellos Linux y Windows. La Raspberry Pi 3 brinda las mejores características para cumplir con esta tarea ya que cuenta con Raspbian Jessie (sistema operativo basado en Linux) con el que fue posible agregar las funciones de la diadema al diseño del prototipo.

Se utilizó la versión de la librería que entrega los valores brutos, como se muestra en las Figuras 5.22 y 5.23, que miden las señales de los electrodos de la diadema; primero porque la librería que interpreta las señales del cerebro, suministrada por el fabricante, presenta varias incompatibilidades con el sistema Raspbian Jessie y segundo, porque la aplicación desarrollada requiere más libertad en la clasificación de los datos, es decir, que se deja abierta la posibilidad de agregar algoritmos inteligentes en futuras mejoras al prototipo.

Por el momento, se acopló la lectura de los electrodos de la diadema al sistema de adquisición de datos diseñado mediante el uso de la tarjeta Raspberry Pi 3; además se diseñó una interfaz gráfica capaz de usar el módulo de la librería EDK que comprueba la calidad de la señal de transmisión de datos de la diadema y la calidad de la conexión de los electrodos sobre el cuero cabelludo del usuario, como se muestra en las Figuras 5.24 y 5.25.

El objetivo de usar la diadema es que el pilotaje o control de la silla de ruedas sea compartido o mixto con el joystick; por eso, se diseñó dentro de la interfaz gráfica una pestaña

## 6.2 Análisis de resultados y Conclusiones.

---

que puede utilizar los módulos de la librería que reconocen cuando el usuario está pensando en empujar o halar, lo cual es equivalente a si el usuario de la silla de ruedas piensa en ir adelante o atrás. Como se muestra en las Figuras 5.27 y 5.28; esta parte de la interfaz por incompatibilidades de versiones entre la librería y el Rasbian se realizó en Windows.

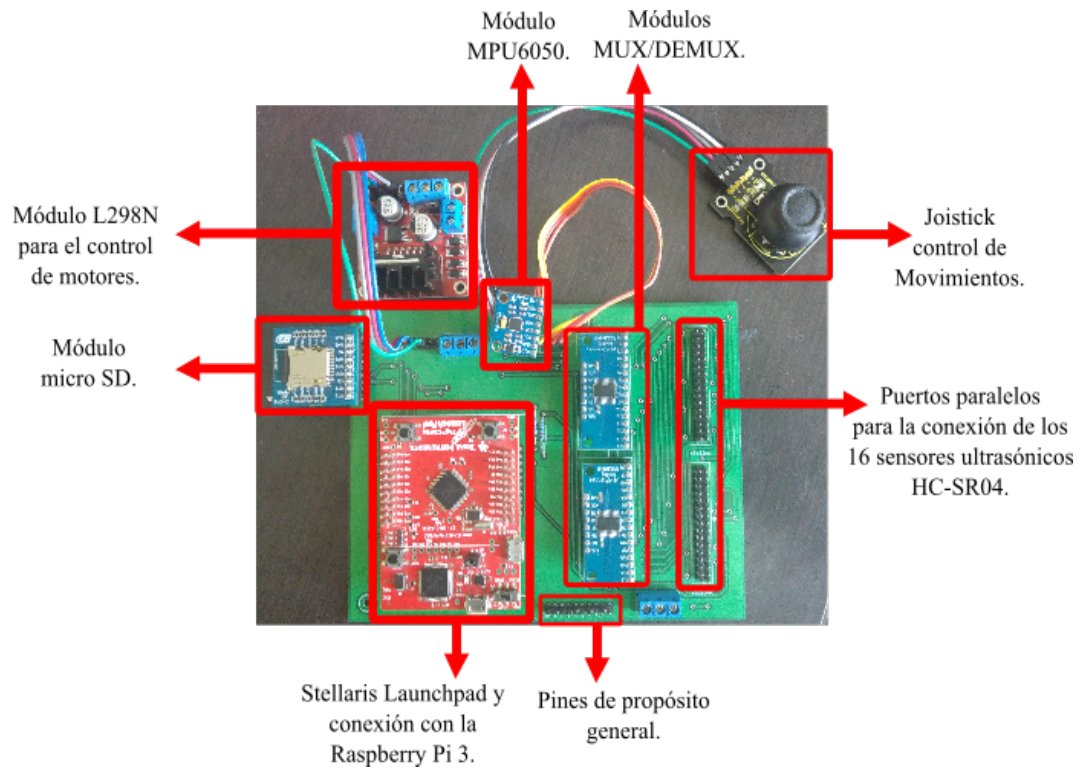
Fue posible acoplar la diadema al sistema de adquisición de datos, dejando abierto el sistema a la implementación de un algoritmo de inteligencia artificial capaz de interpretar los datos brutos entregados por la librería EDK, para lograr cumplir con todas y cada una de las funciones que requiere el control de una silla de ruedas (teniendo en cuenta la teoría existente acerca de las señales emitidas por el cerebro). La navegación semiautónoma consta en la posibilidad que tiene el prototipo de controlar la silla de ruedas de forma compartida, es decir, de manera manual con el joystick y mediante el procesamiento de los datos, de las señales cerebrales, entregados por la diadema y leídos por la librería EDK, la cual también usa un algoritmo de clasificación para la mera lectura de los electrodos, además del diseño de una interfaz gráfica para el usuario de la silla de ruedas.

### 6.2.3. Diseño modular del sistema.

El prototipo fue diseñado de forma modular para poder reemplazar o mejorar las características del mismo en el futuro, facilitando también el acople y desacople del mismo en la estructura de la silla de ruedas. En la Figura 6.1 se muestra el diseño modular del sistema de adquisición de datos.

## 6.2 Análisis de resultados y Conclusiones.

---

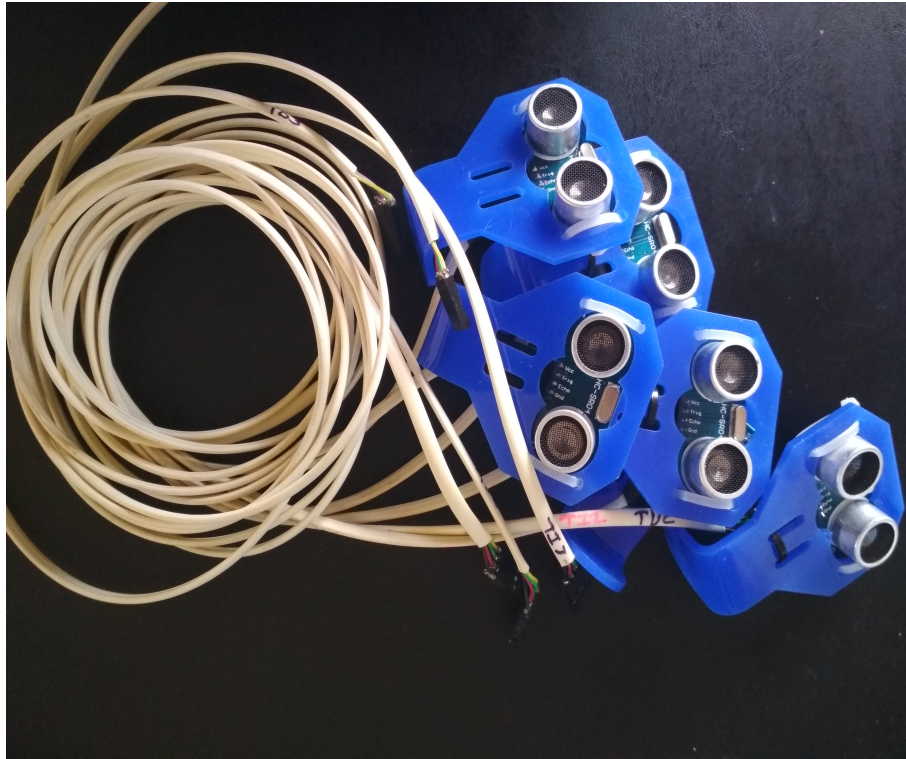


**Figura 6.1.** *Diseño modular del sistema de adquisición de datos.*

Además, en la Figura 6.2 se muestra el cableado utilizado para los sensores ultrasónicos.

## 6.2 Análisis de resultados y Conclusiones.

---



**Figura 6.2.** *Sensores ultrasónicos y cableado.*

Para los sensores ultrasónicos se utilizaron 16 tramos, de un metro cada uno, de cable telefónico de cuatro hilos (cada hilo compuesto de fibras de cobre trenzadas); estos cables son lo suficientemente largos como para rodear la estructura de la silla de ruedas y poder ubicar los sensores en su respectiva posición. Para el módulo MPU6050 se utilizaron cables trenzados de 15 [cm] de largo (ver Figura 6.2) lo cual permite colocar dicho módulo debajo (y paralelo) del soporte para brazo de la silla de ruedas.

### 6.3 Observaciones y recomendaciones.

---



**Figura 6.3.** *Prototipo acoplado a la silla de ruedas (Vista trasera).*

El sistema de adquisición de datos sobre la silla de ruedas puede ser observado desde la parte trasera en la Figura 6.3 así como la conexión con la Raspberry Pi 3. El acoplamiento total de todos los módulos que componen el sistema del prototipo diseñado sigue el esquema propuesto en la Figura 4.2.

### 6.3. Observaciones y recomendaciones.

Las zonas de guarda, delimitadas por las distancias vistas en las Tablas 6.1 y 6.3, no son uniformes; es decir, tienen distancias a veces muy diferentes para cada sensor, esto se debe a la diferencia de tamaño entre las ruedas frontales y traseras de la silla. Para mejorar estas zonas podrían utilizarse dos caminos; el primero sería reubicar los sensores ultrasónicos, que ya se tienen, de forma equidistante en el perímetro de la silla de ruedas, pero esto aumentaría el número de puntos ciegos en zonas importantes como por ejemplo la frontal. La segunda posibilidad (y puede ser la más confiable) es agregar un par de sensores ultrasónicos en los



### 6.3 Observaciones y recomendaciones.

---

laterales de la silla de ruedas, haciendo que, los rangos de recepción de señal se intercepten más rápido ya que es en esta área donde los sensores necesitan más distancia para detectar los obstáculos. Esta apreciación se da a modo de sugerencia para mejorar el diseño en futuros trabajos.

El uso de las dos tarjetas de desarrollo, Stellaris Launchpad y Raspberry Pi3, se hizo necesario para poder utilizar la diadema Emotiv Epoc en conjunto con el sistema de adquisición de datos previamente diseñado en base al uso de microcontroladores. Pero, para mejoras en el futuro, por ejemplo, pueden comprarse las tarjetas de expansión de puertos para la Raspberry con la que podrían ser controlados también todos los módulos que componen la instrumentación del prototipo y de esta forma usar una única unidad de procesamiento. Estas tarjetas de expansión tienen un valor que oscila entre los 20 y 40 dólares (haciendo el diseño un poco más costoso), mientras que la tarjeta Stellaris Launchpad no excede los 13 dólares y por eso el diseño final usa las dos tarjetas de desarrollo.

Es recomendable, para aprovechar todas las posibilidades y funciones que ofrece la diadema Emotiv Epoc, implementar un algoritmo de clasificación de datos y de inteligencia artificial que interpreten las señales cerebrales leídas por los electrodos para controlar la silla de ruedas y el prototipo en general. Las librerías suministradas por el fabricante de la diadema tienen muchas limitaciones, además de incompatibilidades con algunas plataformas, que evitan que se puedan obtener mejores resultados con el dispositivo.

Es necesario, para la visualización de la interfaz gráfica de usuario, adquirir una pantalla touch screen para la Raspberry Pi 3. Para el prototipo se utilizó una pantalla de 14 pulgadas conectada por puerto HDMI a la Raspberry haciendo el diseño un poco tosco.

Otra forma de mejorar el prototipo diseñado es implementar la amplia gama de sensores que existen para ser acoplados a la Raspberry Pi 3; por ejemplo, el módulo de cámara que permite reconocer imágenes y puede usarse como apoyo (o reemplazar) para los sensores ultrasónicos al momento de detectar obstáculos. También existen acelerómetros y giroscopios de tres ejes para esta tarjeta; el precio de estos módulos también es un poco elevado y su implementación depende del presupuesto que se destine para mejorar el prototipo.

# Bibliografía

- [1] Carlos Arturo Ruiz Ruiz. “Diseño de un sistema hombre máquina para la locomoción de un robot hexápodo”. Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca. 2016.
- [2] Krishma Tejawani, Jaydip Vadodariya, Dipesh Panchal. “Biomedical Signal Detection using Raspberry Pi and Emotiv EPOC”. Electronics and Communication Engineering Department, Institute of Technology, Nirma University. 2016.
- [3] Carlos A. Velásquez Hernández, John J. Chávez Chávez. “Implementación de sistema de navegación autónomo en robot móvil experimental para reconstrucción y exploración de entornos desconocidos”. Departamento de Eléctrica y Electrónica Universidad Nacional de Colombia. 2015.
- [4] Albano Carrera González. “Innovaciones en sistemas e interfaces Humano-Máquina: Aplicación a las tecnologías de rehabilitación”. Departamento de teoría de la señal y comunicaciones e ingeniería telemática, Universidad de Valladolid. 2013.
- [5] S. Shaheen, R. Yokeeswaran. “Sensor Based Autonomous Wheelchair”. Journal of Electrical Engineering. 2013.
- [6] Carlos Fernández Carampes. “Técnicas de navegación para un robot móvil utilizando sistemas de razonamiento espacial”. Departamento de Informática y Automática Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca (España). Septiembre 2012.
- [7] Klaus Miesenberger, Arthur Karshmer. “Computers Helping People with Special Needs”. 13th International Conference, ICCHP. Austria, July 2012.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [8] Rodrigo Andrés Maureira Tenorio. “Mejoramiento del diseño de control y electrónico de un vehículo autobalanceado”. Universidad de Chile, diciembre 2010.
- [9] José Alberto Arcos Sánchez. “Sistema de Navegación y modelado del entorno para un robot móvil”. Noviembre 2009.
- [10] Quan Qiu, Jianda Han. “Function Sector Based Real-Time Autonomous Navigation for Outdoor Mobile Robots Equipped with Laser Scanners”. 2009 IEEE International Conference on Control and Automation. December 2009.
- [11] Jacobo Sandoval Gutiérrez. “Trayectorias para robots móviles de navegación autónoma”. Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada, Instituto Politécnico Nacional, México. Enero 2009.
- [12] Byoung-Suk Choi, Ju-Jang Lee. “Localization of a mobile robot based on an ultrasonic sensor using dynamic obstacles”. Artif Life Robotics, ISAROB 2008.
- [13] M. Fezari, M. Bousbia-Salah. “Speech and Sensor in Guiding an Electric Wheelchair”. Badji Mokhtar University, Faculty of Engineering, Department of Electronics BP.12, Annaba 23000, Algeria. october 2005.
- [14] Manuel Mazo, Francisco J. Rodriguez. “Wheelchair for Physically Disabled People with Voice, Ultrasonic and Infrared Sensor Control”. Electronics Department, University of Alcalá de Henares, Ctra. Madrid Barcelona Km 33,600,28871 Alcalá de Henares, Madrid, Spain. october 1995.
- [15] Emotiv Epoc User Guide. Headset and software setup for your Emotiv EPOC neuroheadset, 2014.
- [16] User’s Manual-HC-SR04 Ultrasonic Sensor, Cytron Technologies, Mayo 2013.
- [17] MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification, InvenSense, Revision 3.4, 19 de Jun de 2013.
- [18] Stellaris LM4F120H5QR Microcontroller, Texas Instruments, Texas Instruments Incorporated, 207-2013.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [19] Dual Full-Bridge Driver L298, STMicroelectronics, STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES, Italy, 2000.
- [20] PySerial Documentation, PySerial,Release 2.3, Chris Liechiti, May 28, 2017.
- [21] DM54LS450/DM74LS450 16:1 Multiplexer, National Semiconductor, July 1989.
- [22] [En línea]<http://www.measurecontrol.com/deteccion-y-medicion-sin-contacto-parte-ii/>
- [23] [En línea] <http://mantenimiento177051.blogspot.mx/p/sensores.html>
- [24] [En línea] <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/proximity/info/>