



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

SILLA DE RUEDAS CONTROLADA POR SENSORES INERCIALES

AUTORES

Sebastián Andree Marín Arias  
Ariel Osmar Velarde Zambrano

Año

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

SILLA DE RUEDAS CONTROLADA POR SENSORES INERCIALES.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos establecidos para optar por el título de Ingenieros en Electrónica y Redes de Información.

Profesor Guía

MSc. Jorge Luis Rosero Beltrán

Autores.

Sebastián Andree Marín Arias

Ariel Osmar Velarde Zambrano

Año

2019

### **DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA.**

“Declaro haber dirigido este trabajo, SILLA DE RUEDAS CONTROLADA POR SENSORES INERCIALES, a través de reuniones periódicas con los estudiantes Sebastián Andree Marín Arias y Ariel Osmar Velarde Zambrano, en el semestre 201920, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

.....

Jorge Luis Rosero Beltrán

Máster en Ciencias con Especialidad en Automatización

CI: 180361018-5

### **DECLARACIÓN PROFESOR CORRECTOR.**

“Declaro haber revisado este trabajo, SILLA DE RUEDAS CONTROLADA POR SENSORES INERCIALES, de los estudiantes Sebastián Andree Marín Arias y Ariel Osmar Velarde Zambrano, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

.....

David Fernando Pozo Espín

Máster Universitario en Automática y Robótica

CI: 171734014-3

**DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LOS ESTUDIANTES.**

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

.....  
Sebastián Andree Marín Arias  
CI: 172265280-5

.....  
Ariel Osmar Velarde Zambrano  
CI: 172174182-3

## **AGRADECIMIENTO**

“No temas, porque yo estoy contigo;  
no desmayes, porque yo soy tu Dios que  
te esfuerzo; siempre te ayudaré,  
siempre te sustentaré con la diestra de  
mi justicia.” *Isaías 41:10*

Agradezco a Dios por el hombre que ha  
hecho de mí, supo ser el Faro en la  
oscuridad. Destrozarme a pedazos para  
volver a construirme en su mejor versión  
cada día, aún más fuerte.

A mi amada familia por el ser humano  
que soy, porque cuando me abrazaba la  
derrota estuvieron ahí recordándome de  
que estoy hecho, sin desfallecer armado  
de valentía.

(Ariel Osmar Velarde Zambrano)

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación está dedicado a Dios y a mi familia, sin su apoyo, sacrificio y empuje no hubiese llegado a esforzarme más allá de mis límites, sin alcanzar lo que hoy he logrado.

(Ariel Osmar Velarde Zambrano)

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, que me dio la fuerza y el conocimiento para poder terminar este nuevo ciclo en mi vida.

A mis compañeros, que siempre estuvieron dispuestos a brindarme su apoyo.

Agradezco a mi familia, que me dieron todo su apoyo, pero principalmente a mis abuelitos que siempre me apoyaron y agradeceré a la vida siempre por ponerles en mi camino y a Dios por darles vida para que vean el hombre en el que me he convertido.

(Sebastián Andree Marín Arias)

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación está dedicado a mis abuelitos, que siempre han sido y serán un pilar fundamental en mi vida. Sus enseñanzas han formado el hombre que soy ahora y sé que sin ellos no lograría alcanzar todo lo que he logrado en toda mi vida.

Esto es para ustedes papitos.

(Sebastián Andree Marín Arias)

## RESUMEN

Movilizarse de un lugar a otro en muchos casos se lo considera insignificante, pero para las personas con discapacidad en sus extremidades inferiores es lo más importante. Estas personas sufren ya que en la mayoría de los casos necesitan de un tercero para que los ayude a moverse. Para ayudar a estos pacientes, existen proyectos muy innovadores que utilizan sillas de ruedas eléctricas para que estos pacientes puedan movilizarse sin necesidad de ayuda de terceros.

Este proyecto de titulación consiste en el diseño e implementación de una silla de ruedas controlada mediante un sensor inercial, el cual permite direccionar la trayectoria en la que el paciente se moverá. Se necesitará un microcontrolador, el cual se lo utiliza para recibir e interpretar las órdenes del sensor, se reestructurará la silla de ruedas y por último el ensamble de todas las piezas. Una vez terminado el prototipo se verificará su funcionamiento realizando pruebas y analizando resultados.

Con el fin de cumplir con los objetivos inicialmente planteados. El sensor estará ubicado en la cabeza, donde las inclinaciones de la cabeza, llamados flexión, extensión y laterales determinan el movimiento de los motores de la silla de ruedas. Se envían las señales de los movimientos hacia adelante, atrás o girar, a partir de esto, el microcontrolador transmite los registros de velocidad al controlador, el cual hace posible el movimiento de los motores.

En las pruebas y resultados se pudo verificar que el pulso original que marcaba el sensor con respecto a los movimientos de la cabeza generaba mucha fuerza en los motores haciendo que la parte frontal de la silla de ruedas se levante en el arranque. Adicionalmente, esta fuerza de los motores género que algunas piezas de la estructura de la silla se rompan por lo que se procedió a regular los pulsos y a mejorar la estructura de la silla para que soporte la fuerza de los motores y los pulsos que se generaban en el sensor.

## ABSTRACT

Having the ability to move from one place to another could be considered meaningless, but for people with leg disability is the most important. These people struggle, because in several cases they need help from a third party to help them to move. To help the patients there are innovative projects, where an electric wheelchair is used, so the patients could be able to move by themselves.

This thesis project consists in the design and implementation of a wheelchair controlled by an inertial sensor, which let the patient set the movement they need. A microcontroller is needed to receive and interpret the information sent by the sensor and generate movement, the wheelchair structure will be re-designed and finally the assemble of all the parts.

Once finished the prototype, which is the entire system with the wheelchair using the motors, the microcontroller and sensor. Tests would be done so it could have results analyzed.

Looking forward to fulfilling the objectives presented at the beginning. The sensor will be placed on the head, where the inclinations of the head, called flexion, extension and laterals generate angles in the axes (x, y, z) that are sent to the microcontroller, so it checks the range of movement and transmit the registers of speed to the driver, the one responsible of the motors movement.

In tests and results, changes to be done such as the strength given by the sensor reading the head movement and the pulses sent to the driver where high. Making the front part of the wheelchair to lose balance and elevate at the start of this mentioned movement. In addition, this strength broke many pieces of the structure, therefore the pulses sent to the driver were adjusted and the structure was improved so it can handle the work from the motors at the moment of receiving the movement pulses.

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1	Justificación .....	5
1.2	Alcance .....	6
1.3	Objetivo General.....	8
1.4	Objetivos específicos.....	8
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>8</b>
2.1	Microcontroladores .....	8
2.2	IMU – Inertial Measurement Unit.....	10
2.2.1	Acelerómetro.....	11
2.2.2	Giroscopio.....	13
2.2.3	Magnetómetro.....	15
2.3	Sistemas de seguimiento .....	16
2.3.1	Hand Tracking.....	16
2.3.2	Eye Tracking.....	17
2.3.3	Head Tracking.....	18
2.5	Controlador del Motor .....	21
2.6	Sistemas de Baterías.....	22
2.7	Sistemas de modelamiento 3D.....	24
<b>3.</b>	<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN</b> .....	<b>26</b>
3.1	Diseño de la silla de ruedas .....	26
3.2	Diseño de la caja controladora .....	29
3.3	Diseño del circuito .....	33
3.4	Diseño del algoritmo .....	37
<b>4.</b>	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	<b>45</b>
4.1	Pruebas y resultados silla de ruedas. ....	45
4.2	Pruebas y resultados caja controladora.....	50
4.3	Pruebas y resultados circuito. ....	53
4.4	Pruebas y resultados algoritmo.....	55

4.4.1	Familiarización con funcionamiento del sensor inercial .....	55
4.4.2	Pruebas iniciales con controlador y motores.....	56
4.4.3	Definición de ancho de pulso .....	56
4.4.4	Definición de timer y retardos en pulsos .....	56
4.4.5	Implementación de la batería y la estructura del prototipo.....	57
4.4.6	Calibración del sensor .....	57
4.4.7	Pruebas iniciales del algoritmo con el prototipo ensamblado.....	57
4.4.8	Revisión y ajustes de rangos de movimiento .....	58
4.4.9	Ajustes al algoritmo tras pruebas finales.....	58
4.4.10	Adaptación de freno de emergencia y disminución de velocidad máxima	59
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>61</b>
<b>5.2.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>64</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Sillas que ayudan a personas con paraplejia o paralización severa de las extremidades superiores e inferiores ya existen, como es el caso más conocido, el de Stephen Hawking, pero este científico tenía otra técnica de controlar la silla de ruedas, él podía movilizarla mediante pulsos en sus dedos. Este proyecto de titulación se enfoca en las personas con cuadriplejia, aquellas que solo puedan mover la cabeza, sobre todo para poder brindar cierta autonomía que se ha perdido por esta condición.

El desarrollo de tecnologías en la actualidad ya se enfoca más en la ayuda a personas con discapacidad. Debido a que este campo es muy amplio y se pueden inventar más productos que no solo sean enfocados en medicina sino en robótica o en la autonomía del dispositivo, pero todo enfocado en pacientes con severas lesiones para que su recuperación sea mejor cada día.

En nicaragua se implementó un programa de ayuda a personas con discapacidades especiales o víctimas de accidentes en minas. Este programa fue entregado a una institución técnica, la cual realizo varias encuestas tanto a los pacientes como a las autoridades para que la implementación de la ayuda a este tipo de personas sea la más optima (Referencial, 2001). Por otro lado, en Colombia se implementó un trabajo en conjunto con la Universidad de Nacional de Colombia y la Fundación Saldarriaga Concha, los cuales buscan ayudar a sus pacientes con discapacidades y así ayudar a que su estancia en la fundación sea más optima. Se impartieron cursos de cuidado para las personas discapacitadas e incluso con proyectos de la Universidad (Brunal et al., s.f.).

Como se puede visualizar con las anteriores investigaciones, hoy en día la ayuda a las personas discapacitadas es muy importante y cada vez se busca incrementar esta ayuda. Incluso ya se utiliza la ayuda de personas que tienen conocimiento de otros campos tales como ingenieros en tecnologías y circuitos, para que con su conocimiento aporten ideas para mejorar los mecanismos que permiten beneficiar la vida de los pacientes. La utilización de equipamiento

nuevo es un tema muy cuidadoso ya que se tiene que dar capacitaciones para que su operación sea la adecuada.

Con respecto a anteriores investigaciones se ha encontrado artículos científicos donde técnicos implementaron nuevos proyectos que forman parte de esta inclusión de campos como ingeniería para el cuidado de los pacientes con discapacidad.

Un proyecto utiliza reconocimiento de voz y auto aprendizaje por parte de los microcontroladores que permiten el movimiento de los motores y el procesamiento de datos para su funcionamiento. Uno de ellos se le conoce como “Wheelchair Control Using Speech Recognition”, realizado por los estudiantes del instituto tecnológico SGGGS, en la India. Que, por su parte, con el uso de un Arduino UNO, el cual genera las ordenes que el programa insertado utiliza para controlar las sillas de ruedas con un reconocimiento de voz, una alternativa a la movilización de una silla de ruedas eléctrica (P. B. Ghule, 2016).

Otro ejemplo que se pudo encontrar es el “Android Based Automated Wheelchair Control” que, al igual que el trabajo anteriormente expuesto, también tiene su origen en India. Este por su parte, se basa en utilizar un aplicativo para dispositivos Android, que utiliza también reconocimiento de voz, así pues, mediante un módulo bluetooth, se almacenarían las órdenes que llegarían al microcontrolador para iniciar el movimiento de los motores eléctricos (R. Josephine Leela, 2017).

Un proyecto similar es el “DECoReS: Degree Expressional Command Reproducing System for Autonomous Wheelchairs”, el cual se implementó en Japón. Que se suma al reconocimiento de voz, pero con una ligera variación, la velocidad con la que se movilizaría también es posible ajustar, así como la forma de curvar, donde incluso se solicitaría se tome una curva abierta o cerrada (H. Komei, 2015).

Otra forma de control en la movilización de la silla de ruedas es el proyecto

conocido como “Automatic Gesture Recognition for Wheelchair Control”, este proyecto es realizado en Puebla, México, el cual se basa el movimiento de la silla mediante gestos que serán los comandos para el movimiento. Este tipo de implementación está dentro del sistema de seguimiento, el cual representa el reconocimiento de manos, reconocimiento de ojos y el reconocimiento de la cabeza, todo enfocado en el movimiento (J. Martín-Ortíz, 2017).

Como se puede ver en los proyectos mencionados, su enfoque es el control de la silla de ruedas de una manera diferente e implementando otros dispositivos como son los dispositivos móviles. Utilizan microcontroladores que gracias al código emiten señales que dan las órdenes a los motores, permitiendo así el movimiento de los motores. El reconocimiento de voz se lo puede realizar mediante micrófonos propios de los circuitos o mediante los micrófonos que se ubican en el dispositivo móvil. Incluso existe un proyecto que controla mediante los gestos de las manos un sistema denominado Hand-Tracking. El funcionamiento es el mismo en todos los casos ya que sigue un determinado proceso, generar ordenes procesar esas órdenes y transmitirlos para que controlen los motores.

El enfoque de los sensores que se utilizarán en el trabajo de titulación, se lo ha implementado anteriormente en una cámara para dron, el movimiento es controlado mediante tres mediciones, el acelerómetro, el magnetómetro y el giroscopio, los cuales en conjunto manipulan la dirección y sentido de los movimientos de la cabeza de una persona. La misma perspectiva es aplicada, por la localización del sensor en la cabeza del paciente, por medio de los ángulos en los ejes x, y, z.

El proyecto mencionado anteriormente, no se enfoca en la movilización de una silla de ruedas sino en el reconocimiento de los movimientos del cabeza, la tesis “Implementación de un sistema de Head-Tracking para el control de una cámara en movimientos de PAN y TILT utilizando FPV”, trabajo de titulación realizado en la Universidad de las Américas, permite el movimiento de una cámara posicionada en la parte frontal de un Dron o vehículo aéreo no tripulado, mediante un sensor inercial, en base a las lecturas realizadas, la información

se envía al microcontrolador y se determina el movimiento a realizar, para luego habilitar el movimiento de los servo motores y así realizar el movimiento inicialmente requerido de la cámara (David Polo Cerón De la Vega, 2018).

Es por esto que, se decidió implementar un método distinto, pero con el mismo enfoque ayudar a las personas con discapacidad a moverse libremente. Utilizando las investigaciones de Head-Tracking realizadas por David Polo Cerón De la Vega y Mateo Córdova Yépez, se implementará un mecanismo el cual toma las órdenes del sensor inercial para que se comuniquen con los motores y así brinde la movilidad que los pacientes necesitan. En cuanto a las mediciones del sensor, se utilizará el giroscopio ya que para que los motores se muevan con la cabeza, se reconocerá las instrucciones de los ejes que analiza el sensor.

La tecnología hoy en día se ha convertido en una herramienta muy importante dentro de la vida cotidiana de las personas. Cada día los técnicos e ingenieros trabajan para mejorar o crear equipos que la gente podría necesitar en sus hogares o para su uso personal. La actualización de la tecnología no es tan sencilla como parece, es por esto que, los ingenieros, a través de pruebas y errores, generan pequeños cambios y verifican cada resultado para finalmente actualizarlo o crear otro producto en base a los experimentos. Estos procesos que se realizan con enfoque a mejorar la tecnología pueden ayudar a otros campos como la medicina, la industria y otras más.

La investigación de los componentes que se utilizarán en el proyecto de titulación ayudará a verificar que son, para que sirven y como se los puede implementar ya sea en el diseño como en las pruebas y resultados que se obtendrán al finalizar el prototipo. Gracias a los recursos obtenidos tales como proyectos referentes a las sillas de ruedas eléctricas como tesis indicando el manejo de dispositivos con el sensor, se analizó la posibilidad de crear una silla de ruedas diferente a lo que ya se ha realizado e incluso la facilidad que este proyecto brindará a la movilización de pacientes con discapacidad.

Como para la utilización de cada elemento que se necesita en el prototipo se

debe saber sus características y su funcionamiento antes de implementarlos, es por esto que se realizará una investigación detallando para que sirve y en que se lo puede utilizar en este proyecto de titulación. Un modelado en 3D es la mejor opción para acoplar piezas y crear nuevas como es el caso del diseño de las cajas que contendrán el sensor y el controlador de los motores. En cuanto a la codificación, para entender cómo se orienta el programa se generan diagramas de flujo los cuales mostrarán los comandos de forma gráfica, desde el inicio hasta el fin del programa. En las pruebas y resultados es en donde se espera ya ver el funcionamiento total del prototipo con el montaje de los motores y la conexión del sensor.

### **1.1 Justificación**

Para las personas que no sufren ninguna capacidad en sus extremidades inferiores se pueden movilizar y trasladar de un lugar a otro sin ninguna dificultad, pero para los pacientes que si poseen dichas discapacidades es muy complicado ir al lugar que ellos quieren o necesitan. Incluso necesitan en la mayoría de las ocasiones ayuda de un tercero para que su movilidad sea de mayor agrado. Otro tipo de discapacidades son los pacientes que sufren de cuadriplejia la cual es una condición que no permite la movilidad del cuerpo entero como se mencionó anteriormente, esto puede resultar muy molesto porque el cien por ciento de las ocasiones necesitan de un tercero para poder moverse.

Es por esto que se realiza este proyecto de titulación para que este tipo de pacientes pueda moverse libremente por un entorno donde ellos quieran. Para las personas discapacitadas en las extremidades inferiores, se diseñó el prototipo con motores potentes para que su traslado sea mejor y con mayor fuerza. Por otro lado, para las personas con cuadriplejia, los sensores inerciales ayudaran a que se puedan transportar de un lugar a otro con solo el movimiento de su cabeza, sin necesidad de solicitar ayuda de un tercero.

Como se mencionó anteriormente, cada persona necesita de su propia libertad de movimiento y su privacidad, es por esto que el proyecto de titulación se enfoca en las personas que no poseen dicha libertad o privacidad, porque se dice que

no la poseen pues, debido a su condición, siempre necesitan de un tercero para que les ayude a moverse. Gracias a la silla de ruedas controlada por sensores inerciales se reducirá en gran parte esta ayuda y brindará mayor libertad en el traslado de los pacientes, se reducirá ya que la atención no se la puede eliminar totalmente debido a que la condición de estas personas es muy delicada.

El proyecto de titulación no busca independencia en este tipo de pacientes, lo que se enfoca es brindar un poco de la comodidad que tenían antes ya sea de un accidente o de una enfermedad. Para este tipo de paciente puede ser una experiencia muy gratificante poder sentirse autosuficientes en su movilidad y eso es por lo que se está realizando este prototipo, para ayudar a quienes más lo necesitan y más aún si es una persona que su cuerpo está totalmente paralizado.

Porque se impulsa y se controla la silla con los sensores inerciales que se ubican en la cabeza del paciente, es básicamente porque para las personas con cuadriplejía, la única parte del cuerpo que pueden mover es la cabeza por lo que se aprovechará este movimiento para el manejo de la silla brindando así la movilidad que requieran.

## **1.2 Alcance**

Este trabajo de titulación se enfoca en tres aspectos muy importantes para el ser humano, los cuales son la facilidad de movilidad, la libertad de movilidad y la privacidad para cada persona. Como está destinado para la ayuda a pacientes que están en un estado de parálisis conocido como cuadriplejía, el cual es un estado de discapacidad que no permite la movilidad de todo el cuerpo, la única parte del cuerpo humano que puede moverse es la cabeza, el prototipo busca aprovechar esta movilidad de la cabeza para que junto a un sensor inercial la persona pueda trasladarse en una silla de ruedas eléctrica.

El prototipo contará con motores de gran potencia para que la movilidad, tanto en superficies planas como en superficies inclinadas, sea la más adecuada. Se crearán algoritmos los cuales fijarán rangos de movilidad para que no existan errores en los giros y también se codificará velocidades límites para que la silla

tenga una velocidad promedio que brinde una adecuada movilidad para el paciente.

Los sensores que se utilizan tienen una respuesta a tiempo real lo que produce que en cuanto el paciente mueva la cabeza, la silla siga su movimiento casi sin retardos. Así se logrará una movilidad más cómoda y con libertad de decisión de los pacientes ya que no necesitarán pedir de alguien para incluso solo girar y visualizar algo que les llamó la atención.

Ya existen sillas de ruedas con motores, pero el alcance busca ayudar de una manera diferente a las personas que sufren este tipo de discapacidad beneficiándolas en su movilidad con una aplicación nueva y fácil de utilizar ya que el manejo, como se lo menciono anteriormente, es con el movimiento de la cabeza.

Las personas que utilizan silla de ruedas en la mayoría de los casos necesitan de una persona que les ayude en su traslado de un lugar a otro, haciendo de la movilidad del paciente algo molesto ya que no tiene su propia privacidad. El prototipo de la silla de ruedas controlada por sensores inerciales busca proporcionar libertad, independencia y privacidad para este tipo de pacientes con esta discapacidad. Su funcionamiento consiste en con el giro de la cabeza o la inclinación de esta, dar una dirección a la silla y con esta dirección, el sensor controla los sensores para que se dirijan a la ubicación que el paciente quiera.

La privacidad es algo super importante dentro del entorno del ser humano, pero las personas que sufren de cuadriplejia están destinadas a depender de alguien para su movilización. Como se mencionó anteriormente este proyecto busca independencia del paciente, se sabe que una persona en esa condición debe estar bajo cuidado todo el tiempo, pero para estos pacientes, poder transportarse sin necesidad de alguien puede ser una experiencia muy agradable.

### **1.3 Objetivo General**

Diseñar e implementar una silla de ruedas controlada por movimientos de la cabeza usando sensores inerciales, enfocado a pacientes que tengan paraplejia o cuadriplejia.

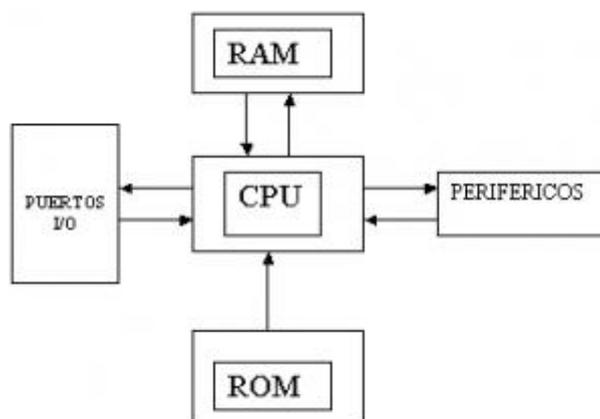
### **1.4 Objetivos específicos**

- Montar y ensamblar los elementos a la silla de ruedas, usando una estructura extra para soportar el peso tanto de la persona como de los materiales.
- Desarrollar algoritmos que permitan mover la silla a través de lecturas del sensor inercial.
- Analizar los resultados mediante prueba y error una vez ensamblado todos los elementos.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Microcontroladores**

El microcontrolador es un circuito integrado que posee una unidad central de procesamiento denominado CPU, unidades de memoria denominados RAM y ROM, puertos de entrada y salida, y también posee periféricos, todos estos componentes se interconectan en el interior del dispositivo (ElectrónicaEstudio.com, 2018).



*Figura 1.* Representación de los componentes del microcontrolador.

Tomado de: (ElectrónicaEstudio, 2018).

Todo microcontrolador requiere de una codificación para que genere las funciones que se necesitan. Esta programación es almacenada en la memoria ROM. El propósito general de los microcontroladores es leer y ejecutar los algoritmos que el usuario crea por lo que se debe tener en cuenta tanto la estructura del microcontrolador como los pines que se programan en la codificación (Parte, I. I., & Contreras, 2007).

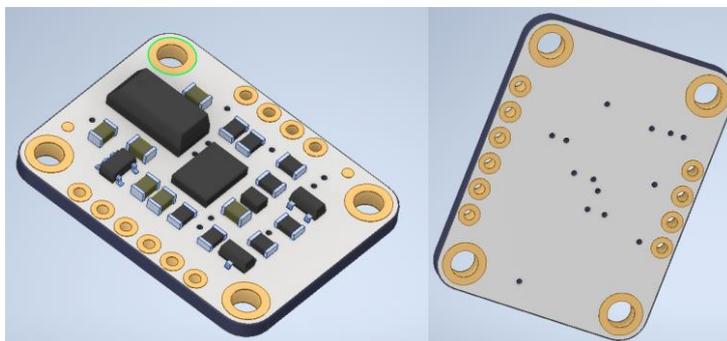
Los microcontroladores poseen periféricos los cuales son módulos digitales propios del microcontrolador. Controla diferentes funciones de los puertos como las conexiones de entrada y salida. Estos periféricos cumplen funciones que permiten configurar acciones específicas por medio de registros en la codificación (E-Marmolejo R, 2017).

El estándar UART (Unidad de Recepción y Transmisión Serial Asíncrona) se utiliza para transmitir y enviar mensajes por medio de pines llamados Rx y Tx, estos mensajes son binarios y pueden comunicarse con sistemas digitales.

El estándar SPI (Synchronous Peripheral Interface) se lo utiliza para la comunicación serial entre dispositivos. Funciona como un enlace de datos en serie síncronico y que trabaja en full dúplex, que significa que viaja en dos direcciones a la vez (PuntoFlotante, 2019).

El estándar I<sup>2</sup>C facilita la comunicación entre microcontroladores y demás dispositivos que solo necesitan de dos líneas de señal. Su metodología es en serie y sincrónica, una de las señales se denomina SCL (System Clock), la cual trabaja como la línea de pulsos de reloj que el sistema sincroniza, la otra señal se la denomina SDA (System Data) la cual trabaja como la línea por la que se transmiten y se reciben los datos entre los dispositivos (Didácticos, 2018). Este estándar es el que se utiliza en el proyecto de titulación.

## 2.2 IMU – Inertial Measurement Unit

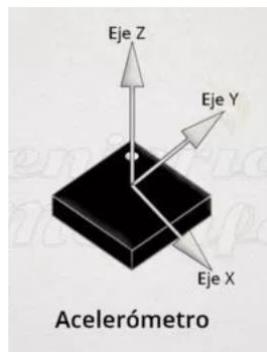


*Figura 2.* Representación del sensor en formato CAD.

Es un dispositivo, el cual permite recopilar información mediante mediciones de tres tipos, los cuales son velocidad, orientación rotacional y fuerzas gravitatorias sin necesidad de realizar mediciones individuales o mediciones con referencias extremas (Townsend, 2018). Este tipo de sensores son utilizados en su mayoría en el control de aviones, en los sistemas de navegación de barcos, satélites, y muchos otros dispositivos. Se puede utilizar en varios campos gracias a que combinan tres tipos de mediciones con sus respectivos sensores, los cuales son acelerómetro, magnetómetro y el giroscopio (Macafenix, 2018).

Cada uno de los sensores internos del sensor IMU dan información para poder obtener un resultado exacto. El giroscopio como su nombre lo indica mide los giros que realiza el dispositivo, por otro lado, el acelerómetro busca medir la aceleración lineal que se realiza en cualquiera de los ejes, el magnetómetro recopila información de los campos magnéticos de la tierra gracias a la medición del norte magnético del cual toma como dato referencial (Rodríguez, 2012).

### 2.2.1 Acelerómetro



*Figura 3.* Ejes de un Acelerómetro.

Tomado de: (Macafenix, 2018).

Los acelerómetros son dispositivos electromecánicos de medida, como su nombre lo indica, medida de aceleración, la cual se define como la tasa de variación de velocidad de un objeto. Las unidades de medición pueden ser segundos al cuadrado ( $m/s^2$ ) o en fuerzas G (g). Los acelerómetros también son utilizados para detectar las vibraciones en los sistemas o para la orientación de estos.

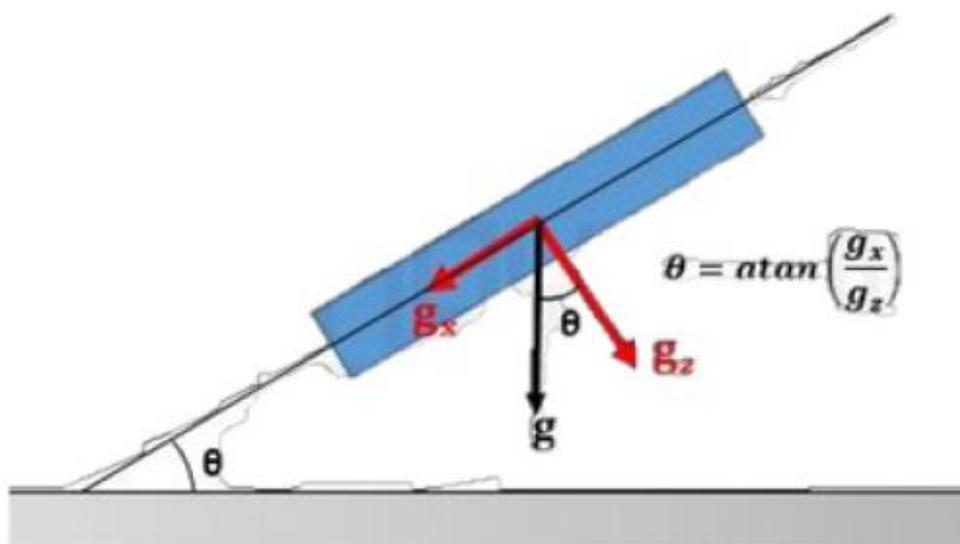
Los acelerómetros son utilizados en la detección de la aceleración estática como puede ser la gravedad y la dinámica que pueden ser arranques repentinos o frenados. Los acelerómetros son utilizados especialmente para la detección de la inclinación de un dispositivo, por lo que estas medidas son afectadas por la aceleración de la gravedad, se puede obtener el cálculo de cómo está orientado el dispositivo con respecto a la superficie de la Tierra. Así gracias a este sensor se puede verificar si el dispositivo está en posición vertical u horizontal.

Cuando el sensor es inclinado, la gravedad genera componentes vectoriales en tres ejes, gracias a estos componentes, se puede calcular el ángulo de inclinación con respecto a la gravedad, y estos valores de voltaje que se genera en los tres ejes serán pertenecientes a la aceleración.

Los acelerómetros poseen una interfaz analógica, la cual entrega un voltaje proporcional a la aceleración de cada eje. Estos ejes fluctúan entre tierra y el

voltaje. Por otro lado, los acelerómetros que poseen una interfaz digital se comunican a través de protocolos de comunicación como son SPI o I<sup>2</sup>C. Los acelerómetros con tecnología digital cuentan con más funcionalidades y el ruido no afecta tanto como en los analógicos.

Para realizar los cálculos dentro del sensor en un plano 2D en los ejes X-Z, se lo realiza de la siguiente manera calculando el ángulo  $\theta$ :



*Figura 4.* Plano 2D para calcular ángulo de inclinación con el sensor.

Tomado de: (David Polo Cerón De la Vega, 2018).

Por otro lado, para el cálculo dentro de un plano 3D en X-Y, se lo calcula con las siguientes ecuaciones, pero para el cálculo del ángulo de rotación es necesario cambiar las fórmulas “ $a_y$ ” por “ $a_x$ ” y también en sentido contrario.

$$\theta_y = \tan^{-1} \left( \frac{ay}{\sqrt{ax^2 + az^2}} \right) \text{ (Ecuación 1)}$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \left( \frac{ax}{\sqrt{ay^2 + az^2}} \right) \text{ (Ecuación 2)}$$

## 2.2.2 Giroscopio

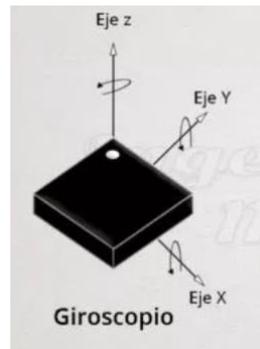


Figura 5. Ejes de rotación del giroscopio.

Tomado de: (Macafenix, 2018).

La función de un sensor con giroscopio es determinar la posición de un objeto, detectando la rotación a la que este es expuesto. Mide la velocidad angular con unidad de grados por segundo ( $^{\circ}/\text{seg}$ ) o también en revoluciones por segundo (RPS). Esta medición se la puede hacer en los tres diferentes ejes referenciales (x, y, z), también se las mide mediante MEMS (Micro Electro Mechanical System) y algoritmos, los cuales determinan la posición en la que se encuentra el objeto (D. Pozo, 2014).

Los giroscopios con interfaz digital se interconectan a otros dispositivos por medio de interfaces, las cuales permiten tanto la comunicación analógica como la digital, adicionalmente se utiliza protocolos como SPI o I<sup>2</sup>C que permiten la interacción con los microcontroladores (5Hertz, 2019). Uno de los contrapuntos de utilizar este tipo de comunicación es los valores que se toman en las velocidades de muestreo. La frecuencia en la que trabaja I<sup>2</sup>C es de 400 Hz, mientras que la frecuencia de muestreo de SPI es mucho más alta.

Los giroscopios con interfaz analógica muestran velocidades de rotación con voltajes variables entre tierra y la fuente de alimentación, por lo que un ADC dentro de un microcontrolador puede ser utilizado también para leer señales (Inercial & Desarrollo, s.f.).

El funcionamiento del giroscopio consiste en la verificación del movimiento del sensor para posteriormente detectar la velocidad angular. En el interior del sensor se encuentra el dispositivo MEMS el cual es tan pequeño como el cabello humano (de 1 a 100 micrómetros), cuando el giroscopio empieza a moverse, una masa diminuta de resonancia se mueve con relación a los cambios de la velocidad angular. Este movimiento se transforma en señales eléctricas con corrientes muy bajas, después de amplifican dichas señales para que el microcontrolador las lea y las procese.

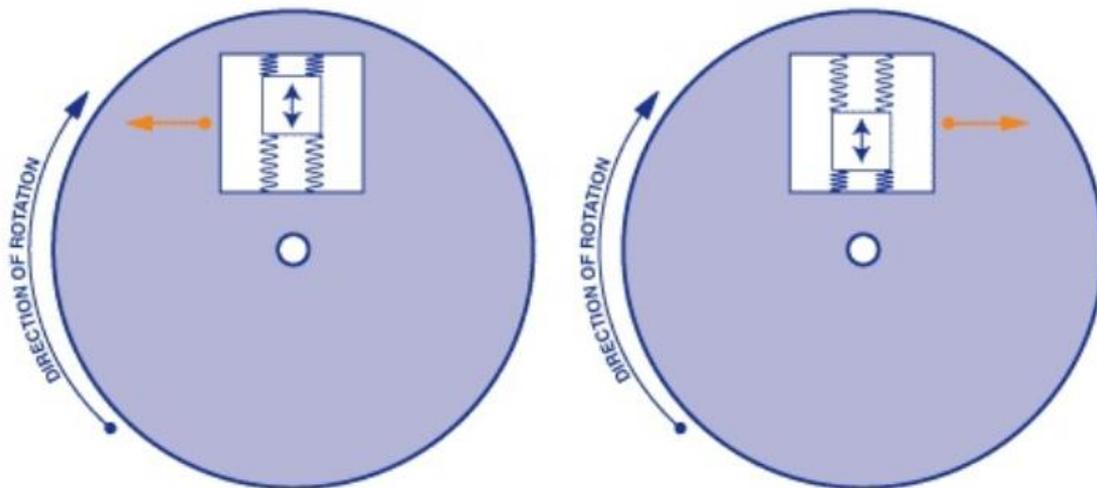


Figura 6. Sensor giroscopio MEMS y su funcionamiento interno.

Tomado de: (5Hertz, 2019).

### 2.2.3 Magnetómetro

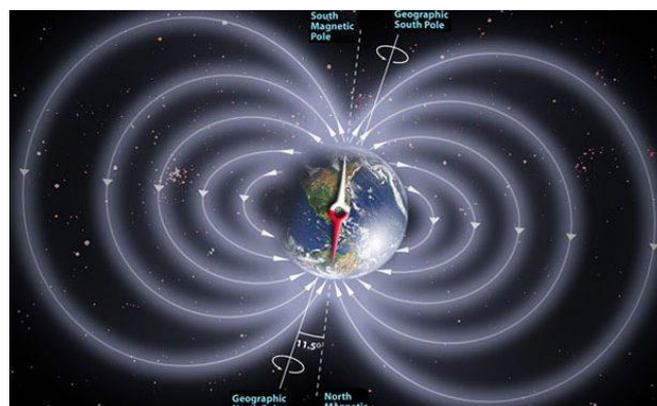


*Figura 7.* Ejes referenciales con respecto al campo magnético.

Tomado de: (Macafenix, 2018).

Es el sensor el cual mide en tres ejes referenciales (x, y, z) la intensidad de campo magnético. Gracias a las medidas de los ejes se puede obtener un valor de campo, el mismo que da la información del Ángulo azimut del dispositivo. Una brújula es un ejemplo muy claro de su funcionamiento solo que la diferencia es que el magnetómetro distingue los movimientos de roll y pitch dentro de los tres ejes.

Existen elementos denominados magneto-resistencias, los cuales son utilizados por los sensores trabajando en el cambio del valor que se relaciona con el campo magnético que las atraviesa (Kip, A. F., Sebastian, L., & Jose, 1967).



*Figura 8.* Campo magnético terrestre.

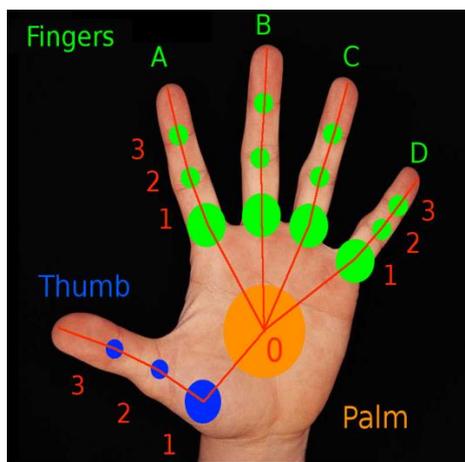
Tomado de: (Fandom, s.f.).

Gracias a estas medidas en los tres ejes del campo magnético, el sensor calcula una medida de orientación relativa de un objeto. Es importante mencionar que trabaja en conjunto con las mediciones de acelerómetro y el giroscopio para identificar la posición de un objeto (Majorana, 1932).

## 2.3 Sistemas de seguimiento

Generar, monitorear, controlar y registrar movimientos dentro de un ambiente denominado sistema de telemetría, es el objetivo que tienen los sistemas de seguimiento. Telemetría es una tecnología que permite recopilar datos de forma remota en lugares donde el acceso tiene limitaciones. Existen varios medios por los que se pueden realizar las funciones de los sistemas de seguimiento, como son el movimiento de las manos conocido también como Hand-Tracking, el movimiento de los ojos que se lo conoce como Eye-Tracking y también el seguimiento de la cabeza, denominado Head-Tracking. Para el proyecto de titulación se utilizará en Head-Tracking ya que, con el movimiento de la cabeza de los pacientes, se logrará obtener datos y manipular los motores de la silla.

### 2.3.1 Hand Tracking



*Figura 9.* Factores pertenecientes al análisis de Hand Tracking.

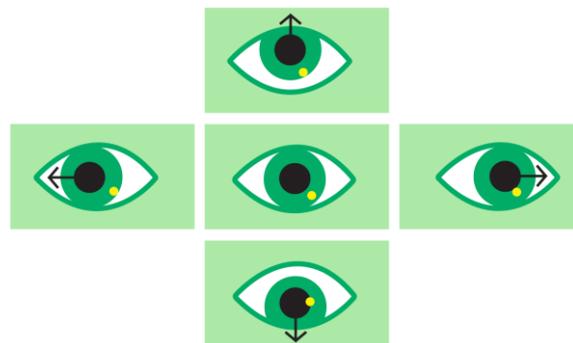
Tomado de: (Ammar Qammaz, 2018).

El seguimiento de los movimientos de las manos se los realiza en tres dimensiones, utilizando las tecnologías FPV, HCI, detección por la cámara de la

computadora y realidad aumentada. Posee una estructura muy compleja ya que para realizar dichas mediciones se necesitan de sensores de profundidad los cuales tienen varios inconvenientes, mostrando posiciones que no corresponden a lo que se quiere obtener.

Este sistema debe estar en la capacidad de identificar gestos únicos en secuencia. Para resolver los problemas que presentan los sensores de profundidad y lograr captar los movimientos de forma precisa, se han creado algoritmos de predicción inteligente que permiten trabajar de mejor manera con este tipo de seguimiento de movilidad (David Polo Cerón De la Vega, 2018).

### 2.3.2 Eye Tracking



*Figura 10.* Funcionamiento de Eye Tracking según la dirección del ojo.

Tomado de: (Tobii-Dynavox, 2019).

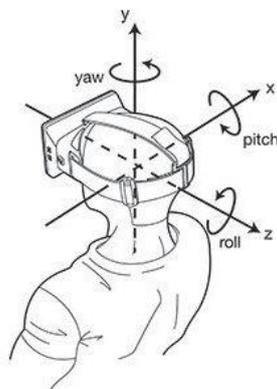
Los sistemas de seguimiento de los ojos trabajan de una forma similar a los de la cabeza. El funcionamiento se basa en dirigir el movimiento a la dirección a la que los ojos del usuario apuntan. La utilización de varias cámaras que se enfocan en un punto referencial es lo que permite recopilar la información que se genera a partir del movimiento de los ojos. Este sistema de seguimiento también se lo implementa mucho en personas con discapacidad, ayudando así en sus labores diarias (David Polo Cerón De la Vega, 2018).

### 2.3.3 Head Tracking

En cuanto al sistema de seguimiento de la cabeza se debe tener en cuenta dos variantes, una es la lectura y control de movimientos de la cabeza y el segundo es el control remoto de un dispositivo físico.

La primera variante consiste en transmitir los movimientos del dispositivo en donde se encuentra el sensor, lo que permite trabajar como un cursor para el control del dispositivo físico. Permite también mapear la cabeza para dar mayor funcionalidad al control, que, en este caso sería la silla de ruedas.

La segunda variante consiste ya en el control del dispositivo físico el cual plasma los movimientos que realiza el sensor a un dispositivo físico que en este caso será la silla de ruedas. El funcionamiento de esta variante consiste en una vez que el movimiento de la cabeza con el sensor es realizado, se mapea estas direcciones y se los transmite por cualquier medio para que el dispositivo físico repita los movimientos que el usuario está generando (Mti, s.f.).



*Figura 11.* Ejes de medición de Head Tracking.

Tomado de: (VA\_Tech\_EE, 2016).

Head Tracking utiliza ángulos de navegación que también se los denomina ángulos de Tait-Bryan, donde la representación de estos es plasmada en los ejes x, y, z. estos ángulos son una variación de los denominados ángulos de Euler. Una rotación que gira en el eje  $X_G$ , que se define entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$  se la llama

ROLL o cabeceo ( $\Phi$ ), una rotación que gira en el eje  $Y_G$ , que se define entre  $-90$  y  $90$  se la llama PITCH o alabeo ( $\theta$ ), por último, una rotación que gira en  $Z_G$ , que se define entre  $-180$  y  $180$  se la llama YAW o guiñada ( $\psi$ ) (Llamas, 2016). Una de sus ventajas es que pueden ser conmutativos, una explicación de esto es que la medida de orientación final que se obtiene no depende del orden en el que se aplique la rotación (Rodríguez, 2012).

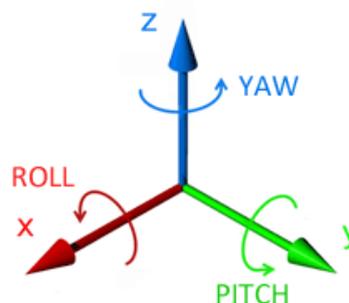
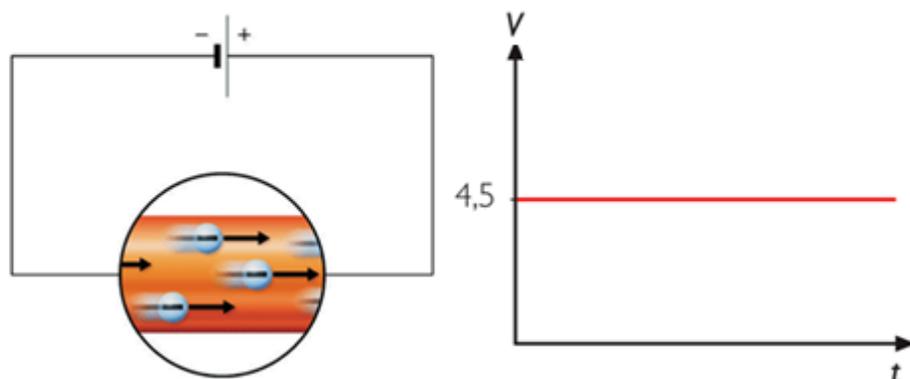


Figura 12. Rotaciones octogonales en torno al eje x, y, z.

Tomado de: (Llamas, 2016).

## 2.4 Motores de Corriente Directa (DC)

Son elementos que son utilizados para transformar la energía eléctrica en energía mecánica. Se utilizan mucho en la industria ya que funcionan en conjunto con el uso de energía eléctrica con una construcción simple y adicionalmente compatibilidad con diversos tipos de carga.



*Figura 13.* Representación de un circuito con corriente continua.

Tomado de: (R. Isa, 2011).

Son utilizados cuando se requiere regular continuamente la velocidad del eje que en ocasiones posee un torque en arranque elevado. También son muy utilizados donde la corriente es continua, como es el caso de trenes, automóviles eléctricos, etc.

Existen dos tipos de circuitos que permiten que el motor funcione en corriente continua o directa, estos son circuito de campo magnético y el circuito de armadura. El campo magnético permite transformar la energía eléctrica que se recibe por la armadura en energía mecánica que se entrega en el eje. La energía eléctrica del campo es consumida en su totalidad en la resistencia externa con la que se regula la corriente que se produce en el campo magnético. El campo magnético actúa como un catalizador la cual permite transformar la energía en la armadura.

La armadura se conforma de un grupo de bobinas que se alojan en el rotor y además posee un dispositivo que se lo denomina colector por el cual se recibe corriente continua desde una fuente externa y está la transformara de energía eléctrica a energía mecánica que es entregada a través del eje de los motores (Electr, D., Utilizan, S., Sincr, M., Asincr, E. M., Sincr, E. M., Asincr, E. M., Asincr, M., Bobinado, R., Asincr, M., Asincr, A. M., & Se, R. B, 2002).

## 2.5 Controlador del Motor

Anteriormente se explicó como es la funcionalidad de los motores de corriente continua, por lo que para su uso se debe tomar en cuenta ciertos aspectos como son el voltaje de funcionamiento, las revoluciones por minuto, y la potencia que desarrolla ya que son los principales.

Por otro lado, la rotación del motor es un tema un poco complejo ya que se necesita invertir la polaridad de la tensión del motor, pero esto no se puede configurar en el microcontrolador, se necesita un circuito denominado puente H (H-bridge) (Inventable, 2012).

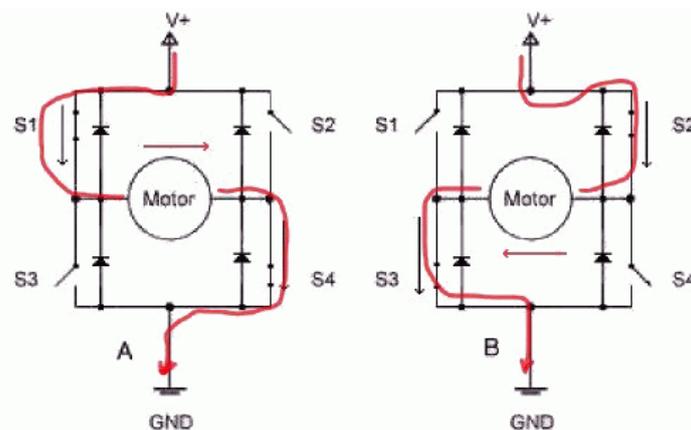
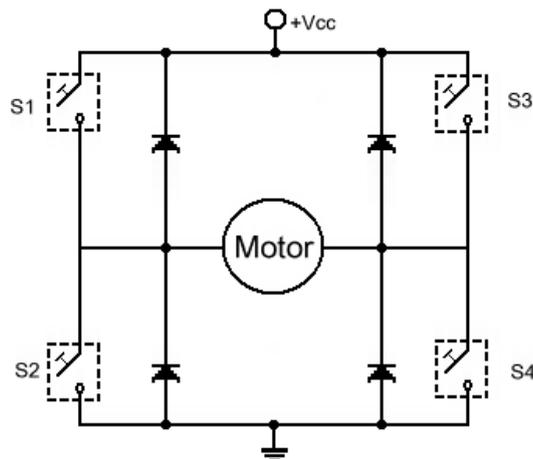


Figura 14. Representación del puente H.

Tomado de: (Hisvavila, 2014).

Según la anterior representación si los interruptores se encuentran abiertos en S1 y S4, el motor tiene un sentido de giro mientras que, si los interruptores se encuentran abiertos en S2 y S3, el motor gira en el sentido contrario. Esto se debe a que en la tensión en las entradas del motor se invirtió su polaridad y por ende su sentido de giro. Estos circuitos son los denominados Puente H, utilizan una conmutación del circuito por pulsos que se generan gracias a señales eléctricas (Briceño, s.f.).



*Figura 15.* Funcionamiento del controlador del motor puente H.

Tomado de: (Hispavila, 2014).

Los diodos que se encuentran en el circuito sirven para proteger los transistores y la descarga inductiva del motor. Manipulan la tensión con los pines por lo que se puede conseguir que los transistores cambien a un estado de corte o saturación generando así un circuito que pueda abrir o cerrar lo que sería los interruptores, mencionados anteriormente, mediante los transistores (Carletti, 2007).

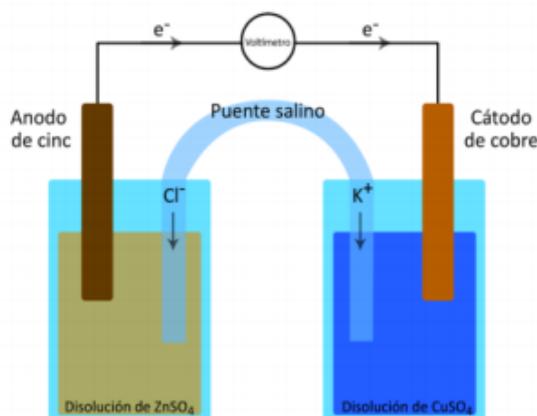
El campo magnético que posee el rotor tiene la capacidad de almacenar energía importante dentro del circuito, y en el momento de interrumpir la alimentación, se libera este campo en forma de corriente eléctrica que será dirigida por los diodos para que no afecten a los transistores ni a la fuente de alimentación (Dimension Engineering, 2007).

## 2.6 Sistemas de Baterías

Una batería eléctrica también conocida como acumulador eléctrico, es un dispositivo que posee celdas electromagnéticas que transforman la energía química de su interior en energía eléctrica. su principal función es la de alimentar circuitos eléctricos dependiendo del tamaño. La medición de las baterías corresponde a las unidades de amperios hora, es decir que brinda cierta

corriente por una hora de funcionamiento continuo. Mientras más alta sea la capacidad de carga de energía más alta es la capacidad de almacenar energía.

La función de una batería consiste en el principio de oxidación y reducción de celdas químicas. Este principio dice que en el interior de la batería algunos elementos químicos pierden electrones y otros ganan permitiendo así la apertura del circuito conocido como carga o el cierre del circuito conocido como descarga (EcuRed, s.f.).



*Figura 16.* Celdas electroquímicas, ánodo y cátodo.

Tomado de: (Universidad Técnica Federico Santa María, 2014).

Las características que más identifican a las baterías son, la cantidad de energía que pueden almacenar ya que como se explicó anteriormente mientras más carga pueda darse, más capacidad de almacenamiento se tiene. Otra característica es la entrega de máxima corriente que corresponda a la descarga de esta y por último la profundidad de descarga que la batería puede soportar, este valor se lo determina de manera porcentual ya que es la energía que puede extraerse de una batería.

Existen dos tipos de baterías, una primaria que consiste en una reacción electroquímica irreversible, que quiere decir que una vez que se descarga la batería no se puede volver a cargar. La secundaria consiste en una reacción electroquímica reversible que significa que una vez descargada la batería puede cargarse dando corriente continua con una fuente externa, su eficiencia dentro

del proceso de carga y descarga es de 70% a 80% (Universidad Técnica Federico Santa María, 2014).

## 2.7 Sistemas de modelamiento 3D

Un sistema de modelamiento en 3D es un software que permite realizar proceso de representación digital en 3D. Existen varios tipos de software que permite no solo crear piezas de forma separada sino también ensamblar estos elementos para una visualización de todas las piezas unidas.

Estas aplicaciones permiten diseñar y plasmar objetos tridimensionales en ambientes virtuales. Para crear dichos elementos se utilizan superficies, ejes y sólidos. Para la modificación de elementos diseñados, se necesita trabajar en el plano de modificación ya que este ayudará tanto a tomar medidas como a dimensionar las modificaciones que se estén implementado.

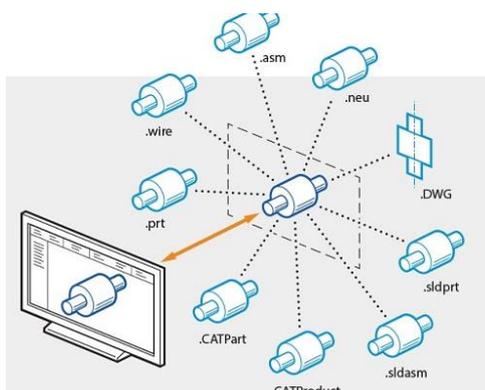


Figura 17. Vistas de un modelamiento en 3D.

Tomado de: (3DCadPortal, 2015).

Existen programas de diseño mecánico los cuales trabajan en modelamiento paramétrico, directo y libre. Para un diseño de piezas se necesita de un plano, el cual permite generar un dibujo en 2D para posteriormente transformarlo a 3D y tener la pieza que se necesita (3DCadPortal, 2015). También algunos programas permiten la simulación de objetos, sistemas de movimiento, etc. Incluso se pueden importar diseños de piezas reales tales como motores, microcontroladores, y elementos comunes como un cable.

Existen varios programas que permiten realizar el modelamiento en 3D unos son dedicados para estudiantes como son SketchUp, el cual es de un nivel intermedio, su manejo no es tan complejo y se pueden agregar imágenes para que la representación en 3D sea más real. A nivel profesional ya se utilizan programas como AutoCAD, el cual permite crear elementos, unirlos y verificar si las medidas de estas están correctas. Otro software que es para nivel de diseño industrial es el Inventor, esta aplicación fue la utilizada en el proyecto de titulación debido a que no solo permite crear piezas y ensamblarlas sino también permite una animación preliminar de la unión de todas las piezas verificando así su correcto funcionamiento.

El diseño ya implementado en la computadora se puede imprimir en una impresora en 3D, la cual genera sólidos tridimensionales con materiales especiales. El proceso de impresión consiste en la adición de materiales capa por capa y de la parte inferior hasta la superior (Universitario, 2016). Para el proyecto de titulación se utilizó un tipo de plástico transparente el cual es muy fuerte y no se rompe fácilmente. Este proceso de impresión se demora por lo que los diseños pueden ser impresos en un solo plano y dimensionándolos con las medidas establecidas.



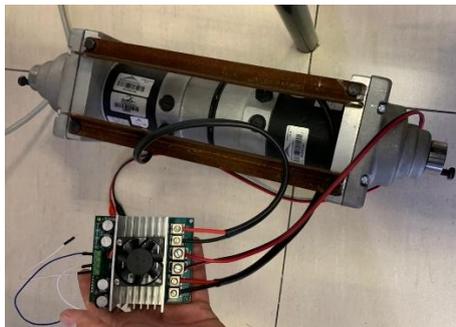
*Figura 18.* Impresora 3D utilizada en el proyecto de titulación.

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

#### 3.1 Diseño de la silla de ruedas

El proyecto de titulación se enfoca en el movimiento independiente de las personas con discapacidad, por lo que la silla de ruedas tendrá motores con gran torque incorporados a una estructura extra. Para esto se debe tomar en cuenta que la estructura de la silla debe ser capaz de soportar el peso tanto de la persona como de los motores y todas las piezas que conforman el circuito. Como las sillas de ruedas comunes no son diseñadas para sostener tantos componentes, se agregará y se modificará muchas piezas, permitiendo así el soporte de todos los componentes.

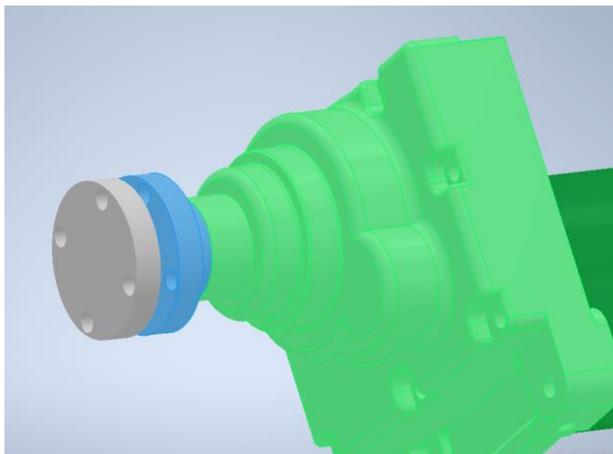
Para el montaje de los motores en la silla de ruedas, primero es necesario adaptar la estructura de la silla a las dimensiones de los motores por lo que se alinea los motores uniéndolos con dos estructuras de metal denominadas ángulos los cuales servirán posteriormente para unir los motores con la silla. Los ángulos son de 90° y permiten unir piezas circulares y rectangulares, esto permitirá acoplar los motores a cualquier tubo que se suelde a la silla.



*Figura 19.* Motores unidos con ángulos.

La unión de los ejes de las ruedas con los motores es uno de los procedimientos más complejos ya que se tiene que diseñar unas piezas que junten las dos partes. Para esto se pensó en un acoplamiento llamado matrimonio el cual junta las dos piezas de forma fija, es decir que la rueda girara solo si el eje del motor está girando. Para la realización de esta pieza se realizó medidas del largo del

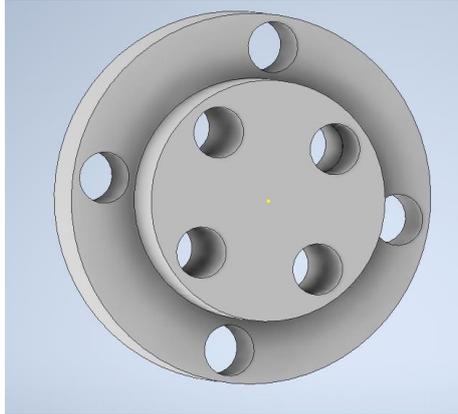
eje del motor y de la rueda así mismo como su diámetro, esto para verificar la unión de estas dos piezas funcionaran perfectamente. Dos piezas son las requeridas para el matrimonio, una que se junte con el motor y otra que se junte con la rosca que unirá la rueda. Se llama matrimonio porque las dos piezas se unen siempre.



*Figura 20.* Unión del matrimonio con los ejes del motor.

Las medidas de los pernos y sus agujeros en el matrimonio deben ser muy precisas ya que si no cuadran no se podrá completar el acople y no será seguro unir la silla con los motores. Para realizar los agujeros existen muchas herramientas mecánicas las cuales perforan la pieza con una medida exacta y sin ningún inconveniente.

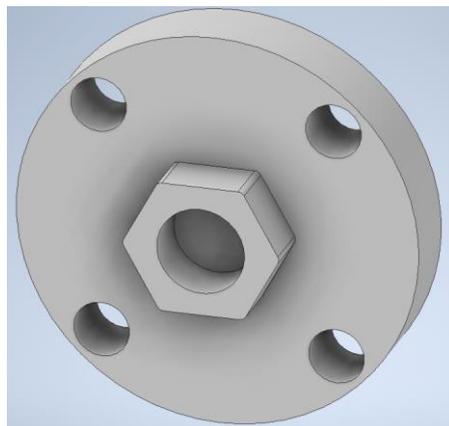
Una vez generado todos los espacios para el acople se procede a encontrar los pernos que calzan tanto en la pieza de metal como en el motor. Para unir se debe ver si se utiliza pernos con tuerca o de rosca la diferencia de los dos es que el uno ajusta con la tuerca la unión, y la otra solo une con el giro ya que posee en su estructura unos canales que permiten ajustarse solo.



*Figura 21.* Perforación de la pieza.

Una de las piezas más importantes de toda la estructura es la rosca que unirá a la rueda con el motor, se debe identificar un centro en el matrimonio en donde se soldará la rosca. Estas medidas deben ser lo más exacto que se pueda ya que si el eje no está en el centro, el giro de la rueda no será el requerido produciendo fricciones y desgaste en la estructura de la silla.

Como la rosca necesita el giro de un sentido para ajustarse con el eje de la rueda y en sentido contrario se afloja, es necesario perforar un extremo de la rosca al igual que el eje de la llanta, esto será necesario para cruzar una pieza metálica que fije el movimiento tanto de la rueda como la del motor unido al matrimonio. Así la unión de las todas estas piezas permitirá el giro de la llanta de la silla con los motores que serán acoplados.



*Figura 22.* Rosca unida en el matrimonio para la unión con el eje de la rueda.

Una vez diseñado e implementado el matrimonio con la silla de ruedas, se procede a arreglar la estructura general de la silla. Primero el dimensionamiento normal de la silla se agranda ya que la unión de los motores agrega un par de centímetros a cada lado por lo que se debe soldar una base más larga y sólida para, la unión de los extremos de la silla y soporte de su cuerpo.

Dentro de lo que es el asiento como tal, se agrandará la lona propia de la silla incorporando una tela anti-escaras debido a que la silla está diseñada para personas que en su mayoría pasan sentadas o sin mucho movimiento en sus extremidades.



*Figura 23.* Estructura de la silla de ruedas con los motores montados.

Finalmente, se tiene la silla de ruedas con los motores acoplados y sus respectivos controladores se agregarán a la estructura de la silla después, para realizar las pruebas finales. La estructura primaria de la silla cambia en su totalidad ya que aparte de que se impulsará con motores también la comodidad mejora al igual que es diseño y funcionamiento del motor. Por lo que el resultado de la estructura final será más amplia y capaz de soportar un gran peso, como el de los motores y el de una persona discapacitada.

### **3.2 Diseño de la caja controladora**

Para la caja controladora se utilizó el software de modelamiento conocido como Autodesk Inventor Professional, el cual permite, como se mencionó anteriormente, modelar esquemas tanto en 2D como en 3D para posteriormente

imprimirlos en 3D. Para poder imprimirlos en 3D se necesita exportar los diseños finales en formato (.stl) o también denominado 3D Object, ya que con esto se puede plasmar el objeto en la plantilla de impresión.

Dentro de la caja controladora se encuentran tanto el microcontrolador como el controlador del motor, los cuales se interconectan para poder manejar así todo el proceso de la silla de ruedas, se diseñaron espacios específicos de los componentes, para montar los cables y también para tener conexión externa ya sea con la computadora o con el sensor.



*Figura 24.* Modelamiento 3D de la caja controladora.

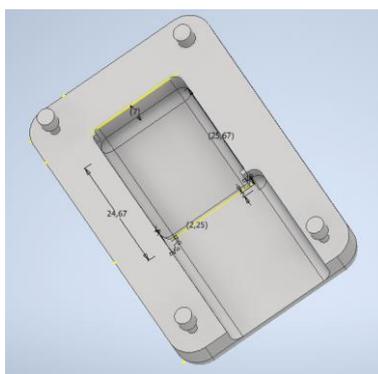
La tapa de la caja controladora tiene una altura diseñada para que el ventilador del controlador del motor pueda tener libertad en entrada y salida del aire y funcione de la mejor manera. En los extremos se perforó las esquinas y el centro debido a que en el momento de sellar la caja se acoplará a unos picos que se encuentran en la caja controladora. Se diseñó de esta manera para que exista facilidad en abrir y cerrar la caja según se necesita. En un principio se diseñó sin esta estructura extra y se notó que para cerrar la caja se tenía que sellar con pegamento y se generaría un gran inconveniente abrirlo para seguir conectando los elementos.



*Figura 25.* Modelamiento 3D de la tapa de la caja controladora.

La caja del sensor está diseñada para que contenga tanto el sensor como el puerto de conexión RJ-11, se utilizó este punto de conexión para que la vinculación de los cables sea más estable y también más amigable con el usuario. Como el sensor, para toda la programación y pruebas primarias se soldó los espadines, para ya las pruebas finales se tuvo la necesidad de desoldar los espadines y soldar los cables propios de los conectores RJ-11.

El sensor debe estar bien fijo en la estructura de la caja, ya que así se podrá tener las lecturas de los movimientos más precisos. Esto se debe tener muy en cuenta ya que si el sensor este suelto las órdenes que se darán a los motores no serán las que se requieren.

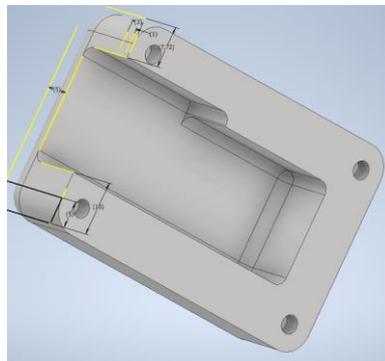


*Figura 26.* Modelamiento 3D de la caja del sensor.

La tapa de la caja del sensor debe tener el espacio necesario para que los cables puedan ser colocados con libertad y sin doblarlos tanto, esto se debe a que si se

los dobla demasiado tienen el peligro de romperse y la conexión se perdería. Adicionalmente, los agujeros que se encuentran en las esquinas son para sostener la caja y no dejar que las piezas se caigan.

Los bordes no son tan gruesos debido a que su peso aumentaría y no sería factible para colgarlo en la cabeza del paciente. Además, un dispositivo muy grueso sería un estorbo más que una ayuda al paciente. Las dimensiones para los acoples de la caja son más gruesos para que no exista el inconveniente de que las patas de los extremos se quiebren y no se pueda unir la caja de sensor.



*Figura 27.* Modelamiento 3D de la tapa de la caja del sensor.

Todas las piezas se diseñaron a partir de los elementos que se encuentran dentro de las cajas. Se importaron diseños de formato CAD, elementos reales como son, el controlador, el Arduino MEGA2560 y el sensor Adafruit BNO055, esto se debe a que las dimensiones tienen que ser lo más preciso posibles para que quepan todos los elementos físicos.

Para finalizar con el diseño se conectan con un cable RJ-11 y se separan las piezas para colocarlas en la silla de ruedas. Se debe verificar siempre que las conexiones de un lado son diferentes del otro por lo que los colores de los cables de cobre deben ser unidos tal y como se necesitan.



Figura 28. Elementos separados y enlazados con el conector RJ-11.

### 3.3 Diseño del circuito

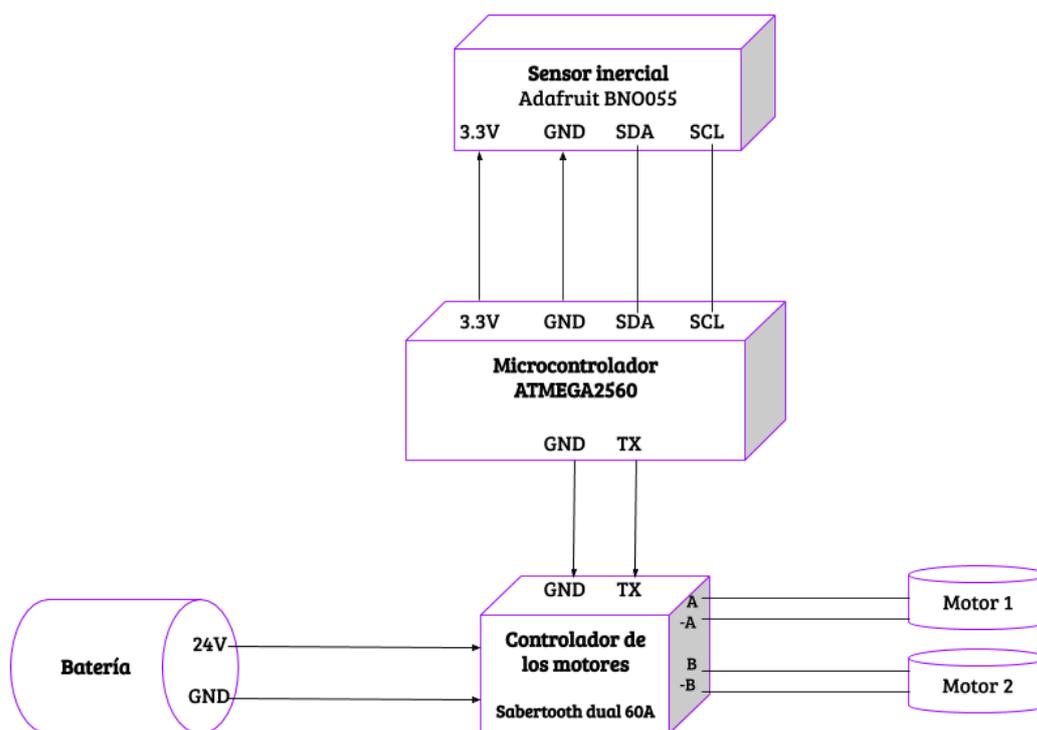
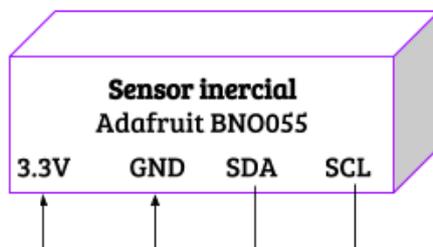


Figura 29. Diagrama en bloques del circuito del prototipo.

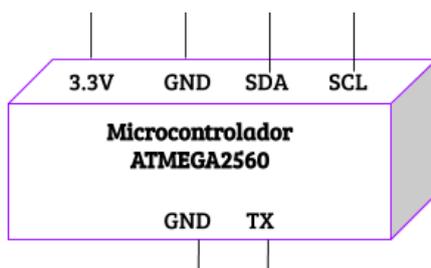
Como se puede apreciar en la figura 27, el circuito consta de tres bloques, el primero es el sensor inercial (Adafruit BNO055), el segundo es el microcontrolador (ATMEGA 2560), y por último tenemos el bloque que

corresponde a la silla como tal, en el que se encuentran la batería, el controlador (Sabertooth dual 60A), y los motores (NPC-64). Por lo tanto, se explicará a detalle cada uno de los bloques anteriormente mencionados:



*Figura 30.* Bloque 1 - sensor inercial Adafruit BNO055.

Este bloque es de los fundamentales para el correcto funcionamiento del prototipo, porque a partir de la utilización de este, es posible detectar los ángulos de los movimientos en la cabeza del sujeto que utilice el prototipo. Como se ha mostrado en el capítulo de marco teórico, el sensor obtiene los datos de los ejes (x, y, z), a partir de la fusión del acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. Esta fusión, permite que la información obtenida sea precisa. Como se puede apreciar en la figura 28, se utilizan los pines (3.3V, GND, SDA, SCL). Todos estos irán conectados al bloque 2 por medio de un cable con conectores RJ-11.

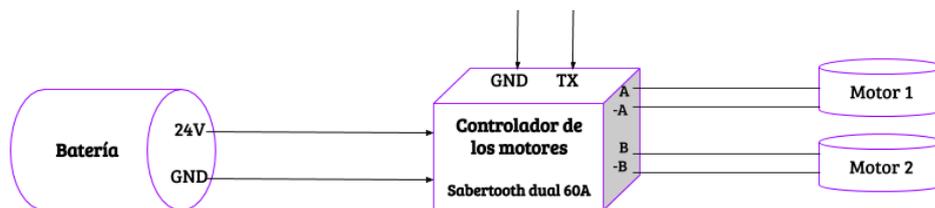


*Figura 31.* Bloque 2 - Microcontrolador ATMEGA2560.

En el bloque 2 se encuentra el cerebro del prototipo, debido a que el microcontrolador se encuentra programado con el algoritmo para utilizar la información del bloque 1 (Sensor inercial) y a partir de la misma para enviar sentencias al bloque 3, específicamente al controlador de los motores, para que estos procedan a moverse. También cabe recalcar que ayuda para establecer

referencia a tierra, tanto para el sensor inercial como para el controlador, porque ambos bloques se conectan a tierra a través del microcontrolador.

El microcontrolador ATMEGA2560 se utiliza por su cantidad de timers y puertos seriales. Dado que el timer necesario para la base de tiempo al transmitir pulsos a los motores interfiere directamente con una de las librerías del algoritmo. Y también para la verificación de información era necesario utilizar otro serial, que no ralentice o bloquee la transmisión de los mencionados pulsos.



*Figura 32.* Bloque 3 - Batería, controlador de motores y motores.

El bloque 3 por su parte es responsable de la movilidad del prototipo. Empezando desde la batería, que provee de 24 voltios necesarios para energizar el controlador y los motores. Luego está el controlador (Sabertooth dual 60A), se escogió este controlador por la cantidad de consumo de corriente que podría soportar a partir de los motores, porque al dimensionar el consumo se tomaba en cuenta el peso de la silla de ruedas, de los acoples, fricción del suelo y, por último, pero no menos importante el peso del sujeto que utilice el prototipo.

Por último, los motores (NPC-64), seleccionados por su capacidad y torque, tomando en cuenta todos los puntos establecidos en el párrafo anterior, funcionen de manera correcta y sean de gran utilidad para el prototipo, porque también se planteó que pueda funcionar para subir terreno inclinado.

Para este proyecto en específico fue necesario utilizar la siguiente disposición en el DIP Switch del controlador.

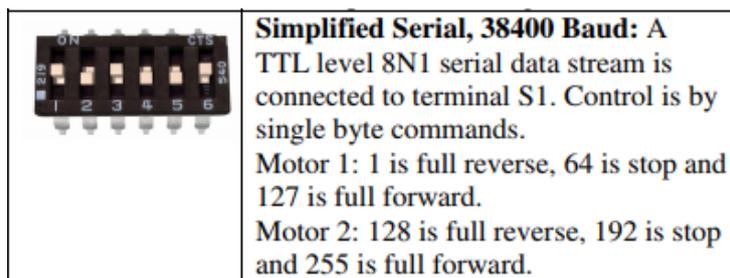


Figura 33. Disposición de DIP Switch del controlador.

Tomado de: (Dimension Engineering, 2007).

Al disponer así los DIP Switch la frecuencia con la que trabajará el microcontrolador debe ser de 38400 baudios. Y utiliza un determinado rango de números, que van desde 1 hasta 255. Donde para el motor 1, su máxima velocidad se expresa con 127, máxima velocidad en reversa con 1 y su alto se encuentra en 64. Para el motor 2, su máxima velocidad va con 255, reversa con 128 y su alto es 192.

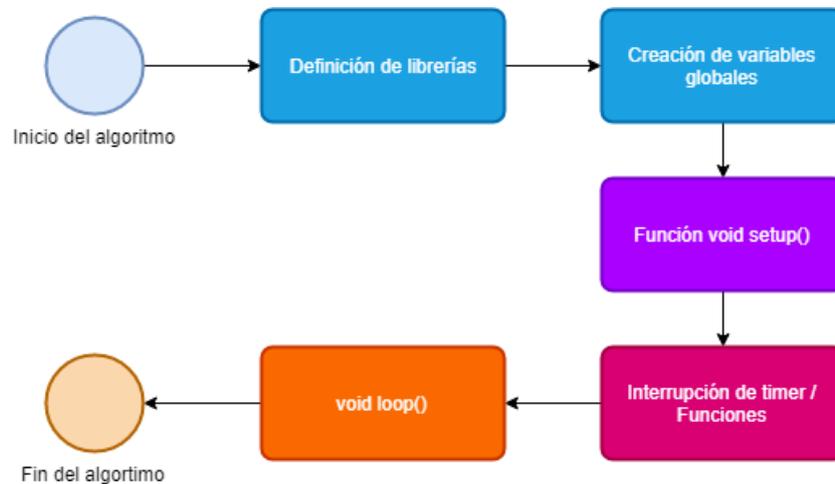
Se adjunta a continuación una tabla de los pines utilizados del microcontrolador:

Tabla 1.

*Pines del microcontrolador utilizados.*

Pines ATMEGA2560	End
SCL (Pin 20)	Sensor SCL
SDA (Pin 21)	Sensor SDA
3.3 V	Sensor Vin
GND	Sensor GND
Vin	Driver 5 [V]
TX2 (Pin 16)	Driver S1
GND	Driver 0 [V]

### 3.4 Diseño del algoritmo



*Figura 34.* Diagrama de flujo general del algoritmo.

El algoritmo de manera general se resume como en la figura 32. Primero la definición de las librerías, después la creación de variables globales, seguido de la función `setup()`, la interrupción de timer, funciones, `loop` y por último el fin del programa. Para la definición de las librerías se toma en cuenta al fabricante del sensor BNO055 utilizado en el prototipo, la librería de cálculo de la IMU y una librería de sensor genérico perteneciente al fabricante.

Posteriormente es necesario crear las variables globales a utilizarse. Las variables globales son necesarias para utilizarlas en las diferentes funciones que se muestra en la figura x del diagrama de flujo general, variables como `power1` y `power2`, así como los contadores para utilizar bases de tiempo para detección de movimientos, así como el envío de pulsos al controlador de los motores.

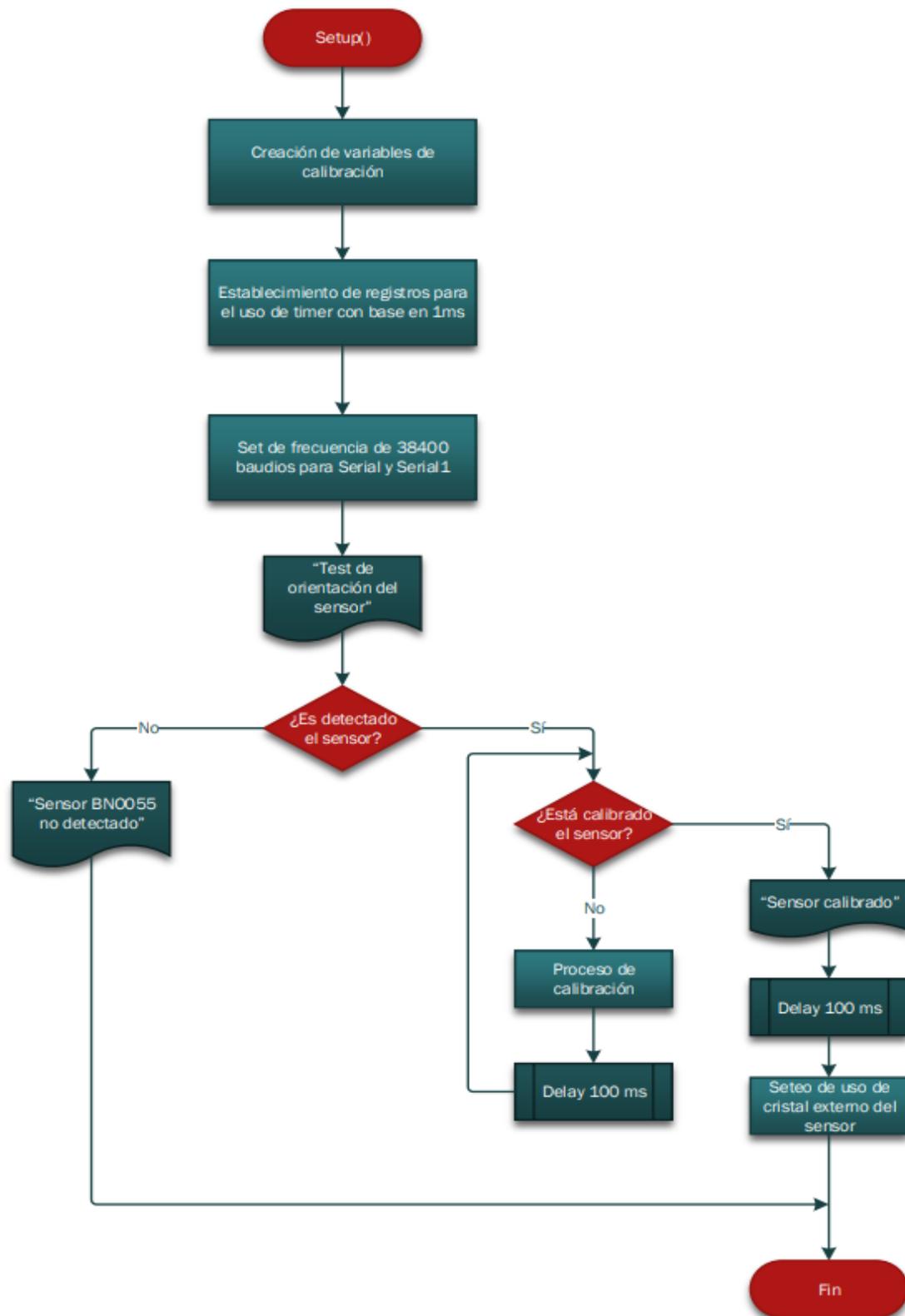


Figura 35. Diagrama de flujo de la función setup().

En la función de setup, Se procede a determinar los registros del timer1 del microcontrolador en una base de tiempo de un milisegundo (1 ms), así como también activar la interrupción propia del timer mencionado. Determinar la frecuencia con la que los puertos seriales funcionan, la misma es de 38400 baudios (se utilizó esta frecuencia por el controlador de los motores). Para después validar si el sensor ha sido detectado y se solicita que se encuentre correctamente conectado. Una vez validado que el sensor es detectado, se procede a la calibración del sensor, posterior a la calibración se utiliza un delay de un segundo para activar el cristal de uso externo que posee el sensor BNO055.

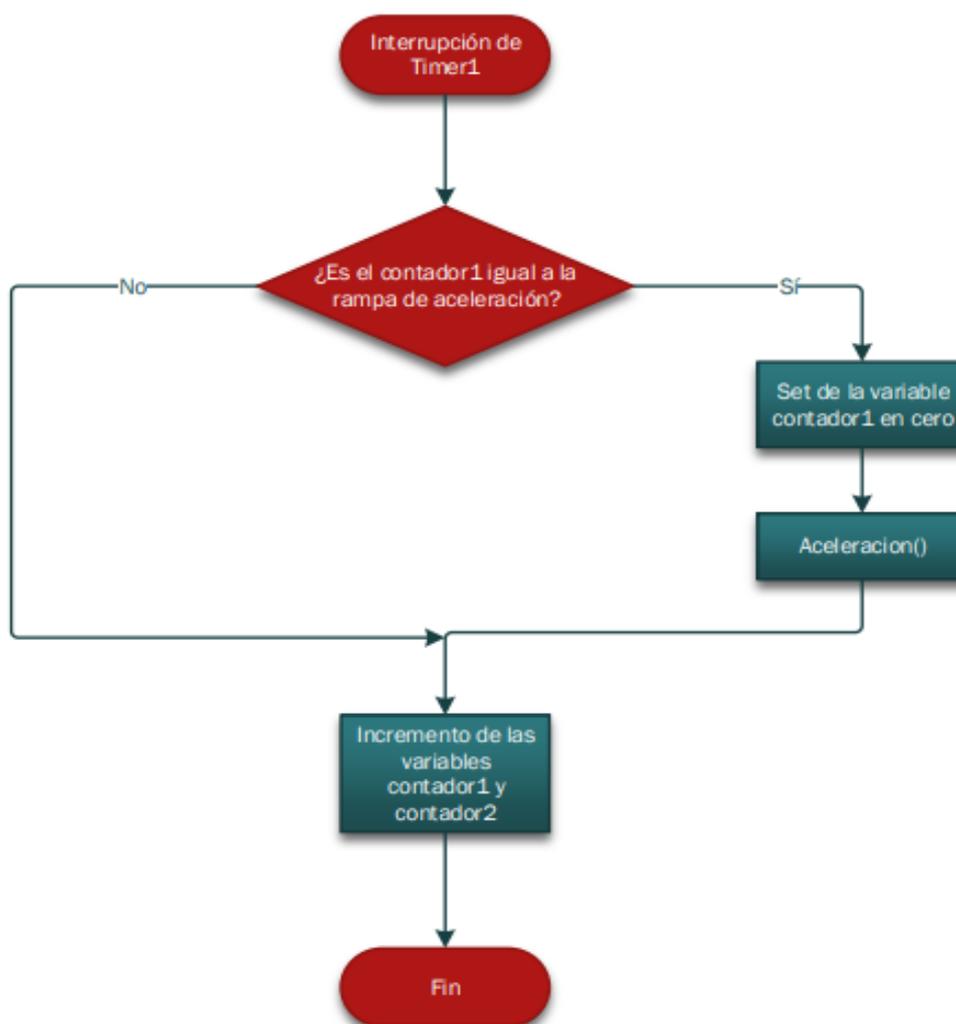


Figura 36. Diagrama de flujo de la función Timer1().

La interrupción del timer con base de un milisegundo, como tal comprueba que, si el contador es igual a la rampa de velocidad definida en la función de Detección de Movimiento, ingresa a la función de Aceleración, y se encera la variable cont1. Esto con el fin que de que cada determinado tiempo (definido por la variable rampa), ingrese a la función responsable del movimiento del prototipo (Aceleración). El incremento de las variables contadoras se produce después de la validación del contador 1.

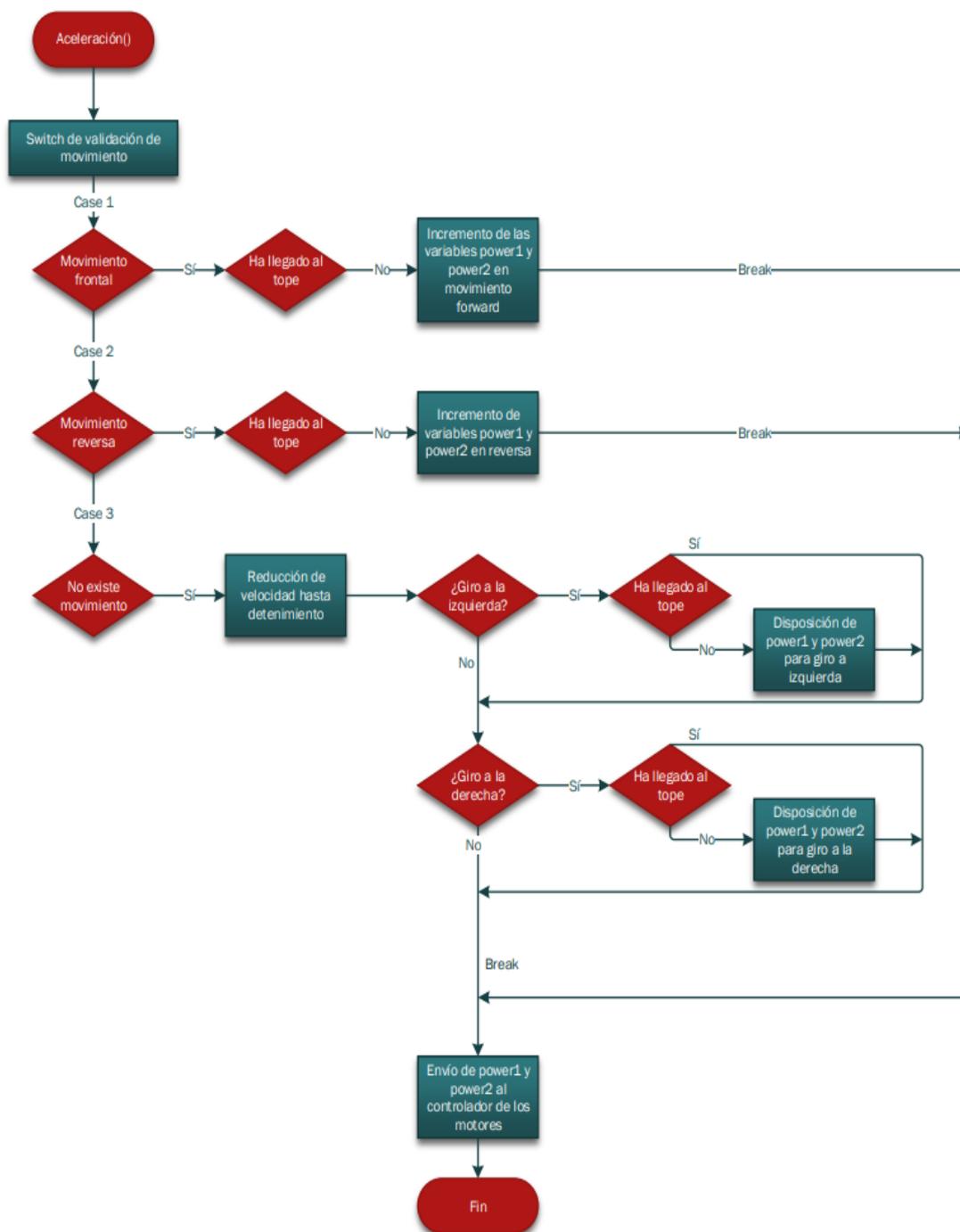


Figura 37. Diagrama de flujo de la función Aceleración().

Dentro de la función Aceleración, se utiliza un switch, porque al momento de determinar el movimiento requerido en la función de detección de movimiento se asigna valores a dos variables una es “forward” y la otra es “giro”. Si la variable forward es igual a 1, esto significa que es necesario avanzar hacia el frente, si

forward es igual a 2, se dispone a moverse en reversa y si forward es igual a 3, quiere decir que movimientos, frontal o de reversa no son requeridos.

Dentro de la última validación se encuentra el detenimiento en caso de que los motores se encuentren en movimiento, se toma en cuenta que ambas variables forward y giro son igual a 3. Al girar si la variable "giro" es igual a 1, se procede a girar en sentidos contrarios a los motores con el fin de que el prototipo se mueva hacia la izquierda. Si la variable giro es igual a 2, se dispone el movimiento de los motores en sentido contrario para girar a la derecha. Y por último se envían los valores de las variables power1 y power2 a los motores por el puerto serial 1.

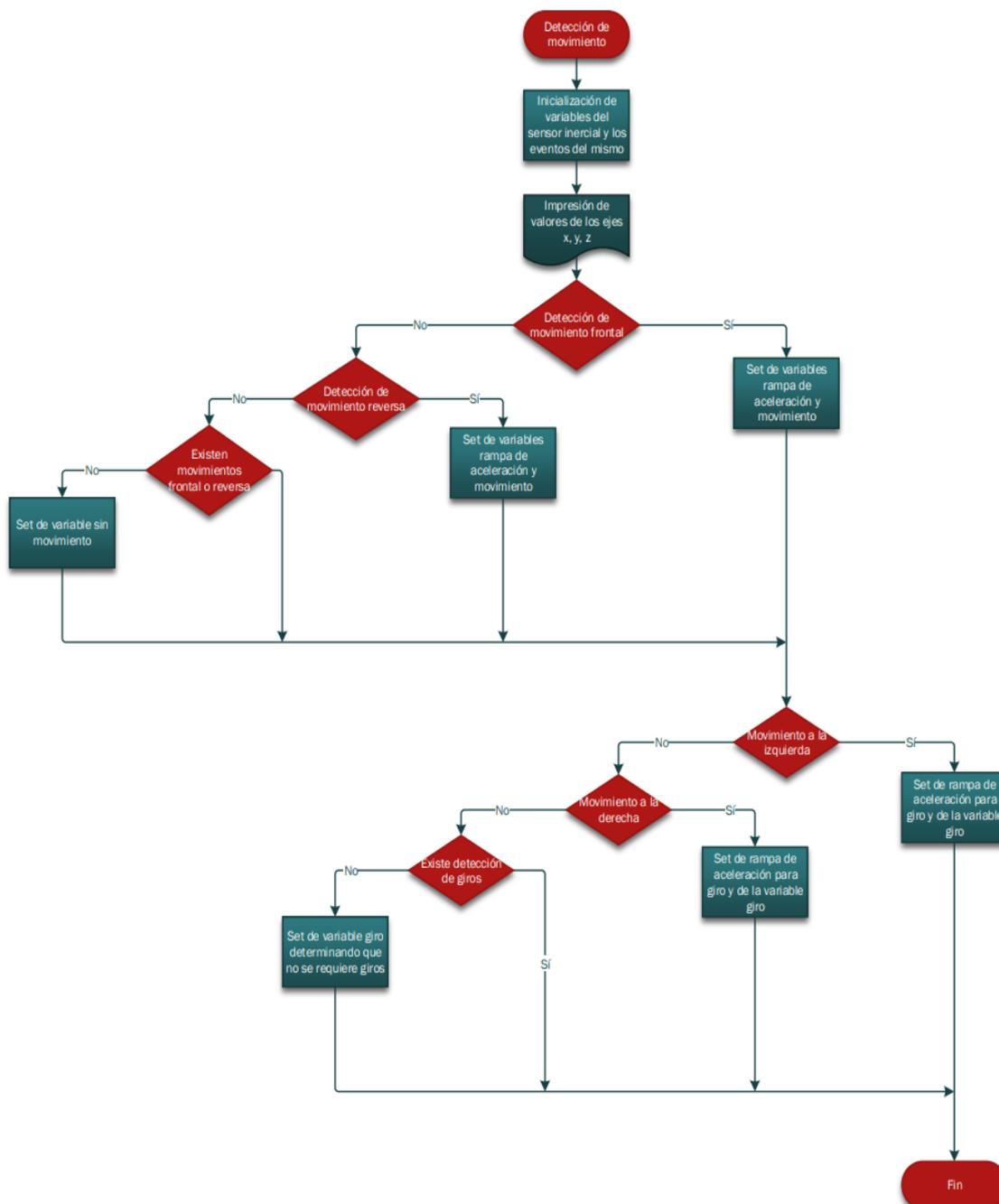


Figura 38. Diagrama de flujo de la función DeteccionMovimiento().

Por su parte la detección de movimiento utiliza variables locales, que no pueden ser globales por restricción de la librería. Estas variables son para crear objetos con referencia a los eventos del sensor, los cuales ayudan para determinar la posición de los ejes x, y, z. Para el algoritmo y la validación del movimiento requerido se utilizaron ejes y, z. Se excluyó el eje x, debido a que si la persona giraba su cabeza para conversar o mirar algo en particular el prototipo giraría sin

haberse requerido el movimiento como tal. Por tanto, las validaciones se separan para ambos ejes (y, z).

Para el eje y los movimientos adelante / atrás, con las variables a tomar valores como se explicó en la función Aceleración, además de determinar el valor de la variable rampa, esto porque al girar se toma en cuenta la fricción y el giro era más lento que cuando se requería movimientos con el eje y. Por tanto, la rampa para esta validación es de 300, lo que determina una base de 300ms para enviar pulsos a los motores al ingresar a la interrupción del timer implementado.

En cambio, para el eje z, mediante prueba y error se determinaron rangos de movimiento para proceder al giro. La variable giro toma valores como se mostró en la explicación del diagrama de flujo de la función Aceleración, incluyendo el asignar un valor a la variable rampa, este valor será menor, porque al realizar pruebas el giro toma más tiempo por la fricción generada al utilizar el movimiento invertido en uno de los motores, por lo que, se determinó utilizar una base de tiempo menor para realizar los giros.

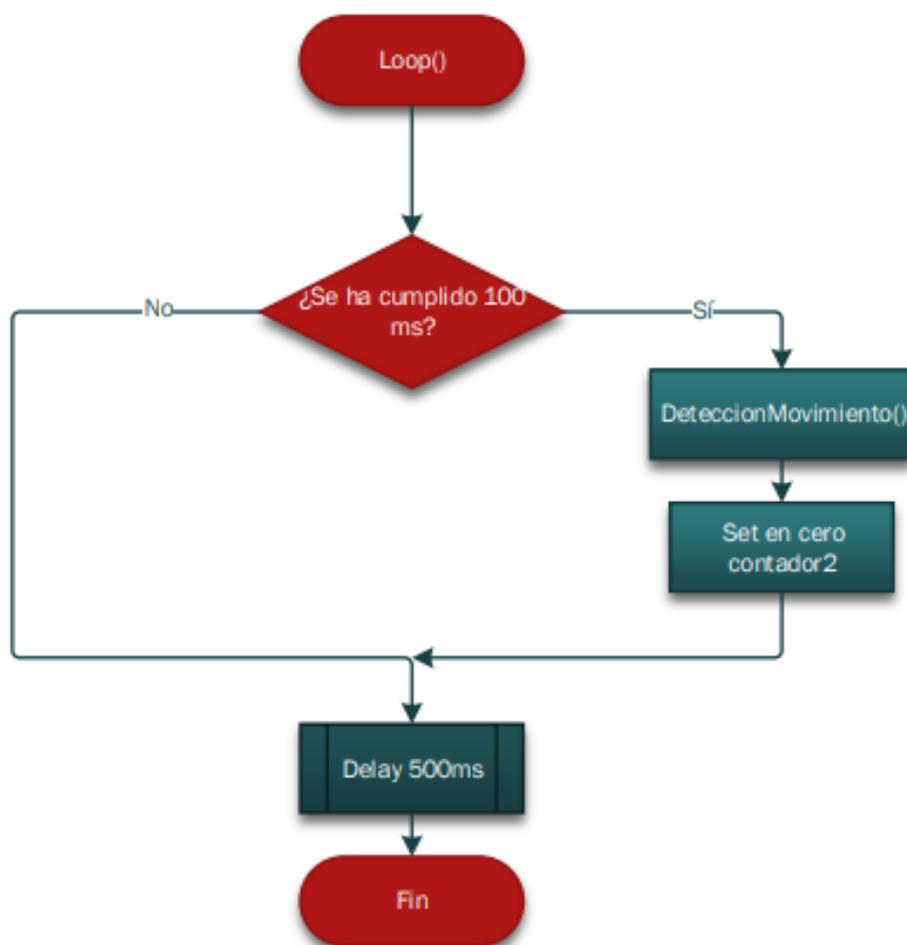


Figura 39. Diagrama de flujo de la función Loop().

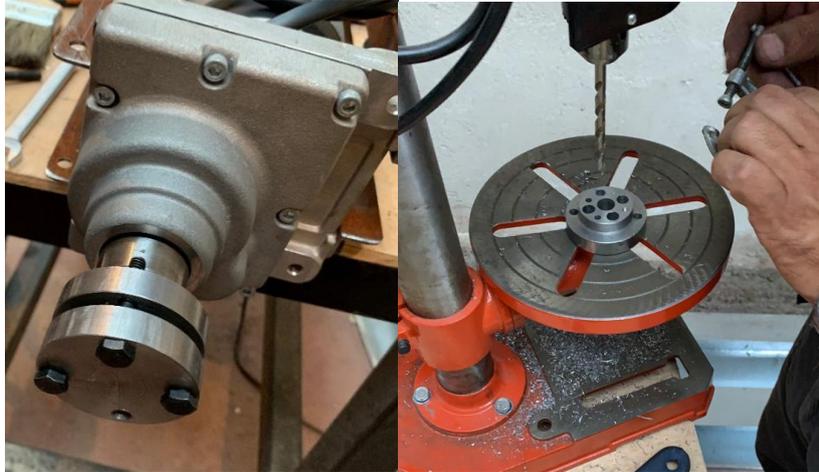
Esta función tiene cierta similitud con la de interrupción de timer, porque valida si el contador 2 ha llegado a cien, para luego ingresar a la función de detección de movimiento y encerrar la variable del contador 2.

## 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1 Pruebas y resultados silla de ruedas.

Antes de realizar la estructura extra de la silla se tuvo que ver un acople el cual permita unir los motores con los ejes de las sillas. Esto se lo realizó con unas piezas metálicas las cuales se debían perforar para que los agujeros coincidan con los del motor, estas piezas llamadas matrimonios se los perfora con una

herramienta conocida como torno, el cual permite realizar trabajos con medida y mucha exactitud. Debido a que no se disponía de dicha herramienta se perforó las piezas con taladro y brocas. Antes de trabajar con las brocas se tuvo que medir varias veces para que los agujeros coincidan perfectamente.



*Figura 40.* Perforación de los matrimonios para la unión con los motores.

Una vez medidos y marcados los agujeros se perforó con mucho cuidado tratando de buscar una broca que coincida con los pernos pertenecientes a los agujeros de los motores. Ya terminada la perforación en los matrimonios se acoplaron a los motores para ver si coincidían los agujeros y se los ajustó con los pernos antes mencionados.

Adicionalmente, se soldó la tuerca que se mencionó en el diseño de la silla de ruedas, esta debido a que va a ser la que se ajuste con el eje de las ruedas. Como el matrimonio son dos piezas por lado se necesitó perforar también la pieza de la tuerca para que con los pernos se ajuste el matrimonio y así se quede fijo y no presente ningún problema en las pruebas de los movimientos.



*Figura 41.* Soldadura de la tuerca en el matrimonio.

En el primer prototipo de la silla se montaron los motores con solo una estructura que sostenga la unión de estos, se soldó en los ángulos incorporados a los motores. Adicionalmente, a la silla se soldó un tubo extra fijando así su estructura. En cuanto a los ejes con los matrimonios, también se soldó la tuerca como se especificó en el diseño del capítulo anterior. Se perforó en un extremo de la tuerca y del eje para que el movimiento de la rueda sea proporcional al movimiento del motor.



*Figura 42.* Primera estructura de la silla con los motores.

Una vez implementado todo, se realizaron las primeras pruebas y se pudo observar que una de las ruedas no giraba uniformemente por lo que las piezas del matrimonio empezaron a desgastarse. Por otro lado, visualmente la silla presenta una estructura un poco inclinada ya que los tubos que se los incorporo no eran de la medida que se necesitaba, esta medida se la verifíco con la de la estructura que se soldó los motores.

Para corregir la inclinación de la estructura de la silla se necesitó desoldar las piezas adicionales y además se necesitó cortar unos tubos los cuales tenían una dimensión superior a la que debía. Una vez cortada toda la estructura, se verificó las dimensiones que se necesitan y se incorporó las piezas correctas. Además, se verificó que las ruedas giren sin ondulación para que las piezas no se sigan desgastando. Gracias a estas nuevas adecuaciones la estructura redujo su anchura y mejoro su apariencia y funcionamiento.

Por el peso de los motores se necesitó adjuntar otro tubo para que el soporte sea el óptimo. Adicionalmente, se agregó otra estructura en el frente de la silla para que la apertura sea equitativa tanto en la parte posterior como en la delantera. Una vez arregladas todas las piezas con las medidas adecuadas, se procedió a verificar el movimiento de los motores con las ruedas.

En el momento de realizar las pruebas ya con la silla no se asentaron las llantas en el piso ya que si se lo realizaban se tenía el riesgo de que el torque de los motores fuerce mucho el matrimonio al punto de romperlos. Es por esto que, todas las pruebas de los movimientos se los realizó progresivamente para que tanto la silla como los motores se acostumbre a trabajar con más peso.



*Figura 43.* Acople del matrimonio con los motores.

Una vez probado el movimiento se pudo notar que la fuerza del motor es tanta que la pieza que se incorporó atravesando la tuerca dentro del matrimonio se rompía cada vez que se realizaban las pruebas por lo que se vio como solución soldar la tuerca en el eje de la rueda así este no presentara ningún problema en

cada movimiento. Adicionalmente se soldó unos puntos en el matrimonio para que, con el movimiento de los motores y la rueda, no sufran desgaste los pernos colocados en este.

Ya con todos los cambios hechos se empezaron las pruebas con peso y en superficie plana para que la fricción de las ruedas no de mucho problema. Una vez calibrado los ángulos del sensor se procedió a las pruebas con el peso de una persona esto para verificar si la estructura de la silla soporta todo el peso incorporado y si el matrimonio con el eje de la silla está centrado y no da inconveniente en el movimiento de las llantas.



*Figura 44.* Matrimonio con las soldaduras para mejor funcionalidad.

En medio de las pruebas finales de la silla de rueda se pudo verificar que, dentro de la rueda, las sueldas que se incorporaron en los rodamientos no fueron suficientes debido a que se rompieron y la rueda giraba sin estar sujeta a su eje. Para esto se necesitó soldar más puntos para unir estas piezas y que giren solo si los motores están en movimientos. Con esto las pruebas finales no tuvieron ningún inconveniente y se pudo seguir con la incorporación del asiento y el espaldar para finalizar la silla de ruedas.

Con toda la parte motorizada completa y las pruebas hechas ya se pudo adaptar el asiento y el espaldar en sus respectivas estructuras, esto para ya verificar si toda la estructura esta completa, pero en el momento de incorporar estas piezas se vio la necesidad de ampliarlas ya que la silla aumento su ancho y no tienen las medidas originales. Una vez aumentado el tamaño tanto del espaldar como del asiento se atornillo a su estructura y se probó con una persona de peso ligero.

Gracias a esto se pudo verificar que los tubos que sostienen el asiento se desprendían en el momento de sentarse, esto debido a que esos tubos solo son puestos a presión, para esto se vio la necesidad de soldarlos a la estructura del espaldar y así no se desprendían cada vez que una persona toma asiento.



*Figura 45.* Suelda de los tubos que sostienen al asiento.

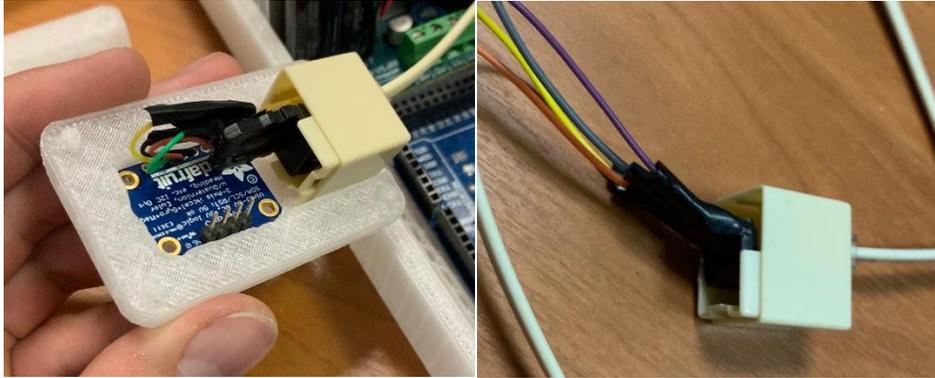
Con todas estas modificaciones la silla quedó acabada y con lista para el uso de los pacientes. El motor no molesta en el momento de sentarse por lo que el asiento u su estructura está un poco elevado, así cada que el paciente tome asiento no tendrá la molestia de hacerse para adelante para no topar con la estructura del motor.

#### **4.2 Pruebas y resultados caja controladora.**

En los diseños preliminares de la caja controladora y la caja del sensor se pensó que mientras más gruesa sea la cobertura de los elementos sería mejor pero después que se los imprimió se pudo notar que el peso de los dos componentes era excesivo para que el paciente lo tenga por un largo tiempo, es por esto por lo que se redujo los contornos y así el tamaño de los elementos antes mencionados.

Para la conexión de la caja del sensor con la caja del controlador de los motores, se utilizó un cable RJ-11, el cual facilita la comunicación ya que tiene los cuatro canales necesarios que se utilizan en el sensor. Los adaptadores de estos cables fueron modificados para que estén al borde de la caja del sensor y así la

apariciencia sea más amigable con el usuario. Se soldaron los cables al sensor para que la comunicación sea la óptima y en el otro extremo también se soldaron cables que se conectan al microcontrolador.



*Figura 46.* Cables soldados al adaptador del RJ-11.

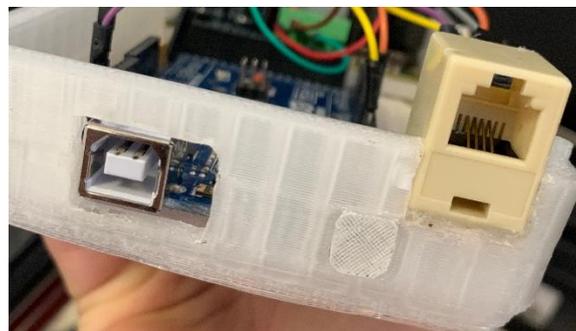
En el diseño de los contenedores se implementó un mecanismo de acople para la tapa y la caja, esto para que no se abra la caja sin necesidad o se caiga la tapa. En la impresión no siempre salen los diseños con las dimensiones que se implementan en los modelados 3D es por esto por lo que con una lima se tuvo la necesidad de igualar tanto los agujeros de la caja controladora como la del sensor. Una vez probado que el acople funciona se verificó que los agujeros de microcontrolador y de las conexiones del controlador estén en las posiciones correspondientes.

En el diseño principal de la caja que contiene el controlador no se implementó el espacio por donde ingresan los cables del motor por lo que se perforo y se limó en los espacios correspondientes dando así facilidad para que los cables sean conectados al controlados y a la batería ya que el controlador tiene conexión directa con la batería. Adicionalmente, los bordes interiores de la caja se eliminaron debido a que ocupaba mucho espacio y no permitía el ingreso de los componentes que deben estar en la caja.



*Figura 47.* Espacio limado para ingreso de los cables del motor y batería.

En la parte frontal de la caja se diseñó con dos espacios; uno para dar energía al microcontrolador y otro para la conexión con la computadora al microcontrolador, por si existe algún cambio en la codificación. Después de colocar todos los componentes y los cables, conectando el controlador con el microcontrolador, se verificó que la batería proporciona energía para que el microcontrolador funcione por lo que el agujero de la energía del microcontrolador se cerró con una de las piezas que se sacaron de los bordes internos.

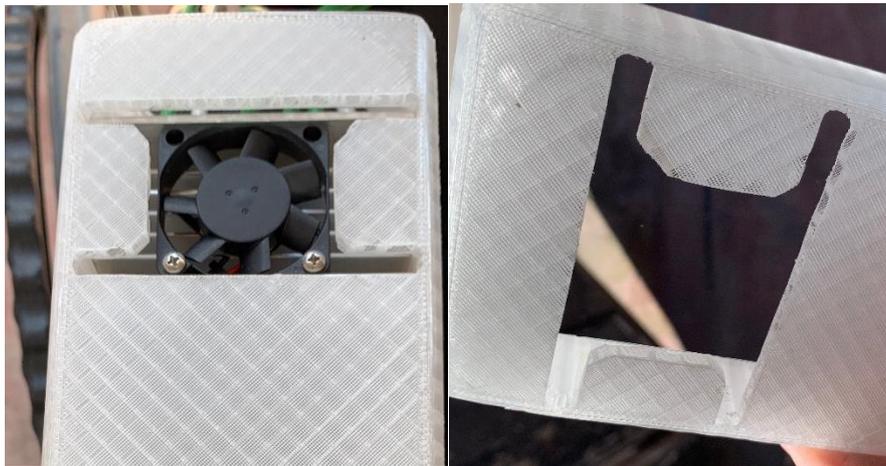


*Figura 48.* Adaptación de la pieza en el espacio de la alimentación del microcontrolador.

En cuando a la tapa de la caja del controlador, al principio se diseñó totalmente cerrada para que visualmente sea muy amigable con el usuario. En el momento de la impresión, como se mencionó anteriormente las dimensiones en el modelado 3D no son las resultantes, por los que no se cerraba completamente la caja. Adicionalmente, cuando se conectaban todos los componentes, el controlador no tenía tanto espacio para liberar el calor por el ventilador, por esto

se adaptó para que la tapa coincidiera con el ventilador para que el aire se dispere por fuera de la caja controladora y gracias a esto la estructura pudo cerrar y la caja ya no demostró ningún inconveniente.

El espacio que se modificó en la tapa primero se lo perforo para que coincida perfectamente con la superficie del controlador de los motores. Una vez perforados todas las esquinas y cortado el espacio del ventilador, se limó para que tenga una estructura uniforme y amigable para el usuario.



*Figura 49.* Modificación en la tapa de la caja controladora para la salida de aire del controlador.

Gracias a todas estas modificaciones se pudo reducir la utilización de cables sueltos y se mejoró visualmente las conexiones y en la parte interna de las cajas tanto del sensor como la del controlador se tuvo mejoramiento y conexiones seguras para que las comunicaciones sean las precisas, así en el momento del funcionamiento no existe ningún problema.

#### **4.3 Pruebas y resultados circuito.**

En cuanto al circuito no se tuvo la necesidad de realizar mayores cambios ya que todos los puertos que se utilizaron se los definió en la programación. Uno de los mayores cambios fue trasladar toda la programación de una adaptación a un microcontrolador UNO a un Mega ya que los seriales que se utilizaron no eran los suficientes en el primer microcontrolador utilizado.



*Figura 50.* Cambio de microcontrolador.

Adicionalmente, se implementó interrupciones, esto debido a que el freno de emergencia que se agregó requería de dicha programación para que se pare el proceso mientras el freno este activado. El freno de emergencia es más una medida de seguridad en caso de que el circuito o la programación presenten cambios repentinos y altere el funcionamiento de la silla.

En cuanto a la calibración del sensor, se incorporó un buzzer el cual genera un sonido mientras los ángulos de calibran. Esto se agregó al circuito debido a que el usuario no tenía conocimiento del inicio y fin de la calibración. También, se incorporó una extensión del botón reset del microcontrolador esto solo en caso de que el funcionamiento de la silla se detenga y no continúe leyendo los ángulos que se calibraron en un principio.

En cuanto a las conexiones, dentro de la caja controladora, no se necesitó cambiar el tipo de cable ya que los puntos de conexión solo permitían los espadines de cables de protoboard por lo que no se tuvo mayor inconveniente. Por otro lado, los cables conectados a los motores y a la batería se tuvo la necesidad de escogerlos muy cuidadosamente, esto gracias a que la batería genera mucha corriente y los cables normales no son aptos para soportar tanta corriente.

Una vez analizada la corriente que generaba la batería y la corriente que consumen los motores se necesitaron unos cables con capacidad 10AWG

flexibles ya que este tipo de elementos como posee varios hilos de cobre en ocasiones son muy rígidos y no se los puede manipular tan fácilmente.

Como la corriente que emiten los motores es muy grande porque su máximo valor es cincuenta amperios, y la unión de los cables del motor y las extensiones de los cables deben ser precisa, se necesitan un acople que soporte la corriente y emita sin ningún problema. Se utilizó un acople de cables de ducha que soportan hasta sesenta amperios que son aptos para transmitir la corriente tanto de los motores como de la batería.



*Figura 51.* Cables 10AWG que soportan la corriente de la batería y los motores.

Gracias a la adaptación de este tipo de material ya no se tuvo ningún inconveniente en la conexión de los motores con el controlador y la batería, como ocurrían al principio de las pruebas que los cables se calentaban al punto de no poder tocarlos.

#### **4.4 Pruebas y resultados algoritmo.**

##### **4.4.1 Familiarización con funcionamiento del sensor inercial**

En este punto se comenzaron a realizar pruebas únicamente con el sensor, a comprender cómo obtenía los ejes necesarios para la programación posterior. Se enfocó en realizar pruebas con movimiento, definir los ejes a utilizarse. El eje x se descartó en ese momento, por lo tanto, el eje Y se definió para censar

movimientos de flexión (hacia adelante) y extensión (hacia atrás), mientras que el eje z se pensó para el movimiento lateral, sea para la izquierda o la derecha.

Es necesario mencionar que hubo inconvenientes inicialmente por la calibración del sensor, las cinco primeras tomas de datos mostraban cero en los tres ejes, y a partir de las siguientes era posible comenzar a definir rangos de movimiento.

#### **4.4.2 Pruebas iniciales con controlador y motores**

Las pruebas con los motores y el sensor iniciaron, la estructura mecánica no se encontraba lista, por lo cual, se comenzó a trabajar con los motores separados. En este punto la disposición del dip switch del controlador era diferente, puesto que se utilizaba dos puertos diferentes a la transmisión, donde el registro enviado al controlador utilizaba ángulos en vez de los registros de 1 a 255. El envío de pulsos, el aumento de velocidad utilizando la rampa de aceleración era demasiado rápido y el freno se producía en un solo movimiento.

#### **4.4.3 Definición de ancho de pulso**

Fue indispensable la utilización de un osciloscopio para verificar el ancho del pulso que se estaba enviando al motor, y para revisar las variaciones por cambios de velocidad. Se utilizó un ciclo for para el aumento y decremento de velocidad de manera paulatina, lo cual ayudó a mitigar el freno instantáneo que se poseía en pruebas iniciales.

#### **4.4.4 Definición de timer y retardos en pulsos**

Dada la necesidad de definir los movimientos a voluntad, se obvió el ciclo for mencionado, y se optó por la utilización de un timer, tomando en cuenta la base de tiempo que se tenía para enviar los pulsos a los motores en ciclo for de aceleración y desaceleración. En ese momento la base de tiempo era de 60 milisegundos. Por lo tanto, se definió un timer para que se genere una interrupción cada 60 milisegundos, además fue necesario crear una función llamada aceleración, donde se determinaba el movimiento “forward” o “backward”.

Fue indispensable aumentar el retardo para enviar el pulso, pero con una diferencia, se prefirió definir un timer de un milisegundo (1 ms), y se implementó un contador para que se envíen los pulsos a los motores cada sesenta milisegundos (60 ms). Y se comenzó a realizar el algoritmo limitante de movimiento para evitar que la rampa de aceleración cree un detenimiento instantáneo al superar los valores de los registros mencionados en máxima velocidad "forward" y máxima velocidad "backward".

#### **4.4.5 Implementación de la batería y la estructura del prototipo**

Con la implementación de los motores a la silla de ruedas y la utilización de una batería de 22.2 voltios, fue necesario aumentar el retardo al enviar los pulsos a los motores, hubo una gran variación de utilizar la fuente de 15 A al amperaje que el prototipo requería. Por consiguiente, los movimientos comenzaron a verse muy rápidos si se comparaba a la utilización de la fuente con la que se había trabajado las pasadas semanas.

#### **4.4.6 Calibración del sensor**

La calibración del sensor fue necesaria, en este periodo de tiempo se separó el circuito del protoboard y se lo implementó en las cajas diseñadas, además de la utilización del conector RJ-11 para la conexión del microcontrolador al sensor. Se revisan nuevos rangos de movimiento para flexión y extensión, se los aplica para pruebas posteriores.

#### **4.4.7 Pruebas iniciales del algoritmo con el prototipo ensamblado**

Con la programación de movimiento frontal y reversa completa, el pulso definido como noventa milisegundos (90 ms), se comenzaron pruebas con el prototipo físicamente implementado, se determinó que era necesario aumentar el retardo, para así mejorar el movimiento y la experiencia.

#### 4.4.8 Revisión y ajustes de rangos de movimiento

Se realiza la revisión de movimiento lateral, para verificar rangos de movimiento en la cabeza del usuario, se mantiene lo mencionado, el ángulo  $Y$  se lo utiliza para detección de movimiento a voluntad, flexión para ir hacia adelante y extensión para ir hacia atrás. Los movimientos laterales determinan el movimiento para girar, por lo tanto, se tuvo que invertir el movimiento de uno de los motores para realizar el giro requerido. En este periodo no se podía definir mediante pruebas los giros, únicamente se movían juntos los motores, sea hacia adelante o en reversa.

Se corrige el algoritmo, permitiendo los giros y movimientos (adelante / atrás), por lo que se procede a realizar pruebas, donde se determina que es necesario utilizar un tope hacia adelante y atrás, y además se implementan cambios en los retardos de pulsos, dando como resultado un retardo para los giros, y otro para los movimientos adelante / atrás. Esto se debe a que los giros por la fricción suelen tardar más que los demás movimientos.

Tabla 2.

*Rangos de inclinación por movimiento requerido.*

Movimiento	Rango de inclinación
Flexión (adelante)	25°
Extensión (atrás)	25°
Lateral (Izquierda)	31°
Lateral (Derecha)	30°

#### 4.4.9 Ajustes al algoritmo tras pruebas finales

Se realizan más pruebas, pero se tuvo que aumentar el retardo, quedando como final en doscientos cincuenta milisegundos (250 ms). El retardo para el detenimiento se define en treinta milisegundos, con el fin de evitar que sea

demasiado lento, ni tampoco tan rápido, tomando como perspectiva la comodidad del usuario del prototipo.

#### 4.4.10 Adaptación de freno de emergencia y disminución de velocidad máxima

A medida que se realizaron pruebas se determinó que para apoyar al usuario a tener una mejor experiencia utilizando el prototipo, por lo tanto, se decidió reducir la velocidad máxima de los motores, ayudando a tener un mejor control sobre la movilidad. Así mismo, se incluyó un freno de emergencia en la caja controladora, en la que, mediante una interrupción externa, específicamente INT4 del pin digital número 2, se disponía a realizar un freno manual, para evitar el movimiento no requerido por parte del prototipo.

Se adjuntan las siguientes tablas mostrando la rampa de aceleración con su respectivo valor máximo tanto antes de las modificaciones, como la rampa definitiva.

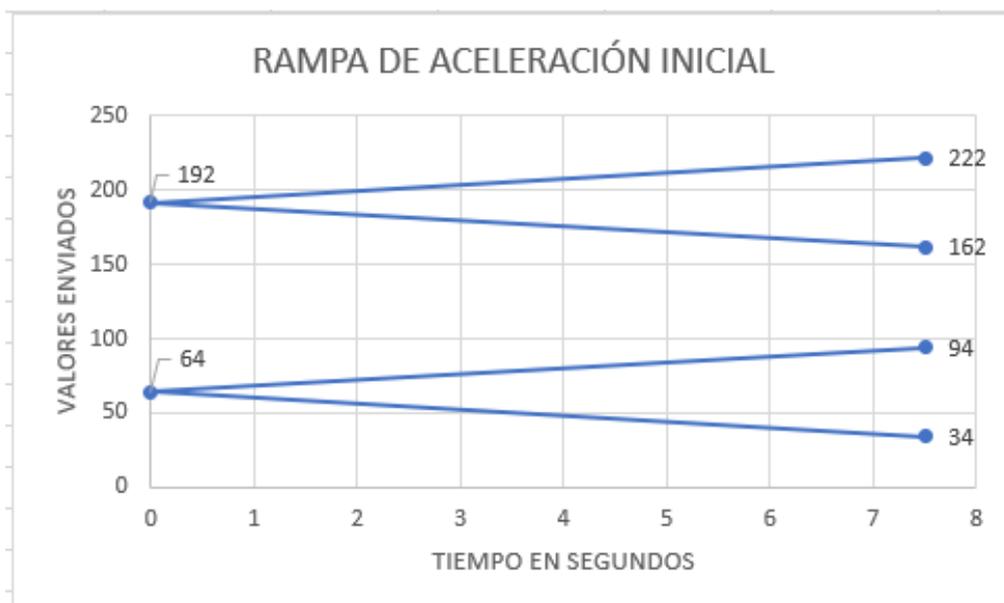


Figura 52. Rampa de aceleración inicial.

Inicialmente se implementó un incremento de 0 a 30 pulsos con una base de tiempo de doscientos cincuenta milisegundos (250 ms) para movimientos adelante / atrás y una base de ciento ochenta milisegundos (180 ms) para los giros. Comenzando en los respectivos valores de detenimiento para ambos motores, para el motor 1 este sería 192 y para el motor 2 sería 64. Pero como se mencionó la experiencia y capacidad de control al utilizar el prototipo no era óptima, consecuentemente se decidió disminuir la cantidad de pulsos y con esto la velocidad máxima utilizada.



*Figura 53.* Rampa de aceleración final.

Al realizar los cambios mostrados en la gráfica anterior se pudo optimizar la capacidad de control de movimiento del prototipo, con esto se mejora notablemente la experiencia. Además de la mencionada implementación del freno de emergencia y un reset físico en caso de que el sistema requiera un reinicio.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

Al iniciar el ensamble del circuito del prototipo, se necesitó implementar todas las conexiones dentro de un protoboard, primero para probar el funcionamiento de cada pieza y después para verificar que otros materiales se necesitaron para unir todos los elementos. Finalmente, ya para la implementación en el prototipo móvil se necesitó separar las piezas adaptando a cables que su conexión sea más óptima y ahorre el espacio que ocuparan las conexiones.

Es necesario tomar en cuenta la comodidad del futuro usuario del prototipo, para realizar cambios en cuanto al retardo de los pulsos enviados a los motores, seleccionar un máximo de velocidad e incluso los rangos de movimiento del sensor para programar la movilidad del prototipo.

La regulación de los pulsos permite disminuir el torque de los motores y la fuerza con la que empieza su funcionamiento. La primera prueba realizada sin la modificación de los pulsos, en el arranque de la silla la parte frontal se levantó generando así la caída del sujeto de prueba. Una vez regulados los pulsos, que permiten el movimiento de los motores, las pruebas fueron más efectivas y con un movimiento moderado.

La utilización de un microcontrolador MEGA 2560, fue necesario por la cantidad de seriales y el timer implementado, para evitar los inconvenientes al momento de compilar y cargar el programa al microcontrolador. El primer serial para la comunicación con el controlador y el otro serial para revisión de los ángulos en cada uno de los ejes a utilizarse para definir movilidad.

Como la revisión de los ángulos se la realiza a partir de una calibración inicial del sensor, es necesario que el usuario lleve puesto el sensor en su cabeza y la regule según su cabeza le permita para generar todos los movimientos que se requieren para la movilización de la silla.

La base del timer fue importante definirla en un milisegundo, porque se requirió utilizar dos contadores diferentes, el primero para el retardo en el envío de los pulsos a los motores y el segundo para la detección de movimiento del sensor, evitando con esto saturar el procesamiento del microcontrolador.

Como la conexión del controlador con la batería y con los motores requiere una corriente alta, se necesita de unos cables que soporten tal corriente sin que se sobrecalienten. Se probó con cables de dron que son flexibles, pero finalmente se utilizó cables utilizados en las conexiones de casa y con adaptadores que soporten la corriente para la unión con los cables principales de los motores.

La dimensión de los motores superó el ancho de la silla de rueda normal por lo que se necesitó cortar piezas y soldar nuevas para que la estructura montada se la más optima y el movimiento de los motores con el circuito sea en necesario para el funcionamiento del prototipo. Adaptar nueva estructura a una silla de ruedas es muy complejo si las dimensiones de la silla cambian debido a que se necesita nivelar los ejes de las ruedas para que su movimiento sea uniforme y no gaste los acoples que se incorporaron en la unión del motor con la rueda.

## **5.2. Recomendaciones**

Antes de soldar los tubos de una silla, cuya estructura se amplió, siempre se debe ver que todas sus piezas tengan la misma dimensión porque si no es así los acoples no se desgastan y se rompen, esto ocurrió en las pruebas cuyas dimensiones variaban y el matrimonio se estaba desgastando. Es por esto que siempre se debe verificar toda la estructura y las dimensiones antes de soldar todas las piezas.

Es preferible que las piezas tales como los matrimonios que necesitan de modificaciones con precisión, se las haga con herramientas que puedan dar esa característica, debido a que si se lo hace con otras herramientas pueda no encajar con los pernos o en los agujeros que corresponden. Como los agujeros hechos en el matrimonio no se lo hizo con torno, las perforaciones variaban un poco en la posición donde debían estar, por lo que se tomó la decisión de perforar

el agujero para que tenga un diámetro más amplio y así pudiera encajar tanto en el motor como en el complemento del matrimonio.

Es preferible utilizar el controlador de los motores en el modo de serial simplificado, la frecuencia se define en 38400 para un correcto funcionamiento. El por qué se basa en que la librería servo genera un error al utilizar el timer 1, evitando que se compile el programa. Por lo tanto, fue necesario cambiar a la utilización del modo simplificado y la frecuencia de trabajo del microcontrolador.

Al momento de la calibración las primeras dos tomas se muestran como cero en los tres ejes, sin embargo, después de las mismas se presenta el cálculo real de posicionamiento. Permitiendo así la detección de los rangos de movimiento de manera real.

La máxima velocidad por utilizarse no debe ser el máximo establecido por el controlador, sino un valor proporcional para el movimiento de los motores. Esto determina seguridad y un mejor tiempo de respuesta en caso de que se necesite frenar o hacer un cambio de movimiento en cualquier momento. Ayudando a la comodidad y facilitando la utilización del prototipo.

Para mejorar la experiencia, será recomendable añadir el movimiento lateral a los de flexión y extensión, es decir, si se requiere mover hacia adelante y dar una curva en movimiento esto sea posible, de la misma manera con el movimiento hacia atrás.

## REFERENCIAS

- Medina E. (2012). ¿Qué es un puente H?. Recuperado el 12 de abril de 2019 de:  
<http://blutintegrado.blogspot.com/2012/05/puente-h.html>
- 3DCadPortal. (2015). Autodesk Inventor un sistema de diseño mecánico inteligente con modelado 3D. Recuperado el 12 de abril de 2019 de:  
<http://www.3dcadportal.com/autodesk-inventor-un-sistema-de-diseno-mecanico-inteligente-con-modelado-3d.html>
- 5Hertz. (2019). INTRODUCCIÓN AL GIROSCOPIO. Recuperado el 16 de abril de 2019 de:  
[https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&tutorial\\_id=13](https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&tutorial_id=13)
- Ammar Qammaz, Sokol Kosta, Nikolaos Kyriazis, A. A. A. (2018). *Distributed Real-Time Generative 3D Hand Tracking using Edge GPGPU Acceleration*. Recuperado el 18 de abril de 2019 de:  
[https://www.researchgate.net/figure/3D-Hand-Tracking-demo-overview\\_fig1\\_325766217](https://www.researchgate.net/figure/3D-Hand-Tracking-demo-overview_fig1_325766217). p. 1.
- Briceño, N. (s.f.). Controlar motores de corriente continua con Puente H. Recuperado el 18 de abril de 2019 de:  
<http://arteymedios.org/tutoriales/item/76-controlar-motores-de-corriente-continua-con-puente-h>
- Brunal, B., Aconiño, A., Ferreira, P., Para El Niño Sordo Ical, F., Lucía Álvarez, M., Pavlov, O., Acosta, P., & Avante, F. (s.f.). Tres proyectos de inclusión para niños y jóvenes con discapacidad en entornos funcionales urbanos Three projects of inclusion for handicap children and youngsters in urban functional environments Alianza derechos por la infancia y adolescencia en condició. Recuperado el 19 de abril de 2019 de:  
[http://inico.usal.es/cdjornadas2015/CD\\_Jornadas\\_INICO/cdjornadas-inico.usal.es/docs/167.pdf](http://inico.usal.es/cdjornadas2015/CD_Jornadas_INICO/cdjornadas-inico.usal.es/docs/167.pdf). p. 1.

Carletti, E. J. (2007). Control de motores de CC Puente H. Recuperado el 12 de abril de 2019 de: [http://robots-argentina.com.ar/MotorCC\\_PuenteH.htm](http://robots-argentina.com.ar/MotorCC_PuenteH.htm)

David Polo Cerón De la Vega, M. C. Y. (2018). IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE HEAD-TRACKING PARA EL CONTROL DE UNA CÁMARA EN MOVIMIENTOS DE PAN Y TILT UTILIZANDO FPV. Universidad de las Americas. Recuperado el 19 de abril de 2019 de: <http://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/51022/TESIS DOCTORAL %28Raquel bañuls bertomeu%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Didácticos, R. (2018). Descripción y funcionamiento del Bus I2C. Recuperado el 21 de abril de 2019 de: <http://robots-argentina.com.ar/didactica/descripcion-y-funcionamiento-del-bus-i2c/>

Dimension Engineering. (2007). *Sabertooth 2x5 User ' s Guide Mixed and independent options*. Recuperado el 21 de abril de 2019 de: <https://www.dimensionengineering.com/datasheets/Sabertooth2x60.pdf> pp. 6–18.

EcuRed. (s.f.). Batería (acumulador eléctrico). Recuperado el 21 de abril de 2019 de: [https://www.ecured.cu/Batería\\_\(acumulador\\_eléctrico\)](https://www.ecured.cu/Batería_(acumulador_eléctrico))

PuntoFlotante. (2019). El estándar SPI para comunicación síncrona de alta velocidad. Recuperado el 22 de abril de 2019 de: <http://www.puntoflotante.net/default.htm>

Electr, D., Utilizan, S., Sincr, M., Asincr, E. M., Sincr, E. M., Asincr, E. M., Asincr, M., Bobinado, R., Asincr, M., Asincr, A. M., & Se, R. B. (2002). Motores de Corriente Directa ( DC ) Motores de Corriente Alterna ( AC ) Otros Motores Aplicaciones Generales de los diferentes tipos de Motores eléctricos, 1–2. Recuperado el 22 de abril de 2019 de: <http://www.bolanosdj.com.ar/MOTORES/MOTORES.PDF>. p. 3

- ElectrónicaEstudio. (2018). ¿QUÉ ES UN MICROCONTROLADOR? Recuperado el 22 de abril de 2019 de: <https://www.electronicaestudio.com/que-es-un-microcontrolador/>
- Fandom. (s.f.). Campo magnético terrestre. Recuperado el 23 de abril de 2019 de: [https://unidad-6-y-7-fisica.fandom.com/wiki/Campo\\_magnético\\_terrestre](https://unidad-6-y-7-fisica.fandom.com/wiki/Campo_magnético_terrestre)
- Hispavila. (2014). EL PUENTE-H (H-BRIDGE). Recuperado el 23 de abril de 2019 de: <https://www.hispavila.com/el-puente-h/>
- Inercial, M., & Desarrollo, S. (s.f.). Capítulo 2. Desarrollo teórico 2.1. (pp. 29–46).
- Kip, A. F., Sebastian, L., & Jose, L. (1967). *Fundamentos de electricidad y magnetismo*. Recuperado el 23 de abril de 2019 de: <http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/fundamentos-fisicos/contenidos/Teoria/Transparencias%20Tema%201.pdf>. p. 2
- Komei, H. Seigo, F. Yusuke, K. Michita, I. (2015). *DECoReS: Degree Expressional Command Reproducing System for Autonomous Wheelchairs*. Recuperado el 20 de diciembre de 2018 de: [http://delivery.acm.org.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/10.1145/2820000/2814942/p149-hasegawa.pdf?ip=132.174.254.237&id=2814942&acc=ACTIVE SERVICE&key=70944006DF64F86C.2C19CF1FF1E9CB28.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&\\_\\_acm\\_\\_=1543797036\\_417517cac64a853d](http://delivery.acm.org.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/10.1145/2820000/2814942/p149-hasegawa.pdf?ip=132.174.254.237&id=2814942&acc=ACTIVE SERVICE&key=70944006DF64F86C.2C19CF1FF1E9CB28.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&__acm__=1543797036_417517cac64a853d)
- Llamas, L. (2016). MEDIR LA INCLINACIÓN CON IMU, ARDUINO Y FILTRO COMPLEMENTARIO. Recuperado el 24 de abril de 2019 de: <https://www.luisllamas.es/medir-la-inclinacion-imu-arduino-filtro-complementario/>
- Macafenix, F. (2018). Sensor inercial o Sensor IMU. Recuperado el 24 de abril de 2019 de:

<https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensores/sensor-inercial/>

Majorana, E. (1932). *Atomi orientati in campo magnetico variabile*. Recuperado el 24 de abril de 2019 de: <https://doi.org/10.1007/BF02960953>

E-Marmolejo R. (2017). Microcontrolador – qué es y para que sirve. Recuperado el 2 de mayo de 2019 de: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/microcontrolador/>

Mti, E. (s.f.). *Direcciones y orientación 3-D*. Recuperado el 4 de mayo de 2019 de: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml>

R. Isa (2011). Definición de corriente eléctrica. Diferencia entre c. continua (cc) y c. alterna (ca). Ejemplos. Recuperado el 5 de mayo de 2019 de: <http://isa-tecnologias.blogspot.com/2011/03/tema-3-electricidad.html>

Tobii-Dynavox (2019). Seguimiento ocular. Recuperado el 5 de mayo de 2019 de: <https://www.tobiidynavox.com/es/sobre-tobii-dynavox/sobre-nosotros/como-funciona-seguimiento-ocular/>

P. B. Ghule, M. G. Bhalerao, R. H. Chile, V. G. A. (2016). *Wheelchair control using speech recognition*. Recuperado el 20 de diciembre de 2018 de: <https://www-computer.org.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/csdl/proceedings/ic3/2016/3251/00/07880214.pdf>

Parte, I. I., & Contreras, C. (2007). Introducción a los microcontroladores. Recuperado el 6 de mayo de 2019 de: <http://www.bolanosdj.com.ar/MICRO/INTRODUCMICRCONT.pdf>. p. 1.

Pozo, D., Sotomayor, N., Rosero, J., & Morales, L. (2014). Medición de Ángulos de Inclinación por Medio de Fusión Sensorial Aplicando Filtro de Kalman. *Revista Politécnica*, 1(1), 78–87. Recuperado el 9 de mayo

de 2019 de:  
[http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/144/pdf](http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/144/pdf). p. 1.

R. Josephine Leela, A. Joshi, B. Agasthiya, U. K. Aarthiee, E. Jameela, S. V. (2017). *Android Based Automated Wheelchair Control*. Recuperado el 21 de diciembre de 2018 de:  
<https://www.computerorg.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/csdl/proceedings/icrtccm/2017/4799/00/4799a349.pdf>. p. 1.

Referencial, M. (2001). *Proyectos Productivos para Personas con Discapacidad*. Recuperado el 21 de diciembre de 2018 de:  
[https://www.paho.org/nic/index.php?option=com\\_docman&view=download&alias=302-proyectos-productivos-para-personas-con-discapacidad&category\\_slug=publicaciones-anteriores&Itemid=235](https://www.paho.org/nic/index.php?option=com_docman&view=download&alias=302-proyectos-productivos-para-personas-con-discapacidad&category_slug=publicaciones-anteriores&Itemid=235). p. 1.

Rodriguez, N. J. (2012). OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES DE POSICIÓN ANGULAR PITCH, ROLL, YAW DE UNA AEREONAVE POR MEDIO DE UNA UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL IMU (Inertial Measurement Unit) A TRAVÉS DEL FILTRO DE KALMAN. p. 1.

Rodríguez, N. J. (2012). OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES DE POSICIÓN ANGULAR PITCH , ROLL , DE MEDICIÓN INERCIAL IMU ( Inertial Measurement. p. 17.

Townsend, K. (2018). *Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor*. Adafruit. Recuperado el 10 de mayo de 2019 de:  
<https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor>

Universidad Técnica Federico Santa María. (2014). *Tecnología de las baterías Definición y Clasificación*. Recuperado el 10 de mayo de 2019 de:  
[www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf%5Cn](http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf%5Cn).

p. 1.

Universitario, I. T. (2016). Características de las Impresoras 3D. Recuperado el 11 de mayo de 2019 de: <http://itu.uncuyo.edu.ar/caracteristicas-de-las-impresoras-3d>

VA\_Tech\_EE. (2016). *Gyroscopic Arduino Head Tracking Unit*. Recuperado el 11 de mayo de 2019 de: <https://www.instructables.com/id/Gyroscopic-Arduino-Head-Tracking-Unit/>

Vázquez-Valencia, J. Martín-Ortíz, M. Olmos-Pineda, I. Olvera, J. Pinto, D. (2017). *Automatic Gesture Recognition for Wheelchair Control*. Recuperado el 11 de mayo de 2019 de: [http://delivery.acm.org.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/10.1145/3130000/3123839/a45-vazquezvalencia.pdf?ip=132.174.254.237&id=3123839&acc=ACTIVE&SERVICE&key=70944006DF64F86C.2C19CF1FF1E9CB28.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&\\_\\_acm\\_\\_=1543800954\\_7cace8ba42](http://delivery.acm.org.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/10.1145/3130000/3123839/a45-vazquezvalencia.pdf?ip=132.174.254.237&id=3123839&acc=ACTIVE&SERVICE&key=70944006DF64F86C.2C19CF1FF1E9CB28.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&__acm__=1543800954_7cace8ba42). p. 1.

