



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO DE UN SISTEMA EMBEBIDO DE SENSORES INERCIALES PARA
REHABILITACIÓN DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL GRAVE**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO

INGENIERA MECATRÓNICO

PRESENTADO POR:

2161015 GABRIELA ISABEL NEIRA ORDÓÑEZ

ASESOR: ING. ALICIA MARÍA REYES DUKE

CAMPUS SAN PEDRO SULA, ABRIL, 2021

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a mis padres que me dieron la oportunidad de poder volar para crecer como persona, siempre me apoyaron en todas las decisiones que tomaba para poder ser quien soy ahora.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente le agradezco a la Ing. Karla Reyes por haberme tomado en cuenta para su proyecto de investigación, por creer en mis habilidades, por guiarme a ser mejor persona profesional en mi área y por haberme enseñado muchas cosas que anteriormente no sabía.

Le agradezco al Dr. José Javier por darme la oportunidad de realizar un proyecto y ser parte del Laboratorio de Bioinstrumentación y Nanomedicina.

Le agradezco al Ing. Marco Rivera, Ing. Josué Pérez y nuevamente a la Ing. Karla Reyes por ayudarme con los desafíos técnicos que surgieron durante en el desarrollo del proyecto.

Le agradezco a mis padres que me ayudaron con mucho esfuerzo para poder realizar este proyecto de investigación.

Le agradezco a toda mi familia y mis amigos por haberme apoyado tanto en este proceso importante de mi carrera.

Finalmente le agradezco a Dios por haberme escuchado y dado la oportunidad de realizar uno de mis objetivos en la vida.

EPÍGRAFE

No creo que las cosas ocurren cuando estas preparado, creo que las cosas ocurren porque estas preparado.

Anónimo

RESUMEN EJECUTIVO

Hoy en día las tecnologías asistivas han sido un apoyo para todas las personas con cualquier discapacidad, permiten que los individuos puedan involucrarse en diversas actividades donde participan personas sin discapacidad. En el laboratorio de Bioinstrumentación y Nanomedicina del Centro Tecnología Biomédica de la Universidad Politécnica de Madrid se está desarrollando un sistema embebido para la aplicación de rehabilitación de invidentes. Así, el objetivo de este proyecto es diseñar un sistema embebido para el prototipo del sistema de evaluación de los parámetros de orientación y movilidad en la rehabilitación de invidentes mediante la aplicación del diseño mecatrónico. Para esto se utilizó la metodología de diseño basada en el modelo W y la identificación de Lenguaje de Modelado de sistemas haciendo uso de las herramientas de diseño como Altium Designer y SolidWorks. Como resultado, se obtuvo un sistema embebido con un diseño sencillo, pequeño y minimalista que utiliza componentes de bajo costos siendo una cantidad de 19 componentes pasivos y 7 componentes activos, el protocolo de comunicación siendo el I2C y con un diseño preliminar de una montura adaptada al bastón universal para invidentes. Este diseño es preliminar y se debe desarrollar una segunda fase que consiste en soldar los componentes de la placa impresa, desarrollar la comunicación entre los componentes, desarrollar el código para programarle a la placa la tarea asignada mediante Mbed Studio. Este sistema servirá para el desarrollo de las pruebas de validación de un sistema de Orientación y Movilidad, con pacientes invidentes.

Palabras Claves: Diseño Mecatrónico, Invidentes, Tecnología asistivas, Orientación y Movilidad.

ABSTRACT

Today assistive technologies have been a support for all people with any disability, allowing individuals to get involved in various activities where people without disabilities participate. In the Bioinstrumentation and Nanomedicine laboratory of the Biomedical Technology Center of the Polytechnic University of Madrid an embedded system is being developed for the application of rehabilitation of the blind. The purpose of this project is to design an embedded system for the prototype of the evaluation system of orientation and mobility parameters in the rehabilitation of the blind through the application of mechatronic design. For this, the design methodology based on the W model was used and the identification of the Systems Modeling Language making use of design tools such as Altium Designer and SolidWorks. As a result, an embedded system was obtained with a simple, small and minimalist design that uses low-cost components, being a number of 19 passive components and 7 active components, the communication protocol being I2C and with a preliminary design of an adapted mount to the universal cane for the blind. This design is preliminary and a second phase must be developed which consists of soldering the components of the printed board, developing communication between the components, developing the code to program the board with the task assigned by Mbed Studio. This system will serve for the development of validation tests of an Orientation and Mobility system, with blind patients.

Keywords: Assistive technology, Blind people, Mechatronic Design, Orientation and Mobility.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	15
II.	Planteamiento del Problema.....	17
	2.1 Precedentes del Problema.....	17
	2.2 Estado de la cuestión.....	19
	2.2 Definición del Problema	22
	2.3 Justificación	22
	2.4 Preguntas de Investigación	23
	2.5 Objetivos	24
	2.5.1 Objetivo General.....	24
	2.5.2 Objetivo Específicos	24
III.	Marco Teórico.....	25
	3.1 La conceptualización de la discapacidad Visual.....	25
	3.1.1 Discapacidad Visual Mundial.....	25
	3.1.2 Tecnología Asistivas para personas invidentes.....	26
	3.1.3 Tecnología Asistivas para rehabilitación	29
	3.2 Sistema Embebido	31
	3.2.1 Diseño de Sistemas Embebidos.....	32
	3.2.2 Hardware	33
	3.2.3 Software.....	34
	3.2.4 Comunicación.....	34
IV.	Metodología.....	35
	4.2 Hipótesis.....	35
	4.3 Enfoque.....	35
	4.4 Variables de Investigación.....	36

4.5 Técnicas e Instrumentos Aplicados	37
4.5.1 Tecnicas	37
4.5.2 Insturmentos.....	38
4.6 Metodología de estudio.....	40
4.8 Cronograma de Actividades.....	41
V. Resultados y Análisis.....	43
5.1 REQUERIMIENTOS CONCEPTUALES PARA DISEÑO DE SISTEMA PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL.....	43
5.2 Identificación de las etapas de desarrollo de un sistema embebido.....	45
5.3 Selección de componentes electrónicos para el diseño del sistema embebido.	46
5.3.1 Lista de componentes	50
5.3.1.1 Componentes del prototipo previo.....	50
5.3.1.2 Componentes del prototipo nuevo.....	51
5.4 Esquemático de las interconexiones	52
5.5 Montura del sistema embebido.....	59
VI. Conclusión	62
6.1 Conclusión general	62
6.2 Conclusión especifica.....	62
VII. Recomendaciones.....	63
VIII. Aplicabilidad.....	64
IX. Trabajo Futuro	64
X. Bibliografía.....	65
XI. Anexos.....	68
11.1 Anexo 1: IMAGENES DEL PROTOTIPO PREVIO	68
11.1.1 Peso del prototipo previo(gramos): Procesador, multiplexer, adaptador micro sd, interruptor, botones y adaptador con baterias 1.5v(4).....	68
11.1.2 Peso prototipo previo(gramos): Procesador y sensor.....	68

11.1.3	Imagen del prototipo previo: procesador	69
11.1.4	Imagen del prototipo: procesador y sensor	69
11.2	ANEXO 2: MICROCONTROLADOR NRF52832	70
11.2.1	PIN OUT MICROCONTROLADOR NRF52832.....	70
11.2.2	LISTADO DE Pines del microcontrolador NRF52832	71
11.2.3	Dimensiones del NRF52832	73
11.3	Anexo 3: SENSOR BNO055.....	74
11.3.1	Dimensión del BNO055	74
11.3.2	ASIGNACION DE Pines del sensor BNO055.....	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-	Diseño previo del sistema de prototipo	19
Ilustración 2-	Imagen de Libros táctiles impresos en 3D para niños ciegos	26
Ilustración 3-	Imagen de ecografía para madres invidentes	27
Ilustración 4-	Imagen del Calzado Háptico.....	27
Ilustración 5-	Usuarios y equipo de desarrollo del sistema de WeWalk	28
Ilustración 6-	Requerimientos conceptuales	44
Ilustración 7-	Diagrama Y-Chart.....	32
Ilustración 8-	Variables de Investigación	36
Ilustración 9-	Altium Designer Logo.....	38
Ilustración 10-	Mbed Studio Logo.....	38
Ilustración 11-	Embedded Studio Logo.....	39
Ilustración 12-	SolidWorks Logo.....	39
Ilustración 13 –	Las cinco fases de la metodología W	40
Ilustración 14-	Etapas de Desarrollo de un sistema embebido	45
Ilustración 15-	Sensor BNO055	47
Ilustración 16-	Microcontrolador Nrf52832	48
Ilustración 17-	Referencia de circuito del microcontrolador	49
Ilustración 18-	Referencia del sensor (I2C).....	50
Ilustración 19-	Fuente de alimentación del circuito.....	53
Ilustración 20-	Conexiones de Osciladores	54
Ilustración 21-	Conexiones de Interruptor y bocina	54

Ilustración 22-Conexiones del microcontrolador	55
Ilustración 23-Esquemático del sensor.....	56
Ilustración 24-Diseño de la placa de circuito impreso 2D.....	57
Ilustración 25- Diseño PCB 3D Frontal.....	58
Ilustración 26-Diseño PCB 3D Vista Diagonal.....	58
Ilustración 27-Carcasa Dispositivo 1.....	59
Ilustración 28-Carcasa Dispositivo 1 ensamblaje.....	60
Ilustración 29-Carcasa Dispositivo 2.....	60
Ilustración 30-Carcasa Dispositivo 2 Vista Lateral.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-Estimaciones globales de discapacidad visual, por regiones de la OMS (miles).....	17
Tabla 2-Matriz de Criterios.....	41
Tabla 3-Cronograma de Actividades y Tareas	42
Tabla 4- Lista de componentes Prototipo Previo	50
Tabla 5- Lista de componentes Prototipo nuevo	51

LISTA DE SIGLAS Y GLOSARIO

SE Sistema embebido

LBN Laboratorio de Bioinstrumentacion y Nanomedicina

CTB Centro Tecnológico de Biomedica

I2C Inter-Integrated Circuit

IDE Integrated development environment

SyML System Model Language

CAD Computer Aid Design

O&M Orientación y Movilidad

PCB Printed Circuit Board

IOT Internet of Things

I. INTRODUCCIÓN

En el proceso de investigación aplicada, el desarrollo de prototipos de evaluación es necesario para la validación previa de los métodos, técnicas o procedimientos creados. Actualmente existen diversas placas de evaluación y kits de desarrollo para diseño de prototipos a nivel académico, que son aceptados por la comunidad científica en diversas etapas de validación, sin embargo, en algunas aplicaciones es más adecuado el desarrollo de sistemas embebidos para la etapa de validación, como en el presente proyecto.

El proyecto de investigación presentado en este informe, forma parte de un prototipaje que está realizándose en el Laboratorio de Bioinstrumentación y Nanomedicina (LBN), que pertenece al Centro de Tecnología Biomédica (CTB) en Madrid, España. Este prototipo está siendo diseñado para el la evaluación y el entrenamiento remoto de Orientación y Movilidad (O&M) en la rehabilitación de los invidentes, la cinemática es evaluada a través de sensores inerciales y es un proyecto del grupo de investigación de Tecnologías Asistivas para discapacitado de este laboratorio. Como parte de este proyecto global, la finalidad del proyecto presentado en este informe, consistió en diseñar un sistema embebido para pruebas de validación del sistema de rehabilitación, que reemplazara el prototipo previo. Este diseño del sistema embebido deberá cumplir ciertos requerimientos técnicos de diseño electrónico. A demás deberá cumplir ciertos requerimientos del usuario discapacitado, como lo es el diseño háptico, no invasivo, interactivo y fácil de usar para los invidentes.

A continuación, en el capítulo II de este documento, se presentará una discusión de la problemática abordada donde se describen los precedentes del problema de diseño y se justifica la necesidad del desarrollo del sistema embebido. Posteriormente, en el capítulo III se presenta la fundamentación teórica para el desarrollo del sistema embebido y el análisis del estado del arte, con relación a sistemas desarrollado para invidentes.

La metodología de diseño utilizada en este proyecto de investigación está basada en el modelo W y la identificación de Lenguaje de Modelado de sistemas, una

metodología desarrollada para el diseño mecatrónico y será explicada detalladamente en el capítulo IV del presente informe.

El capítulo V es una recopilación de los resultados obtenidos en esta investigación, en donde se presentan las etapas del desarrollo, la discusión de los retos en cada una de las etapas y los diseños propuestos. Finalmente, en el capítulo VI, se muestran las conclusiones obtenidas y las siguientes etapas de la investigación.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En esta sección se explica el planteamiento del problema de investigación, mostrando los precedentes del diseño previamente realizado en el Centro Tecnológico de Biomédica y justificando la necesidad del desarrollo del diseño del sistema embebido. Definiendo el problema existente y las preguntas que surgieron durante el proceso, también se presentaran los objetivos del proyecto y la justificación de la investigación.

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

Actualmente, alrededor de 285 millones de personas tiene discapacidad visual de las cuales 39 millones son totalmente ciegas y además el 90% de la población afectada por esta discapacidad visual se encuentra en países con altos porcentajes de pobreza (Organización Mundial de la Salud, 2011).

En la Tabla 1, se muestra el número y el porcentaje de personas de personas ciegas y personas con baja visión globalmente y por regiones. Se puede observar claramente que existen porcentajes altos de discapacidad visual principalmente en las regiones de África y Europa del Este.

Tabla 1-Estimaciones globales de discapacidad visual, por regiones de la OMS (miles)

	África	América	Europa del Este	Europa	Sudeste Asiático	Oeste Pacífico
Población	672.238	852.551	502.823	877.886	1.590.832	1.717.536
N* y porcentaje (%) de personas ciegas	6.782 (1.01%)	2.419 (0.28%)	4.026 (0.80%)	2.732 (0.31%)	11.587 (0.72%)	9.312 (0.54%)
N* y porcentaje (%) de personas con baja visión	19.996 (2.97%)	13.116 (1.54%)	12.444 (2.47%)	12.789 (1.46%)	33.496 (2.11%)	32.481 (1.89%)
N* Total y Porcentaje (%) Total de personas con discapacidad visual	26.778 (3.98%)	15.535 (1.82%)	16.469 (3.27%)	15.521 (1.77%)	45.083 (2.83%)	41.793 (2.43%)

Fuente: (Gómez Ulla de Irazábal & Ondategui Parra, 2012)

Las personas con discapacidad visual deben acudir a rehabilitación para poder aprender técnicas, estrategias y uso de recursos que les permitan realizar actividades cotidianas.

En el Laboratorio de Bioinstrumentación y Nanomedicina se está desarrollando un sistema remoto para evaluación de parámetros de orientación y movilidad en la rehabilitación de personas invidentes. Este sistema utiliza información de los vectores de orientación y de aceleración de los sensores inerciales (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro) para obtener una estimación de los movimientos que realiza la persona invidente y brindar retroalimentación inmediata respecto a su desempeño en la utilización del bastón durante la práctica de ejercicios de O&M que también sirve como evaluación remota para su entrenador y para el invidente mismo. El sistema utiliza dos sensores inerciales ATBNO055-XPRO, pre procesamiento de datos local a través de un Arduino Nano IOT 33, transferencia de datos vía Bluetooth integrado en el Arduino y plataforma de visualización de pruebas LabVIEW, como se muestra en la Ilustración 1. Sin embargo, el sistema actualmente se encuentra en etapa de desarrollo, hasta ahora ha sido desarrollado como prototipo de análisis de laboratorio, y solo ha sido probado con voluntarios videntes que utilizan vendaje para simular la situación de invidentes. Posteriormente el grupo de investigación debe proceder con la validación del sistema desarrollado, esta vez con usuarios invidentes. Sin embargo, para esta etapa el prototipo desarrollado debe ser adaptado a la realidad del usuario invidente, lo que indica que debe desarrollarse un sistema embebido personalizado a la necesidad del usuario.

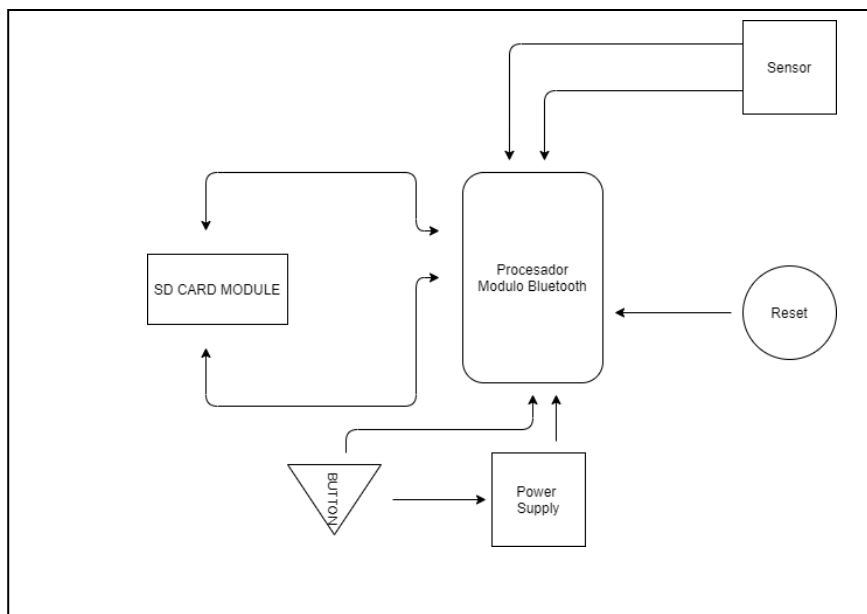


Ilustración 1- Diseño previo del sistema de prototipo

Fuente: Propia

2.2 ESTADO DE LA CUESTIÓN

En la actualidad el uso de los sistemas embebidos ha incrementado en distintas áreas por la portabilidad y comodidad. Las aplicaciones de estos sistemas se dan en diferentes áreas como domestico hasta industrial, caracterizándose por el enfoque hacia una determinada tarea, menor consumo de energía y fácil de fabrica (López & Garzón Romero, 2013).

Se han realizado una cantidad de sistemas embebidos con diferentes propósitos. Por ejemplo, Ferrin et, al, crearon un sistema que permitirá acelerar las investigaciones en el campo medico podológico. El sistema analiza la huella plantar mediante una imagen del pie encontrando puntos que luego son conectados con líneas para crear la forma de la huella y obtener parámetros morfológicos de ella. Este sistema está compuesto por lámparas cilíndricas de color verde, cámara RGB de 640x480, una pantalla táctil se usa el sistema Beaglebone Black que permiten la implementación de algoritmos que son utilizados en este sistema (Por et al., 2017).

Cantillo et al, diseñaron un sistema embebido de control de actitud para aeronaves no tripuladas. El sistema tiene 4 entradas de control asociadas con los cuatro grados de libertad, que serán combinadas de manera adecuada para actuar en cada uno de los actuadores del sistema según la disposición y el sentido de giro de ellos mismos. El diseño de la placa para realizar todas esas funcionalidades está compuesto por un microcontrolador de 32 bits, radio integrada, sensores como barómetros, magnetómetro, temperatura y medidos de batería, giroscopios, acelerómetros, fuente de alimentación y memoria. Estos componentes fueron seleccionados por prototipos previos y comparando mismos componentes, pero de diferentes marcas con el objetivo de reducir costos y tengan las mejores cualidades para el objetivo del sistema (Kharsansky, 2013).

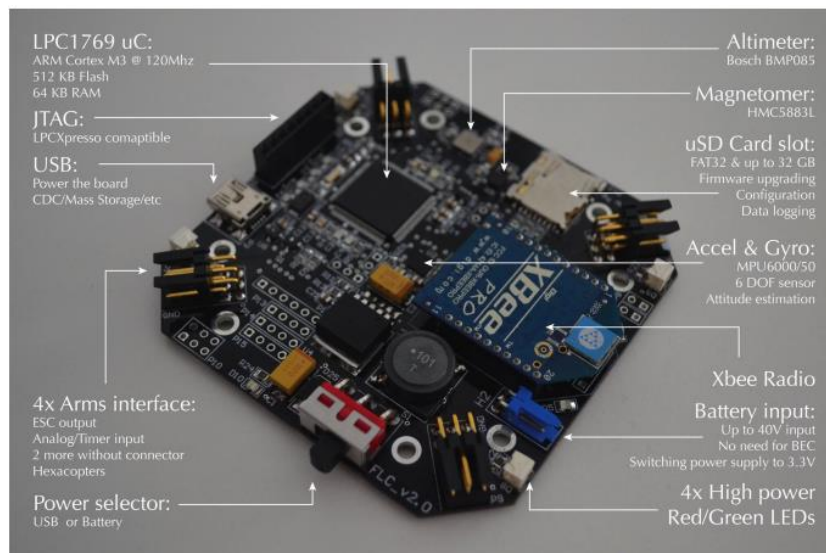


Ilustración 2- Placa electrónica del SE de control de actitud

Fuente: (Kharsansky, 2013)

Por otro lado, Scasso, creo un robot diferencial con el control de movimiento ejecutado por un sistema embebido para recolectar datos de un invernadero. Componiendo el sistema embebido en tres partes importantes: la unidad del procesamiento implementado por un microcontrolador, un sistema de medición compuesto por sensores e interfaces A/D y por último el sistema de actuación conformado por motores, interfaces D/A y la etapa de potencia. El software fue diseñado

basándose en el estudio de la dinámica del sistema sienten un proceso secuencial que realiza las acciones de censado, proceso de información y actuación (Ilustración 3). El sistema embebido que controla el robot lo desarrollaron en diferentes fases. Primera fase, se realizó una ingeniería de requerimientos para el sistema, segunda fase, se modeló el aspecto cinemático del robot, y en base a esas dos fases se diseñó el controlador acorde a las características. Luego la tercera fase se diseñó el hardware del sistema y una vez determinado esta fase se realizó el diseño del software que implementara el controlador modelado (Scasso et al., 2012).

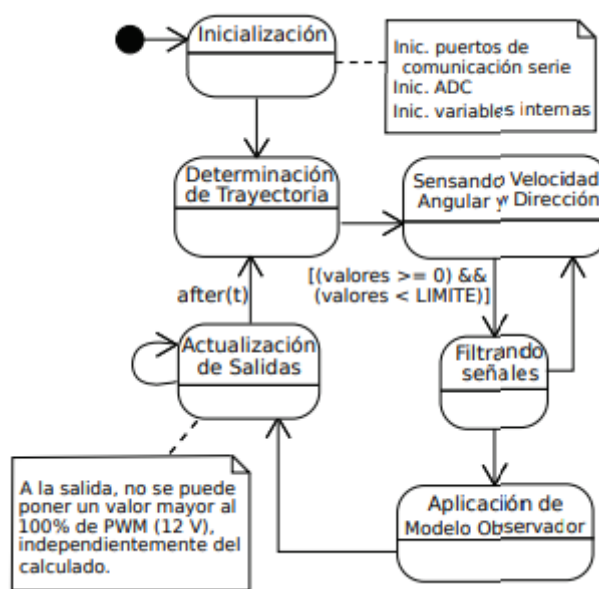


Ilustración 3- Diagrama del software

Fuente: (Scasso et al., 2012)

Los proyectos anteriormente mencionados tienen una similitud al momento de diseñar el sistema embebido que son las siguientes:

1. Se define el propósito del sistema embebido, que tareas tendrá que realizar el sistema.
2. Una vez definido el propósito se seleccionan los componentes electrónicos que se requiere en el sistema en otras palabras definir el hardware.
3. Luego, al tener los componentes se debe analizar la manera en que serán ejecutados para que se realice la función o sea el software.

Esta es la pauta que se han llevado a cabo en varios proyectos para diseñar un sistema embebido con bajo consumo de energía, de bajo costo y eficiente.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El prototipo del sistema de medición debe ser lo menos invasivo posible, por lo cual es necesario mudar el sistema de prototipo de desarrollo a un sistema de prototipo de pruebas de validación para invidentes.

Este nuevo prototipo debe funcionar como un sistema embebido sencillo y personalizado, descartando los componentes del sistema anterior que no son necesarios. Además de esto, el sistema debe ser interactivo, ligero, tangible y fácil de usar para una persona invidente. Esto implica desarrollar un diseño de un sistema embebido que sea una placa de circuito impreso pequeña con diseño minimalista y no invasivo.

Además debe diseñarse la montura de esta placa adaptada a la zona de agarre del bastón blanco de invidentes y a la zona de la pierna donde el sistema será incorporado para captar los movimientos en la rehabilitación del usuario.

Es por eso que la presente investigación pretende diseñar un sistema embebido para el prototipo del sistema de evaluación de los parámetros de orientación y movilidad en la rehabilitación de invidentes que cuya montura se ajuste a la zona de agarre del bastón para invidentes.

Si el diseño realizado es aceptado por la comunidad de invidentes que validarán el sistema en las etapas futuras del proyecto mencionado, será el sistema embebido utilizado por el grupo de investigación.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Debido a que el entrenamiento de O&M se realiza durante la etapa de aprendizaje y rehabilitación, es necesario que no sea complejo o pesado, ya que estas

personas que comienzan a lidiar con la ceguera, pueden tener accidentes cuando están aprendiendo a desplazarse con autonomía. Las personas invidentes necesitan que las tecnologías asistivas que se diseñan, sean instrumentos livianos, sencillos y a la vez a un costo bajo.

Por lo tanto, el prototipaje de desarrollo actual debe mudarse a un prototipo de prueba para invidentes. Esto es debido a que el sistema actual es complejo y contiene muchos componentes innecesarios en la placa de evaluación, además cables al exterior, tamaño inadecuado y no es adecuado para una persona invidente.

El diseño de este sistema embebido debe contener un circuito integrado pequeño, que contenga un microcontrolador adecuado para el procesado local que sustituya al Arduino.

También debe contener un módulo Bluetooth, el sensor inercial seleccionado previamente por el grupo de investigación y debe ser diseñado tomando en cuenta que los componentes no sean de precios elevados, haciendo su costo final un precio accesible para las personas invidentes.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuáles son los requerimientos conceptuales del sistema?
2. ¿Cuáles son las etapas del diseño un sistema embebido?
3. ¿Qué componentes electrónicos requiere un sistema embebido con sensores inerciales?
4. ¿Cuál es el protocolo de comunicación más adecuado para el sistema desarrollado?
5. ¿Como desarrollar el esquema del circuito integrado?
6. ¿Cómo hacer el código de comunicación del microcontrolador con el sensor?
7. ¿Como diseñar la montura del dispositivo adecuado para una persona invidente?

2.5 OBJETIVOS

En esta sección se presentará el objetivo general del proyecto y los objetivos específicos que debemos alcanzar durante el proceso del diseño de un sistema embebido.

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema embebido para el prototipo del sistema de evaluación de los parámetros de orientación y movilidad en la rehabilitación de invidentes mediante la aplicación del diseño mecatrónico.

2.5.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

1. Evaluar los requerimientos conceptuales del sistema para el entendimiento de las necesidades del usuario final, mediante el análisis de la literatura.
2. Identificar las etapas del desarrollo de un sistema embebido para el diseño del esquema de trabajo mediante el análisis de la literatura.
3. Seleccionar los componentes electrónicos adecuados para el diseño del sistema embebido a través del análisis de los esquemáticos del sensor inercial.
4. Elegir el protocolo de comunicación mediante la comparación de los requerimientos técnicos de los protocolos proporcionados por el sensor inercial.
5. Diseñar diagrama esquemático de las interconexiones de cada uno de los elementos del circuito del sistema embebido mediante el software Altium design.
6. Diseñar las monturas del sistema embebido para adaptación del dispositivo al bastón de invidente y a la pierna, mediante el software de diseño SolidWorks.

III. MARCO TEÓRICO

Este capítulo se presenta la información que muestra la actualidad sobre las personas con discapacidad visual, las herramientas o tecnologías que se han creado siguiendo un patrón de cualidades para solucionar problemas cotidianos en la vida de estas dichas personas. También se muestra las técnicas, recomendaciones, instrumentos y decisión de componentes electrónicos para diseñar un sistema embebido según la función que ejecutará en el campo donde será instalado.

3.1 LA CONCEPTUALIZACIÓN DE LA DISCAPACIDAD VISUAL

3.1.1 DISCAPACIDAD VISUAL MUNDIAL

Según la Organización Mundial de Salud, la discapacidad es un término general que abarca las deficiencias, las limitaciones de la actividad y las restricciones de la participación. Las deficiencias son problemas que afectan a una estructura o función corporal; las limitaciones de la actividad son dificultades para ejecutar acciones o tareas, y las restricciones de la participación son problemas para participar en situaciones vitales (OMS, 2021). Este fenómeno hace que las personas busquen una manera diferente de vivir a modo de superarse a sí mismos y se adaptan a varias costumbres cuales los ayudan a descubrir otras habilidades que anteriormente no las desarrollaban siendo sus instrumentos para seguir adelante en su vida cotidiana.

Los últimos datos mundiales que la Organización mundial de la salud mostro fueron que más de 1000 millones de personas padece de algún tipo de discapacidad en otras palabras el 15% de la población mundiales afectada por este fenómeno. Los datos mundiales muestran que las tasas de empleo son más bajas para los hombres (53%) y las mujeres (20%) con discapacidad, que hombres (65%) y mujeres (30%) sin discapacidad siendo esto que la tasa de empleo para las personas con discapacidad ascienda a poco más de la mitad de la correspondiente a las personas sin discapacidad (OMS, 2017).

Según World Report Vision, la discapacidad visual se produce cuando una afección ocular afecta el sistema visual, la visión es el sentido más dominante e

importante en nuestras vidas. Es esencial en las interacciones interpersonales y sociales en la comunicación entre las personas, por la cual se transmite información a través de señales no verbales como gestos y expresiones faciales (World Health Organisation, 2019). La vista es quien nos muestra cómo vivir, aprender, percibir y crecer a medida que van pasando los días. El sentido de la vista es importante nos ayuda a realizar la mayoría de actividades cotidianas y ver nuestro entorno como se lleva a cabo, sin embargo, debemos tener un cuidado ya que existe la discapacidad visual.

3.1.2 TECNOLOGÍA ASISTIVAS PARA PERSONAS INVIDENTES

Hasta el momento, existe diversidad de dispositivos, instrumentos o desarrollos experimentales que se han realizado como tecnologías asistivas para las personas invidentes, algunas de estas tecnologías son ya desarrollos comerciales. Estas tecnologías están enfocadas principalmente para generar autonomía e independencia en el desplazamiento mediante la incorporación de sensores ópticos para detección de objetos y sistemas de navegación asistida (Real & Araujo, 2019), también diversos diseños y sistemas han sido creados para la adaptación e inclusión de las personas invidentes. Por ejemplo, existen libros realizados por impresoras 3D con ilustraciones hechas en relieve que ayudan con el apoyo de la lectura a niños con dificultad visual (Ilustración 4), para madres ciegas que están embarazadas existe un modelado 3D de una ecografía (Ilustración 5), un calzado aptico con navegación asistida y sensores en que obtienen información del lugar y obstáculos que puedan estar en el camino cual están conectados vía bluetooth con el celular móvil para evitar accidentes (Ilustración 6), entre otros (Dupleich et al., 2015).



Ilustración 4-Imagen de Libros táctiles impresos en 3D para niños ciegos

Fuente: (Dupleich et al., 2015)



Ilustración 5-Imagen de ecografía para madres invidentes

Fuente: (Cultura Inquieta, 2015)



Ilustración 6-Imagen del Calzado Háptico

Fuente: (Fernando Berreti, 2014)

Otra herramienta importante para los invidentes, la cual es la herramienta de movilidad más utilizada es el bastón blanco para personas invidentes. El bastón de ayuda a indicarle al invidente el tipo de superficie por el cual se va desplazando y avisa mediante retroalimentación vibro táctil y sonora, si hay algún objeto enfrente de él debido a la vibración producida en la punta del bastón en al diferentes superficies (Federación Española de Sordoceguera, 2018). El bastón le proporciona un espacio seguro a la

persona por la manera en el que se sujeta el bastón. El bastón se sujeta con la mano relajada hacia abajo pegada hacia el cuerpo dejando que la punta del bastón toque el suelo para cubrir la zona necesaria para protegerse por cualquier obstáculo.

Hasta ahora, ha existido diversos intentos por agregar tecnología al tradicional bastón de invidentes, incluso algunos bastones se encuentran comercialmente en algunas regiones de Estados Unidos y Europa, como por ejemplo el WeWalk. Un bastón inteligente capaz de detectar objetos en el camino y brindar soporte de navegación con interfaz de móvil (Ilustración 7).



Ilustración 7- Usuarios y equipo de desarrollo del sistema de WeWalk

Fuente: (WeWalk, 2017)

A parte de WeWalk, otros sistemas como aplicaciones que utilizan inteligencia artificial como el Aipoly Vision han sido desarrollados para asistir a los invidentes. Aipoly visión es una aplicación que reconocer objetos y colores y funciona apuntando objetos con la cámara del teléfono móvil presionando el botón de reconocimiento para activar la herramienta de inteligencia artificial, presentado en vos alta los objetos reconocidos (Orientatech, 2017). También como Aipoly, está a la tecnología Wayfindr Open Standard que es un completo conjunto lleno de pautas y herramientas para integrar la orientación en audio aquellos productos digitales para orientar y guiar ya existentes (DISCAPNET, n.d.).

A nivel de desarrollo experimental o académico, también existen diversos sistemas desarrollados para invidentes, que aún no se encuentran en el mercado. Algunos de los más actuales incluyen la utilización de inteligencia artificial para movilización segura en espacios interiores (Zhang & Ye, 2020). O la identificación de señales de pedestres en la movilización en espacios exteriores (Zhong & Lee, 2020), así como el desarrollo de ayudas para manipulación de objetos (Jin et al., 2020).

Aunque muchos de estos sistemas han sido desarrollados como tecnologías de asistencia y su finalidad son sustituir una función corporal, de acuerdo a algunos especialistas de diseño de tecnologías estas soluciones no han sido necesariamente adoptadas por toda la comunidad de invidentes, debido principalmente a la complejidad de su uso específico el cual requiere entrenamiento adicional debido al tipo de tecnología (Salud & Nacional, 2020). Una de las hipótesis para esto es que los sistemas diseñados para los discapacitados visuales, no son diseños centrados en el usuario. (Reyes et al., 2021), la mayoría de los autores utilizan personas con los ojos vendados en lugar de personas ciegas reales durante la validación de los desarrollos de sus dispositivos.

3.1.3 TECNOLOGÍA ASISTIVAS PARA REHABILITACIÓN

Cuando una persona sufre de discapacidad visual debe ser asistido inmediatamente por médicos capacitados a este tipo de casos y entrar a un proceso de rehabilitación (Salud & Nacional, 2020). La rehabilitación tiene como propósito optimizar el funcionamiento diario de las personas con discapacidad visual que no se pueden tratar en su entorno y debe someterse a prácticas para abordar las consecuencias sociales, adaptarse al nuevo estilo de vida para ser personas independientes (Rehabilitation et al., 2004).

Estos son ejemplos de herramientas interactivas de apoyo para rehabilitación de invidentes (Eluniversal, 2020):

- Jaws: es un narrador de pantalla, cuenta lo que está sucediendo en el monitor y se controla mediante el teclado convencional o braille usando comandos para recibir las instrucciones de lo que la persona quiere realizar.
- Zoom text: magnificador de pantalla que aumenta el tamaño de la fuente e imágenes y a la vez modifica el contraste y color para que las personas con baja visión puedan facilitarles la lectura.
- Sistema operativo de Smartphones: tanto Android (TalkBack) como iOS (Voiceover) tienen lectores que interpretan la información en voz alta para que el usuario haga uso de la pantalla.

También se han realizado prototipos innovadores para entrenador de rehabilitación en orientación del sonido usando tecnología háptica por ejemplo el cinturón de retroalimentación háptica o drones basados en simular un espacio de audio3d pero debido a que son tecnologías complejas que no todas las personas tienen acceso a estos se han descartado para las personas invidentes (Schloerb et al., 2010).

Según el estudio de la rehabilitación a nivel mundial, la rehabilitación brinda servicios de asistencia dependiendo del caso de la persona. Según el estudio de la rehabilitación mundial se encuentra los siguientes servicios (Rehabilitation et al., 2004):

1. Orientación y Movilidad(O&M)
2. Autocuidado o destrezas de la vida (ADL)
3. Adaptación a la ceguera

El servicio de Orientación y Movilidad es de los más efectivos ya que dentro de los programas de O&M se enseña técnicas de orientación que incluye, la capacidad de identificar, utilizar pistas y puntos de referencia ambientales no visuales, conocimiento del entorno de la persona, sistema de direcciones y mapa táctil con audio lo cual requiere la toma de decisiones del usuario y resolución de problemas (Salud & Nacional, 2020).

El sistema embebido que se diseñó en este proyecto es un sistema no complejo con sensores inerciales para brindar asistencia remota a la práctica actual de entrenamiento de Orientación y Movilidad. Con este sistema podrá llevarse a cabo la rehabilitación desde casa para evitar trasladarse a un centro lo cual no todos tienen acceso fácilmente a transporte o tiempo disponible (Reyes et al., 2020) (Giraudeau et al.,

2021). Esta situación implica un prototipaje pequeño, sencillo y fácil de usar que no sea un problema para la persona invidente. Se realizará un sistema embebido ya que es un sistema electrónico minimalista que se puede diseñar de manera a que sea un circuito pequeño y a la vez sea fácil de usar.

3.2 SISTEMA EMBEBIDO

Un sistema embebido es un sistema para realizar una o varias tareas en tiempo real que tiene como propósito cubrir necesidades específicas, la mayoría de los componentes que se encuentran en una misma placa base, generalmente se pueden programar mediante un compilador usando lenguaje C o C++ o directamente con un lenguaje ensamblador.(Guerrero Aguirre et al., 2014) Los sistemas embebidos son diseñados para algunos servicios dedicados que integran un sistema completo que generalmente posee hardware y componentes mecánicos. Forman parte de dispositivos o equipos con el propósito de controlar alguna función específica de las maquinas (Vázquez, 2019).

Estos sistemas embebidos se encuentran en muchos dispositivos que usamos en la vida cotidiana por ejemplo en los ordenadores, celulares, lavadoras, automóviles, en las telecomunicaciones, etc. Estos sistemas se diseñan para realizar una tarea específica del dispositivo donde este implementado. En el diseño de dichos sistemas suelen implicarse ingenieros y técnicos especializados para analizar cuál sería el hardware adecuado para dicha asignación al sistema al igual el software que se utilizara para la comunicación entre componentes y entre sistema y máquina (Sistemas & Miñarro, 2009).

Existen varios desafíos al momento de diseñar un sistema embebido por ejemplo, este sistema debe ser confiable y funcional, el software es dependiente del hardware utilizado cual implica tener conocimiento entre el protocolo de comunicación entre ellos, deben cumplir los requerimientos pedidos como la confiabilidad, consumo de energía, espacio y restricciones de tiempo al igual al interacción con el entorno físico posee complicaciones ya que estos sistemas con un poco complejos por todos los componentes que lo complementan (anónimo, 2007).

3.2.1 DISEÑO DE SISTEMAS EMBEBIDOS

Para poder diseñar un sistema embebido se deben utilizar técnicas de codiseño Hardware/Software una de ellas es guiándose del Diagrama Y-Chart (Ilustración 8) que consiste en relacionar los diferentes aspectos del diseño que debemos tener en cuenta que son el comportamental, estructural y físico tomando en cuenta también los cuatro niveles de abstracción sistema, procesador, lógica y circuito como se puede ver en la siguiente imagen (Mart, 2019).

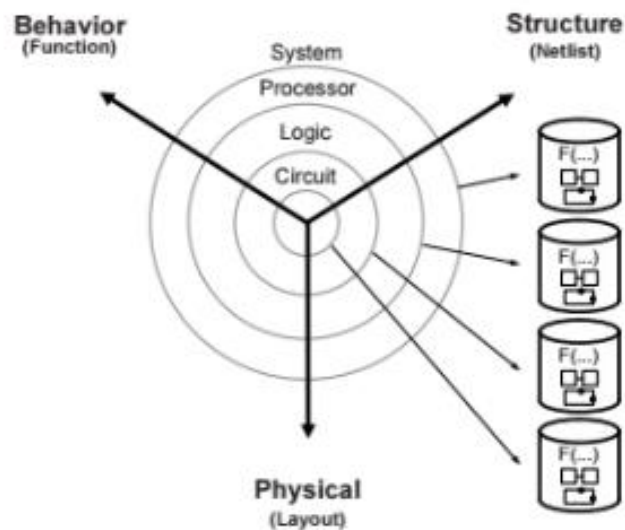


Ilustración 8-Diagrama Y-Chart

Fuente: (Mart, 2019)

Aspectos de Diseño:

1. Comportamental: describe las salidas y entradas.
2. Estructural: componentes y conexiones.
3. Físico: dimensión de la placa (alto y ancho), posición de cada componente y de las pistas de conexión entre ellos.

Niveles de abstracción:

1. Sistema: abarca todo lo que es el CPU del sistema como procesadores, memorias y buses.
2. Procesador: componentes para transferencia entre registros.

3. Lógica: compuertas lógicas como flip-flops.
4. Circuito: uso de transistores, osciladores, resistencias.

El diseño de un sistema embebido se divide en dos partes cuales sin ninguna de ellas puede elaborarse un sistema embebido: hardware y software.

3.2.2 HARDWARE

El hardware se refiere a todo lo físico que puede tener un circuito electrónico en este caso un sistema embebido. Según el informe sobre sistemas embebidos (2009), un sistema embebido se trata de un módulo electrónico alojado dentro de un sistema de mayor entidad como un anfitrión el cual ayuda a que la función se realice como el procesamiento de datos generado por sensores, el control de actuadores (Sistemas & Miñarro, 2009).

Según Goñi (2020) los componentes que generalmente forman un sistema embebido son:

- Microprocesador: el controlador de todo el circuito
- Microcontrolador
- DSP de punto fijo o flotante
- Diseño de medida tales como los dispositivos FPGA
- Sensores
- Actuadores
- Memorias (volátil o no volátil)

También se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- Tamaño que por lo general debe ser lo más reducido posible.
- Margen de temperatura específico dependiendo del ambiente donde será aplicado
- Consumo de energía: cantidad, fuente de energía (normalmente vienen con baterías recargables porque son de bajo consumo)
- Robustez mecánica

- Costo de la placa

3.2.3 SOFTWARE

El software de los sistemas embebidos se define como la herramienta de programación especializada en los dispositivos embebidos que facilitan el funcionamiento de las máquinas y administra los diferentes dispositivos y sistema del hardware(Q&A, n.d.). Según Vázquez (2019) el software embebido tiene factores críticos como espacio limitado de memoria, CPU restringidas en clock y longitud de palabras, conectividad limitada, etc. El software debe ser esencial y tener una programación correcta para que ejecute la función asignada mediante la comunicación entre el microcontrolador o microprocesador con los sensores o actuadores que es el propósito del software del sistema. El software asigna a los recursos lo que deben realizar y toda esta información debe estar almacenada en la memoria del sistema embebido.

3.2.4 COMUNICACIÓN

Existen varios protocolos de comunicación para los sistemas embebidos. El protocolo de comunicación a utilizar depende del hardware, en otras palabras, los componentes que llegaremos a utilizar ya que cada componente tiene una lista de protocolos por la cual ellos se pueden comunicar con otros. Según Lifelong Learning (2011) estos son los tipos de comunicaciones que existen para los sistemas embebidos:

- RS-232, RS-422, RS-485, UART/ USART
- I2C, SPI, SSC y ESSI, USB
- Protocolos de comunicación de red como Ethernet, CAN, LonWorks, etc.
- Software: Popular OS-QNX4 RIOS, Linux embebido y Linux-base, iOS, Windows CE.

IV. METODOLOGÍA

Al tener el planteamiento el problema de la investigación y un marco teórico como respaldo de evidencia que comprueba el problema existente, procede este capítulo donde se describe la metodología que se llevó a cabo en la investigación, explicando los métodos, técnicas aplicadas y procesos seguidos para la realización del diseño del sistema embebido.

4.2 HIPÓTESIS

El desarrollo del sistema embebido permitirá una reducción de costo, tamaño y peso del dispositivo de pruebas.

4.3 ENFOQUE

Debido a los objetivos planteados, se hizo una revisión de lectura sobre la actualidad referente a la tecnología en la rehabilitación de las personas con discapacidad visual, también de cómo se ha desarrollado el prototipaje previo en el laboratorio y cómo se debe diseñar un sistema embebido utilizando métodos y técnicas tomando en cuenta las cualidades que debe tener para este prototipaje ya que se realizó un diseño de ingeniería que reemplazará un sistema de pruebas ya existente, por lo que esta investigación también se considera un estudio longitudinal.

También está definida como una investigación no experimental, en este caso el sensor principal del sistema embebido ha sido seleccionado previamente por el grupo de investigación y el diseño está enfocado en torno a esta variable. El enfoque de la investigación es cualitativo, ya que el resultado global es un diseño que será evaluado cuantitativamente en la siguiente fase del proyecto.

4.4 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Debido a que esta investigación es un diseño de ingeniería, las variables de investigación son consideradas como los requerimientos del sistema diseñado. Siendo la variable dependiente el diseño de hardware. Y las variables independientes (Ilustración 9): 1) El procesador; 2) La fuente de alimentación; 3) El protocolo de comunicación; 4) Los componentes periféricos; 5) Los elementos activos y; 6) La montura tridimensional.

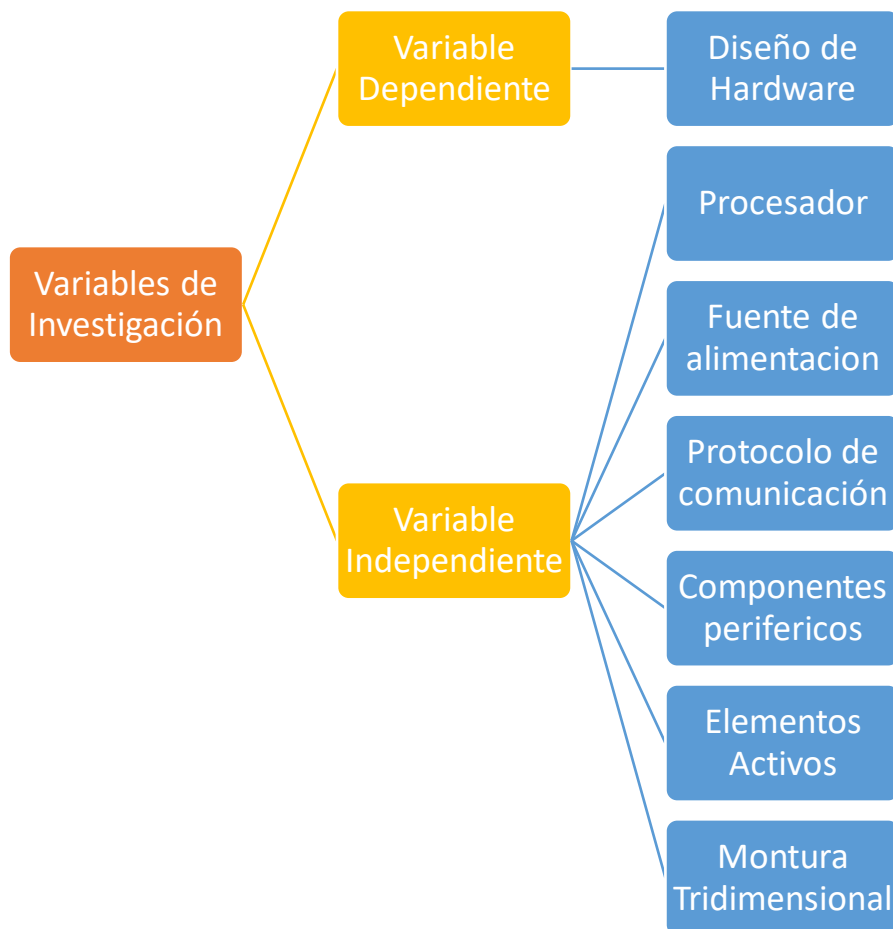


Ilustración 9- Variables de Investigación

Fuente: propia

Se consideran variables independientes a estos factores por las siguientes razones:

- 1) El procesador: juega uno de los papeles importantes ya que será quien controlará todo el sistema y por medio de él se comunicarán los componentes entre sí y se

- encarga de mandar los datos. El procesador varía dependiendo de los requerimientos necesarios en este caso que contenga módulo de bluetooth incorporado, pueda comunicarse con el sensor ya establecido y sea de costo bajo.
- 2) La fuente de alimentación: se deberá considerar la entrada de voltaje que tendrá el sistema que sea capaz de sostener el consumo del sistema entero y ver las conexiones del circuito requerido para la entrada del voltaje del sistema y como se distribuirá.
 - 3) El protocolo de comunicación: existen varios protocolos de comunicación, se debe tener en cuenta que protocolos puede el sensor inercial y el procesador utilizar para poder comunicarse entre sí y cual es más conveniente para nuestro sistema embebido.
 - 4) Los componentes periféricos: estos componentes se definen por el usuario final que utilizará el sistema y varía por el hecho que se analiza cual será adecuado para la rehabilitación del invidente.
 - 5) Elementos activos: el circuito del sistema embebido depende de las entradas, salidas, puertos de comunicación, resistencias e inductores necesarios para llevar a cabo un circuito eficiente y pueden cambiar depende de los componentes que requieran cada elemento del circuito para su función.
 - 6) La montura tridimensional: el diseño de la montura debe ser tangible, interactivo y no invasivo siendo una montura cómoda y fácil de usar para la persona invidente.

4.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

4.5.1 TÉCNICAS

Se realizaron consultas a expertos en ingeniería electrónica e ingeniería eléctrica para la toma de decisión de componentes y diseño de la placa impresa. También se realizó una entrevista a un experto rehabilitador miembro de la Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE) para recomendaciones del diseño de la montura del dispositivo de manera que no sea un dispositivo incómodo para la persona con discapacidad visual grave.

4.5.2 INSTRUMENTOS

- Software de diseño de esquema del circuito, diseño del circuito impreso y simulación:
Altium Designer (Ilustración 10)



Ilustración 10-Altium Designer Logo

Fuente: (Altium, n.d.)

Altium Designer es un programa para diseño de circuitos electrónicos con todas las fases como diseño de los esquemas de los circuitos, simulaciones, diseño de circuitos impresos simulando en 3D.(Sector, 2008)

- Software de Entorno de desarrollo integrado, IDE por sus siglas en inglés: Mbed Studio (Ilustración 11) y Embedded Studio-Segger (Ilustración 11)



Ilustración 11-Mbed Studio Logo

Fuente: (mbed, n.d.)



Ilustración 12-Embedded Studio Logo

Fuente: (Segger, n.d.)

Mbed Studio y Embedded Studio son softwares para poder programar sistemas embebidos basados en arquitecturas ARM y dispositivos IOT con lenguaje C o C++.

- Software de diseño CAD: Solidworks (Ilustración 13)



Ilustración 13- SolidWorks Logo

Fuente: (seekvectorlogo, n.d.)

SolidWorks es un programa para diseño CAD 3D para modelar piezas y ensamblajes en planos 2D y 3D.

Altium Designer y SolidWorks fueron seleccionados en conjunto con las instrucciones del investigador principal y de acuerdo a mis conocimientos, por otro lado, Mbed Studio y Segger Embedded Studio se seleccionaron de acuerdo a las indicaciones del kit de desarrollo de la marca Nordic del microcontrolador.

4.6 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La metodología de estudio aplicada en el desarrollo de este proyecto es la metodología de diseño basada en el modelo W y la identificación de Lenguaje de Modelado de sistemas SyML por sus siglas en inglés creada por (Barbieri et al., 2014).

Esta metodología está enfocada en el desarrollo de sistemas mecatrónicos en la etapa del desarrollo conceptual y está desarrollada de forma en que el problema puede ser abordado entrelazando el diseño conceptual con modelos ejecutables que son validados a través de la simulación.

En esta primera fase del proyecto, se han abordado tres de las cinco fases del diseño W:

La fase de análisis del sistema (Ilustración 14), que consiste en la definición de los requerimientos propios de la aplicación. Que en este caso particular de diseño es enfocado para usuarios invidentes. La fase de Soluciones específicas y análisis dependiente, que consiste en la identificación de los módulos del sistema y sus componentes derivados evaluando los parámetros de red. Y finalmente, la fase de Integración del Sistema virtual, que consiste en el desarrollo del diseño y su simulación virtual.

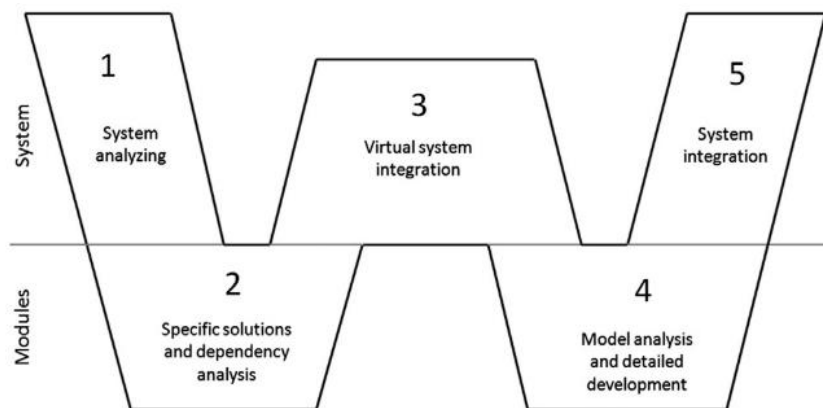


Ilustración 14 – Las cinco fases de la metodología W

Fuente: (Barbieri et al., 2014)

En la fase 1 de la metodología W obtuve los requerimientos conceptuales en base a las consultas bibliográficas, adicionalmente la consulta con los miembros del grupo de investigación de tecnología asistivas del cual formé parte en el cual participa un rehabilitador senior de la Organización nacional de Ciegos ONCE.

En la Tabla 2 se presenta la matriz de los criterios más importantes que se debe tomar en cuenta al momento del diseño del prototipo.

Tabla 2-Matriz de Criterios

Criterio	Importancia				
	1	2	3	4	5
Tamaño					x
Peso				x	
Costo			x		
Diseño Háptico					x
Sistema Inalámbrico					x

Fuente: Propia

En la fase 2, se identificaron los componentes necesarios debido a que las hojas de datos de los componentes principales ofrecen circuitos de referencia dependiendo de la configuración que nos beneficie a nuestro sistema embebido. Y finalmente la fase 3, se diseña el esquemático del circuito electrónico con sus respectivas conexiones, entradas y salidas de los actuadores y sensores.

4.8 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En esta sección se presenta el cronograma de actividades y tareas que se realizaron durante el proyecto de investigación.

Tabla 3-Cronograma de Actividades y Tareas

Actividades y Tareas	Semana 0	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7
Asignación del proyecto								
Evaluación y estudio de los requerimientos electrónicos en el sistema embebido								
Seleccionar componentes electrónicos requeridos en el circuito								
Diseñar diagrama esquemático de las interconexiones de los elementos del circuito utilizando Altium								
Simulación y pruebas del esquemático electrónico general								
Elaboración y pedido de elementos para el sistema embebido								
Diseño de montura del dispositivo								

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se mostrará los resultados obtenidos de acuerdo al análisis de los objetivos planteados del proyecto.

5.1 REQUERIMIENTOS CONCEPTUALES PARA DISEÑO DE SISTEMA PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL

En la rehabilitación de invidentes las personas acuden a un centro de rehabilitación donde ellos aprenden a ser independientes a pesar de su discapacidad, aprendiendo nuevas técnicas para desenvolverse en las actividades cotidianas por ejemplo utilizar un bastón, perro guía o tecnologías asistivas. Hoy en día no existe muchos instrumentos tecnológicos que sean adecuados para las personas invidentes ya que se necesitan que sean sencillos, tangibles, interactivos, lo menos invasivo y a la vez sean de costos accesibles para todas las personas de cualquier clase.

El prototipo previo es un sistema que calcula parámetros de movimiento y orientación de una persona invidente para saber cómo se comporta la persona invidente con el bastón en el tiempo de aprendizaje. Está compuesto por un Arduino, sensores inerciales y cables al exterior. Su modo de funcionalidad es complejo y no apto para ser utilizado en la rehabilitación de los invidentes.

Para poder diseñar un sistema dedicado para personas invidentes los requerimientos conceptuales del sistema que se tomaron en cuenta para el desarrollo de este prototipo, basado en las recomendaciones evaluadas en la revisión bibliográfica (Davies et al., 2007) son:

Lista de requerimientos conceptuales



Ilustración 15- Requerimientos conceptuales

Fuente: propia

- Tamaño del dispositivo: el dispositivo debe adaptarse a las dimensiones donde el tamaño no afecte el lugar donde será implementado en este caso en el bastón, el prototipo debe adaptarse al grosor y longitud del bastón, ya que durante el entrenamiento de la rehabilitación la sensación percibida por el invidente debe ser lo más parecido posible a una escena real de movilidad sin el dispositivo.
- Peso del dispositivo: el peso debe ser lo más mínimo para que no ocurra ninguna incomodidad al momento de sujetar el bastón, también para que la persona no adapte una mala postura o mala manía por el peso adicional.
- Retroalimentación háptica: el dispositivo debe brindar información sobre el estado a través del sentido del tacto de modo que sea fácil de manipular.
- Retroalimentación auditiva: a través de la retroalimentación auditiva se genera comunicación y se brinda información del estado del dispositivo respecto a la batería y la comunicación de red inalámbrica.
- Bajo costo: la mayoría de las personas que no tienen acceso al servicio de rehabilitación presencial son personas de escasos recursos por lo tanto es

necesario que el dispositivo tuviera la menor complejidad en el diseño electrónico para reducir los costos.

En base a estos requerimientos conceptuales se prosiguió a realizar el diseño del sistema embebido.

5.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS ETAPAS DE DESARROLLO DE UN SISTEMA EMBEBIDO

Un sistema embebido puede ejecutar una o varias tareas en tiempo real es un sistema predecible y determinista. El diseño de un sistema embebido toma en cuenta dos características muy importantes que sin ninguna de estas se puede crear un sistema embebido que son el hardware y el software. Debemos tomar en cuenta que entre ellas debe existir una comunicación para poder ejecutar la tarea asignada. Por esta razón se debe analizar el tipo de componentes que son requeridos dependiendo del objetivo que tenemos, el protocolo de comunicación entre los componentes y que plataforma se utilizara para crear esta dicha comunicación. (Goñi, 2020)

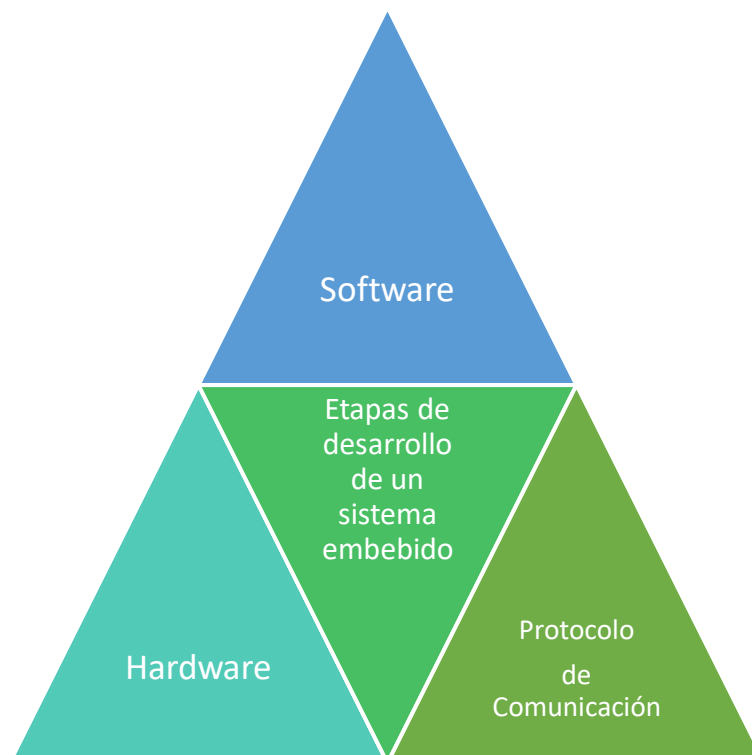


Ilustración 2-Etapas de Desarrollo de un sistema embebido

Fuente: Propia

La primera etapa de desarrollo, es el diseño de Hardware (Ilustración 16): para esta etapa se debe tener en cuenta la funcionalidad de la placa para así seleccionar los componentes necesarios del circuito electrónico y se ejecuten correctamente.

La segunda etapa de desarrollo es el protocolo de comunicación: elegir el protocolo de comunicación se define por los componentes principales en este caso el microcontrolador con el sensor. Debemos tener la hoja de datos para ver que protocolos se pueden utilizar entre estos dos componentes y elegir cuál de ellos es el más adecuado en nuestro sistema, en este caso sería el protocolo que requiera menos componentes y sea el menos complicado.

La tercera y última etapa es el diseño de software: en esta etapa se hace una revisión en la hoja de datos del microcontrolador para saber que interfaces podemos utilizar para programar la comunicación entre los componentes y que lenguaje se utiliza. También al elegir la interface sabremos si nuestros componentes tienen librerías en el lenguaje indicado o se deberían crear.

5.3 SELECCIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA EMBEBIDO.

Los componentes electrónicos se eligieron de acuerdo a los circuitos de referencias que brinda la hoja de datos del microcontrolador y del sensor que se utilizó. También se tomó en cuenta los componentes que requieren para los actuadores que se agregaron al circuito como botones, leds, alarma e interruptores. El sensor inercial que es el componente determinado en este prototipo es el BNO055 y el microcontrolador que se selecciono es el NRF52832 de Nordic.



Ilustración 3- Sensor BNO055

Fuente: (Bosch, 2014)

El bno055 es un sensor inercial que captura y analiza movimiento, contiene 9 ejes, magnetómetro, acelerómetro y giroscopio con comunicación I2C Y UART (Ilustración 17). Este sensor ya estaba previamente elegido por el grupo de investigación (Ver Anexo 3).

Como procesador para nuestro sistema se eligió un microcontrolador ya que su uso es para tareas específicas, son sencillos y de bajo costo. Contiene memoria RAM y ROM integrados y periféricos embebidos lo cual es adecuado para nuestro prototipo.

Se investigó sobre los microcontroladores más utilizados en la actualidad para sistemas embebidos y para IOT. Según el mercado y referencias, se encontraron los siguientes microcontroladores que se utilizan en estos tipos de sistemas haciendo una comparativa entre ellos para identificar cuál sería el más adecuado de acuerdo a los siguientes parámetros (Tabla 4):

Tabla 4- Comparativa de Microcontroladores

Microcontrolador	Memoria	Bluetooth	Consumo de Energía	GPIO	Precio
MAX32652	Integrada	-	1.8v-3.3v	103	6.81€
NRF52832	Integrada	Integrado	1.7v-3.6v	32	3.3 €
ATSAM4LC8BA-MU	Integrada	-	1.68v-3.6v	75	6.2€
PIC32MX154F128BT-I/MM	Integrada	-	2.5v-3.6v	28	3,65 €

Fuente: propia

Estos parámetros son importantes para nuestro sistema ya que necesitamos comunicación vía bluetooth para transmitir los datos a otros dispositivos, memoria integrada, bajo consumo de energía, pines para entradas y salidas y una de las cosas más importantes que sea de bajo costo.

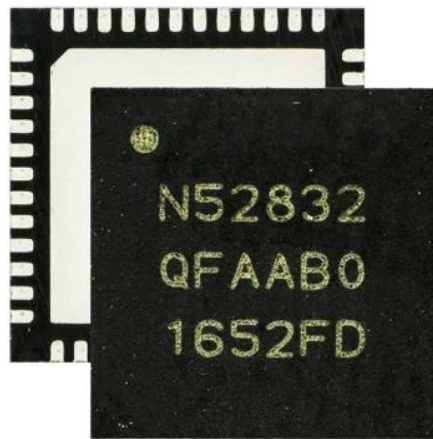


Ilustración 4-Microcontrolador Nrf52832

Fuente: (Personal et al., n.d.)

El microcontrolador que se eligió fue el Nrf52832 (Ilustración 18), es un chip con bluetooth incorporado de bajo consumo de energía, contiene cantidades de pines de entradas y salidas y es el microcontrolador con precio accesible.

La hoja de datos del microcontrolador nrf52832 (Ilustración 19) brinda varias referencias de conexión dependiendo de la configuración que se requiere. Se eligió el circuito con la configuración Internal LDO porque es más eficiente para bajo consumo de corriente (Ver Anexo 2).

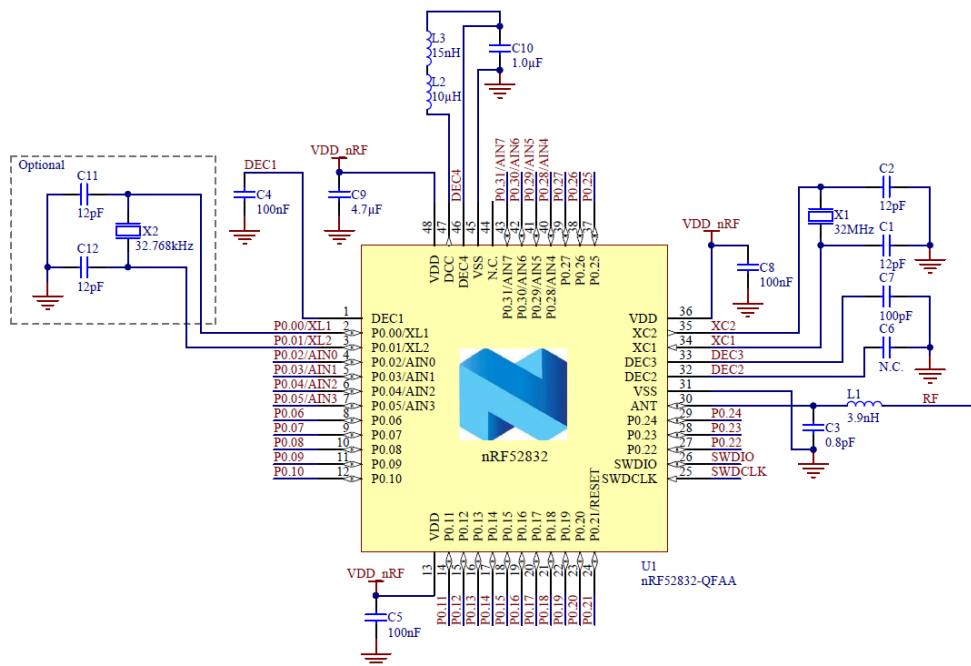


Ilustración 5-Referencia de circuito del microcontrolador

Fuente: propia

El sensor inercial BNO055 tiene diferentes maneras de conexión (Ilustración 20) dependiendo del protocolo de comunicación elegido.

Para este prototipo se eligió el protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit) ya que es el tipo de comunicación más simple, no utiliza muchos componentes, soporta múltiples de maestros y esclavos y existe confirmación recibida. (teslabem, 2017)

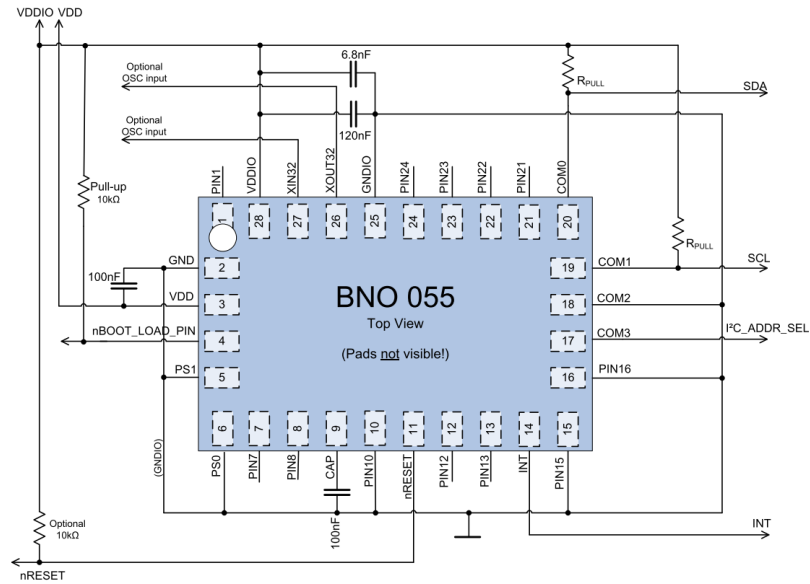


Ilustración 6-Referencia del sensor (I2C)

Fuente: (Bosch, 2014)

5.3.1 LISTA DE COMPONENTES

Al tener estos diagramas de conexión del microcontrolador y el sensor inercial se prosiguió a realizar una lista de componentes para investigar los precios de los componentes en la tienda de RS Components con quien mantiene un convenio de compra la Universidad Politécnica de Madrid.

5.3.1.1 COMPONENTES DEL PROTOTIPO PREVIO

En la Tabla 5, se muestra la lista de componentes que utiliza el prototipo previo (Ver Anexo 1), con un total de 17 componentes y un precio total de 114.242 euros.

Tabla 5- Lista de componentes Prototipo Previo

Descripción	Componente	Cantidad	Precio	Total
Arduino MKR Wifi 1010	ABX00023	1	27.97	27.97
Sensor	ATBNO055-XPRO	2	23.51	47.02

Descripción	Componente	Cantidad	Precio	Total
Memoria	Módulos de Tarjeta Micro SD	1	6.99	6.99
Pulsador	SPST	2	0.093	0.186
Multiplexer	2717	1	5.73	5.73
Porta pilas	512-3574	4	1.27	5.08
Resistencia	1kohm	2	0.083	0.166
Tarjeta Micro SD	MicroSD Kingston 16 gb	1	9.1	9.1
Batería	1.5v	3	4	12

Cantidad de Elementos	Costo Total
17	114.242

5.3.1.2 COMPONENTES DEL PROTOTIPO NUEVO

En la Tabla 6, se muestra la lista de componentes que utiliza el prototipo nuevo, con un total de 36 componentes y un precio total de 28.51019 euros.

Tabla 6- Lista de componentes Prototipo nuevo

Descripción	Componente	Cantidad	Precio	Total
Cargador de batería	MPC73832	1	0.54	0.54
Sensor	BNO055	1	8.37	8.37
Cristal	32KHz	1	0.96	0.96
Cristal	32MHz	1	0.45	0.45
Transistor NPN	SMD	1	0.08	0.08
SoC Nordic	NRF52832	1	3.3	3.3
Pulsante	SMD	1	0.23	0.23
USB 2.0	SMD	1	0.4	0.4
Led	led	1	0.29	0.29
Resistencia	4.7kOHM	5	0.55	2.75
Capacitor	1uf	4	0.08	0.32
Capacitor	12pf	2	0.33	0.66
Resistencia	1KOHM	3	0.08	0.24

Descripción	Componente	Cantidad	Precio	Total
Bocina	CMT-7525-80-SMT-TR	1	0.67701	0.67701
Capacitor	4.7uf	2	0.08	0.16
Capacitor	1 pf	2	0.47	0.94
Capacitor	100 uf	2	0.08	0.16
Capacitor	0.1uf	3	0.08	0.24
Resistencia	470ohm	1	0.08	0.08
Interruptor	JS102011SCQN	1	0.33318	0.33318
Batería	3.7v	1	7.33	7.33

Cantidad de Elementos	Gasto Total
36	28.51019

El costo del prototipo nuevo se le debe agregar los gastos de producción de la PCB que en este momento no se conoce, pero debido a las características y por experiencia previa del miembro del grupo del laboratorio se estima que será menos de 10 euros.

5.4 ESQUEMÁTICO DE LAS INTERCONEXIONES

El diseño del sistema embebido se realizó en el programa Altium Designer. Las siguientes imágenes son partes del esquemático del diseño de las interconexiones del circuito siendo la fuente de alimentación, la conexión del microcontrolador, conexión del sensor inercial, botón, interruptor, bocina, led y otros componentes. Luego del esquemático se realiza el diseño de la placa de circuito impreso 2D cual se indican las pistas que conectan los componentes y nos da la dimensión de la placa ya impresa.

Primero se crearon librerías siguiendo la hoja de datos de algunos componentes para poder tener el símbolo del esquemático, el símbolo de las pistas y el diseño 3D del componente para así proseguir con lo esquemáticos de las conexiones.

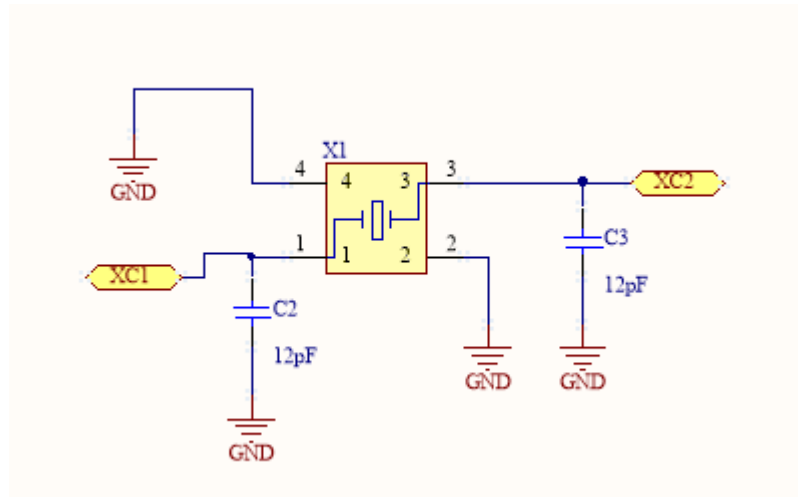


Ilustración 8-Conexión de Oscilador

Fuente: propia

El microcontrolador NRF52832 contiene dos osciladores de cristal por default de 32Mhz y de 32.768hZ cuales van conectados en los puertos XL1, XL2 Y XC1, XC2 y sus respectivos capacitores.

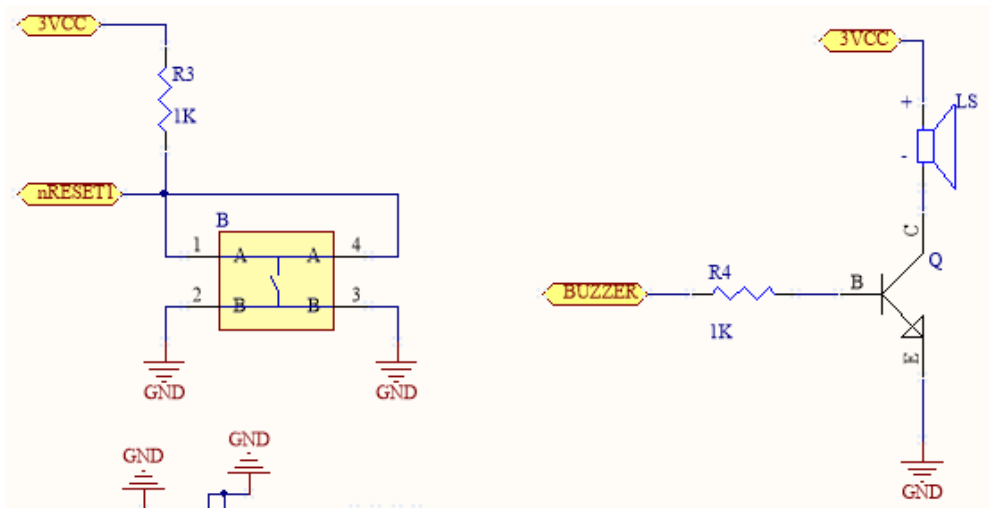


Ilustración 9-Conexiones de Interruptor y bocina

Fuente: propia

Nuestro sistema tiene un botón para resetear el sistema y una bocina para dar una alarma cuando nuestro dispositivo se conecte vía bluetooth y para indicar el estado de encendido. Estos componentes auxiliares se eligieron dependiendo del consumo de voltaje y siendo el tamaño los más pequeños. La bocina es el CMT-7525-80-SMT-TR con un rango de 2.4-3v de consumo de energía y el botón es el EVQ-Q2Y03W.

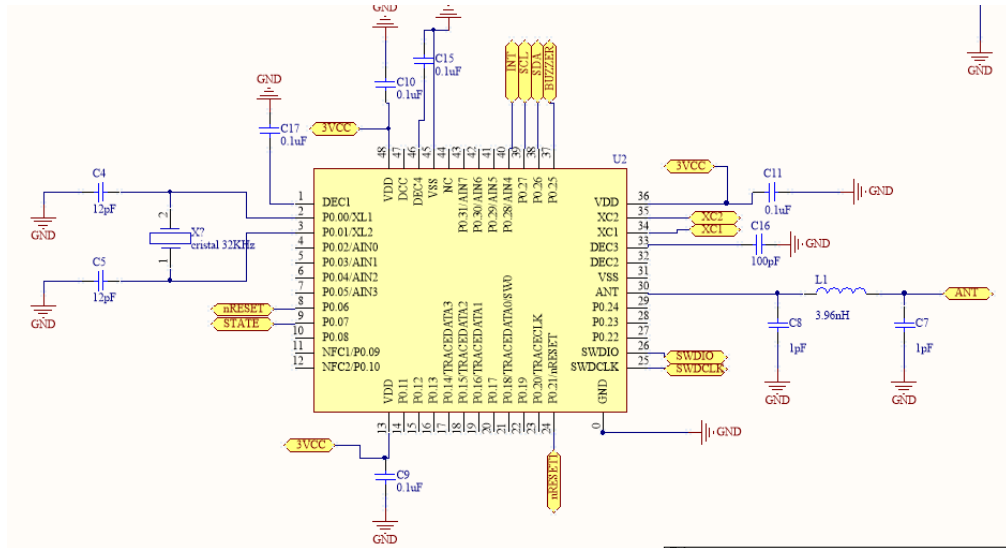


Ilustración 10-Conexiones del microcontrolador

Fuente: propia

También tenemos las conexiones del microcontrolador con sus salidas, entradas, antena y fuentes de alimentación siguiendo la referencia del circuito y posicionando las entradas y salidas de los componentes auxiliares y comunicación con el bno055 de la mejor manera para que al momento de diseñar el modelo 2D de las pistas no interfieran entre sí y su diseño sea más fácil.

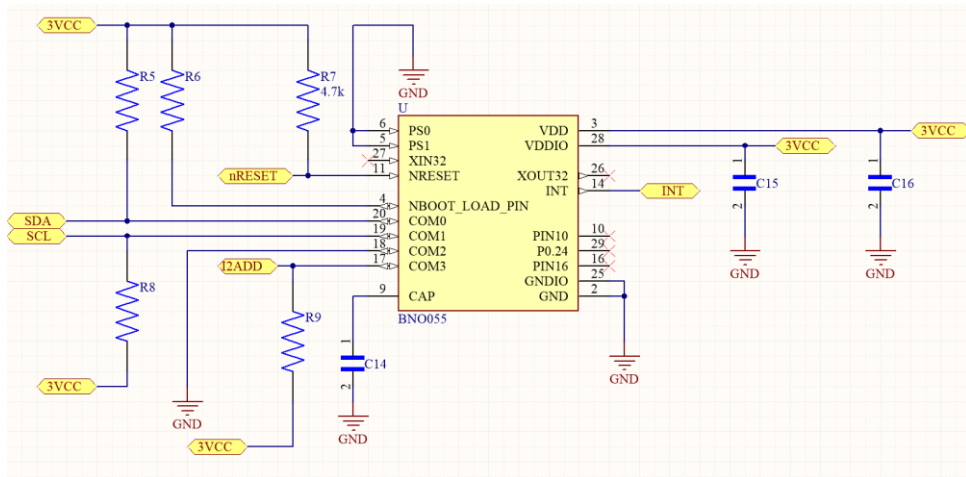


Ilustración 11-Esquemático del sensor

Fuente: propia

Por último, las conexiones del sensor BNO055 con sus puertos de comunicación con el microcontrolador, puerto del botón reset, puerto de suministro de energía y el puerto de la dirección del sensor con el microcontrolador, siguiendo el circuito de referencia del sensor en comunicación I2C.

Al tener el esquemático completo se prosiguió al diseño del circuito impreso 2D, donde se conectaron cada componente con las pistas necesarias haciendo el diseño lo más pequeño posible y posicionando los componentes de la mejor manera (Ilustración 26).

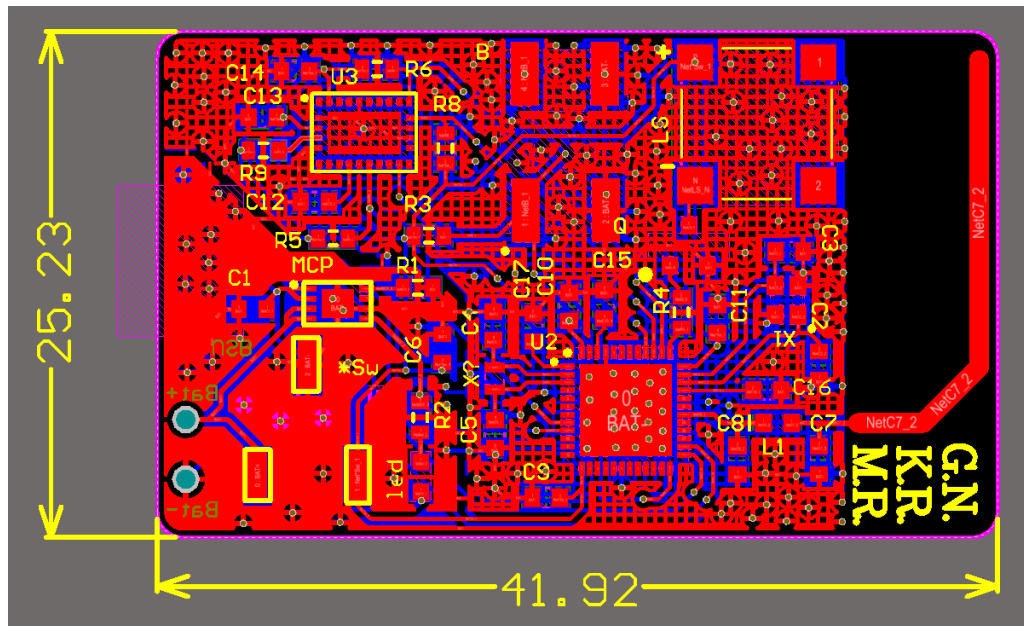


Ilustración 12-Diseño de la placa de circuito impreso 2D

Fuente: propia

El diseño de la pcb fue un desafío por la cantidad de componentes. Las pistas rojas indican que están en la capa superior y las pistas azules las que están en la capa inferior. Se jugo con el diseño de las pistas y posición de los componentes para lograr la mejor conectividad sin que existan ruidos o interferencia entre ellos. Las dimensiones que se obtuvieron fueron de 25.23mmx41.92mm. Las dimensiones de las pistas fueron de 0.2mm de acuerdo a las recomendaciones de un experto ya que los componentes son de carcasa 0603, esto se refiere que los pines de los componentes son pequeños al momento de soldar, no se toma en cuenta la temperatura porque las corrientes son bajas por las que pasa en las pistas.

La antena de nuestro sistema que permitirá la conexión vía bluetooth debe ir alejada de todos los componentes para que no exista ninguna interferencia de señales. La antena está alejada de una distancia de 6mm, longitud de 20mm y grosor de 1mm. Estos datos fueron recomendados por un experto.

Finalmente tenemos la vista del modelo 3D de la PCB vista frontal y diagonal (Ilustración 25 y 26). Altium Designer nos da una idea de cómo se verá nuestra placa

impresa con todos los componentes necesarios ya soldados en los espacios que les corresponde según el diseño.

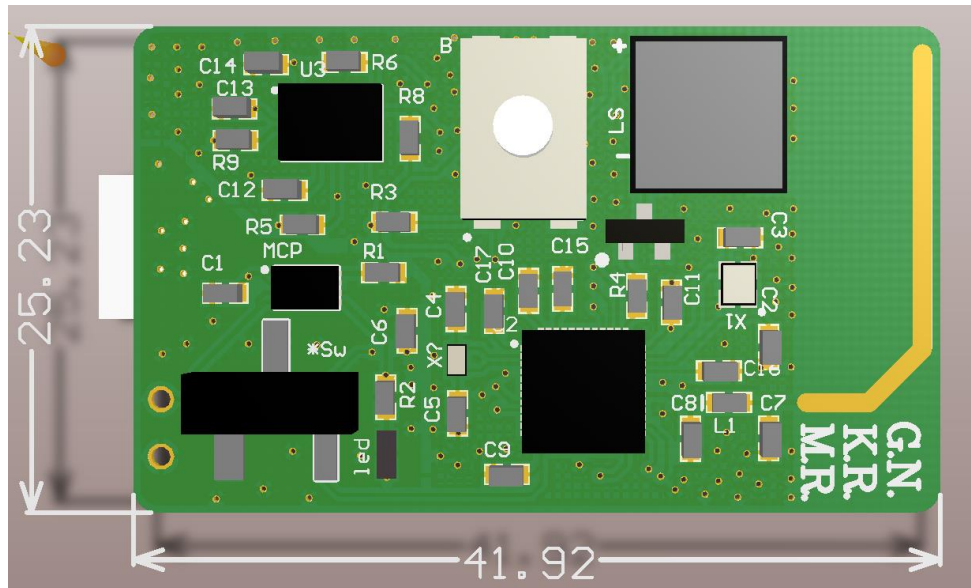


Ilustración 13- Diseño PCB 3D Frontal

Fuente: propia

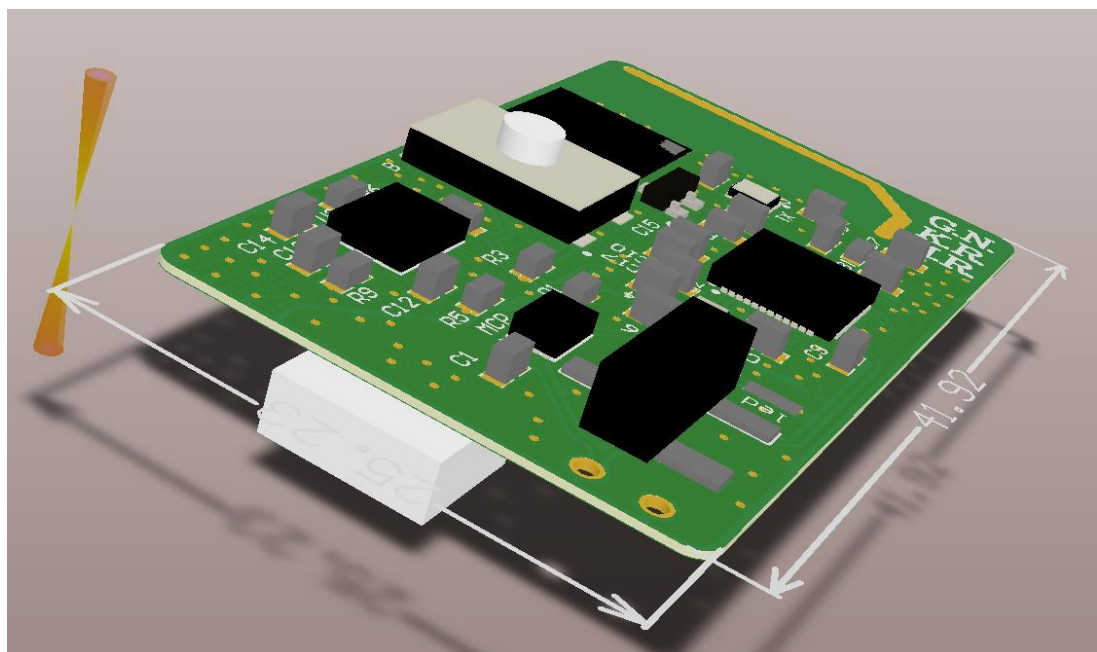


Ilustración 14-Diseño PCB 3D Vista Diagonal

Fuente: propia

5.5 MONTURA DEL SISTEMA EMBEBIDO

La montura del sistema embebido se diseñó en el programa SolidWorks. Teniendo las dimensiones se pudo crear una carcasa previa que protegerá nuestra placa siendo sencilla cual luego se tendrá que mejorar para que sea háptico y adecuado para las personas invidentes.

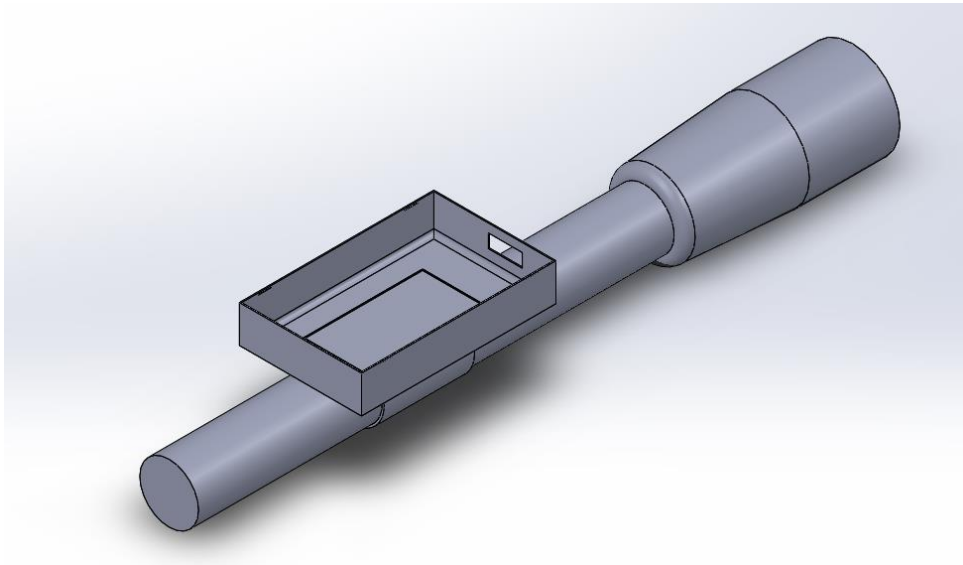


Ilustración 15-Carcasa Dispositivo 1

Fuente: Propia

En el diseño se simuló el bastón como prueba de visualización del prototipo. La carcasa del dispositivo 1 se diseñó de manera que se adapte al grosor del bastón para que este sujete a él con un tipo de anillo.

El diseño de la montura debe ser sencillo, lo menos invasivo y a la vez que pase desapercibido para que no se sienta una diferencia al momento de sujetar el bastón. La forma cuadrada con esquinas redondas se hizo con referencia a las dimensiones y forma de la placa impresa.

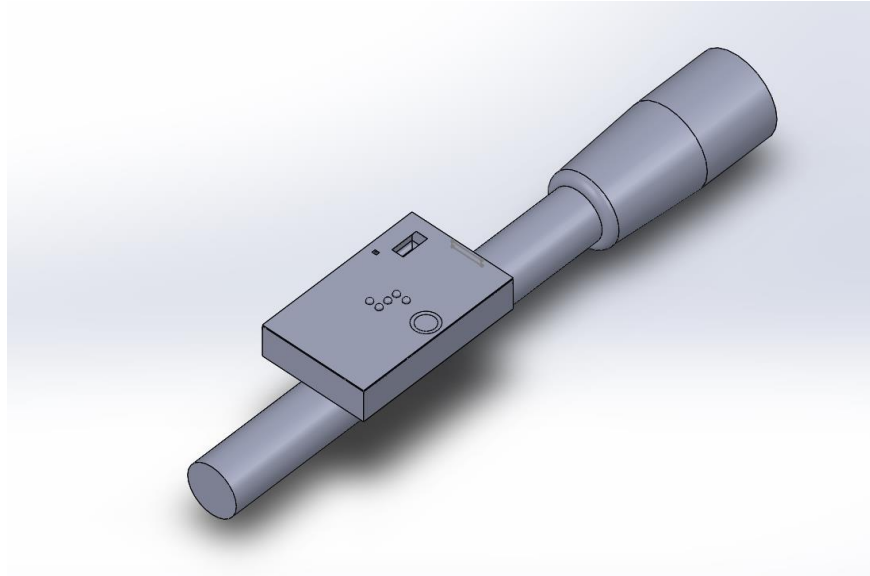


Ilustración 16-Carcasa Dispositivo 1 ensamblaje

Fuente: propia

Luego se hizo el ensamblaje de la tapadera del dispositivo 1 que está adaptado al bastón. También se diseñó el dispositivo 2 que va adaptado para la pierna del usuario (Ilustración 29).



Ilustración 17-Carcasa Dispositivo 2

Fuente: propia

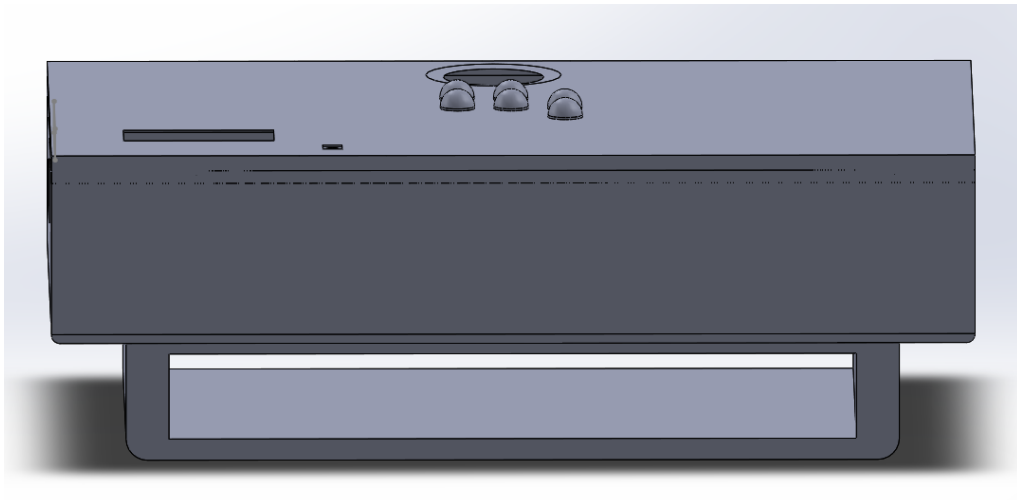


Ilustración 18-Carcasa Dispositivo 2 Vista Lateral

Fuente: Propia

El dispositivo 2 lleva un espacio en el lado inferior para poder ser sujetado a la pierna del usuario usando una cinta. Ambos dispositivos llevan lenguaje braille para diferenciar el dispositivo 1 del 2 ya que ambos van en lugares diferentes. La carcasa del dispositivo 1 y 2 serán hechas con impresión 3D.

VI. CONCLUSIÓN

6.1 CONCLUSIÓN GENERAL

Se diseño un sistema embebido para la etapa de evaluación y validación del programa de asistencia a la orientación y movilidad en la rehabilitación de invidentes usando metodología de diseño mecatrónico.

6.2 CONCLUSIÓN ESPECIFICA

Partiendo de los requerimientos conceptuales, que fueron importantes para el diseño, debido a que el usuario final es un paciente de rehabilitación con pérdidas visuales graves;

1. Se analizaron los requerimientos conceptuales del sistema para crear el diseño del dispositivo cumpliendo las necesidades del usuario final.
2. Se identificaron las etapas de desarrollo de un sistema embebido, a través del análisis de la literatura.
3. Se seleccionaron los componentes necesarios para el diseño, siendo los componentes principales: el microcontrolador NRF52832 que contiene bluetooth de baja energía integrado, el sensor BNO055 que consiste en una fusión de sensores inerciales (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro), bocina, interruptores y otros componentes secundarios.
4. Se prosiguió a elegir el protocolo de comunicación adecuado, siendo elegido el bus Circuito Inter integrado I2C debido a sus características específicas y a las capacidades del microcontrolador y el sensor principal, descartando el protocolo UART.
5. Se diseñó el esquemático del circuito y la placa del circuito impreso utilizando el programa Altium Designer, para el cual fue necesario diseñar las librerías y modelos tridimensionales de cada uno de los componentes, exceptuando las

resistencias y capacitores proveídos por el programa, obteniendo las dimensiones finales de 4.192 x 2.523 cm.

6. Se diseñaron dos carcasas para el dispositivo, el primero es un diseño adaptado al bastón blanco de personas invidentes y el segundo dispositivo, adaptado a la pierna para el usuario, obteniendo un diseño sencillo y háptico.

VII. RECOMENDACIONES

Para realizar un sistema embebido debemos conocer el objetivo que tendrá este dicho sistema. Una vez definiendo el propósito se debe analizar las etapas de diseño de un sistema embebido para tener un resultado eficiente.

Seguir las etapas del diseño de un sistema embebido para identificar los componentes necesarios logrando que sea un circuito sencillo, de bajo consumo de energía, bajo costo y trabaje de manera eficiente a tiempo real.

Definir el protocolo de comunicación que mejor convenga para el sistema embebido tomando en cuenta las cualidades de los componentes principales que son el microcontrolador y el sensor.

Al tener todas estas características se prosigue a diseñar el esquemático y la placa del circuito impreso siendo las conexiones de la mejor manera, posicionando los componentes donde mejor convenga consultando a expertos para hacer el circuito más pequeño, sencillo y menos invasivo, así tener las dimensiones de la placa

Al tener las dimensiones se diseña la carcasa de la placa de manera a que se adapte al campo en el que integrará en este caso al bastón y a la pierna del usuario siendo un dispositivo invasivo, pequeño y liviano.

VIII. APLICABILIDAD

Este sistema embebido será utilizado para realizar pruebas de validación de un proyecto general que está siendo desarrollado en el Laboratorio de Bioinstrumentación y Nanomedicina. El cual, consiste en un sistema remoto para evaluación de parámetros de Orientación y Movilidad (O&M) en la rehabilitación de personas invidentes.

Sin embargo, si el diseño es adecuado y finalmente aprobado por la comunidad de invidentes que forman parte del proyecto general y que participarán en la etapa de validación del sistema en futuras etapas, incluyendo la validación del diseño de las características del sistema embebido. Este diseño de sistema podría servir como base para consideración de los grupos de investigación que trabajan en el desarrollo de tecnologías asistivas para invidentes.

IX. TRABAJO FUTURO

Las siguientes etapas de este trabajo consisten en el desarrollo de este sistema embebido. Para lo cual es necesario trabajar en diseño de software, impresión de la placa y pruebas de funcionamiento general:

El software debe ser programado de modo que el sistema sea capaz de leer los datos del sensor y transmitirlos vía red inalámbrica a un sistema interfaz previamente diseñado en el laboratorio de Bioinstrumentación y Nanomedicina.

Al mismo tiempo, esta placa debe ser impresa y se debe realizar la etapa de soldadura y ajuste fino del circuito.

Al lograr la comunicación y transferencia de datos con el interfaz y una vez finalizado el desarrollo de la placa PCB, se deben realizar las pruebas generales del sistema embebido.

X. BIBLIOGRAFÍA

Barbieri, G., Fantuzzi, C., & Borsari, R. (2014). A model-based design methodology for the development of mechatronic systems. *Mechatronics*, 24(7), 833–843. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.12.004>

Bosch. (2014). *BNO055. 9-axis absolute orientation sensor. November.*

Davies, T. C., Burns, C. M., & Pinder, S. D. (2007). Mobility interfaces for the visually impaired: What's missing? *ACM International Conference Proceeding Series*, 254, 41–47. <https://doi.org/10.1145/1278960.1278966>

Dupleich, J. L., García, M. R., & García, C. B. (2015). Avances: la tecnología y las personas ciegas. *XXXIV Encuentro Arquisur 2015 y XIX Congreso de Escuelas y Facultades Públicas de Arquitectura de Los Países de América Del Sur (La Plata, Argentina).*

Federacion Española de Sordoceguera. (2018). Guía de orientación y movilidad. In *FESOCE* (Vol. 1).

Fernando Berreti. (2014). *Calzado Háptico.*

Giraudeau, M., Miriam, K., Leiva, R., Abi, R., & Daou, Z. (2021). Virtual Representation of the movement of a long cane for visually impaired people , a proposal for remote rehabilitation . *In Press, SEH 2021: 3rd ICSE Workshop on Software Engineering for Healthcare.*

Gómez Ulla de Irazábal, F., & Ondategui Parra, S. (2012). Informe sobre la ceguera en España. *Ernest & Young*, 0814(RetinaPlus+), 7. http://www.seeof.es/archivos/articulos/adjunto_20_1.pdf

Goñi, O. E. (2020). Introducción a los sistemas embebidos, Microcontroladores y

Microprocesadores. In *Agosto*. <https://www.incibe-cert.es/blog/introduccion-los-sistemas-embebidos>

Guerrero Aguirre, Á., Jimena, P., & Giraldo, R. (2014). Sistema embebido de bajo costo para visión artificial Low cost embedded system for machine vision. *Scientia et Technica Año XIX*, 19(2).

Jin, L., Zhang, H., Shen, Y., & Ye, C. (2020). Human-Robot Interaction for Assisted Object Grasping by a Wearable Robotic Object Manipulation Aid for the Blind. *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Human-Machine Systems, ICHMS 2020*, 15–20. <https://doi.org/10.1109/ICHMS49158.2020.9209377>

Kharsansky, A. (2013). *Diseño e implementación de un sistema embebido de control de actitud para aeronaves no tripuladas*. 113.

Lifelong Learning Platform. (2011). Ingeniería de los sistemas embebidos. *Industrial Systems Engineering*, 1–19.

López, D. A., & Garzón Romero, H. A. (2013). Diseño e implementación de IPv6 en un sistema embebido. *Revista Tecnura*, 17(37), 167. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.3.a14>

Mart, P. (2019). *Metodología de Codiseño de desarrollo de Sistemas*.

Personal, R., Multi-touch, M. K., Coremark, E., Data, R. A. M., Memory, R. T. C., & Softdevice, R. A. M. N. (n.d.). *nRF52 832 Product Specification v1. 3*.

Por, V., En, C., & Sistema, U. N. (2017). Sistema De Extracción Automática De Parámetros Morfológicos De La Huella Plantar Mediante Técnicas De Visión Por Computador En Un Sistema Embebido. *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (Rcta)*, 1(23), 80–86. <https://doi.org/10.24054/16927257.v23.n23.2014.2336>

Q&A, T. (n.d.). *What is embedded systems software?* <https://www.hcltech.com/technology-qa/what-is-embedded-systems-software#:~:text=Embedded systems software can be,various hardware devices and systems.&text=Embedded systems software can be compared to the operating systems in computers.>

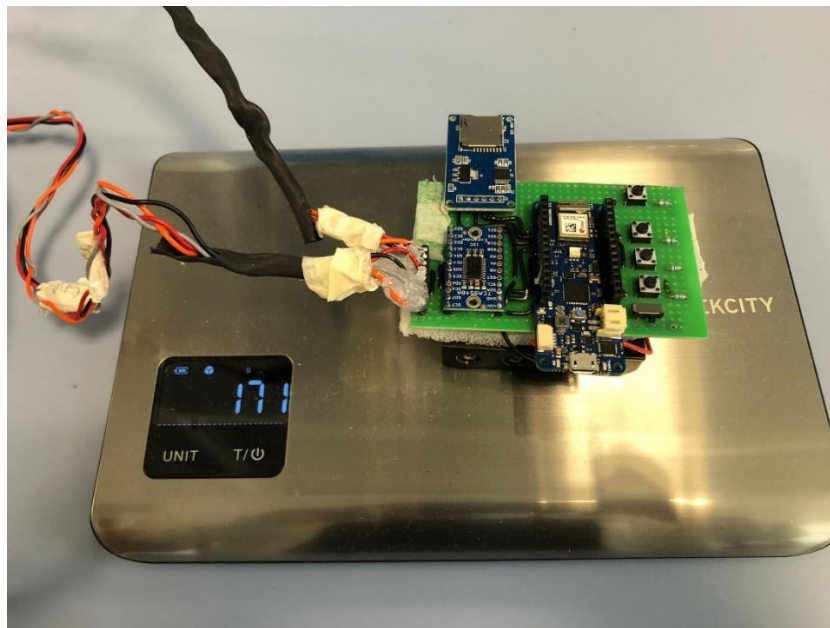
- Real, S., & Araujo, A. (2019). Navigation systems for the blind and visually impaired: Past work, challenges, and open problems. *Sensors (Switzerland)*, 19(15). <https://doi.org/10.3390/s19153404>
- Rehabilitation, V., Individuals, E., & Vision, L. (2004). Technology Assessment Vision Rehabilitation for Elderly Individuals with Low Vision or Blindness. *October*.
- Reyes, K. M., Jaen, M., Codina, B., & Olmedo, J. J. . S. (2021). The role of Inertial Measurement Unit sensors in assistive technologies for visually impaired people: A review. *In Press, IEEE Reviews in Biomedical Engineering*.
- Reyes, K. M., Lara, S. S., & Olmedo, J. J. S. (2020). Development of a motion measurement system of a white cane for Visually Impaired People rehabilitation . *XXXVIII Congreso Anual de La Sociedad Española de Ingeniería Biomédica. 25 – 27 Nov, 2020*.
- Salud, E. N. De, & Nacional, C.-I. (2020). *Motivación y objetivos de la ENDIS. 2016*.
- Scasso, M., Garro, R., & Ordínez, L. (2012). *Diseño e Implementación de un Sistema Embebido de Control Moderno: una Experiencia Práctica. August 2012*, 170–175.
- Schloerb, D. W., Lahav, O., Desloge, J. G., & Srinivasan, M. A. (2010). BlindAid: Virtual environment system for self-reliant trip planning and orientation and mobility training. *2010 IEEE Haptics Symposium, HAPTICS 2010*, 363–370. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2010.5444631>
- Sector, N. (2008). *¿ Qué es Altium Designer? 806540*.
- Sistemas, A. De, & Miñarro, B. Ú. (2009). *Apuntes de: Sistemas embebidos (2009)*. 1–30.
- Vázquez, M. (2019). *Introducción a los sistemas embebidos*. 1–27.
- World Health Organisation. (2019). World report on vision. In *World health Organization* (Vol. 214, Issue 14).
- Zhang, H., & Ye, C. (2020). A Visual Positioning System for Indoor Blind Navigation. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 9079–9085. <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196782>
- Zhong, Z., & Lee, J. (2020). Virtual Guide Dog: Next-generation pedestrian signal for the

visually impaired. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(3), 1–9.
<https://doi.org/10.1177/1687814019883096>

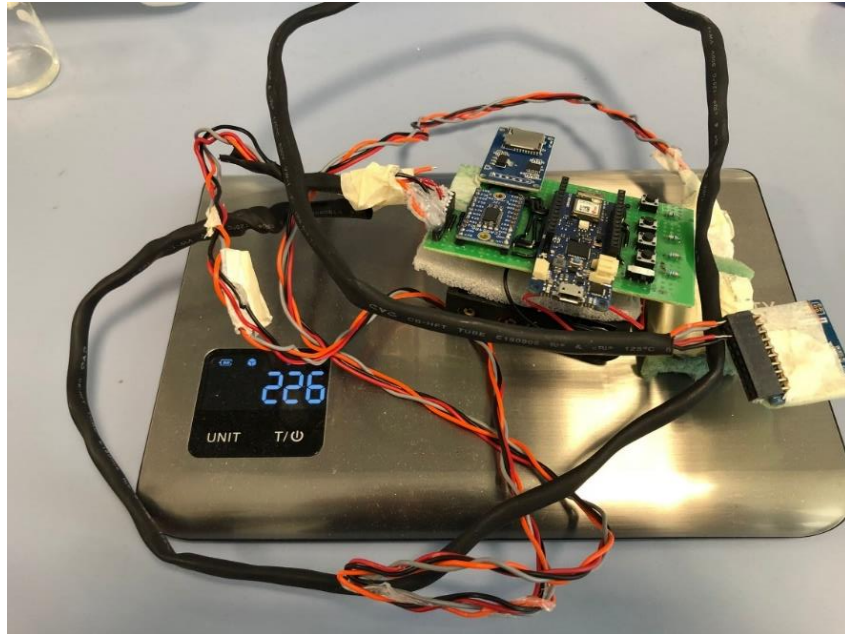
XI. ANEXOS

11.1 ANEXO 1: IMAGENES DEL PROTOTIPO PREVIO

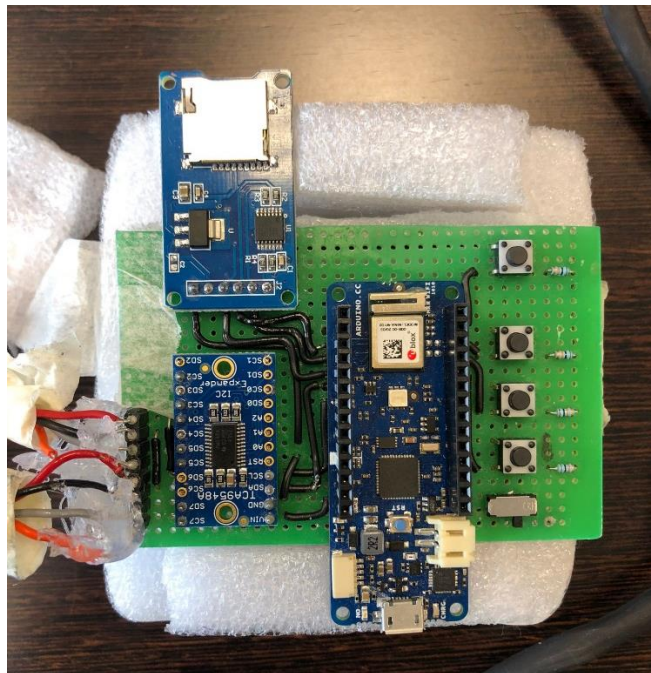
11.1.1 PESO DEL PROTOTIPO PREVIO(GRAMOS): PROCESADOR, MULTIPLEXER, ADAPTADOR MICRO SD, INTERRUPTOR, BOTONES Y ADAPTADOR CON BATERIAS 1.5V(4).



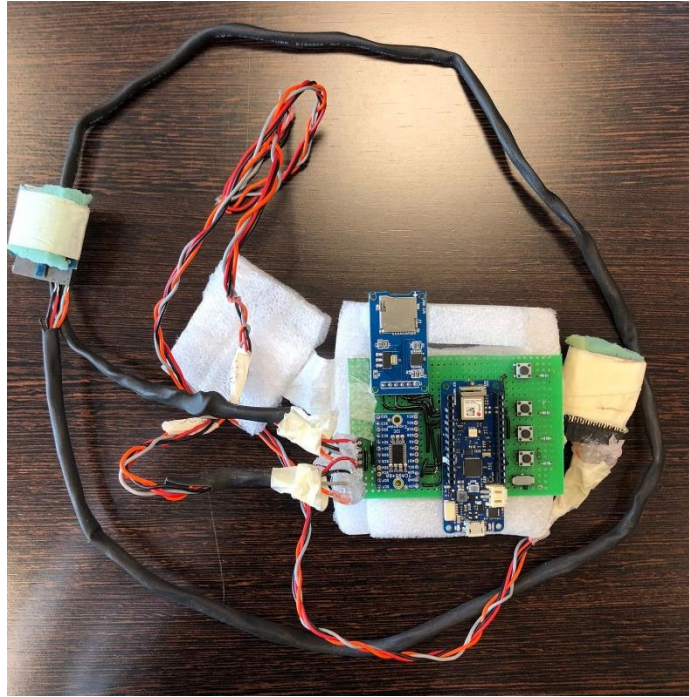
11.1.2 PESO PROTOTIPO PREVIO(GRAMOS): PROCESADOR Y SENSOR



11.1.3 IMAGEN DEL PROTOTIPO PREVIO: PROCESADOR

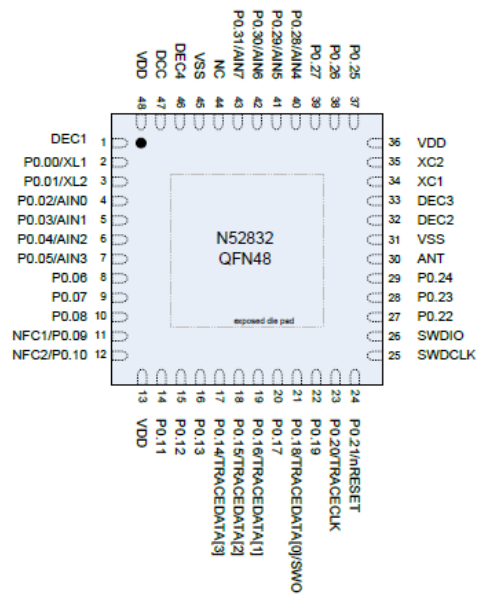


11.1.4 IMAGEN DEL PROTOTIPO: PROCESADOR Y SENSOR



11.2 ANEXO 2: MICROCONTROLADOR NRF52832

11.2.1 PIN OUT MICROCONTROLADOR NRF52832



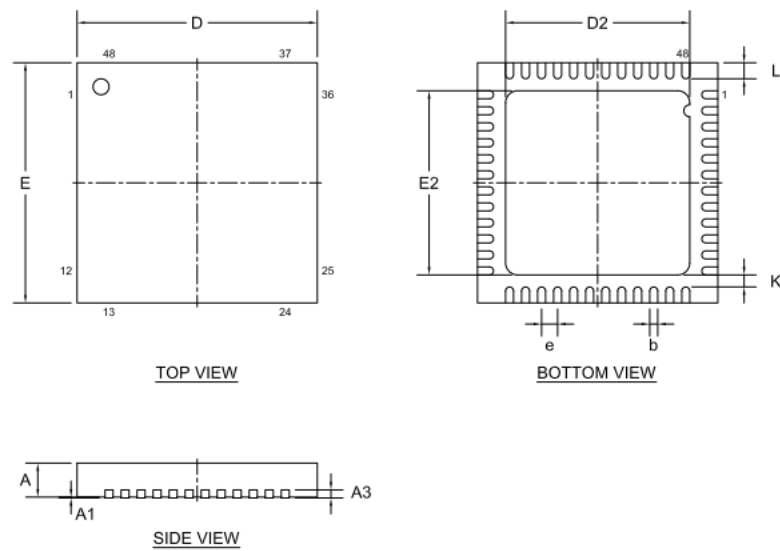
11.2.2 LISTADO DE PINES DEL MICROCONTROLADOR NRF52832

Pin	Name	Type	Description
Left Side of chip			
1	DEC1	Power	0.9 V regulator digital supply decoupling
2	P0.00	Digital I/O	General purpose I/O
3	XL1	Analog input	Connection for 32.768 kHz crystal (LFXO)
	P0.01	Digital I/O	General purpose I/O
4	XL2	Analog input	Connection for 32.768 kHz crystal (LFXO)
	P0.02	Digital I/O	General purpose I/O
5	AIN0	Analog input	SAADC/COMP/LPCOMP input
	P0.03	Digital I/O	General purpose I/O
6	AIN1	Analog input	SAADC/COMP/LPCOMP input
	P0.04	Digital I/O	General purpose I/O
7	AIN2	Analog input	SAADC/COMP/LPCOMP input
	P0.05	Digital I/O	General purpose I/O
8	AIN3	Analog input	SAADC/COMP/LPCOMP input
	P0.06	Digital I/O	General purpose I/O
9	P0.07	Digital I/O	General purpose I/O

Pin	Name	Type	Description
10	P0.08	Digital I/O	General purpose I/O
11	NFC1	NFC input	NFC antenna connection
	P0.09	Digital I/O	General purpose I/O ¹
12	NFC2	NFC input	NFC antenna connection
	P0.10	Digital I/O	General purpose I/O ¹
Bottom side of chip			
13	VDD	Power	Power supply
14	P0.11	Digital I/O	General purpose I/O
15	P0.12	Digital I/O	General purpose I/O
16	P0.13	Digital I/O	General purpose I/O
17	P0.14	Digital I/O	General purpose I/O
	TRACEDATA[3]		Trace port output
18	P0.15	Digital I/O	General purpose I/O
	TRACEDATA[2]		Trace port output
19	P0.16	Digital I/O	General purpose I/O
	TRACEDATA[1]		Trace port output
20	P0.17	Digital I/O	General purpose I/O
21	P0.18	Digital I/O	General purpose I/O
	TRACEDATA[0] / SWO		Single wire output
			Trace port output
22	P0.19	Digital I/O	General purpose I/O
23	P0.20	Digital I/O	General purpose I/O
	TRACECLK		Trace port clock output
24	P0.21	Digital I/O	General purpose I/O
	nRESET		Configurable as pin reset
Right Side of chip			
25	SWDCLK	Digital input	Serial wire debug clock input for debug and programming
26	SWDIO	Digital I/O	Serial wire debug I/O for debug and programming
27	P0.22	Digital I/O	General purpose I/O ²
28	P0.23	Digital I/O	General purpose I/O ²
29	P0.24	Digital I/O	General purpose I/O ²
30	ANT	RF	Single-ended radio antenna connection
31	VSS	Power	Ground (Radio supply)
32	DEC2	Power	1.3 V regulator supply decoupling (Radio supply)
33	DEC3	Power	Power supply decoupling
34	XC1	Analog input	Connection for 32 MHz crystal
35	XC2	Analog input	Connection for 32 MHz crystal
36	VDD	Power	Power supply
Top side of chip			
37	P0.25	Digital I/O	General purpose I/O ²
38	P0.26	Digital I/O	General purpose I/O ²
39	P0.27	Digital I/O	General purpose I/O ²
40	P0.28	Digital I/O	General purpose I/O ²
	AIN4	Analog input	SAADC/COMP/LPCOMP input
41	P0.29	Digital I/O	General purpose I/O ²
	AIN5	Analog input	SAADC/COMP/LPCOMP input
42	P0.30	Digital I/O	General purpose I/O ²
	AIN6	Analog input	SAADC/COMP/LPCOMP input
43	P0.31	Digital I/O	General purpose I/O pin ²
	AIN7	Analog input	SAADC/COMP/LPCOMP input

Pin	Name	Type	Description
44	NC		No connect Leave unconnected
45	VSS	Power	Ground
46	DEC4	Power	1.3 V regulator supply decoupling Input from DC/DC regulator Output from 1.3 V LDO
47	DCC	Power	DC/DC regulator output
48	VDD	Power	Power supply
Bottom of chip			
Die pad	VSS	Power	Ground pad Exposed die pad must be connected to ground (VSS) for proper device operation.

11.2.3 DIMENSIONES DEL NRF52832



11.3.2 ASIGNACION DE PINES DEL SENSOR BNO055

Pin #	Name	I/O Type	Description	Function		
				I2C	UART	HID-I2C
1	PIN1	--	Do not connect	DNC		
2	GND	Ground	GND	GND		
3	VDD	Supply	VDD	VDD		
4	nBOOT_LOAD_PIN	Digital I/O	Bootloader mode select pin (active low)	nBOOT_LOAD_PIN		
5	PS1	Digital in	Protocol select pin 1	GNDIO	VDDIO	GNDIO
6	PS0	Digital in	Protocol select pin 2	GNDIO	GNDIO	VDDIO
7	PIN7	--	Do not connect	DNC		
8	PIN8	--	Do not connect	DNC		
9	CAP	--	External capacitor	CAP		
10	PIN10	Ground	connect to GNDIO	GNDIO		
11	nRESET	--	Reset pin (active low)	nRESET		
12	PIN12	--	Do not connect	DNC		
13	PIN13	--	Do not connect	DNC		
14	INT	Digital Out	Interrupt output	Interrupt		
15	PIN15	Ground	Connect to GNDIO	GNDIO		
16	PIN16	Ground	Connect to GNDIO	GNDIO		
17	COM3	Digital I/O	Digital interface pin 3	I2C address select	GNDIO	GNDIO
18	COM2	Digital I/O	Digital interface pin 2	GNDIO		
19	COM1	Digital I/O	Digital interface pin 1	SCL	Rx	SCL
20	COM0	Digital I/O	Digital interface pin 0	SDA	Tx	SDA
21	PIN21	--	Do not connect	DNC		
22	PIN22	--	Do not connect	DNC		
23	PIN23	--	Do not connect	DNC		
24	PIN24	--	Do not connect	DNC		
25	GNDIO	Ground	GNDIO	GNDIO		
26	XOUT32	Digital Out	Optional OSC port	OSC Output		
27	XIN32	Digital In	Optional OSC port	OSC Input		
28	VDDIO	Supply	VDDIO	VDDIO		