



UNIVERSIDAD SERGIO ARBOLEDA

E S C U E L A
D E C I E N C I A S
E X A C T A S
E I N G E N I E R Í A

INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA
UNIVERSIDAD SERGIO ARBOLEDA

Documento Trabajo de grado - InLo

Desarrollo de un prototipo hardware para la adquisición de señales inalámbricas basadas en tecnologías Wi-Fi y BLE aplicado a localización de objetos en ambientes interiores mediante técnicas de posicionamiento inalámbricas

Jonathan Alexander Diaz Naranjo

31 de agosto de 2018

ECEI
Calle 74 # 14 - 14
Torre B - Piso 2º
11021 Bogotá D.C.
Colombia
Tel. +57 (1) 3 25 75 00
<http://www.usergioarboleda.edu.co/>

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por sus bendiciones y sus constantes enseñanzas, por darme la oportunidad de estar en el lugar en donde estoy y de tener la familia que tengo. A mis padres Jorge y Oliva, por su apoyo incondicional, por hacer de mí una persona con valores y por darme lo más valioso que se le puede dar a un hijo, la oportunidad del estudio.

A mi hermano menor y mi futuro colega, Jorgito, de quien he aprendido mucho y por el que me esfuerzo para que vea en mi un ejemplo de vida a seguir. A mi hermana, Johana, quien ha sido mi amiga, mi guía y mi consejera, a quien quiero mucho junto con mi sobrino. Le agradezco en especial a mi amorcito, Yuly, la persona que está siempre conmigo para alegrarme la vida, confidente de mis tropiezos, mis caídas y mis triunfos, con quien cursé una carrera y con quien cursaría esta vida y la otra.

Agradezco de igual manera, a los profesores que toman muy personal la tarea enseñar y divulgar sus conocimientos y sus experiencias de vida, ya que con esto nos enseñan a ser personas útiles en la sociedad, los ingenieros Freddy Diaz, Sergio Sánchez, Andre Laverde e Ignacio Acero.

A mis directores de tesis, Henry Carrillo y Marco Terán, quienes con su experiencia, conocimientos y amor por lo que hacen, me brindaron las herramientas que necesité para culminar de la mejor manera este proyecto.

Y, finalmente a la Universidad Sergio Arboleda, la cual me ayudó a crear el primer escalón (el que sostendrá a los siguientes) que necesitaba para cumplir un gran sueño personal, el ingreso al interesante campo de la investigación aeroespacial.

Resumen

Desde la antigüedad le surgió al hombre la necesidad de saber la ubicación precisa tanto de personas como de objetos en diferentes escenarios. Los ejemplos hoy en día no son difíciles de encontrar, basta con observar las soluciones que se dan a tareas de vigilancia, seguimiento del transporte de cargas, la ubicación de un objetivo al que nos queremos dirigir, el planeamiento de la ruta que debemos seguir para llegar a nuestro trabajo o un simple dispositivo que nos permita encontrar el control remoto del televisor, ese que tanto se pierde.

Con el transcurrir del tiempo, se desarrolló el sistema global de navegación por satélite (GNSS), el cual en principio nos satisfacía en gran medida a tal punto que cualquier persona con el uso de un celular podía saber la ubicación de él y la de diferentes objetos presentes en su entorno con gran precisión. El verdadero problema surge cuando queremos saber la ubicación de un objeto que se encuentra dentro de una casa, un edificio, un centro comercial, un aeropuerto o un túnel, ya que el GNSS está planeado para funcionar con línea de vista (nada en medio) desde el dispositivo celular hasta el satélite ubicado a una altura aproximada de 36.000 km.

La necesidad de localizar objetos en ambientes interiores está presente en diferentes escenarios, como por ejemplo en centros comerciales, cuando se desea ofrecer a proveedores de productos el pasillo más transitado por personas, en bodegas, cuando se desea saber la posición exacta de cierto objeto o en hospitales, cuando se desea ubicar las camillas en un piso determinado.

Es importante resaltar que las tecnologías que pueden ser utilizadas para la micro-localización, en principio no se desarrollaron con este objetivo, pero según los experimentos, se pueden obtener resultados bastante favorables. Dichas tecnologías son Wi-Fi, Bluetooth, RFID, ZigBee, NFC, entre otras.

En este trabajo de grado se presenta el desarrollo de un prototipo hardware que permite la adquisición de señales inalámbricas basadas en tecnologías BLE y Wi-Fi, para ser utilizado en la micro localización. Abarcando temas desde el diseño, la implementación, hasta las pruebas que se le realizaron al dispositivo denominado InLo y finalmente la comparación con un teléfono celular en la adquisición de dichas señales.

Palabras clave: Hardware, Micro-localización, BLE, Wi-Fi, RSSI, IMU, Beacons.

Índice general

Portada	1
Índice general	3
1. Introducción	9
1.1. Planteamiento y formulación del problema	9
1.2. Objetivos	10
1.2.1. Objetivo general	10
1.2.2. Objetivos específicos	10
1.3. Metodología	11
2. Marco contextual	12
2.1. Técnicas de posicionamiento mediante tecnología GNSS	12
2.1.1. GPS	12
2.1.2. GLONASS	13
2.1.3. GALILEO	13
2.2. Tecnologías inalámbricas para posicionamiento en interiores	13
2.2.1. RFID	13
2.2.2. Zigbee	13
2.2.3. Wi-Fi	13
2.2.4. BLE	14
2.2.5. NFC	15
2.2.6. Elección de tecnología(s) inalámbrica(s)	15
2.2.7. Coexistencia entre Wi-Fi y BLE	18
2.3. Breve estado del arte de técnicas de posicionamiento	18
2.3.1. Triangulación	19
2.3.2. Proximidad	20
2.3.3. Análisis de escenario	20
2.3.4. Indicador de intensidad de señal recibida (RSSI)	20
2.4. Hardware dedicado a la micro localización	23
2.4.1. Balizas BLE y WI-FI	23
2.4.2. Productos similares	23
2.5. Aplicaciones dadas a los productos de micro localización	25
2.6. ¿En dónde fabricar tarjetas de circuito impreso?	26
3. Marco teórico	27
3.1. Internet de las cosas IoT	27
3.1.1. Ciudades inteligentes	27
3.1.2. Frecuencias de operación para dispositivos IoT	27

3.2.	Sistemas embebidos	28
3.3.	Protocolos de comunicación serial en sistemas embebidos	28
3.3.1.	UART	28
3.3.2.	SPI	29
3.3.3.	I2C	31
3.4.	Estándares de circuitos impresos	34
3.4.1.	Normas IPC	34
4.	Diseño del prototipo	36
4.1.	Requerimientos	36
4.1.1.	Requerimientos no funcionales del hardware	36
4.1.2.	Requerimientos funcionales del hardware	37
4.2.	Diseño del hardware	37
4.2.1.	Diagrama de bloques	37
4.2.2.	Escogencia de las referencias de los componentes	41
4.2.3.	Cálculo de ancho de pistas y diámetro de vías	45
4.2.4.	Estimado del consumo energético	46
4.2.5.	Diseño de esquemáticos	47
4.2.6.	Resultados del diseño	55
4.2.7.	Almacenamiento de datos	59
4.2.8.	Ensamble	59
5.	Pruebas y experimentos realizados al prototipo	61
5.1.	Pruebas del prototipo	61
5.1.1.	Pruebas antes del ensamble	61
5.1.2.	Pruebas después del ensamble	61
5.1.3.	Pruebas de aplicación	61
5.2.	Implementación del software para pruebas	62
5.3.	Experimentos y análisis	63
5.3.1.	Experimentos para Wi-Fi	63
5.3.2.	Experimentos para BLE	67
5.3.3.	Experimentos para IMU	70
6.	Conclusiones	72
7.	Trabajos futuros	73
8.	Anexos	74

Lista de Figuras

1.	Frecuencias y canales Wi-Fi. Tomado de: [14].	14
2.	Frecuencias y canales BLE. Tomado de: [19].	14
3.	Coexistencia entre BLE y Wi-Fi. Tomado de: [46].	18
4.	Clasificación de las técnicas de posicionamiento en interiores.	19
5.	Escenario ideal para realizar triangulación. Tomado y modificado de: [48]	20
6.	Potencia entre dos antenas. Tomado de: [2].	21
7.	Beacon de Estimote. Tomado de: [41].	23
8.	Vista superior e inferior de la tarjeta sensiBLE. Tomado de: [47].	24
9.	Vista superior de la tarjeta sensiBLE V2.0. Tomado de: [47].	25
10.	Características de ciudades inteligentes. Tomado de: [10].	27
11.	Arquitectura de comunicación UART.	28
12.	Arquitectura bus SPI con un esclavo.	29
13.	Arquitectura bus SPI con varios esclavos.	30
14.	Diagrama de tiempo básico para el protocolo SPI. Tomado de: [34].	30
15.	Arquitectura bus I2C.	32
16.	Estructura de la trama de escritura para el protocolo I2C.	32
17.	Estructura de la trama de lectura para el protocolo I2C.	33
18.	Diagrama de tiempo básico para el protocolo I2C. Tomado de: [1].	33
19.	Tipo de huella según la aplicación. Tomado de: [6].	35
20.	Diagrama de bloques Nivel 0.	38
21.	Diagrama de bloques Nivel 1 con Protocolos de comunicación.	38
22.	Diagrama de bloques Nivel 2, Alimentación.	39
23.	Diagrama de bloques Nivel 2, Comunicación inalámbrica.	39
24.	Diagrama de bloques Nivel 2, Microcontrolador.	40
25.	Esquema multihoja en Kicad.	48
26.	Esquemático de alimentación.	49
27.	Esquemático del conector USB.	49
28.	Condensadores de desacople del MCU.	50
29.	Conecotor para el programador.	50
30.	Esquemático del oscilador.	50
31.	Conecotor de GPIO.	51
32.	Conexiones del sensor IMU y de la memoria flash.	51
33.	Esquemático del sensor IMU.	51
34.	Esquemático de la memoria flash.	52
35.	Conexiones de pulsadores.	52

36.	Esquemático de los pulsadores.	52
37.	Conexiones del Display.	53
38.	Conektor del display.	53
39.	Conexión de los módulos inalámbricos.	54
40.	Esquemático del módulo BLE.	54
41.	Esquemático del módulo Wi-Fi.	55
42.	Recomendaciones para ubicación del módulo Wi-Fi.	56
43.	Recomendaciones para ubicación del módulo BLE.	56
44.	Diseño de PCB en Kicad.	57
45.	Diseño de PCB con zonas de cobre GND.	57
46.	Renderización 3D en Kicad del PCB ensamblado, parte superior.	58
47.	Renderización 3D en Kicad del PCB ensamblado, parte posterior.	58
48.	Características de InLo.	60
49.	Máquina de estados para la realización de las pruebas.	62
50.	Estado inicial en InLo.	63
51.	Lectura datos Wi-Fi.	64
52.	RSSI vs Distancia (Wi-Fi) - InLo.	64
53.	Distribución de frecuencia de Wi-Fi para 1m.	65
54.	Distribución de frecuencia de Wi-Fi para 2m.	65
55.	Distribución de frecuencia de Wi-Fi para 4m.	65
56.	Escaneo de redes Wi-Fi 2.	66
57.	Lectura datos BLE.	67
58.	RSSI vs Distancia (BLE).	68
59.	Distribución de frecuencia de BLE para 1m.	68
60.	Distribución de frecuencia de BLE para 2m.	69
61.	Distribución de frecuencia de BLE para 4m.	69
62.	Experimento con IMU a 0 grados.	70
63.	Experimento con IMU a 90 grados.	70
64.	Experimento con IMU a 180 grados.	71
65.	Cotización en Colcircuitos.	74
66.	Lista de materiales y costos.	75

Lista de Tablas

1.	Comparación entre tecnologías inalámbricas	17
2.	Comparación de las especificaciones de empresas de Colombia y del extranjero	26
3.	Requerimientos no funcionales del hardware	36
4.	Requerimientos funcionales del hardware	37
5.	Comparación entre microcontroladores.	41
6.	Comparación entre módulos BLE	42
7.	Comparación entre módulos Wi-Fi	43
8.	Comparación entre módulos IMU	43
9.	Comparación entre Displays	44
10.	Comparación entre reguladores de 3.3V de salida	44
11.	Comparación de baterías 1. Tomado de [13]	45
12.	Comparación de baterías 2. Tomado de [13]	45
13.	Aproximación del consumo energético de InLo.	46
14.	Descripción de la simbología en la máquina de estados	62
15.	Formato de respuesta del módulo Wi-Fi con el comando <i>SCAN</i>	66

1. Introducción

1.1. Planteamiento y formulación del problema

Hoy la localización es un problema al que ya se le ha venido dando solución. Pues, existen sistemas de posicionamiento en ambientes exteriores que utilizan tecnologías inalámbricas diseñadas especialmente para esta aplicación tales como el GPS, Galileo, GLONASS [30][9][28], en los cuales no importa la estructura física del entorno. Por otro lado, en ambientes interiores no se han desarrollado sistemas en los que no importe la estructura física del entorno y las tecnologías desarrolladas para este tipo de escenarios aún no han tenido gran impacto en el mercado [38]. Surge así una nueva necesidad de sistemas de posicionamiento, mediante el uso de tecnologías que se desarrollaron con un objetivo diferente al de localizar que ya están implementadas en lugares y dispositivos, tales como las redes móviles, el Wi-Fi, Bluetooth, entre otras, que, en cuanto a localización se refiere, aportan información relevante.

GPS, Galileo y GLONASS son sistemas de posicionamiento global mediante satélites caracterizados por la alta confiabilidad y precisión que ofrecen al utilizarse en ambientes exteriores, pero no son muy eficientes a la hora de utilizarse en ambientes interiores debido a los fenómenos (reflexión, refracción, difracción, y absorción, entre otros) a los que están expuestas las ondas de radiofrecuencia en estos escenarios y la imposibilidad de éstas de penetrar edificios y en general construcciones [22]. Es importante resaltar que estos sistemas fueron inicialmente planeados para funcionar con línea de vista (nada en medio) desde el dispositivo que se utiliza para localizar, hasta los satélites que realizan la triangulación, es por esto por lo que, al encontrarse el dispositivo dentro de una edificación crea un “obstáculo” el cual anula el correcto funcionamiento del sistema, debido al debilitamiento de la señal en el recorrido.

Actualmente, existen varias tecnologías inalámbricas que permiten realizar posicionamiento en interiores, entre las que se destacan RFID, NFC, Beacons BLE, Wi-Fi, GSM y ZigBee. Cada una con sus determinadas características y costos. Se optó por la implementación de dos de estas (Wi-Fi y BLE) debido a aspectos como frecuencia que utilizan, el alcance, ancho de banda, costo de implementación, consumo energético y velocidad de comunicación, como se puede observar en la Tabla 1.

Teniendo en cuenta el planteamiento de la anterior necesidad, surge una pregunta, a la cual se busca dar respuesta en el transcurso de este trabajo:

¿Cómo desarrollar un prototipo hardware que adquiera información de interés de un sensor inercial y de beacons Wi-Fi y BLE, para el computo de métricas utilizadas por las técnicas de posicionamiento en localización de objetos en ambientes interiores?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Desarrollar un prototipo hardware que permita la adquisición de información de interés de un sensor inercial y de beacons Wi-Fi y BLE, para el computo de métricas utilizadas por las técnicas de posicionamiento en localización de objetos en ambientes interiores.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar el conjunto de métricas necesarias por las técnicas de posicionamiento inalámbricas.
- Establecer una arquitectura específica para el hardware implementando el diseño orientado a las pruebas (DFT, ing. Design For Testing).
- Seleccionar los componentes y materiales que conformarán la tarjeta.
- Fabricar el prototipo hardware basado en el diseño realizado.
- Establecer e implementar un protocolo de pruebas de funcionamiento para cada uno de los módulos del sistema.

1.3. Metodología

La metodología propuesta para este trabajo consta de 8 fases, las cuales se detallan a continuación:

Fase 1. Revisión inicial: en esta fase inicial se realizan actividades correspondientes a la identificación de los requerimientos de alto nivel relacionados con el hardware, se definirá el diagrama de bloques del sistema, se determinará la funcionalidad de cada bloque y, finalmente, se hará la lista comparativa de componentes para la elección de los que se utilizarán.

Fase 2. Definición de requerimientos de ingeniería: en esta fase se hará el levantamiento de los requerimientos eléctricos y mecánicos de cada uno de los bloques (definidos en la fase anterior) sus correspondientes entradas y salidas. De igual manera, se especificarán los requerimientos del sistema de alimentación.

Fase 3. Desarrollo: esta fase inicia con la selección de la empresa en la cual se realizará la fabricación y el ensamblaje, este es un punto clave para el desarrollo del trabajo, ya que dependiendo de la empresa que se escoga, se van a tener varias restricciones de fabricación (ver cuadros 3 y 4). También, se realizará una recopilación de la hoja de datos de cada componente seleccionado con el fin de verificar sus especificaciones de manera detallada. Se diseñarán los diagramas de esquemático y huellas, el diagrama de layout, para identificar en qué lugar se va a ubicar cada componente dentro de la PCB, colocación de puntos de prueba y ruteo.

Fase 4. Simulaciones: en esta fase definirá si es necesario realizar simulaciones de tipo térmico y de EMC, en caso de ser necesario, se elegirá el correspondiente software y posteriormente, se concluirán las simulaciones realizando las correcciones.

Fase 5. Definición del protocolo de pruebas: esta fase es una de las más importantes, ya que nos permitirá definir el tipo de pruebas que se le hará al PCB antes y después del ensamblaje, las pruebas funcionales y de aplicación por cada módulo.

Fase 6. Revisión final: En esta fase final, se mandará a fabricar y ensamblar el PCB en la empresa seleccionada anteriormente, y luego de tener el producto, se procederá a aplicarle las pruebas definidas en la fase anterior, es importante resaltar que durante el tiempo que dure la fase anterior, se puede ir adelantando esta fase con el desarrollo del software de prueba de aplicación.

Fase 7. Diseño y fabricación de la caja de protección: esta fase estará enfocada en la identificación del software para realizar el diseño de la caja de protección y así mismo, elegir cómo se fabricará, los materiales que se utilizarán y el ensamblaje de esta.

Fase 8. Documentación: en esta fase principalmente se avanzará con la documentación del proceso de diseño de los resultados de las simulaciones realizadas, de las pruebas de fabricación y ensamblaje y, finalmente, se concluirá el trabajo realizado.

2. Marco contextual

2.1. Técnicas de posicionamiento mediante tecnología GNSS

Para conocer la posición de una persona o un objeto es necesario recurrir a puntos de referencia y realizando una serie de cálculos, se puede obtener dichas coordenadas. En la antigüedad, los navíos, con la ayuda del astrolabio recurrieran a las estrellas, aunque no era un medio muy preciso, era útil. Con el transcurrir del tiempo, ingenieros y científicos se han dado a la tarea de idear sistemas de navegación complejos que permitan ubicar objetivos con la mayor precisión posible. Es así como luego de la carrera espacial entre Estados Unidos y Rusia, que se desarrolla el primer satélite en el año 1957, el Sputnik 1, que tenía el objetivo de enviar un ¡bip, bip! a la Tierra. Años más tarde, el ser humano decidió utilizar estos artefactos como puntos de referencia para obtener en teoría la ubicación de cualquier persona u objeto que estuviera en el planeta con un dispositivo capaz de recibir señales desde los satélites, a este sistema se le denominó Sistema Global de Navegación por Satélite, también conocido por sus siglas como el GNSS.

El GNSS hace referencia a una constelación de satélites que proporciona señales desde el espacio, transmitiendo datos de posicionamiento y temporización a sus receptores. Luego de desarrollado el primer sistema de navegación por satélite, el GPS, por parte de EE. UU, todos los países comenzaron a usarlo. Tiempo después, se dieron cuenta que en cualquier momento si EE. UU tuviera el capricho de cortar el servicio de este sistema para lugares ubicados fuera de sus fronteras, pues lo hacían y ya. Esta dependencia llevó a cabo el desarrollo de propios sistemas de navegación por parte de las potencias en tecnología y fue como nacieron sistemas como el Galileo de Europa, el GLONASS de Rusia, BeiDou de China y el indio IRNSS, entre otros [21]. Para evaluar el rendimiento de un sistema de navegación satelital se evalúan cuatro criterios:

- Precisión: la diferencia entre la posición, velocidad o el tiempo medidos y el real de un receptor.
- Integridad: capacidad del sistema para proporcionar un umbral de confianza o en caso de anomalía en los datos, una alarma.
- Continuidad: capacidad del sistema de funcionar sin interrupción.
- Disponibilidad: porcentaje de tiempo en que una señal cumple los criterios de precisión, integridad y continuidad anteriormente mencionados.

2.1.1. GPS

Es un servicio de propiedad de Estados Unidos, que brinda información acerca de posicionamiento, navegación y cronometría. Está conformado por tres segmentos. El segmento espacial, que se compone por una constelación de 24 satélites operativos que proporcionan la posición y la hora de cada satélite del GPS. El segmento de control, que está formado por estaciones de seguimiento y control, distribuidas por todo el mundo con el objetivo de mantener los satélites operando en todo momento en la órbita apropiada y con sus respectivos relojes atómicos ultra precisos, ajustados. Finalmente, el segmento de usuario que consiste en el equipo receptor del GPS, el cual se encarga de procesar y calcular la posición tridimensional y la hora precisa [30].

2.1.2. GLONASS

Es un sistema global de navegación por satélite, desarrollado por la Unión Soviética, hoy conocida como Rusia. Consta de una constelación de 27 satélites, de los cuales 23 están operando, 2 están en mantenimiento, uno en servicio y el otro en pruebas. Esta constelación de satélites, orbita con una altitud de 19.100 km y está a cargo del Ministerio de Defensa de la Federación Rusa. Su puesta en marcha inició en 1982 con el envío de tres satélites, y su puesta en funcionamiento fue hasta el año 1996 [28].

2.1.3. GALILEO

Es un programa europeo con radionavegación y posicionamiento por satélite, desarrollado por la Unión Europea, planteado para iniciar en el año 2020 y contará con treinta satélites en órbita, proporcionando información de posicionamiento con gran precisión y fiabilidad. Este proyecto surge con el fin de independizarse del GPS y el GLONASS, caracterizándose por ser desarrollado con un objetivo civil, en comparación con estos últimos dos mencionados, los cuales se iniciaron con objetivos militares [9].

2.2. Tecnologías inalámbricas para posicionamiento en interiores

2.2.1. RFID

La tecnología RFID (Identificación por radio frecuencia) se utiliza hoy para identificar, seguir y obtener la trazabilidad de todo tipo de productos, su aplicación se da en diferentes áreas, tales como la industria, logística, farmacéuticas y librerías, entre otros. Es difícil definir su año de origen, pues para algunas fuentes se dio en el año 1920 por parte del MIT, y otras afirman que apareció en los años 60 popularizándose tiempo después por su bajo costo. Además, se caracteriza por tener un alcance aproximado de 3-15 metros [15].

2.2.2. Zigbee

Es un tipo de tecnología inalámbrica que opera en las bandas libres ISM (Industrial, Scientific & Medical) ubicada en 2.4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EE. UU). Fue establecida en 2002 por una alianza entre varias empresas entre las que se encuentran Texas Instruments, Huawei y Silicon Labs, entre otros [52]. El objetivo de Zigbee es habilitar redes inalámbricas con capacidades de control y monitoreo que sean confiables, de bajo consumo de energía y de bajo costo. La disponibilidad de esta tecnología en dispositivos móviles es muy poca y se caracteriza por tener un alcance aproximado de 70-80 metros a una velocidad de transmisión de 250 Kbps [26].

2.2.3. Wi-Fi

Es una tecnología ampliamente usada a nivel mundial. Wi-Fi es una marca de la Alianza Wi-Fi, que adopta, prueba y certifica que los equipos cumplen con los estándares 802.11 relacionados con redes WLAN, el objetivo principal de esta marca es conectar a todo el mundo en todas partes, ya que esto trae mejoras en los aspectos de la vida cotidiana [51]. La disponibilidad de esta tecnología en lugares es muy alta y se caracteriza por tener un alcance aproximado de 20-30

metros. En teoría, el Wi-Fi tiene la capacidad de operar en 14 canales diferentes, con 20MHz o 22MHz de ancho, tal como se observa en la Figura 1. Es importante resaltar que, si el punto de acceso es el canal 1, la señal se extiende hasta el canal 3, es decir, por tanto, la señal se transmite a través de 3 canales (canales 1, 2 y 3). Por otro lado, si el punto de acceso es el canal 6, la señal se transmite a través de 4 canales (canales 4, 5, 6,7 y 8). Y finalmente, cuando se está en el canal 11, la señal va desde el canal 9 al 13.

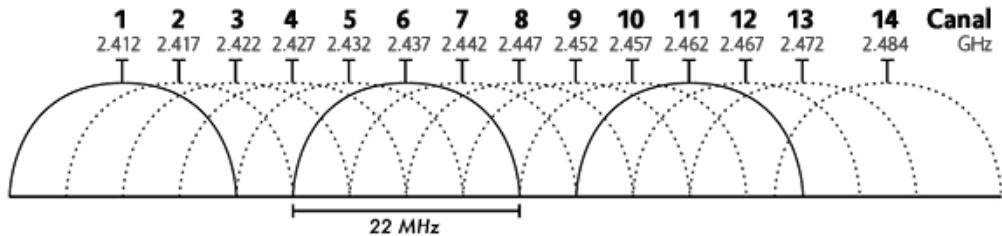


Figura 1. Frecuencias y canales Wi-Fi.

Tomado de: [14].

2.2.4. BLE

Es una de las tecnologías inalámbricas más recientes, siendo una derivación del Bluetooth, pero con el objetivo de trabajar con menor costo energético. Se denominaba Wibree antes del año 2007 y se le conoce a Nokia como su desarrollador [12]. La disponibilidad de esta tecnología en lugares es alta y se caracteriza por tener un alcance aproximado de 50 metros. La aplicación principal de esta tecnología es enviar mensajes por medio de una aplicación hacia los celulares de los visitantes de tiendas de ropa, accesorios o museos, enviando la descripción de la pieza al dispositivo. Aunque de igual manera, se le ha usado en los últimos años en el campo de la micro localización.

Como se observa en la Figura 57, el bluetooth está compuesto por 40 canales, cada uno con 2 MHz de ancho, 37 de estos se utilizan para el envío de datos y 3 para envío de paquetes publicitarios. Esta tecnología se caracteriza por tener una velocidad de envío de datos de 1 Mbit/s.

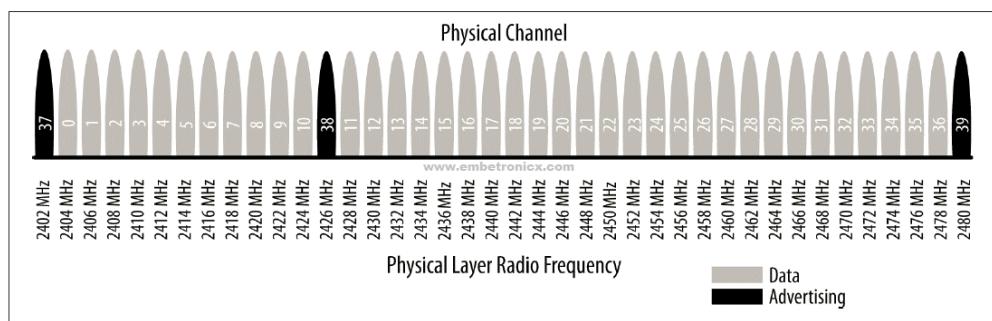


Figura 2. Frecuencias y canales BLE.

Tomado de: [19].

2.2.5. NFC

NFC es una tecnología que se caracteriza por funcionar en tres modos, el Tag Reader/Writer el cual conecta el mundo de las aplicaciones con el mundo físico, Peer to Peer (de igual a igual) el cual permite conectar dispositivos mediante la proximidad física y, por último, la emulación de tarjetas inteligentes. La disponibilidad de esta tecnología en lugares es media y se caracteriza por tener un alcance promedio aproximado de 10 cm [24]. El costo y la precisión de cada una de estas tecnologías es variable, pues depende directamente del cómo se implemente en los diferentes lugares. Aunque es importante aclarar que si se hace una buena inversión en routers o repetidores para Wi-Fi, beacons en el caso de BLE y demás antenas para cada caso, se pueden obtener excelentes resultados.

2.2.6. Elección de tecnología(s) inalámbrica(s)

Para seleccionar la(s) tecnología(s) inalámbrica(s) adecuada(s) que se implementaron, se hace necesario conocer en detalle algunas características y algunos de los parámetros más relevantes, los cuales se presentan en la Tabla 1.

Inicialmente se descarta el uso de las tecnologías NFC y RFID ya que apesar de su bajo costo de implementación, tienen limitaciones de alcance y en el caso de esta última, no tiene la suficiente capacidad de banda para prestar servicio de localización a gran escala.

La tecnología LoRa, es prometedora en cuanto a cobertura, alcanzando distancias de hasta 15 Km, pero esto se contrasta con su baja velocidad de comunicación, característica que es bastante importante en aplicaciones de micro localización.

En el caso de ZigBee, sucede lo mismo que en LoRa, las limitaciones de velocidad son suficientes para que otras tecnologías sobresalgan a estas.

La tecnología UWB, es quizá la más equilibrada en sus características, aunque no posee un gran alcance, el gran ancho de banda que la caracteriza la hace interesante para trabajar. A priori, se diría que es la mejor para la aplicación, el problema radica en que en UWB el tema de estandarización está atrasado y en el mercado es un poco complejo conseguirla [38].

Por otro lado, están las tecnologías WWAN, las cuales resaltan ante las demás por su largo alcance y por su infraestructura lograda a nivel mundial. Éstas, a pesar de su bajo costo en la adquisición de hardware, tienen un elevado costo cuando se desea enviar datos a un servidor. Por tanto, la primera opción más viable es la de Wi-Fi, tanto por permitir realizar localización a buena velocidad, como por tener la capacidad de conexión a la nube con routers de fácil adquisición.

En último lugar, una de las tecnologías que ha ido evolucionando con el tiempo, mejorando su bajo consumo y adaptándose a aplicaciones de localización en interiores, disponible en todos los dispositivos móviles es la de Bluetooth, la cual pasó a llamarse desde la versión 4.0 Bluetooth Low Energy o Smart Bluetooth.

En conclusión, el dispositivo desarrollado integrará las tecnologías Wi-Fi y BLE.

Cuadro 1. Comparación entre tecnologías inalámbricas

Característica	WPAN				WWAN			WLAN			
	BLE	UWB	ZigBee	NFC	2G (GSM)	3G (UMTS)	LoRa	RFID		Wi-Fi	
Frecuencia	2.4 GHz	Desde 3,1 GHz hasta 10,6 GHz	2,4 GHz (Global) 868 MHz (Europa) 915 MHz (EEUU)	13,56 MHz	0,85/1,9 GHz	1,7/2,1 GHz	433 MHz (Asia) 868 MHz (Europa) 915 MHz (América)	125 KHz - 134 KHz (LF)	13,553 MHz - 13,567 MHz (HF)	400 MHz - 1000 MHz (UHF)	2,4/5 GHz
Alcance	50 m	10 m	100 m	20 cm	5 Km	+5 Km	15 Km	45 cm	3 m	10 m	50 m
Ancho de banda	2 MHz	500 MHz	5 MHz	2 MHz	200 KHz	5 MHz	500 KHz	9 MHz	0,14 MHz	600 MHz	20 o 22 MHz
Costo de implementación	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo en el hardware pero Alto en el consumo de datos	Bajo en el hardware pero Alto en el consumo de datos	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Consumo energético	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Velocidad máxima de comunicación	1Mbps	500 Mbps	250 Kbps	848 Kbps	14,4 Kbps (downlink)	2 Mbps (downlink)	50 Kbps	1 Kbps	25 Kbps	50 Kbps	54 Mbps
Ventajas	Bajo consumo y bajo costo	Utiliza gran ancho de banda para envío de información	Bajo consumo y bajo costo	Bajo consumo y bajo costo	Existencia de infraestructura		Largo alcance, bajo consumo y bajo costo	Bajo consumo energético			Bajo costo y disponibilidad en casi todos los lugares

2.2.7. Coexistencia entre Wi-Fi y BLE

A pesar de que Wi-Fi y Bluetooth Low Energy son tecnologías que transmiten/reciben información inalámbrica en la misma frecuencia (2.4 GHz), se debe aclarar que hoy existen muchos métodos para la mitigación de la interferencia a través del aislamiento temporal, espacial y de frecuencia. Aunque efectivos, todos ellos reducen el desempeño de los dispositivos [33].

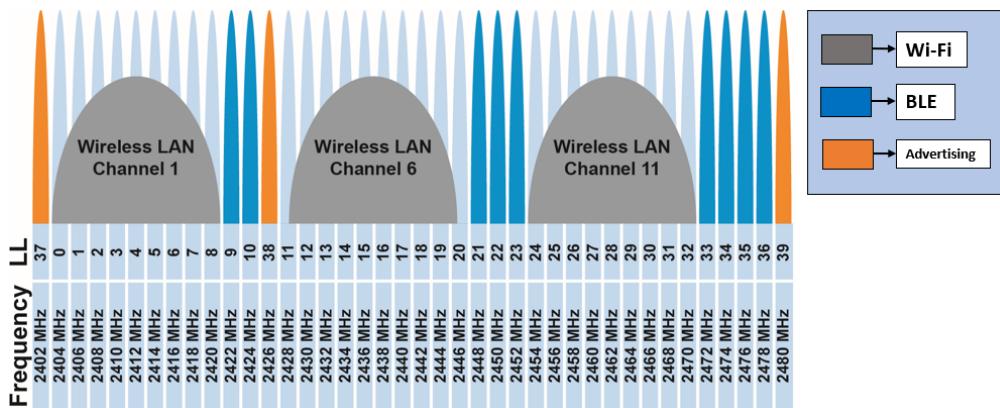


Figura 3. Coexistencia entre BLE y Wi-Fi.

Tomado de: [46].

2.3. Breve estado del arte de técnicas de posicionamiento

Las técnicas de posicionamiento en interiores comenzaron a estudiarse hace aproximadamente 20 años. En la actualidad, existen muchas técnicas para realizar posicionamiento utilizando tecnologías como RFID, ZigBee, Wi-Fi, BLE, entre otras, tanto para interiores, como para ambientes exteriores. Tres técnicas de las más utilizadas se pueden apreciar en la Figura 4 [49]:

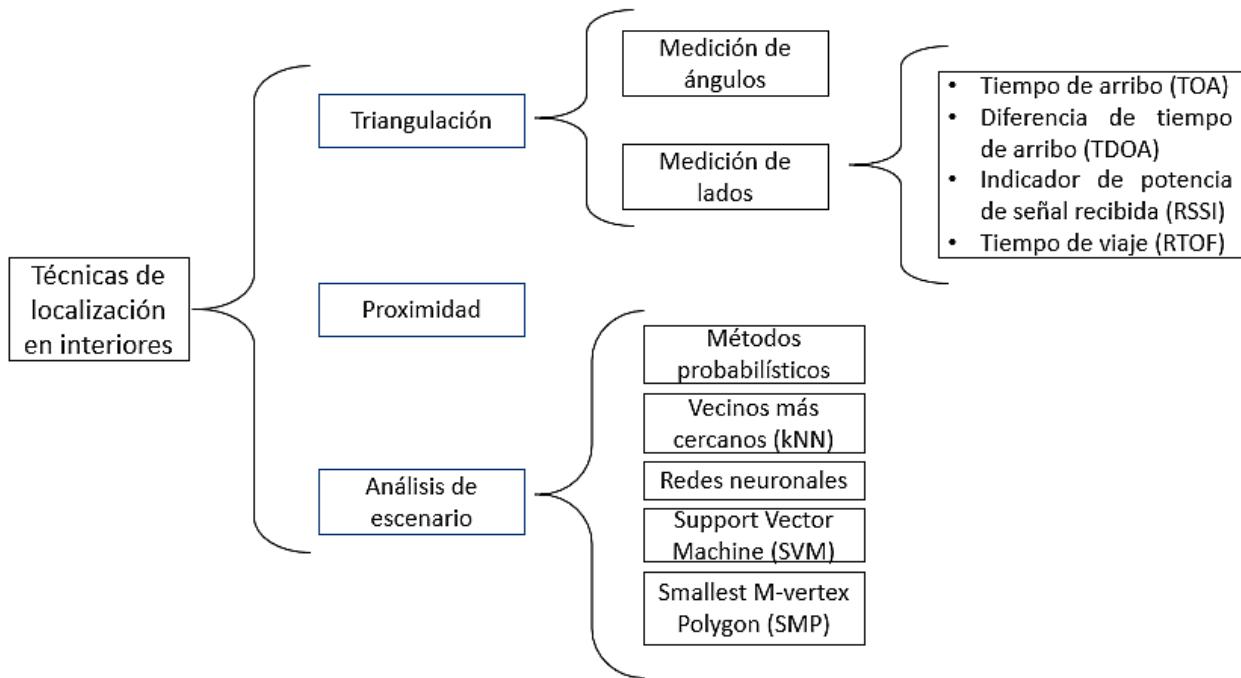


Figura 4. Clasificación de las técnicas de posicionamiento en interiores.

2.3.1. Triangulación

Generalmente para realizar triangulación, existen dos métodos, el primero es midiendo las distancias entre los transmisores y el receptor, esto se puede hacer de diferentes maneras [49] [35]:

- Tiempo de llegada (ToA): se mide el tiempo de llegada de la señal de un punto a otro, con una velocidad de transmisión conocida, y para obtener la distancia entre transmisor y receptor, basta con multiplicar estos dos factores.
- Diferencia de tiempo de llegada (TDoA): el transmisor emite un pulso acústico junto con un pulso de radio, el receptor debe captar las señales y medir la diferencia de tiempo de llegada de cada una, conociendo previamente la velocidad de propagación de éstas.
- Tiempo de vuelo (ToF): este método utiliza mediciones del tiempo transcurrido en una transmisión entre un tag y un lector, aunque es importante resaltar que el hardware en el que se implemente debe tener relojes con alta exactitud.
- Indicador de intensidad de señal recibida (RSSI): esta técnica utiliza las propiedades de atenuación de la señal de radio para modelar la distancia entre dos puntos. Utiliza varios puntos de acceso WLAN simultáneamente para obtener la localización de un dispositivo. Teniendo mínimo un receptor y un transmisor, es posible encontrar la posición relativa entre ambos. Ahora bien, para saber la posición relativa dentro de un espacio cerrado, se hace necesario tener como mínimo tres transmisores con un mismo receptor, tal como se observa en la Figura 5.

El segundo método para realizar triangulación es midiendo los ángulos con los que llega la señal (AoA, ing. Angle of Arrival) y esto es posible siempre y cuando no existan multicaminos, porque de haberlos, puede que se tome el ángulo de una señal reflejada [36]:

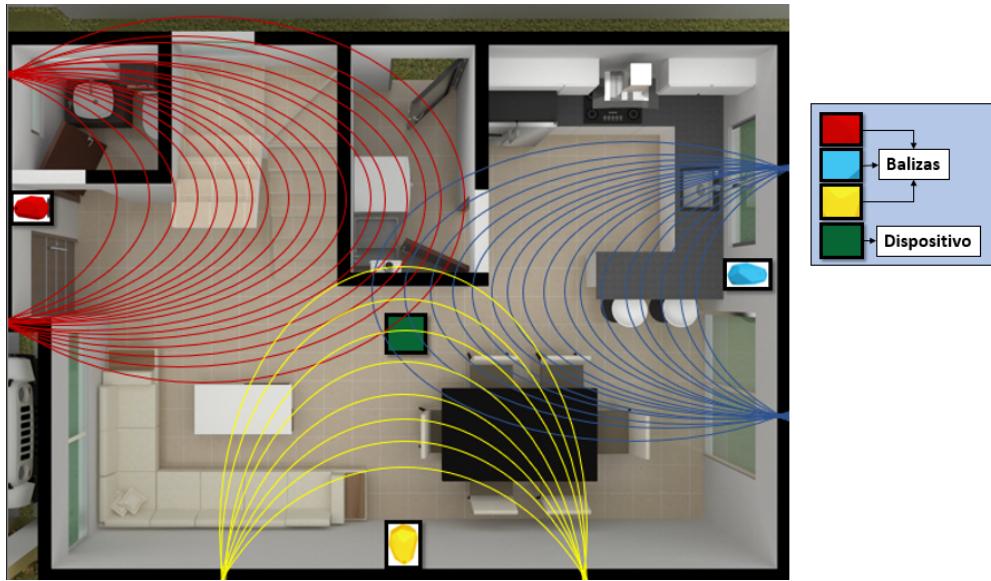


Figura 5. Escenario ideal para realizar triangulación.
Tomado y modificado de: [48]

2.3.2. Proximidad

Ésta técnica consiste en colocar varios dispositivos receptores en un escenario y el navegador con un dispositivo transmisor. Lo que se hace es ver las lecturas de los receptores y en el que la lectura sea mayor, ahí se encuentra el navegador [49].

2.3.3. Análisis de escenario

También conocido como *fingerprinting*. Es en donde previamente se recolecta información radioeléctrica de las señales inalámbricas del lugar deseado, teniendo una base de datos la cual permitirá relacionar las lecturas del sistema en tiempo real con las que se tenían anteriormente y así estimar la posición. Esta técnica se suele usar con el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI, ing. Received Signal Strength Indicator) [49].

2.3.4. Indicador de intensidad de señal recibida (RSSI)

Es el método más utilizado en redes tipo WLAN para localización en interiores, debido a la poca complejidad a la hora de diseñar el hardware, pues la mayoría de los dispositivos WLAN proveen la información de las mediciones RSSI [7]. Los métodos basados en RSSI se dividen en dos grupos:

- Huella digital de radiofrecuencia (Fingerprinting): consiste en generar un mapa con el valor correspondiente del RSSI en cada posición del lugar. La desventaja de este método es que,

si el lugar de estudio llega a cambiar en lo más mínimo, se debe volver a realizar el mapa de valores [22]).

- Modelo de propagación: en estos modelos, la distancia entre un tag (objeto o persona) y un lector se determina mediante la conversión del RSSI en el lector, en una medida de distancia. Utiliza un algoritmo similar al del método ToA [7].

Por otro lado, según la teoría, se establece que para dos antenas separadas por una distancia r , tal como se puede observar en la Figura 6, existe la ecuación de Friis la cual establece una relación entre la potencia recibida y la radiada. Esta relación se denomina pérdida de transmisión entre las antenas y generalmente viene dada en dB [2].

$$P_L = \frac{P_r}{4 * \pi * r^2} * D_T * A_{efR}$$

En donde:

P_L : es la potencia que la antena receptora entregará a su carga.

P_r : potencia radiada isótropamente.

D_T : el factor de directividad de la antena transmisora, .

A_{efR} : es el área de captación o area efectiva en el receptor, ya que la antena extrae potencia del frente de onda incidente.

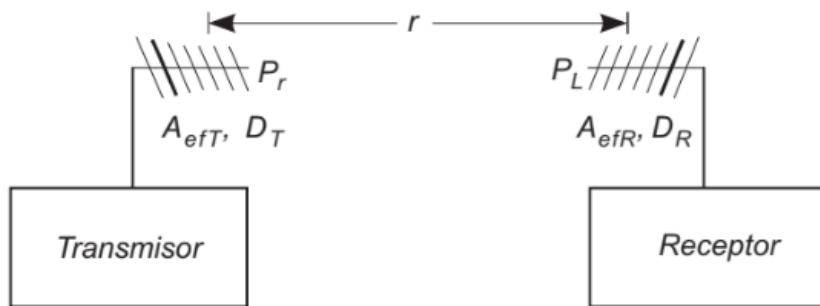


Figura 6. Potencia entre dos antenas.

Tomado de: [2].

Sin embargo, la anterior ecuación se utiliza cuando el escenario es el espacio libre. Así pues, existen ecuaciones para el cálculo de RSSI que involucran datos empíricos como la presentada en [42], la cual establece que la pérdida de propagación de la señal recibida por un nodo a una distancia d_1 del nodo transmisor es:

$$P_L(d_i)[dB] = P_L(d_0)[dB] + 10n \log_{10} \frac{d_i}{d_0}$$

En donde:

$P_L(d_i)$: es la pérdida de propagación de la señal recibida a una distancia d_i del transmisor.

$P_L(d_0)$: es la pérdida de propagación a una distancia de referencia conocida, generalmente es 1 metro.

n : es una constante que depende del medio y de los obstáculos que existan entre los nodos. En el espacio libre $n=2$, sin embargo, en un entorno real la propagación de la señal se ve afectada por fenómenos de reflexión, difracción y dispersión debido a los obstáculos del entorno, por lo que debe ser medida empíricamente.

Finalmente, involucrando las propiedades de las antenas en una misma ecuación que deriva de la de Friis, se obtiene [40]:

$$P_R[dBm] = P_T[dBm] + G_T + G_R - L - 10n \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

En donde:

P_R : potencia en el receptor.

P_T : potencia del transmisor.

G_R : ganancia de la antena del receptor.

G_T : ganancia de la antena del transmisor.

L : Factor relacionado con las pérdidas.

n : Factor empírico.

d : distancia entre el transmisor y el receptor

λ : longitud de onda.

2.4. Hardware dedicado a la micro localización

2.4.1. Balizas BLE y WI-FI

Junto al desarrollo de la tecnología BLE se han venido trabajando tecnologías como iBeacon por parte de la empresa Apple [8] y Eddystone por parte de Google [29], desarrollando dispositivos balizas o beacon que emiten señales de referencia de localización. Al colocar varios beacons en lugares de espacio interior, da lugar a que se pueda implementar un sistema de localización utilizando diferentes técnicas de posicionamiento inalámbricas del estado del arte.

Algunas de las empresas pioneras en la venta de productos implementados para localización en interiores son Estimote, con su producto principal el Beacon BLE (ver Figura 7) que ha sido implementado en varios lugares del mundo, uno de ellos es el aeropuerto de Qatar en donde orientan a sus pasajeros de manera sencilla y precisa a la puerta que desean ir [20]. De igual manera, la empresa Konkakt.io es una de las que se especializa en el desarrollo de sistemas completos de localización por medio de BLE [32].



Figura 7. Beacon de Estimote.

Tomado de: [41].

Estos dispositivos están diseñados para enviar cada cierto tiempo una señal o mensaje hasta que su batería se agote. Así mismo, junto con estas balizas, algunas empresas desarrollaron aplicaciones tanto para Android como en iOS para realizar proyectos que involucre el uso de celulares.

Por otro lado, se conoce como baliza Wi-Fi a cualquier dispositivo modem que emita señal inalámbrica asociada a una red. Estos, se encuentran en la actualidad en la mayoría de las casas, centros comerciales, aeropuertos y hasta en estaciones de buses de servicio público.

2.4.2. Productos similares

Algunos productos del mercado actual implementan la combinación de un MCU, un módulo BLE y sensores de diferentes tipos, tal como la tarjeta sensiBLE desarrollada por la compañía israelí SensiEDGE. Dicho producto se caracteriza por tener un tamaño de 20 x 30 mm y como se puede observar en la Figura 8, está basada en el microcontrolador ARM 32-bit Cortex-M4 que cuenta con varias interfaces de comunicación serial. De igual manera, cuenta con el módulo BLE SPBTLE-1S BLE v4.2, acelerómetro, giroscopio y magnetómetro en 3 dimensiones, sensores

de temperatura, presión, humedad y luz, memoria externa de tipo flash serial y finalmente una batería en forma de moneda [47].

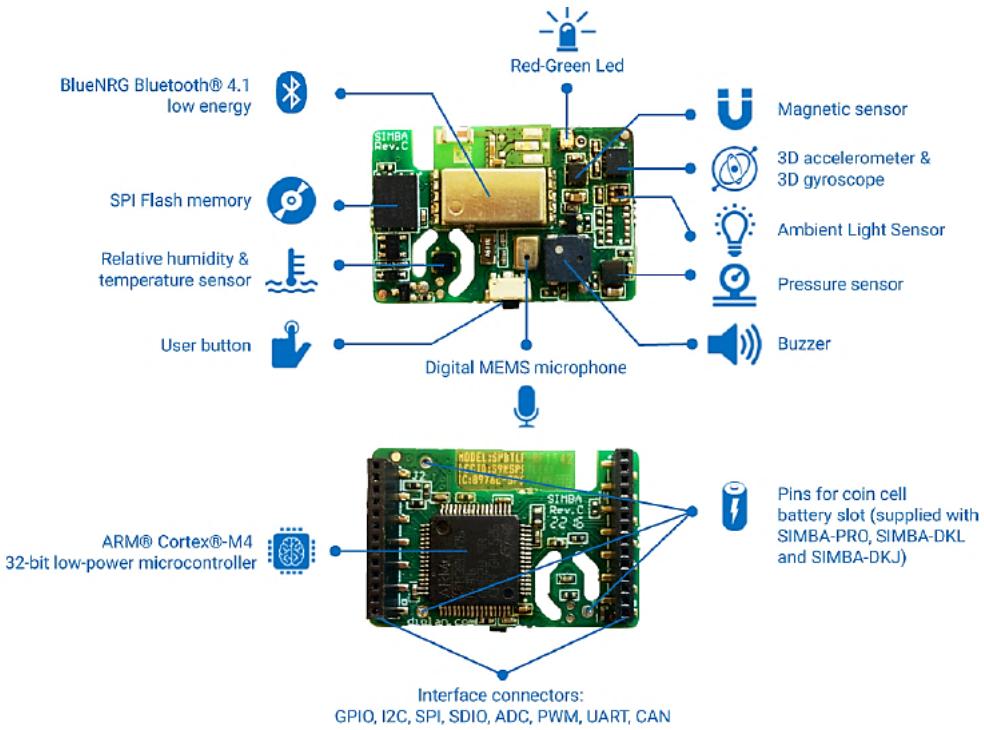


Figura 8. Vista superior e inferior de la tarjeta sensiBLE.

Tomado de: [47].

Lo llamativo de este producto es que fue diseñado para que estuviera en la capacidad de funcionar con mínimo 2V de alimentación. De igual manera, esta misma empresa desarrolló una segunda versión del mismo producto, con la principal diferencia de que usa un sistema en chip (SoC, ing. System on Chip) que integra el MCU y el módulo BLE. Este cuenta con dimensiones de 17 x 40 mm y aparte de esto funciona con una batería de 100mA recargable, tal como se observa en la Figura 9.



Figura 9. Vista superior de la tarjeta sensiBLE V2.0.

Tomado de: [47].

2.5. Aplicaciones dadas a los productos de micro localización

Realizar microlocalización es una tarea que puede ser implementada en muchos ámbitos de la vida cotidiana para resolver diferentes problemas en la sociedad. Un ejemplo de lo anterior, se puede ver en la ONG Wayfindr la cual tiene el objetivo de unir a las personas que son propietarias de instalaciones de recintos cerrados, con servicios de navegación en tiempo real, para que juntos lleven a cabo un proyecto de inclusión social, desarrollando un sistema de navegación en interiores (por medio de BLE y tecnología 5G) basado en audio. [50]

Gracias al servicio de navegación en interiores, al Big Data y al análisis de datos, en la actualidad se puede saber con precisión cuáles son los pasillos más transitados dentro de un mercado o un centro comercial. Estos datos cobran relevancia si se desea dar más importancia a un stand o a cierto producto. Además, también en los centros comerciales se han desarrollado aplicaciones móviles con el fin de que una persona pueda tener en su celular el mapa de dicho lugar para minimizar tiempos y facilitar el recorrido de búsqueda. [43]

Además, a nivel nacional se han identificado propuestas del gobierno como el de la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN), que para el año 2018, busca la implementación de dispositivos electrónicos de seguridad para el seguimiento y control de mercancías o de los medios de transporte para asegurar la integridad de la carga mediante el registro de los movimientos, cierres y aperturas. La DIAN requiere el monitoreo de la posición de la carga las 24 horas del día en entornos exteriores e interiores [18]. Dada la importancia que tiene darle solución a este tipo de problemáticas en el país, existen entidades como el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC) que brinda apoyo económico mediante convocatorias a empresas TIC, centros e institutos de investigación encaminados a resolver problemáticas de los sectores estratégicos de la industria mediante el uso de tecnologías disruptivas como el Internet de las cosas (IoT) e Inteligencia Artificial (IA) entre otros [39].

2.6. ¿En dónde fabricar tarjetas de circuito impreso?

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de un PCB es la escogencia de la empresa que realizará la fabricación, ya que cada empresa ofrece unas especificaciones, y éstas son proporcionales al precio. A continuación, en la Tabla 2 se presenta las especificaciones de empresas en Colombia y en el exterior.

Cuadro 2. Comparación de las especificaciones de empresas de Colombia y del extranjero

País	Colombia		Estados Unidos	China
Empresa	Microensamble	Colcircuitos	4PCB	Smart-Prototyping
Mínimo ancho de pistas [mm]	0.15 y 0.3	0.2	0.07 hasta 1.524	0.1524
Mínima distancia entre pistas-pad-vias [mm]	0.15	0.2	0.07	0.1524
Espesor del laminado [mm]	0.3 a 1.6	0.1, 0.8 y 1.6	hasta 6.35	0.8 hasta 2.3
Espesor del cobre [Oz]	0.5 a 4	0.5	0.5 a 8	0.5 a 4
Número de capas	hasta 8	1 y 2	hasta 40	hasta 6
Mínimo diámetro de perforaciones metalizadas [mm]	0.2	0.4	0.0762	0.3
Tiempo de fabricación	24 horas, 3, 6, 10 y 15 días	1 a 2 semanas	de 24 horas a 15 días	24, 48 horas, 10 y 15 días

El precio de fabricación en la mayoría de las empresas se da luego de realizar un estudio de los archivos gerber. Se eligió una empresa Colombiana debido al factor tiempo, pues si se escogía una empresa del extranjero, el tiempo hasta que llegue dicha tarjeta será mucho mayor. La cotización de la tarjeta se muestra en el Capítulo 8.

3. Marco teórico

3.1. Internet de las cosas IoT

El internet de las cosas (IoT, ing. Internet of things) es el concepto de conectar básicamente cualquier dispositivo a internet, desde celulares, tablets, hasta electrodomésticos o automóviles. El IoT es un paradigma de desarrollo electrónico prometedor a nivel mundial, pues según la curva de Gartner para el año 2016, ésta se encuentra ubicada en el rango de tecnologías en auge y son necesarios de 5 a 10 años para su implantación a nivel global al igual que la inteligencia artificial [27]. Así mismo, esta firma analista asegura que para el año 2020 habrá más de 26 mil millones de dispositivos conectados a internet.

3.1.1. Ciudades inteligentes

Una Smart City por definición es un sistema complejo e interconectado que aplica nuevas tecnologías para gestionar el adecuado funcionamiento de los sistemas de transporte público, los sistemas de seguridad, el uso eficiente de los recursos tanto energéticos como hídricos, entre muchas otras. Esto se logra por medio del análisis de datos captados por sensores que se encuentran directamente conectados a la red y que luego de un análisis, lleva a la toma de decisiones autónomas. Es necesario tener en cuenta que las ciudades inteligentes no son aquellas que tienen mayor presupuesto o que utilicen las tecnologías más sofisticadas, si no las que logran ofrecer una mayor calidad de vida para sus habitantes [45].

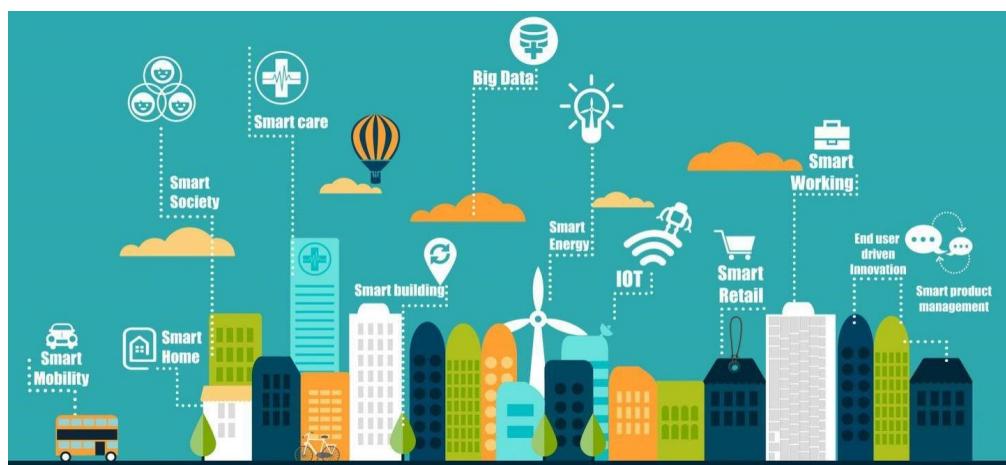


Figura 10. Características de ciudades inteligentes.

Tomado de: [10].

3.1.2. Frecuencias de operación para dispositivos IoT

El internet de las cosas no es un servicio de radiocomunicación, por tal motivo, no existen atribuciones de frecuencias. Sin embargo, los dispositivos diseñados para trabajar en el ámbito del IoT pueden usar frecuencias de uso libre para dispositivos de baja potencia y corto alcance, como redes Wi-Fi, bluetooth, controles remotos, lectores de tarjeta, entre otros, que por sus características de transmisión tienen baja probabilidad de causar interferencias a otros dispositivos [5].

3.2. Sistemas embebidos

Los sistemas embebidos, básicamente, son una combinación de hardware y software, tal cual un computador como el que usamos a diario, con la principal diferencia de que son diseñados para cumplir tareas específicas [25], mientras que los demás son diseñados para cumplir tareas de propósito general [3]. Generalmente, los sistemas embebidos se encargan del procesamiento, control de periféricos y manejo de la memoria, de distintos elementos electrónicos. De hecho, en la actualidad, se encuentran presentes en electrodomésticos, celulares, ascensores, semáforos, entre otros. Y existen los protocolos de comunicación serial, los cuales permiten la comunicación entre diferentes módulos presentes en un sistema embebido.

3.3. Protocolos de comunicación serial en sistemas embebidos

3.3.1. UART

El periférico UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) de un dispositivo realiza conversiones de comunicación paralela a serie en dispositivos que quieran enviar información y de comunicación en serie a comunicación paralela en dispositivos de recepción de datos. De igual manera, este protocolo es conocido como USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter), debido a que esta interfaz de comunicación tiene la capacidad de ser utilizada con señal de reloj o sin señal de reloj. [11]

Como se puede observar en la Figura 11, la conexión en este caso es punto a punto y en algunos casos se hace necesario utilizar los pines CTS y RTS que también se definen en el protocolo como señales de control de flujo.

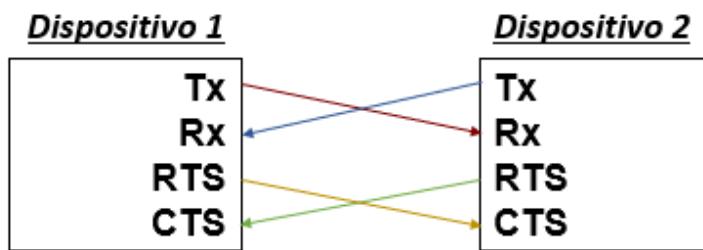


Figura 11. Arquitectura de comunicación UART.

Ventajas

- Unicamente necesita de dos cables para funcionar.
- No es necesaria una señal de reloj.
- Tiene un bit de paridad, lo cual permite realizar detección de errores en los mensajes.
- Es un protocolo muy bien documentado y trabajado a nivel mundial.

Desventajas

- El tamaño de la trama está limitado a un máximo de 9 bits.
- No soporta sistemas de multiple maestro o multiple esclavo.

3.3.2. SPI

El SPI (Serial Peripheral Interface) es un protocolo de comunicación serial, el cual fue desarrollado por Motorola para el año de 1980. Este protocolo maneja una arquitectura de tipo maestro-esclavo, en donde el dispositivo maestro tiene la capacidad de iniciar la comunicación con uno o varios dispositivos esclavos. Llegó a ser tan popular en la industria electrónica debido a su sencillez y “alta” velocidad de comunicación, al compararlo con otros protocolos de corto alcance [34]. Una de las características de este tipo de comunicación es que es un bus síncrono ya que el maestro emite una señal de reloj la cual sincroniza a los demás dispositivos conectados. La comunicación es Full Dúplex, pues, el maestro puede enviar y recibir información simultáneamente por dos líneas independientes y básicamente necesita de mínimo 3 líneas para funcionar, más una por cada esclavo conectado. Estas líneas se detallan a continuación.

- SCK (Clock Signal): Línea de reloj transmitida por el maestro hacia los esclavos.
- MOSI (Master Output – Slave Input): Es la línea por la cual el maestro envía datos y los esclavos de la comunicación los reciben.
- MISO (Master Input – Slave Output): Cuando los esclavos van a enviar datos, lo hacen por esta línea de comunicación para que el maestro pueda recibir.
- SS (Slave Select): Por esta línea el maestro puede seleccionar al esclavo al cual le quiere enviar información.

Cuando únicamente se tiene un esclavo en la comunicación, la arquitectura del cableado se ilustra en la Figura 12.

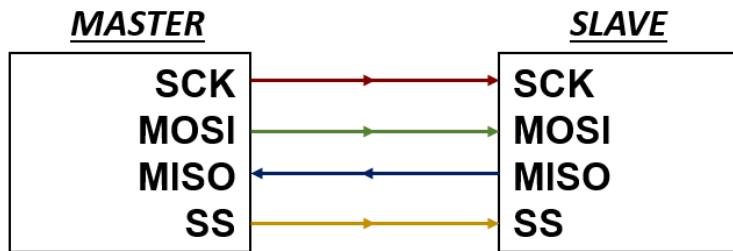


Figura 12. Arquitectura bus SPI con un esclavo.

De otra manera, cuando se cuenta con más de un esclavo en el protocolo SPI la arquitectura es la que se muestra en la Figura 13.

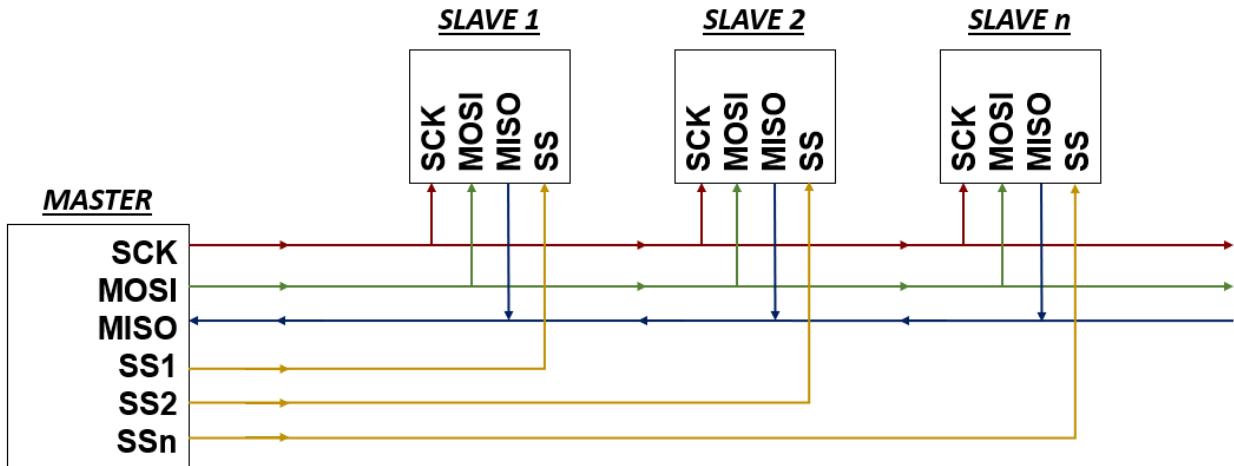


Figura 13. Arquitectura bus SPI con varios esclavos.

Como se puede observar, entre más esclavos se tengan en la comunicación, se va a requerir de más líneas de conexión, lo que a la larga sería una desventaja para un sistema de comunicación con gran cantidad de dispositivos. Cuando el maestro quiere establecer comunicación con un esclavo, pone en nivel bajo la línea SS correspondiente, ya que por defecto se encuentran todas estas en nivel alto tal como se muestra en el diagrama de tiempo en la Figura 14 .

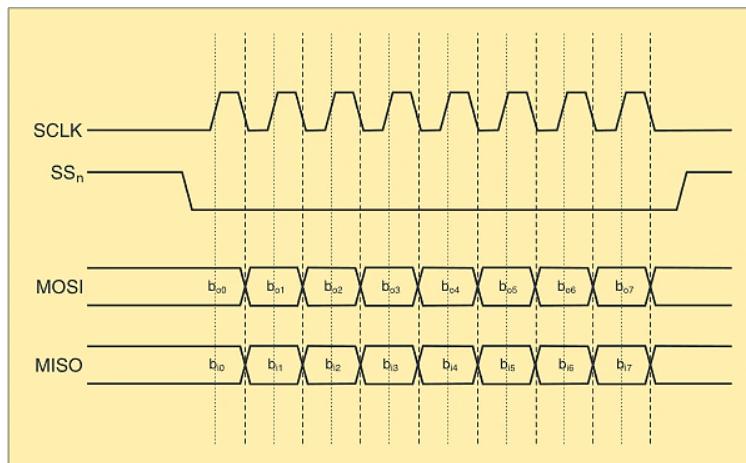


Figura 14. Diagrama de tiempo básico para el protocolo SPI.
Tomado de: [34].

Ventajas

- Es full dúplex y cuenta con alta velocidad de transmisión (Puede soportar velocidades de reloj de más de 10Mb/s).
- Puede llegar a soportar múltiples esclavos.
- Está disponible en gran cantidad de microcontroladores en la actualidad.

Desventajas

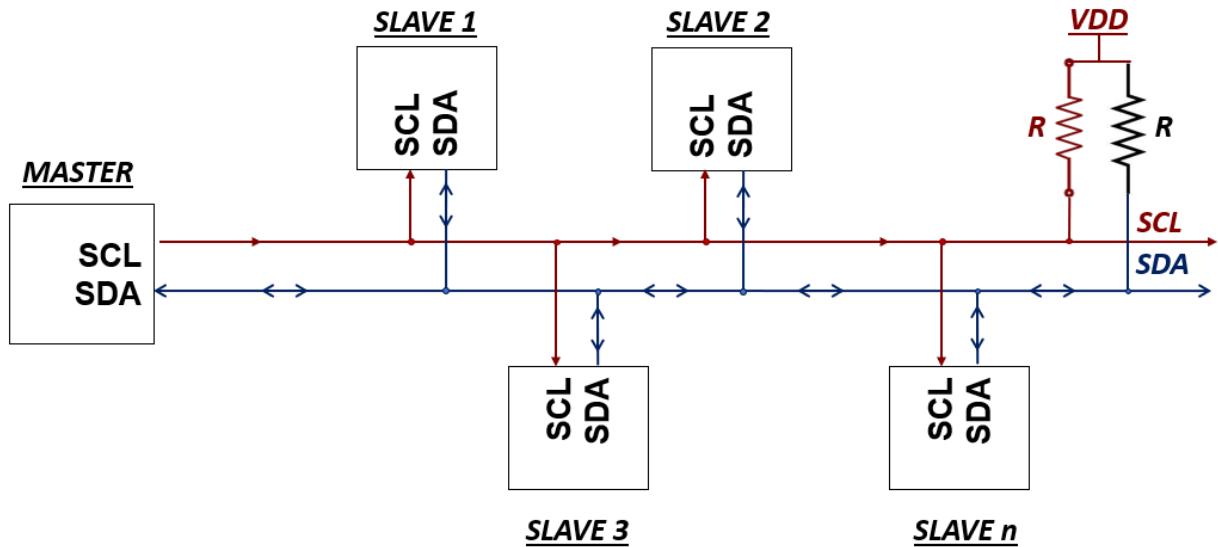
- Para llevar a cabo la comunicación se requiere de tres cables más uno adicional por cada dispositivo esclavo.
- El protocolo solo es adecuado a cortas distancias (menos de 30 cm)
- No se cuenta con un bit de control para saber si el mensaje fue recibido o no.
- No se cuenta con un sistema de detección de errores tal como bit de paridad, CRC o similar.

3.3.3. I2C

El protocolo de comunicación serial conocido como I2C (Inter-Integrated Circuit), es un bus de comunicación síncrona en donde al igual que el SPI, se maneja la arquitectura maestro-esclavo. Fue desarrollado en 1982 por Phillips Semiconductors, fabricando la primera familia de microcontroladores (MAB8400) la cual contaba con este protocolo. Este protocolo se caracteriza por poder comunicarse en el modo estándar a 100 kHz o en el modo rápido a 400 kHz, además de esto, algunos dispositivos están diseñados para tener velocidades mayores a 1MHz. Lo que hace útil este protocolo es, al igual que la comunicación serial asíncrona (RS-232 o UART), el tener dos líneas principales de comunicación, las cuales se explican a continuación.

- CLK (Serial Clock): Señal de reloj que genera el maestro hacia los esclavos de la comunicación.
- SDA (Serial Data): Línea bidireccional de datos por la cual puede enviar información tanto el maestro como los esclavos.

A diferencia de las conexiones UART o SPI, el bus I2C utiliza líneas con open drain, esto significa que los dispositivos esclavos pueden forzar la línea de señal hacia abajo (cero lógico), pero no pueden controlar que la señal suba (uno lógico). Por lo tanto, no existe el problema de que algún dispositivo quiera bajar la señal, mientras otro quiera subirla. Cada línea de señal tiene una resistencia de pull-up para restaurar la señal a alto cuando ningún dispositivo la esté forzando a bajar. La arquitectura del protocolo I2C se puede apreciar en la Figura 15.

**Figura 15.** Arquitectura bus I2C.

Este protocolo no tiene un Slave Select como el bus SPI, en vez de eso, cada dispositivo esclavo tiene una dirección, así pues, si el maestro envía cierta dirección de esclavo, únicamente se comunicará con ese dispositivo y al mismo tiempo le indica si el maestro enviará o recibirá los datos en la comunicación. La cantidad de esclavos permitidos en este protocolo depende directamente de la cantidad de bits que se tengan para el direccionamiento, es decir, si las direcciones de los dispositivos son de 7 bits, el límite de esclavos es de 127, de los cuales realmente se pueden usar 112 ya que 16 direcciones se reservan para usos especiales. Por otro lado, si el direccionamiento se realiza con direcciones de 10 bits, se puede alcanzar hasta un máximo de 1023 dispositivos esclavos conectados al bus. Antes que nada, se debe aclarar que en este protocolo la comunicación se realiza mediante palabras de 8 bits (1 Byte), pero para enviar datos o para recibirlos, es necesario seguir diferentes pasos, según lo aclara el protocolo [1].

Envío de datos La comunicación inicia con un bit de inicio (S), seguido de la dirección de esclavo (DIRECCIÓN ESCLAVO) de 7 bits y con el octavo bit (R/W) se indica que se desea enviar datos (bit con valor 0), luego va el bit de Acknowledge (A) el cual es de utilidad para saber si el dispositivo esclavo recibió la información. Seguidamente, se envía la información en formato de 8 bits (DATOS ENVIADOS), cada palabra seguida de su correspondiente bit de Acknowledge y finalmente la comunicación se da por finalizada con un bit de parada (P), tal como se observa en la Figura 16.

TRAMA DE ESCRITURA I2C														
DATOS ESCRITOS														
S	DIRECCIÓN ESCLAVO							R/W	A	DATOS ENVIADOS				
BO	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	BO	BO	B7	B6	B5	B4	B3

Figura 16. Estructura de la trama de escritura para el protocolo I2C.

Recepción de datos Para la recepción de datos se debe seguir los siguientes pasos. La

comunicación inicia con un bit de inicio (S), seguido de la dirección de esclavo (DIRECCIÓN ESCLAVO) de 7 bits y con el octavo bit (R/W) se indica que se desea enviar datos (bit con valor 0), luego va el bit de Acknowledge (A). Se indica la dirección del registro que se desea leer (DIRECCIÓN DE REGISTRO) seguido del bit Ack. Se repite el bit de inicio (Sr), nuevamente se envía la dirección de esclavo, pero esta vez con el bit R/W en 1 para indicar que se va a leer, con el correspondiente bit Ack. Para finalizar, se reciben los datos del esclavo, seguido del Ack por parte del maestro, seguido del bit de parada (P), tal como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Estructura de la trama de lectura para el protocolo I2C.

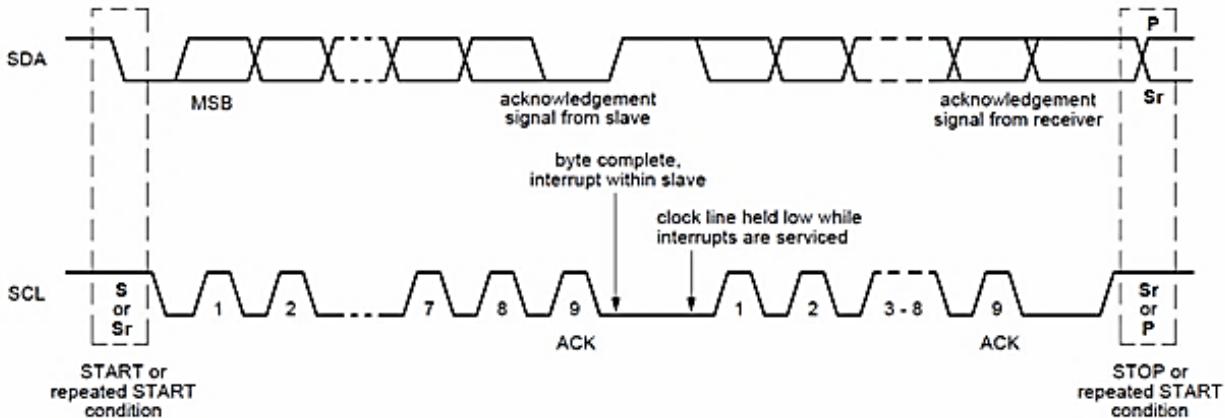


Figura 18. Diagrama de tiempo básico para el protocolo I2C.

Tomado de: [1].

Ventajas

- En un bus estándar con direccionamiento de 7 bits, se puede llegar a tener conectado hasta 127 dispositivos esclavos con las dos líneas principales de SDA y SCL.
 - Cuenta con un bit (Ack) para verificar que la señal que se envió efectivamente llegó al otro dispositivo. Desventajas
 - Su velocidad es baja comparada con los demás protocolos de comunicación (En modo rápido 1Mb/s y en modo de alta velocidad hasta 3.4Mb/s, este último no es fácilmente disponible en dispositivos).
 - No es Full Dúplex.
 - No tiene modo de verificar que el contenido del mensaje que llegó fue el que se envió.

3.4. Estándares de circuitos impresos

Los estándares y normas son herramientas de uso voluntario, pero es necesario tener en cuenta que adicionan robustez, confiabilidad y duración a un producto. Igualmente, en la mayoría de los casos, acogerse a normas se traduce en un proceso de manufactura más rápido, económico y ayudan a pasar certificaciones a las que son sometidos los productos electrónicos para ser vendidos en mercados internacionales. Existe gran cantidad de normas técnicas enfocadas al diseño y fabricación de circuitos impresos. Éstas dictan aspectos concernientes al tamaño de las huellas de los componentes, anchos de pistas y vías, radiación de señales electromagnéticas, interferencias en etapas de un mismo circuito, entre otras. Dichas normas son emitidas por entidades internacionales como la IEC (International Electrotechnical Commission) [31] y la IPC (Association Connecting Electronics Industries), la cual es la máxima autoridad en lo relacionado con el diseño de circuitos impresos en el mundo [6].

3.4.1. Normas IPC

Algunas de las normas IPC más usadas en el diseño de circuitos impresos son:

- IPC 2220 Diseño de tarjetas de circuito impreso: En esta norma se definen los requisitos generales para el diseño de tarjetas y ensamble tanto de componentes THT o SMT.
- IPC 7351 Requisitos genéricos para el diseño de huellas de componentes SMT y THT: Esta norma contiene tamaños, formas y las tolerancias apropiadas para asegurar una soldadura óptima para proceso de soldado manual o automático. Esta norma define tres tipos de huellas, las cuales se explican a continuación:

Densidad Nivel A Las medidas de los pads y los huecos para este nivel de densidad ofrecen la mayor robustez posible en el filete de soldadura. Generalmente es utilizado para aplicaciones militares o dispositivos médicos.

Densidad Nivel B Es la medida mediana en nivel de robustez. Los dispositivos presentarán una sólida fijación de soldadura. Este nivel es utilizado para aplicaciones de escritorio, dispositivos de entorno controlado y muchos productos electrónicos de consumo.

Densidad Nivel C Este nivel se utiliza en su mayoría cuando son aplicaciones en donde hay alta densidad de componentes, como por ejemplo en productos portátiles.

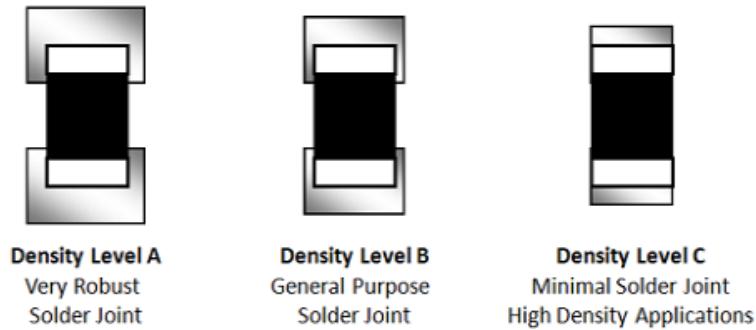


Figura 19. Tipo de huella según la aplicación.

Tomado de: [6].

- IPC 600 Aceptabilidad de circuitos impresos: Esta norma es para fabricantes de circuitos impresos, sirve para mejorar la calidad de los productos y la comunicación con proveedores y clientes. Es uno de los estándares más usados en el mundo.
- IPC 610 Aceptabilidad de ensambles electrónicos: Esta norma va dirigida a los ensambladores, soldadores, diseñadores, fabricantes de productos electrónicos. La norma plantea criterios de inspección de calidad visual.

4. Diseño del prototipo

4.1. Requerimientos

La totalidad de requerimientos con los que se inició el desarrollo de la tarjeta se puede observar a continuación, estos se dividen en dos, requerimientos no funcionales y los funcionales, y juntos son una herramienta que permite juzgar el funcionamiento del sistema.

4.1.1. Requerimientos no funcionales del hardware

Estos requerimientos son criterios que especifican el funcionamiento del sistema, también son conocidos como atributos de calidad.

Cuadro 3. Requerimientos no funcionales del hardware

Número	Requerimiento	Prioridad
1	El PCB debe tener máximo las dimensiones de 10 mm x 10 mm y debe cumplir las normas IPC correspondientes al diseño de huellas de componentes y las normas de fabricación de Colcircuitos [16].	Alta
2	Los componentes deben tener un rango de temperatura de operación mínimo de 0°C, además deben cumplir la directiva RoHS (RoHs, ing. Restriction of Hazardous Substances) [44].	Alta
3	El microcontrolador elegido debe soportar los protocolos de todos los sensores y módulos que estén presentes en la tarjeta.	Alta
4	El sistema embebido debe contar con memoria suficiente para almacenar los datos recibidos por los módulos.	Alta
5	El PCB debe ser fabricado en una empresa nacional y deber ser doble capa para que no sea tan costoso.	Alta
6	El ensamblaje de la tarjeta se hará manual por aspecto de precios.	Media
7	El sistema embebido debe contar con un programador externo evitando mayores dimensiones y costos en la tarjeta.	Media
8	Se debe asegurar la alimentación a un voltaje constante en todos los módulos.	Alta
9	La elección del tipo (composición química) de batería debe ser consecuente con la aplicación portable y recargable.	Alta

4.1.2. Requerimientos funcionales del hardware

Estos requerimientos se enfocan en las funciones que debe realizar el sistema.

Cuadro 4. Requerimientos funcionales del hardware

Número	Requerimiento	Prioridad
1	La tarjeta debe estar en la capacidad de realizar lectura de un sensor de medición inercial IMU.	Alta
2	La tarjeta debe estar en la capacidad de recibir y mostrar información de interés de beacons Wi-Fi y BLE.	Alta
3	La tarjeta debe estar en la capacidad de almacenar los datos recolectados por cada módulo.	Alta

4.2. Diseño del hardware

Inicialmente, cuando se procede a desarrollar un prototipo hardware se debe realizar un diagrama de bloques en el que se identifiquen claramente las entradas y las salidas del sistema, luego se va detallando los submódulos que contendrá el sistema, los protocolos de comunicación y el sistema de alimentación. El paso siguiente es la elección de los componentes que conforman los submódulos, la escogencia del proveedor y la referencia del dispositivo. Se procede con un diseño de layout, el cual indicará la ubicación de cada componente dentro de la tarjeta, en lo posible en este paso se realiza un modelo 3D para evitar problemas con el espacio que ocupan los módulos dentro del prototipo. Se realiza un estudio de consumo de energía con el fin de asegurarse que la fuente de alimentación cumpla con su objetivo. Y finalmente, en lo posible se realizan simulaciones de tipo térmico y de compatibilidad electromagnética.

4.2.1. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques se presenta por niveles, en donde el nivel 0 es vista general de todo el sistema en el que se ilustra la tarjeta como un único bloque con flechas que indican las entradas y las salidas. A medida que se aumenta el nivel, se van detallando los submódulos y los protocolos de comunicación que serán implementados. Nivel 0: En este nivel se tienen dos tipos de entradas. La primera de tipo análoga, como lo son las señales inalámbricas Wi-Fi y Bluetooth que están presentes en el ambiente, y la segunda entrada de tipo Digital por parte del programador que se encarga de transferir los datos desde el computador hasta el microcontrolador.

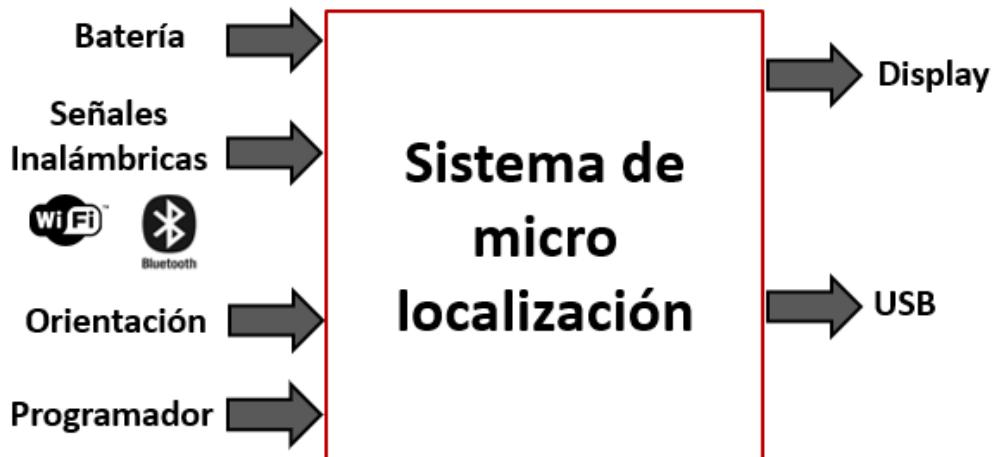


Figura 20. Diagrama de bloques Nivel 0.

Entrando un poco más en detalle, en la Figura 21 se observa el nivel 1, En cual se encuentran los diferentes submódulos que conforman la tarjeta, las conexiones rojas indican señales de alimentación y las negras indican que se transmite o recibe información digital.

Así mismo, se pueden observar los protocolos de comunicación que se eligieron para comandar y administrar la información de los diferentes submódulos, esto se convierte en un buen criterio para seleccionar una referencia de microcontrolador, pues este en lo posible debe tener disponible todos los protocolos, ya que, de no tenerlos, se haría necesario la implementación de más componentes de hardware que permitan ese cambio de protocolos.

Aunque la interfaz de comunicación es importante en la elección de un módulo, no es un criterio fundamental que determine la elección, es decir, de igual manera hay que tener en cuenta otros aspectos tales como el tamaño, el costo y el consumo energético. Ahora bien, si no se encuentra en el mercado un dispositivo que maneje el protocolo elegido, se procede a seleccionar otro protocolo o en su defecto otra referencia de módulo que cumpla con los requisitos.

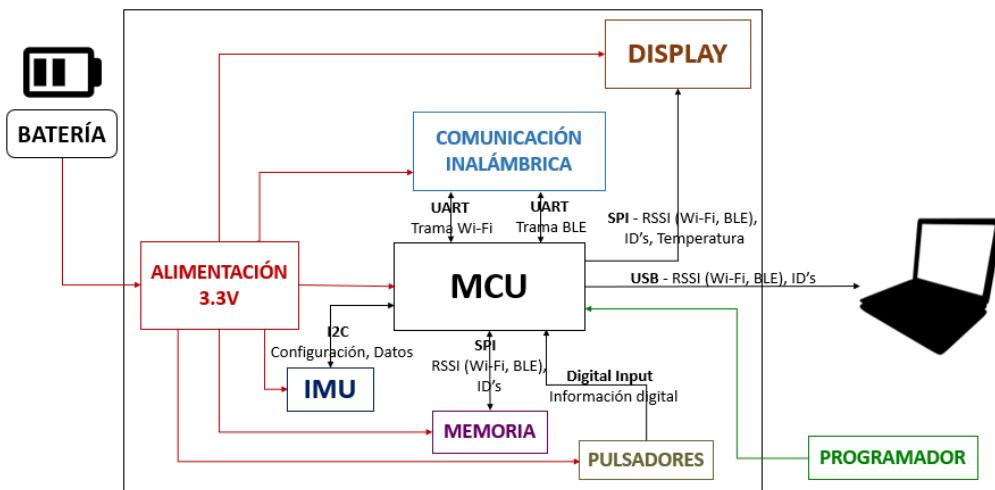


Figura 21. Diagrama de bloques Nivel 1 con Protocolos de comunicación.

La alimentación del sistema se controla mediante un switch de encendido, el cual permite la circulación de corriente a las demás partes de la tarjeta. Seguidamente, se tiene un regulador de 3.3V el cual va conectado a cada uno de los módulos.

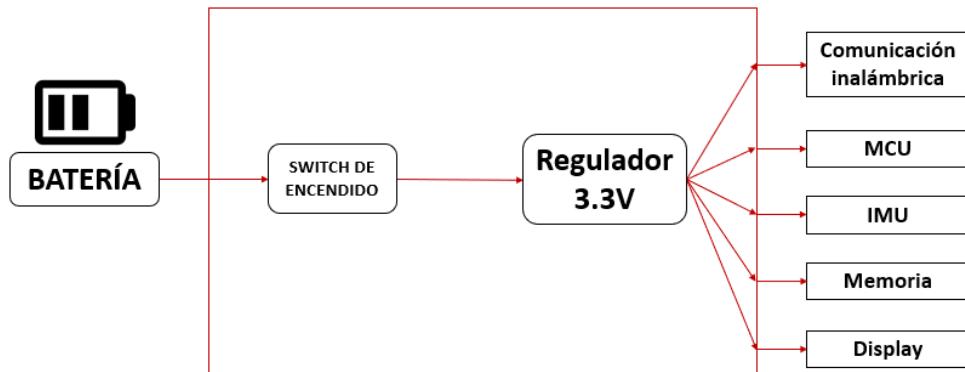


Figura 22. Diagrama de bloques Nivel 2, Alimentación.

Como se puede ver en la Figura 23, se decidió usar el protocolo UART para la comunicación entre el microcontrolador y los módulos de comunicación inalámbrica tanto el Wi-Fi como el BLE. Esto se debe a que es un protocolo práctico, sencillo y que permite grandes velocidades de comunicación. Una de las pocas desventajas de este protocolo, como se mencionaba anteriormente, es que maneja palabras de 8 bits, pero no hay mayor inconveniente, debido a que no se va a establecer comunicación con otro dispositivo inalámbrico, entonces, no se manejarán grandes cantidades de información.

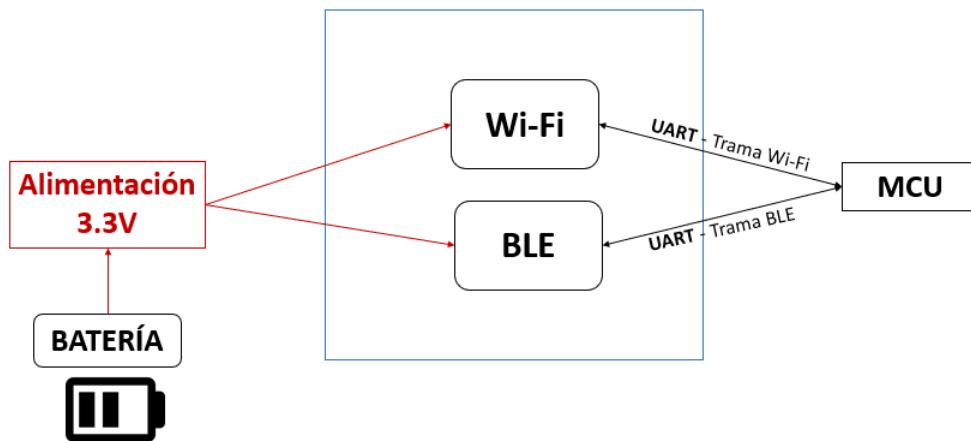


Figura 23. Diagrama de bloques Nivel 2, Comunicación inalámbrica.

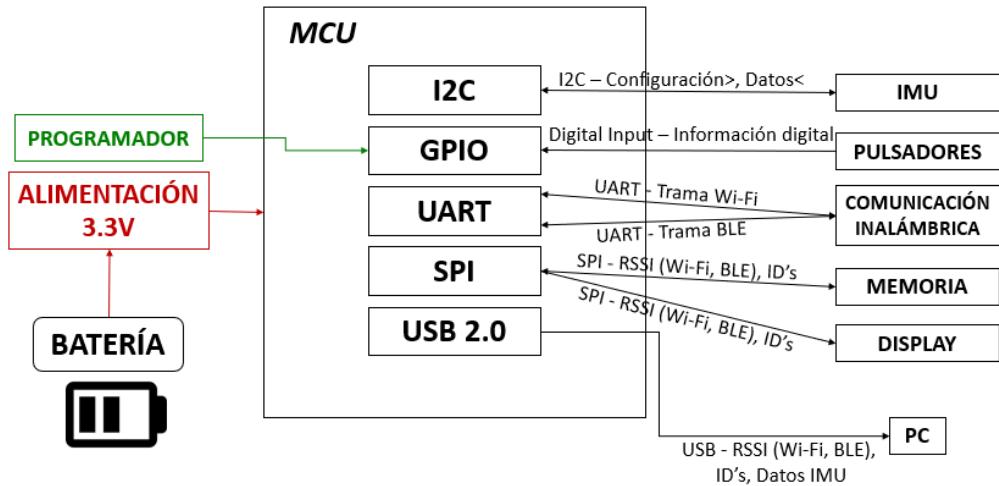


Figura 24. Diagrama de bloques Nivel 2, Microcontrolador.

4.2.2. Escogencia de las referencias de los componentes

Para escoger los componentes adecuados, es necesario realizar un comparativo de los aspectos más relevantes de estos, tales como voltajes de operación, tamaño, empaquetado, precio y disponibilidad en el mercado, entre otros. A continuación, se presentan las tablas comparativas que permitieron llevar a cabo la escogencia.

■ Microcontrolador

Para escoger un microcontrolador adecuado, se tuvieron en cuenta aspectos como el voltaje de operación, el número de bits, el empaquetado, la frecuencia máxima de operación, los protocolos disponibles y el precio del proveedor estadounidense digikey, debido a que éste reune, compara y facilita la información de componentes electrónicos, tal como se puede observar en el Cuadro 5. Se decidió escoger el microcontrolador de referencia *PIC32MZ2048EFM100 – I/PF* de Microchip, debido a que éste tiene mayor frecuencia de operación, presenta empaquetados que permiten el ensamble manual, tiene mayor cantidad de memoria para el almacenamiento de código, tiene disponibles gran cantidad de protocolos de comunicación serial, una cantidad considerable de pines y todos estos aspectos permiten implementar un buen algoritmo de micro localización permitiendo buena comunicación con los demás componentes dentro de la tarjeta.

Cuadro 5. Comparación entre microcontroladores.

MCU				
Características	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Fabricante	Microchip		ARM	Texas Instruments
Referencia	PIC32MX534F064H-I/PT	PIC32MZ2048EFM100	STM32F401VCT6	MSP430F5310IPTR
Cantidad de pines	64	64,100 o 144	100	48
Empaquetado	QFN,TQFP,TFBGA,VTLA	QFN,TQFP	LQFP	LQFP
Bits	32	32	32	32
Frecuencia máxima	80 MHz	200 MHz	84 MHz	25 MHz
Comunicación serial	USB x 1, UART x 6, I2C x 5, SPI x 4	I2C x 5, UART x 6, SPI x 6, USB x 1	I2C, IrDA, LIN, SDIO, SPI, UART/USART, USB OTG	I2C, IrDA, LIN, SCI, SPI, UART/USART
Memoria de programa	64 KB	2048 KB	64 KB	32 KB
Precio USD	\$ 4.91	\$ 12.77	\$ 6.14	\$ 3.48

■ Módulo BLE

Uno de los aspectos más importantes para la elección de un módulo BLE es que debe tener integrada la antena, ya sea trazada o cerámica, esto se debe a que, si la antena es un dipolo, el volumen total que ocuparía la tarjeta sería mucho mayor. Aparte de esto, es necesario analizar el consumo de corriente en los diferentes modos, tanto en transmisión como en la recepción, las certificaciones, el tamaño, el empaquetado, entre otros.

Por todo lo anterior, se escogió el módulo *RN4870* de Microchip, el cual aporta buenas características en cuanto a eficiencia, consumo de corriente y precio, a pesar de que es el de mayores dimensiones.

Cuadro 6. Comparación entre módulos BLE

Módulo BLE				
Características	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Fabricante	Microchip		STMicroelectronics	Rigado, Inc
Referencia	BM71	RN4870	BlueNRG	BMD-350
Tamaño (mm)	9 x 11.5 x 2.1	12 x 22	5 x 5	6.4 x 8.65 x 1.5
Empaquetado	Pad RF	Pad RF	QFN32	Pines bajo el módulo
Antena integrada	Si	Si	No	Si
Versión BLE	4.2	4.2	4.1	4.2
Comunicación serial	UART	UART, AIO, PIO	SPI	I2C, I2S, SPI & UART
Consumo de corriente en modo RX (entrada 3v a 0dBm)	13 mA	13 mA	7.3 mA	5.3 mA
Rango de voltaje de operación	1.9V a 3.6V	1.9V a 3.6V	2V a 3.6V	1.7V a 3.6V
Sensibilidad de recepción	-90 dBm	-90 dBm	-88 dBm	-96 dBm
Pico de ganancia	0.1 dBi	1.63 dBi	No especifica	No especifica
Eficiencia	42.7 %	71.55 %	No especifica	No especifica
Certificaciones	FCC, IC, MIC, KCC, NCC & SRRC	FCC, MIC, IC, KCC & NCC	FCC, ETSI, EN & ARIB	FCC, IC, CE, MIC, AS/NZS 4268 & QDID
RoHS	Si	Si	No	Si
Precio USD	\$ 8.44	\$ 7.45	\$ 3.88	\$ 13.25

■ Módulo Wi-Fi

En la elección del módulo Wi-Fi se tuvieron en cuenta varios aspectos similares al del módulo BLE, por ejemplo que si la antena está integrada, la sensibilidad de recepción, las certificaciones, la potencia de transmisión, entre otros. Se eligió el módulo de referencia *RN1810* de Microchip debido a su bajo consumo de corriente en modo TX y RX y por la capacidad de transmitir a "largo alcance".

Cuadro 7. Comparación entre módulos Wi-Fi

Módulo Wi-Fi						
Características	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5	Opción 6
Fabricante	Microchip			SparkFun Electronics	Silicon Labs	Adafruit
Referencia	ATWINC1500-MR210PB1952		MRF24WN0MA	RN1810	WRL-13678	WF111-A-V1
Huella	Pad RF		Pad RF	Pad RF	Pad RF	Pad RF
Tipo	Módulo		Módulo	Módulo	Módulo	Módulo + Componentes
Antena integrada	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Protocolo serial	SPI	SPI	UART	SPI, UART	PIO, SDIO, SPI	I2C, SPI, UART
Consumo de corriente en modo TX	172 mA	246 mA	246 mA	215 mA	192 mA	294 mA
Consumo de corriente en modo RX	70 mA	64 mA	64 mA	62 mA	88 mA	58 mA
Rango de voltaje de operación	3V a 4.2V	1.7V a 3.6V	3.15V a 3.45V	3.3V	1.7V a 3.6V	2.7V a 3.6V
Sensibilidad de recepción	-95 dB	-94 dB	-94 dB	-98 dB	-97 dB	-98 dB
Potencia transmitida	17 dBm	20 dBm	20 dBm	19.5 dBm	17 dBm	19.5 dBm
Certificaciones	FCC, IC & CE	FCC, IC, R&TTE, Australia, New Zealand, Korea, Taiwan and Japan	FCC, IC & European R&TTE	No especifica	CE, FCC, IC, MIC & KCC	FCC, IC & CE
RoHS	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Precio USD	\$ 9.41	\$ 17.48	\$ 17.82	\$ 6.95	\$ 10.23	\$ 24.95

■ **Acelerómetro,giróscopo y magnetómetro**

Son tres sensores distintos que se pueden conseguir por separado, pero Adafruit con el sensor *BNO055* integró estos tres componentes en una sola tarjeta. Se decidió elegir esta por dos cosas, la primera es que facilitaba la conexión y la segunda es que en la actualidad para este sensor existe gran cantidad de información disponible, bibliotecas para uso público, entre otros.

Cuadro 8. Comparación entre módulos IMU

Módulo IMU				
Características	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Fabricante	Microchip	STMicroelectronics	NXP Semiconductors	Adafruit
Referencia	MM7150	GY-801	MMA7455	BNO055
Descripción	Acelerómetro, magnetómetro, giroscopio, MCU para coprocesamiento	Acelerómetro, magnetómetro, giroscopio y barómetro	Acelerómetro	Acelerómetro, magnetómetro, giroscopio, MCU para coprocesamiento
Rango de voltaje	3.3V	3V a 5V	2.4V a 3.6V	3.3V a 5V
Dimensiones mm	17 x 17	25.8 x 16.8	No especifica	26.67 x 20.32
Protocolo serial	I2C	I2C	I2C & SPI	I2C & UART
Precio	\$ 24.77 USD	\$ 53.550 COP	\$ 16.000 COP	\$ 34.95 USD

- **Display** El gran problema que se encontró en los Display's es su alto costo y su gran tamaño, aunque finalmente se encontró uno que cumpliera las restricciones de tamaño y bajo precio.

Cuadro 9. Comparación entre Displays

Display				
Características	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Fabricante	Newhaven Display		Adafruit	Solomon Systech
Referencia	NHD-C0220AZ-FSW-FTW	NHD-2.7-12864UCY3	2674	SSD1306 OLED
Voltaje de operación	5V	5V	5V	3.3V
Dimensiones mm	74.5 x 25 x 6.2	66 x 33	68 x 60	27 x 27 x 4.1
Caracteres	20 x 2	128 x 64	128 x 64	128 x 64
Tipo	Transflectivo	OLED	Monocromático	OLED
Protocolo serial	8 bits	8 bits, SPI	SPI	SPI
Precio	\$ 10.25 USD	\$ 12.3 USD	\$ 49.95 USD	\$20.000 COP

■ Regulador

Para la selección del regulador se tuvo en cuenta la corriente de salida, de tal manera que se permita la correcta alimentación de todos los componentes presentes en la tarjeta, el empaquetado, para que se pudiera ensamblar sin dificultad, el voltaje dropout y el máximo voltaje permitido, el cual a su vez nos dará una idea del voltaje máximo permitido para la batería.

Cuadro 10. Comparación entre reguladores de 3.3V de salida

Regulador 3.3V					
Características	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Fabricante	Texas Instruments		Microchip	STMicroelectronics	Diodes Inc
Referencia	REG113EA-3.3/250	LP3982IMM-3.3/NOPB	MIC5239-3.3YMM	LD1117S33CTR	AZ1117EH-3.3TRG1
Voltaje de salida	3.3V	3.3V	3.3V	3.3V	3.3V
V. Dropout (max)	0.41V @ 400mA	0.22V @ 200mA	0.35V @ 500mA	1.2V @ 800mA	1.1V @ 1A
Voltaje de entrada (max)	10V	6V	30V	15V	13V
Corriente de salida	400mA	300mA	500mA	800mA	1A
Empaquetado	VSSOP-8	VSSOP-8	MSOP-8	SOIC-8 & SOT-223	SOT-223
Precio USD	\$ 3.17	\$ 0.66	\$ 2.79	\$ 0.46	\$ 0.43

■ Batería

Para la elección de la batería, más allá de elegir entre una referencia u otra, se elegirá la composición química de esta, pues de esta elección depende el desempeño y tamaño del dispositivo portable.

Existen tres atributos importantes en cualquier batería [13]:

1. Densidad de energía (tamaño)
2. Ciclos carga/descarga (ciclo de vida)
3. Capacidad (duración operacional sin presencia de un adaptador AC)

A continuación se presentan dos tablas comparativas que permiten determinar las ventajas y desventajas de cada opción.

Cuadro 11. Comparación de baterías 1. Tomado de [13]

Química	Peso de densidad de energía (W-hr/Kg)	Volumen de densidad de energía (W-hr/L)	Voltaje de operación (V)	Voltaje en circuito abierto (V)	Voltaje final (V)	Voltaje de carga (V)
Alcalina	145	400	1,2	1,6	0,9	NA
SLA	30-40	50-80	2	2,25	1,75	2,8
NiCd	40-80	100-150	1,2	1,3	0,9	1,6
NiMH	60-100	160-230	1,2	1,3	0,9	1,5
Li-Ion	110-130	210-320	3,6	4,2	2,8	4,2

Cuadro 12. Comparación de baterías 2. Tomado de [13]

Química	Auto-descarga por mes (%)	Resistencia interna	Ciclos de carga/descarga	Tasa de descarga (mA-hr)	Temperatura de operación (°C)	Costo
Alcalina	0,3	100 -300	1	0.25C	-20 a +55	Muy bajo
SLA	2-8	2,5-25	50-500	<15C	-20 a +50	Bajo
NiCd	15-20	3.5-300	1500	<10C	-20 a +60	Bajo
NiMH	20-25	10-400	800	<3C	0 a +60	Medio
Li-Ion	6-10	50-500	1000	<2C	-20 a +60	Alto

Las baterías de Li-Ion son las ideales para aplicaciones portátiles, pero son un poco más costosas que las demás. Aunque las NiCd tienen mayor cantidad de ciclos de carga/descarga, las de Li-Ion tiene menor porcentaje de descarga por mes y el voltaje de operación es el mas adecuado para alimentar al sistema.

4.2.3. Cálculo de ancho de pistas y diámetro de vías

El cálculo de ancho de pistas se realizó teniendo en cuenta la norma IPC 2221 en la cual se debe conocer la corriente máxima que pasara por esta. De igual manera, se debe tener una noción del aumento de temperatura al que va a estar expuesta la tarjeta y finalmente la longitud del conductor. La fórmula es la siguiente:

$$I = K * dT^{0,44} * (W * H)^{0,725}$$

En donde:

I: intensidad máxima en amperios.

dT : aumento de temperatura sobre ambiente, en °C.

W,H : ancho y grosor en mils.

K : 0,024 para pistas internas y 0,048 para externas.

Es así, como se obtuvo un grosor de 0,5 mm para las pistas de alimentación (las que manejan más corriente) y 0,3 para las demás. Además, es necesario conocer cómo es el comportamiento de las señales entre más ancha o angosta sea la pista. Entre mayor sea el grosor de una pista, la señal tendrá menos resistencia y menos capacitancia, por tal motivo, se finalizó el diseño recubriendo tanto la capa de arriba, como la capa de abajo con zonas de cobre.

4.2.4. Estimado del consumo energético

Para hacer el estudio de consumo energético, se realizó un Power Budget en el cual se tiene en cuenta el peor caso para los componentes, es decir, se toma el máximo consumo de corriente según la hoja de datos, dicho análisis se presenta en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Aproximación del consumo energético de InLo.

Voltaje de operación	3.3V	Tiempo de operación	Continuo	Rango de temperatura	0°C a +70°C
Microcontrolador (PIC32MZ2048EFM100-I/PF)	Corriente Máxima de consumo	150 mA	Potencia Máxima de consumo	0.495 W	
Módulo BLE (RN4870-V/RM118-ND)		13 mA en Rx		0.042 W en Rx	
Módulo Wi-Fi (RN1810-I/RM100-ND)		64 mA en Rx		0.211 W en Rx	
Oscilador (ASDMB-24.000MHz-LC-T)		15 mA		0.049 W	
Memoria flash (SST25VF010A-33-4I-SAE-T)		10 mA		0.033 W	
Display (OLED 0.96")		40 mA		0.132 W	
IMU (BNO055)		20 mA		0.066 W	
TOTAL Corriente/h Y Potencia/h		312 mA			1.028 W

Como se puede observar, la potencia consumida por la tarjeta P_T es de 1.028W.

Se debe aclarar que para este cálculo únicamente se tomaron los componentes más relevantes de la tarjeta en cuanto a consumo de corriente se refiere, por tal motivo, los resultados teóricos corresponden a un valor aproximado que más adelante será contrastado con lo medido experimentalmente. Para saber cuánto tiempo duraría en funcionamiento la tarjeta antes de que se agote la alimentación se realizó el siguiente cálculo:

La batería que se utiliza es un power bank de 5V a 10000mAh. Por tanto, la potencia de la batería P_B es igual a:

$$P_B = 5V \cdot 10000mAh$$

$$P_B \text{ batería} = 50Wh$$

Por tanto, el tiempo de duración de la batería T_B está definido por:

$$T_B \approx \frac{P_B}{P_T}$$

$$T_B \approx \frac{50Wh}{1,028Wh}$$

$$T_B \approx 50 \text{ horas}$$

En conclusión, el sistema con una batería de 50Wh funciona aproximadamente por 50 horas.

4.2.5. Diseño de esquemáticos

Tal como se observa en la figura 25, el esquemático fue desarrollado con formato multihoja con el objetivo de mantener el orden y el entendimiento del proyecto. Las hojas en las que se puede ingresar son: Alimentación, MCU, Bluetooth Low Energy, Wi-Fi, Display, Pulsadores, IMU y Memoria Flash. Como se puede observar, a cada hoja se le conecta el cable de color verde el cual indica el voltaje de alimentación.

Se utilizó el software Kicad para la realización de la tarjeta debido a que es fácil de utilizar, intuitivo, permite visualización en 3D de la tarjeta y es de libre acceso [4].

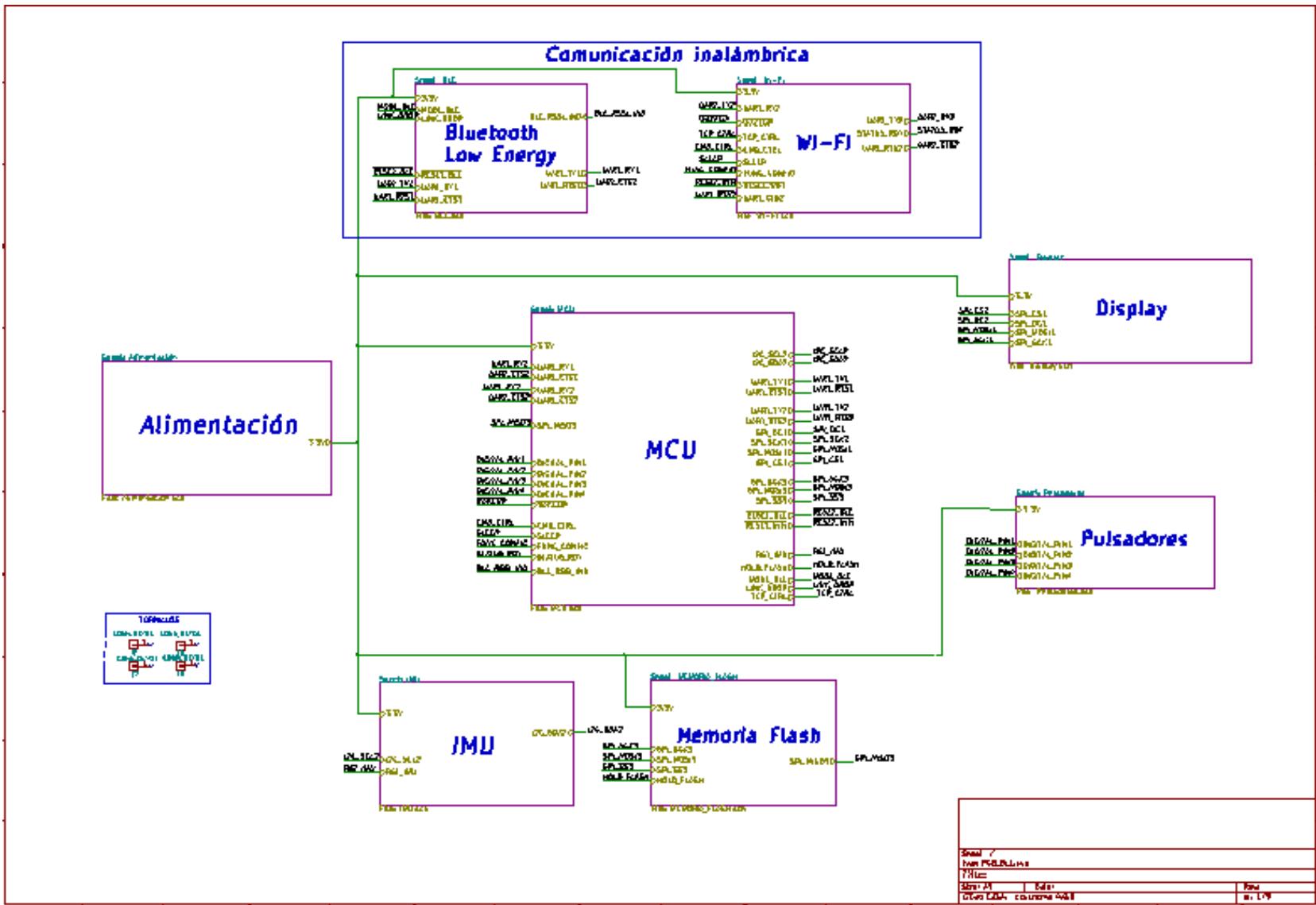


Figura 25. Esquema multihoja en Kicad.

La hoja de alimentación (Ver Figura 26) básicamente contiene el conector USB (J1) que conecta a la batería, un switch (SW1) que permite la alimentación de todo el sistema, un regulador de 5V de entrada y 3.3V de salida (U2), condensadores (C1 y C2) que cumplen la función de limpiar la señal de todo ruido posible y ajustar el voltaje. Por último, se puede observar un LED (POWER_LED1) con su correspondiente resistencia (R1) el cual indica cuando la tarjeta está alimentada.

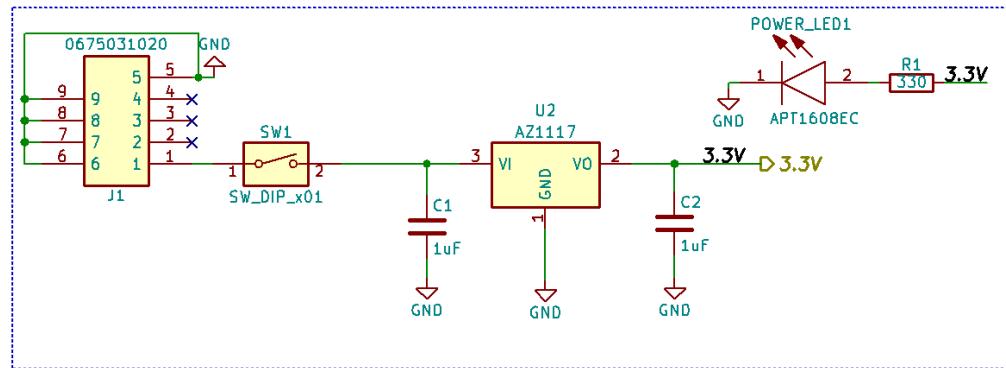


Figura 26. Esquemático de alimentación.

En la Figura 27 se puede observar el conector J11, el cual permite la comunicación USB entre la tarjeta y el computador. Esto es útil cuando se deseen ver todos los datos almacenados.

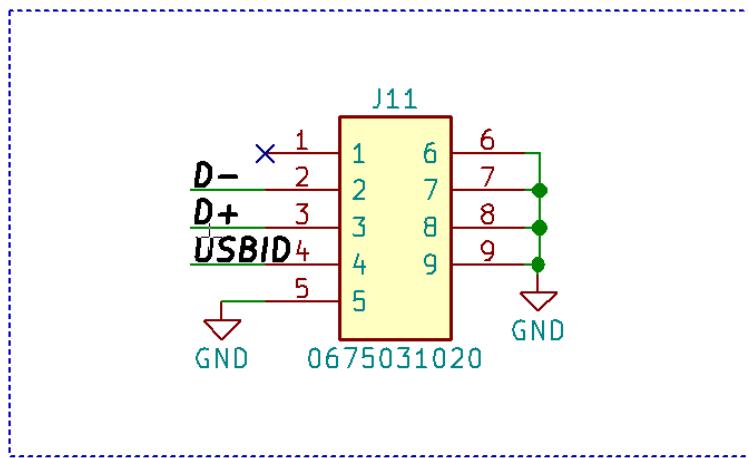


Figura 27. Esquemático del conector USB.

Los condensadores de desacople según la hoja de datos del MCU deben estar lo más cerca posible del microcontrolador debido a que son los encargados de eliminar las señales ruidosas y evitan cambios bruscos en el voltaje de alimentación. La ubicación de estos dentro de la tarjeta se puede observar en la Figura 47.

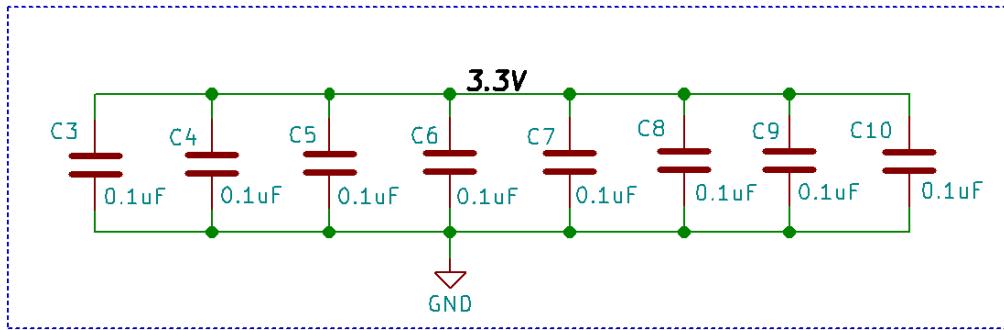


Figura 28. Condensadores de desacople del MCU.

Debido a que la tarjeta no cuenta con un programador interno (para ahorrar espacio), se colocó el conector J3, el cual permitirá la conexión con el pickit3.

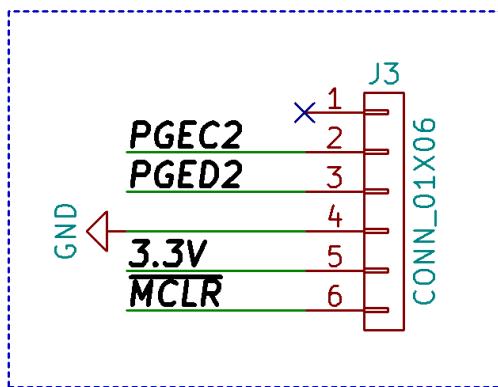


Figura 29. Conector para el programador.

A pesar de que el microcontrolador elegido cuenta con un oscilador interno de 12 MHz, el oscilador externo de 24MHz permite la comunicación USB ya que el interno se ve limitado.

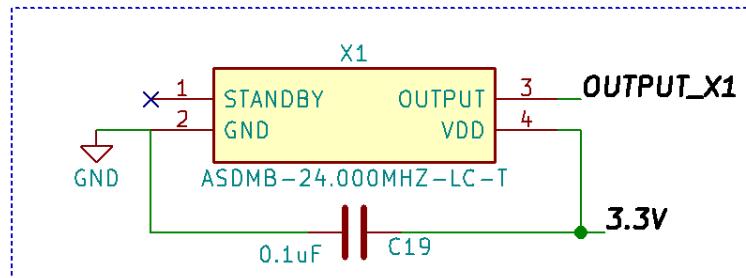


Figura 30. Esquemático del oscilador.

Se decidió dejar un conector libre J10 con pines de propósito general. Este conector se puede obviar en futuras versiones de InLo.

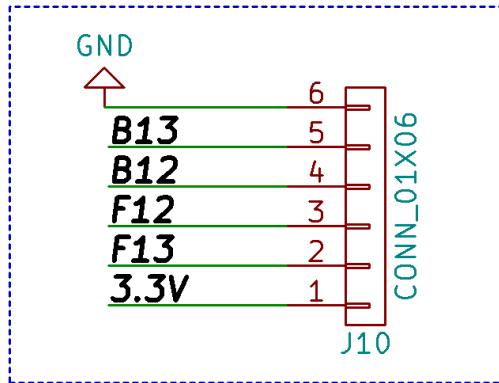


Figura 31. Conector de GPIO.

En la Figura 32 se puede observar el bloque del sensor IMU, el cual opera con el protocolo I2C, y la memoria flash, la cual utiliza SPI.

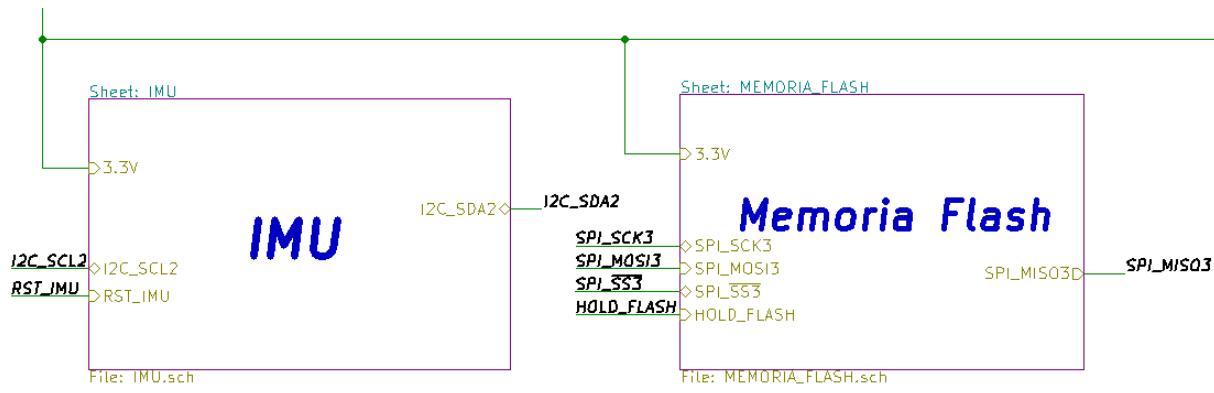


Figura 32. Conexiones del sensor IMU y de la memoria flash.

El sensor IMU necesita de dos conectores (J5 y J6), aunque el segundo solo sea utilizado para que este quede fijo a la tarjeta.

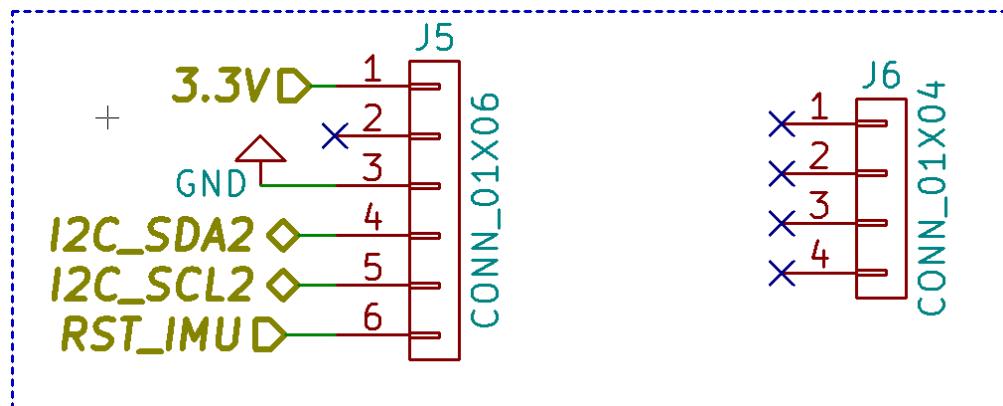


Figura 33. Esquemático del sensor IMU.

La memoria flash de 1MB simplemente fue colocada para dar soporte a la memoria interna del MCU en caso de que esta se quede corta en algún momento.

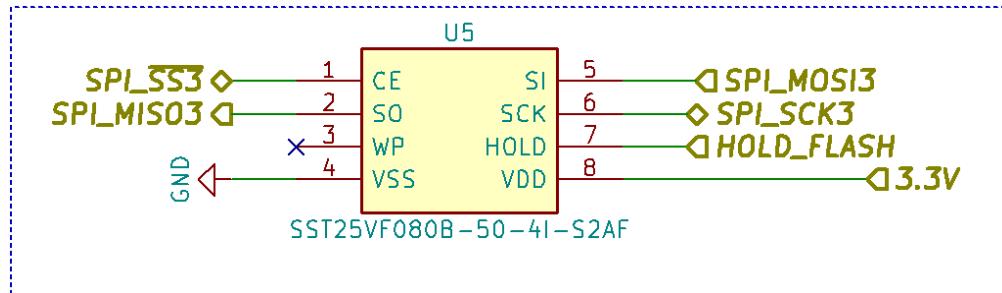


Figura 34. Esquemático de la memoria flash.

Para los pulsadores, como se puede observar en la Figura 35, se utilizaron pines digitales del MCU.



Figura 35. Conexiones de pulsadores.

La conexión de los pulsadores se realizó con resistencias de pull-up, las cuales establecen un estado lógico. Para el correcto uso de los pulsadores, es necesario agregar mediante software un algoritmo para el anti-rebote.

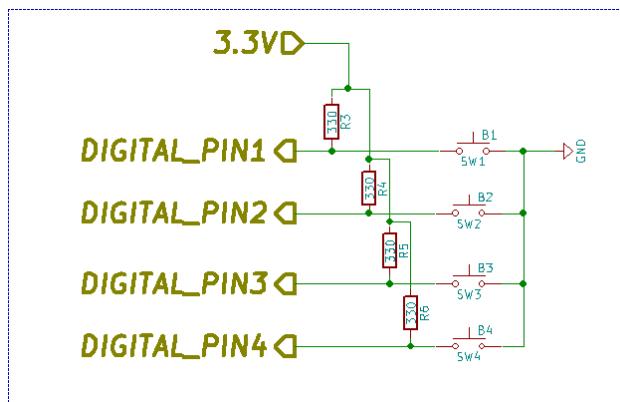


Figura 36. Esquemático de los pulsadores.

El display seleccionado se caracteriza por funcionar mediante comunicación serial SPI, en este caso, además del pin de reloj, el de datos y el de selección, se tiene el pin de comandos, el cual, cuando se active indicará que se enviará un comando al display, de otra manera, no será comando sino un dato.

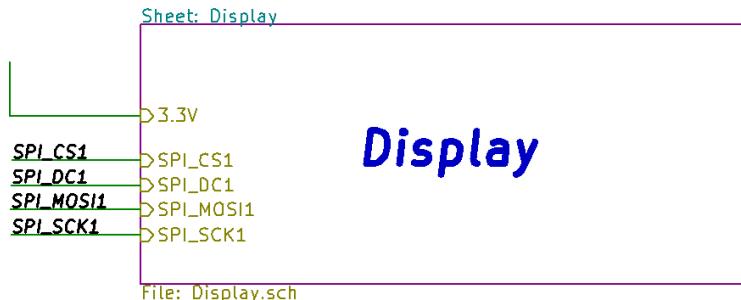


Figura 37. Conexiones del Display.

Lo único que se necesita para el display es un conector de 6 pines o también puede ir soldado directamente a la tarjeta.

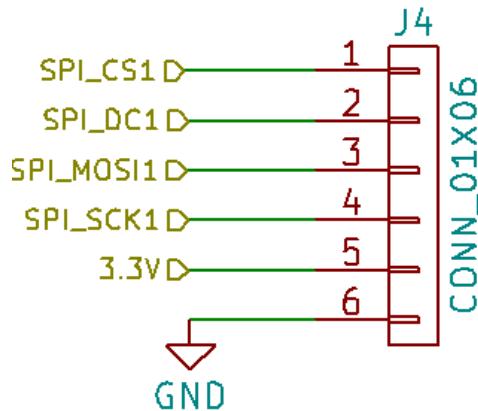


Figura 38. Conector del display.

Como se ha mencionado anteriormente, los módulos de comunicación inalámbrica que se tienen son el BLE y el Wi-Fi. Cada uno de estos opera mediante el protocolo UART.

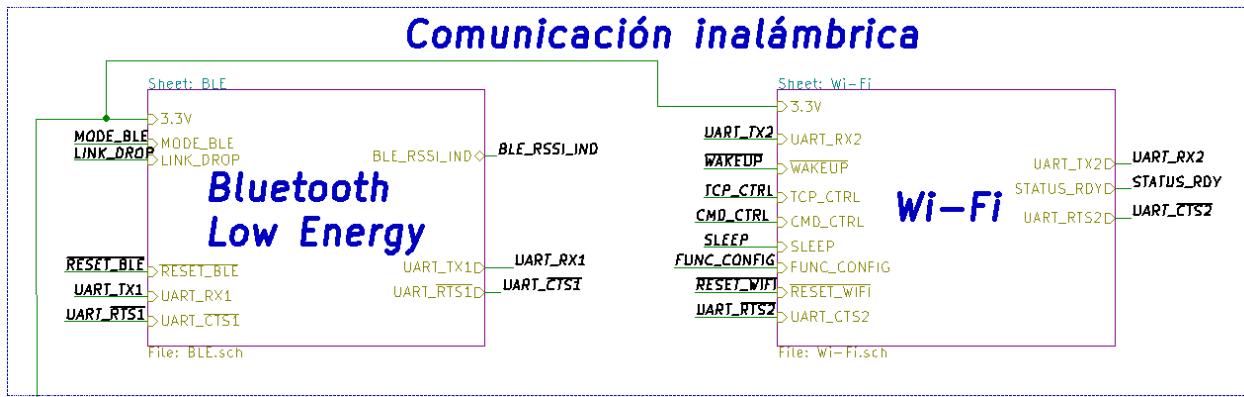


Figura 39. Conexión de los módulos inalámbricos.

El esquemático del módulo BLE, según su hoja de datos, se aconseja utilizar resistencias de pull-up en el pin de reset. El LED va en la dirección observada en la Figura 40 indicando cuando el módulo esté alimentado y por último, cuenta con un condensador el cual cumple la función de eliminar el ruido y no permitir cambios bruscos en voltaje, lo que puede dañar el módulo.

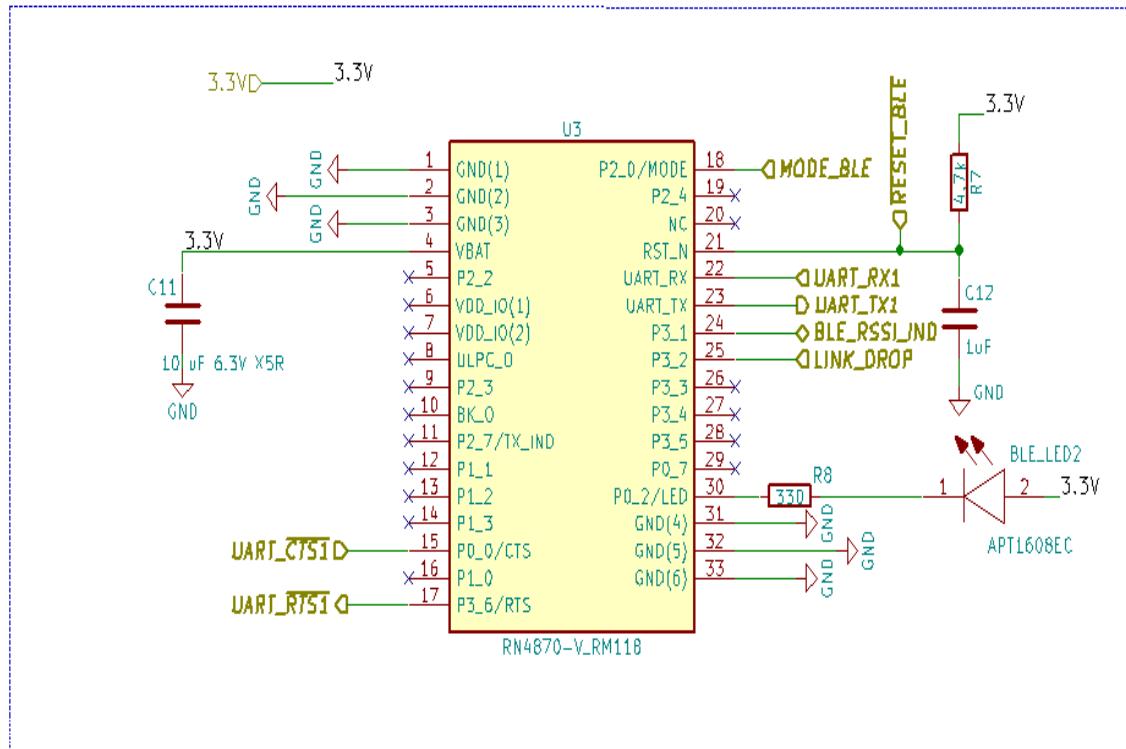


Figura 40. Esquemático del módulo BLE.

Por último, el módulo Wi-Fi, al tener varios pines de alimentación, se hace necesario colocar condensadores de desacople en cada uno de estos. También cuenta con un LED el cual indica cuando el módulo está alimentado y resistencias de pull-up en los pines de TX y reset.

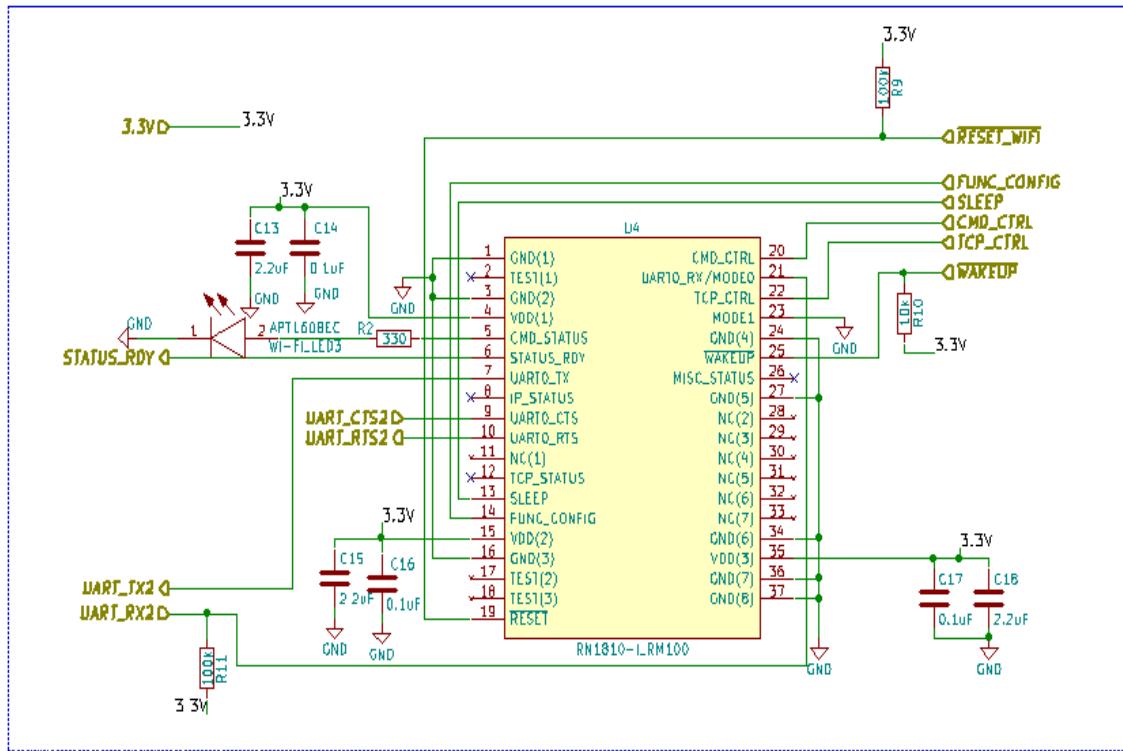


Figura 41. Esquemático del módulo Wi-Fi.

4.2.6. Resultados del diseño

Las huellas para los componentes se diseñaron bajo la norma IPC 7351, densidad nivel B (ver Figura 19), debido a que la tarjeta es de propósito general, con el fin de tener filetes de soldadura confiables, fijos y robustos. Según la norma IPC 2221, la clasificación del producto depende directamente del uso final que se le de a este. Dependiendo de la complejidad del producto, se le asigna una clase.

InLo pertenece a la Clase 2, esta se caracteriza por ser de productos de electrónica profesional o de servicio dedicado en donde el rendimiento es necesario pero no es crítico. En cuanto a la producibilidad, esta depende directamente de la complejidad del diseño y de la precisión requerida en su producción. El nivel de producibilidad, según la norma es de tipo A, ya que es la estándar y la más común en fabricantes de tarjetas de Latinoamérica.

La tarjeta fue finalizada colocandole dos zonas de cobre, una por cada capa, para que así se cree un retorno cercano a las diferentes pistas y evitar al máximo interferencias electromagnéticas entre señales, en algunos casos, las zonas de cobre sirven para disminuir la impedancia. De esta manera se acopla el campo eléctrico y se disminuye el campo magnético.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que entre mas vias tenga una tarjeta, habrá mas resistencia, más capacitancia y más inductancia, y esto no sería lo ideal.

La ubicación de los módulos de radiofrecuencia debe hacerse con precaución y se debe tener

en cuenta las recomendaciones que se hacen en las hojas de datos, ya que generalmente aconsejan cómo se deben ubicar los módulos dentro de un PCB para que tengan mejor desempeño. En éste caso las recomendaciones que se siguieron fueron las siguientes:

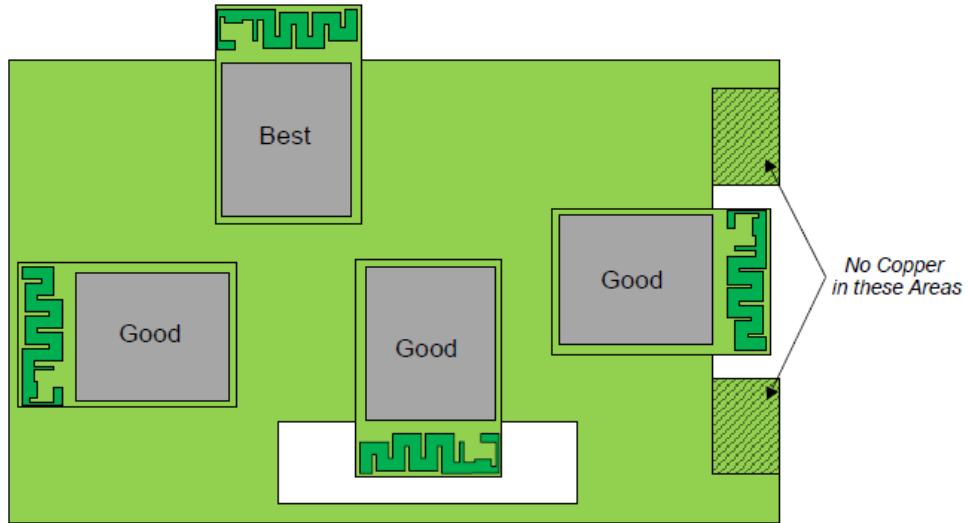


Figura 42. Recomendaciones para ubicación del módulo Wi-Fi.

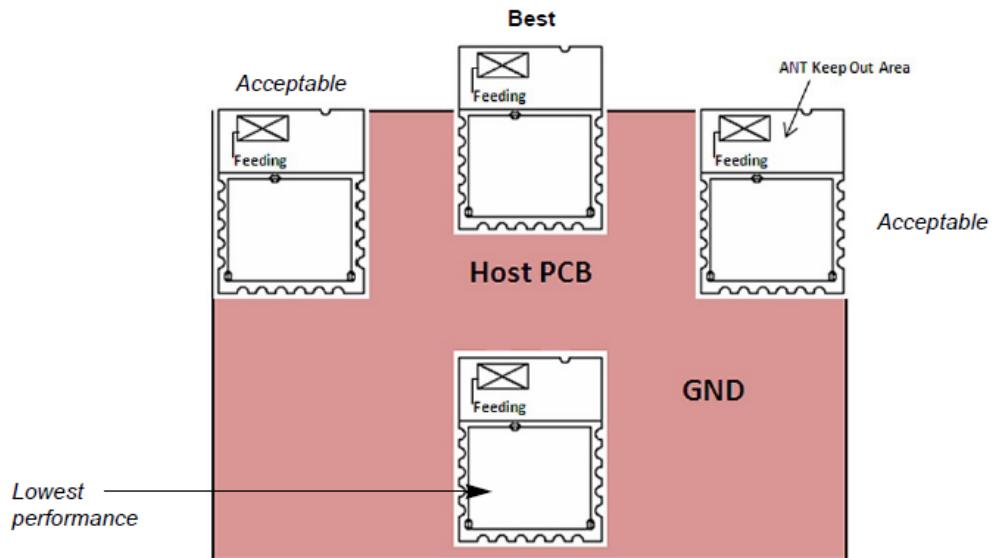


Figura 43. Recomendaciones para ubicación del módulo BLE.

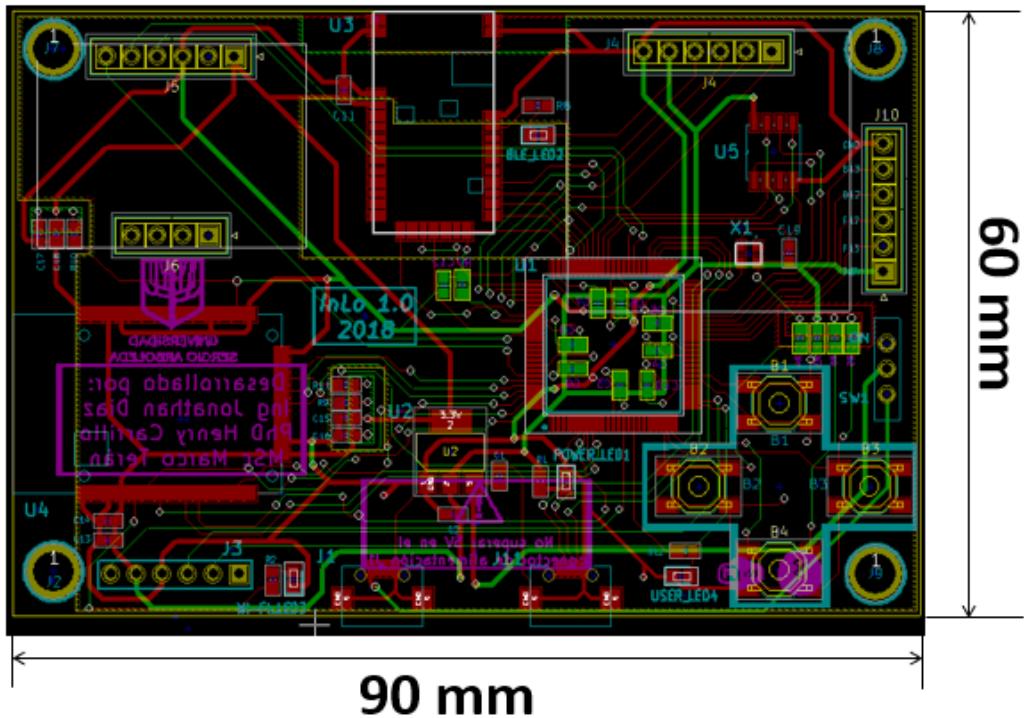


Figura 44. Diseño de PCB en Kicad.

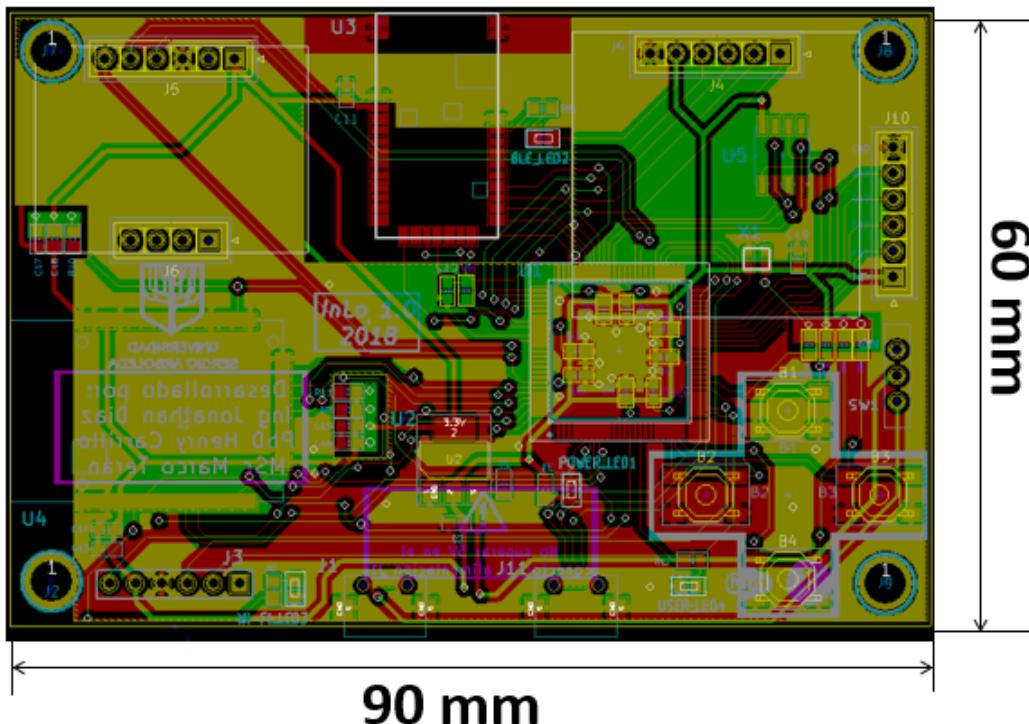


Figura 45. Diseño de PCB con zonas de cobre GND.

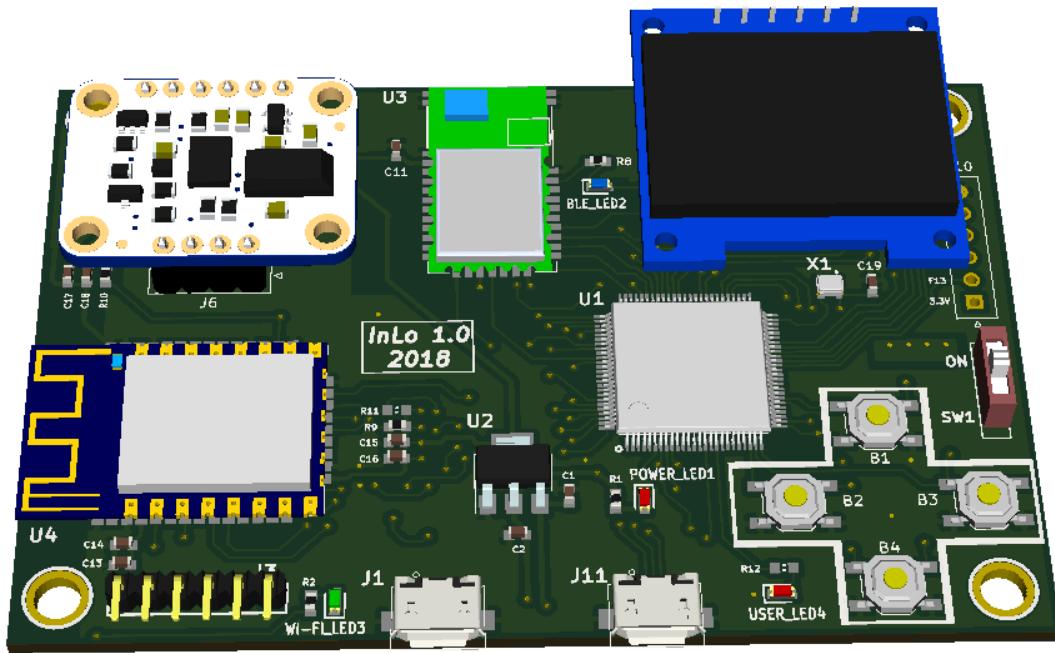


Figura 46. Renderización 3D en Kicad del PCB ensamblado, parte superior.

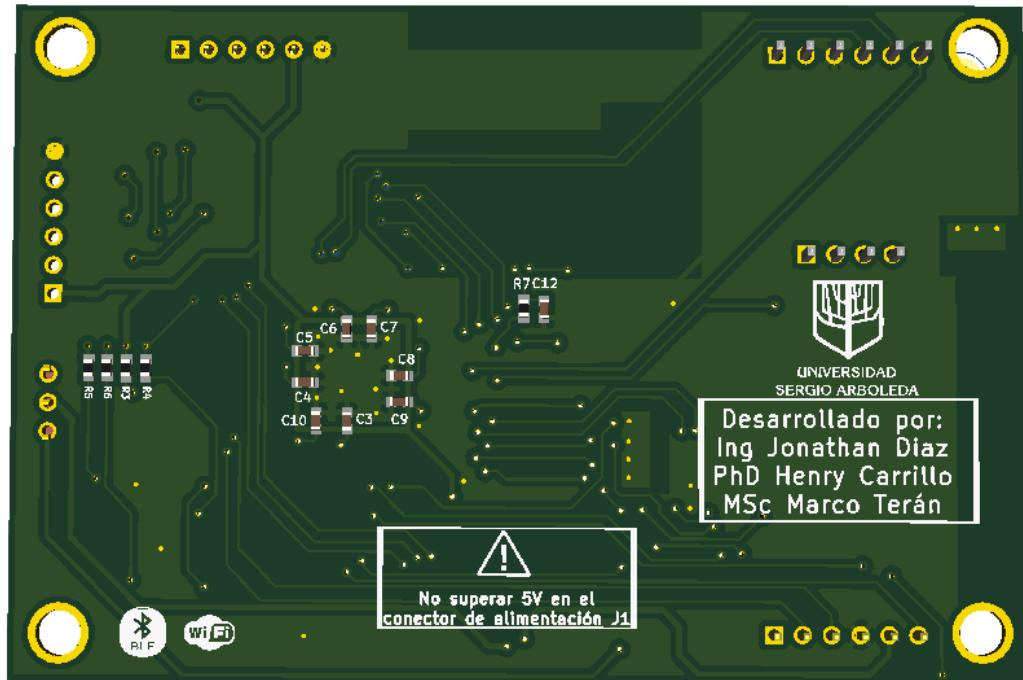


Figura 47. Renderización 3D en Kicad del PCB ensamblado, parte posterior.

El costo de el proyecto se especifica en la lista de materiales (BOM, ing. Bill of materials) que se encuentra en el capítulo 8.

4.2.7. Almacenamiento de datos

InLo cuenta con capacidad de almacenamiento por parte del MCU de 2 MB y de la memoria flash externa de 1 Mbit. Es decir, tiene gran capacidad de almacenamiento para los datos de RSSI y MAC tanto para Wi-Fi como para BLE y los datos de la IMU. Además, la idea es que estos datos no se queden almacenados en la tarjeta, sino que se envíen a un servidor por medio del módulo WI-FI y éste si pueda almacenar los registros durante meses.

4.2.8. Ensamble

El ensamblaje de la tarjeta se realizó de forma manual debido a temas de costos y tiempo. El único componente que no se pudo soldar fue el cristal por el empaquetado QFN, pero aún sin el componente la tarjeta funciona ya que el MCU cuenta con un oscilador interno. Para el ensamblaje manual, principalmente se requiere de habilidad y contar con las herramientas necesarias, también se debe conocer la temperatura a la que pueden estar sometidos los módulos ya que si esto no se cumple, se corre el riesgo de que no funcionen correctamente.

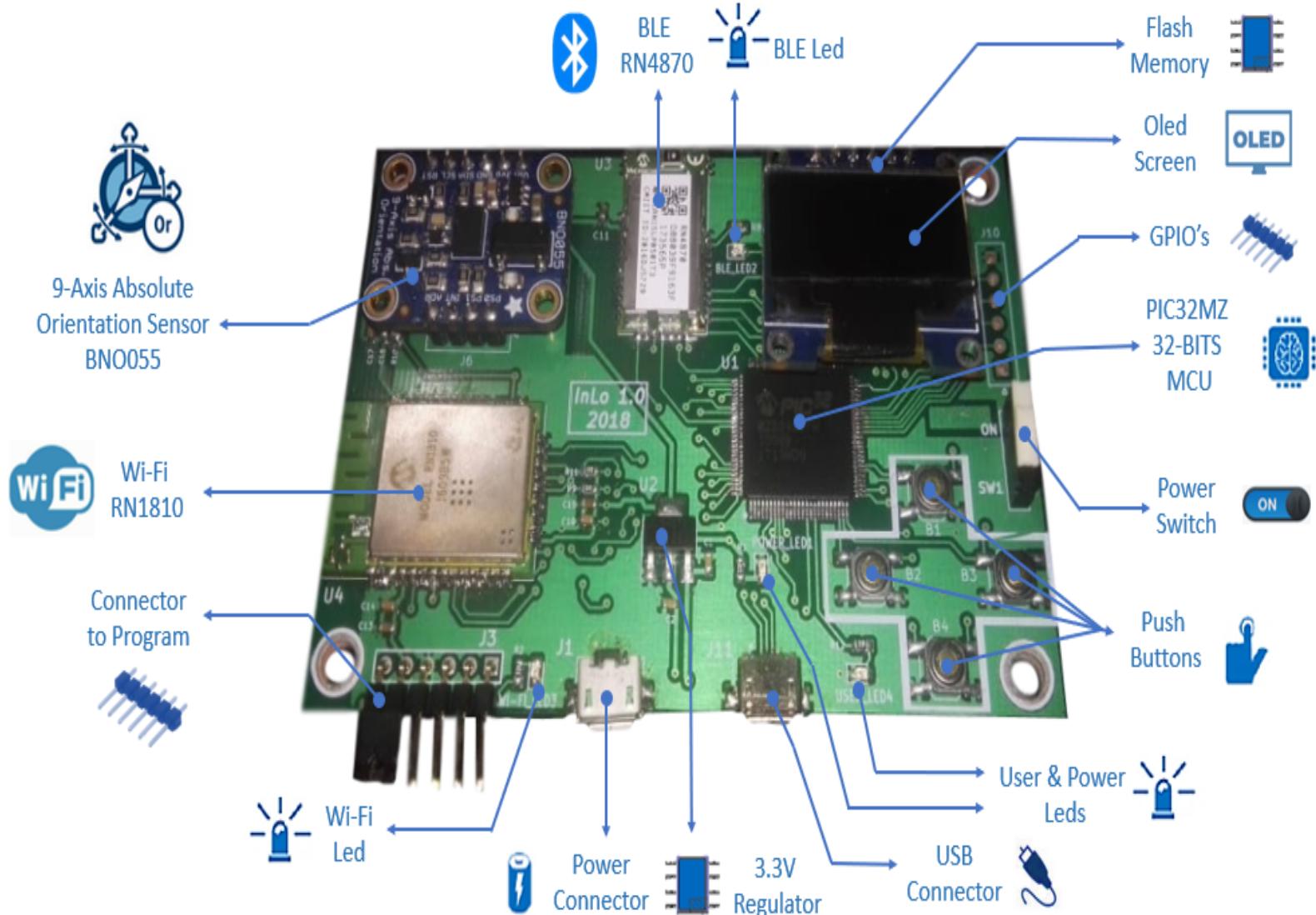


Figura 48. Características de InLo.

5. Pruebas y experimentos realizados al prototipo

5.1. Pruebas del prototipo

Este capítulo es uno de los más importantes de este trabajo, ya que es necesario realizar pruebas para que en dado caso de que la tarjeta presente algún fallo, se pueda concluir por qué sucedió y qué se podría hacer para que no volviera a suceder. Con lo anterior se facilitaría el diseño de una segunda versión, basados en un prototipo ya realizado.

A continuación se listan las pruebas mas relevantes que se le realizaron al prototipo antes del ensamble, despues del ensamble y finalmente las pruebas de aplicación.

5.1.1. Pruebas antes del ensamble

- Verificar que los pads no estén solapados a las vías.
- Verificar que el PCB se encuentre en buenas condiciones (que no esté doblado).
- Verificar que los antisolder no estén solapados.
- Verificar que todas las pistas tengan continuidad, desde el inicio hasta el fin de la pista.

5.1.2. Pruebas después del ensamble

- Verificar la calidad de los puntos de soldadura.
- Verificar que no haya componentes incorrectos, invertidos o levantados.
- Verificar continuidad con los pines de los componentes sin alimentación.
- Verificar que se encienda un LED luego de alimentar la tarjeta.
- Verificar que el voltaje a la entrada de los componentes sea adecuado.
- Verificar el punto de prueba de 3.3V.
- Verificar el voltaje de salida del regulador.

5.1.3. Pruebas de aplicación

- Verificar la comunicación serial de los periféricos, I2C 1, I2C3, UART 1, UART 2, SPI 1 y SPI 2.
- Mostrar algún dato en el display.
- Obtener datos de la potencia RSSI de los módulos inalámbricos y mostrarlos en el display.
- Configurar y comprobar el módulo IMU.
- Guardar datos en la memoria flash y visualizarlos mediante USB en un PC.

5.2. Implementación del software para pruebas

Las pruebas de los módulos se realizaron por medio de una máquina de estados (ver Figura 49 y Tabla 14), la cual permite principalmente la adquisición y visualización de los datos por medio del accionamiento de los 4 botones que están presentes en la tarjeta.

Inicialmente, en el estado S0 se muestra un menu con tres opciones, 1.RSSI BLE, 2. RSSI Wi-Fi, 3. Datos IMU. Al entrar en cualquiera de estas opciones, se puede regresar al menú principal presionando uno de los botones.

Cuadro 14. Descripción de la simbología en la máquina de estados

Estado	Condición	Acción
S0	C0: encender Switch	A0: imprimir menú en LCD, Estado= S0.
	C1: oprimir B1	A1: imprimir MAC y RSSI recibidos por BLE, Estado= S1.
	C2: oprimir B2	A2: imprimir MAC y RSSI recibidos por Wi-Fi, Estado= S2.
	C3: oprimir B3	A3: imprimir ángulos en ejes X,Y,Z, Estado= S3.
S1,S2 & S3	C4: oprimir B4	A4: imprimir menú en LCD, Estado= S0.

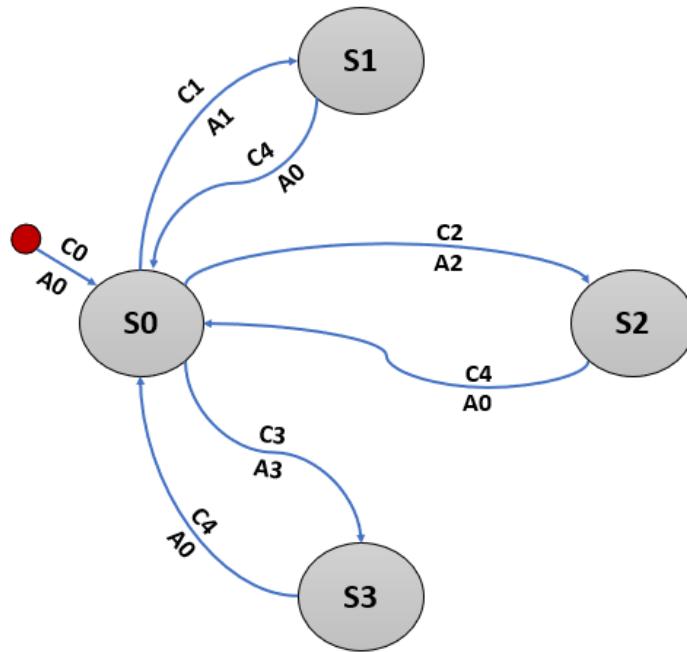


Figura 49. Máquina de estados para la realización de las pruebas.

Según lo anteriormente expuesto, el estado inicial se vería tal como en la Figura 50 en el display.

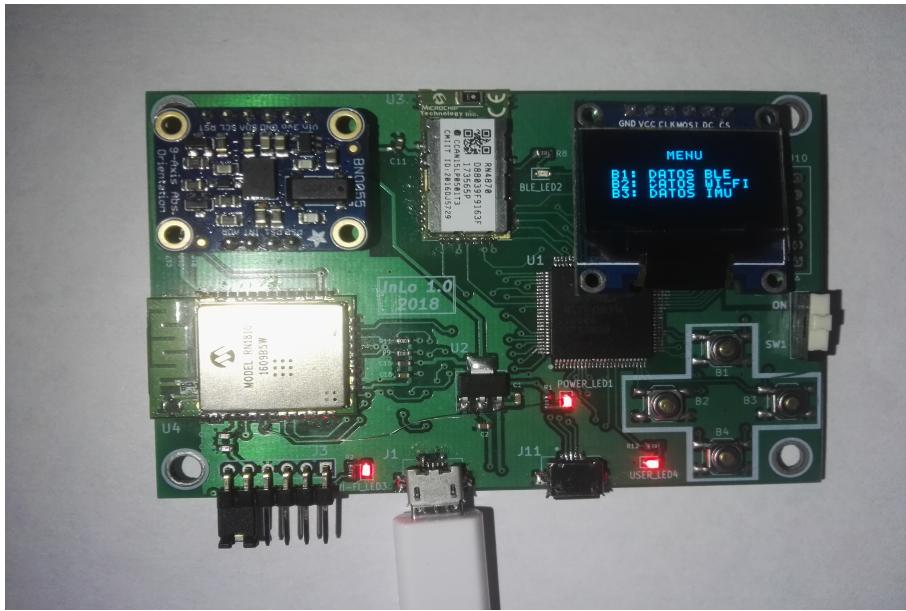


Figura 50. Estado inicial en InLo.

5.3. Experimentos y análisis

Los experimentos realizados se basan principalmente en la adquisición de datos de los módulos Wi-Fi, BLE e IMU. Intrínsecamente se usan los demás componentes como el display para mostrar los datos, la memoria para el almacenamiento y los pulsadores para la elección de opciones.

5.3.1. Experimentos para Wi-Fi

Los datos que se extraen y almacenan correspondientes al Wi-Fi son la MAC, el valor de RSSI y el SSID (ver Figura 51), este último con el objetivo de identificar el nombre del router del que se adquiere la información y así poder identificarlo fácilmente. Dicho módulo realiza la lectura de varias redes pero no realiza el preprocesamiento para organizarlas de la más cercana a la más lejana. Éste sería el primer paso a llevar a cabo a la hora de querer realizar un procesamiento con estos datos.

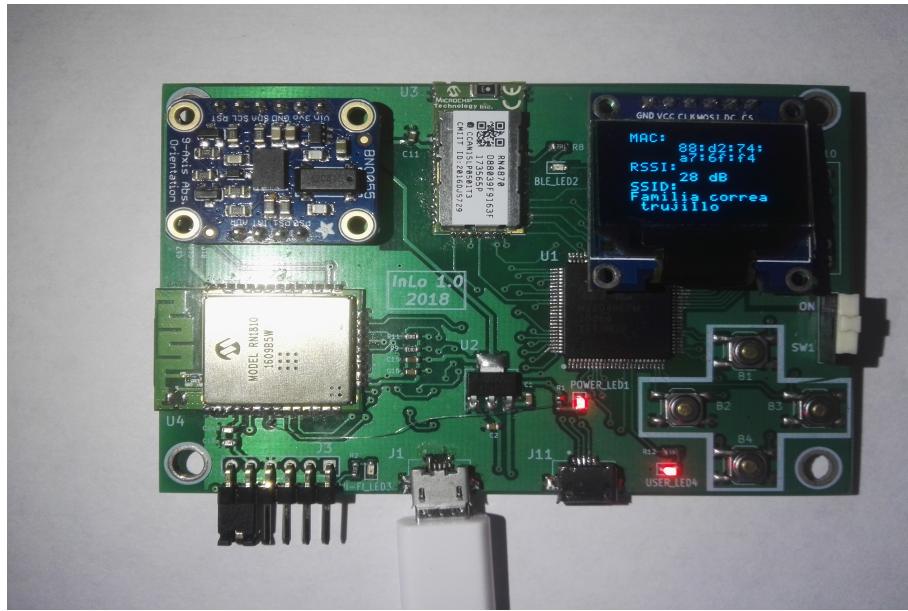


Figura 51. Lectura datos Wi-Fi.

En el primer experimento que se realizó, se tomaron mediciones de RSSI a diferentes distancias entre el punto de acceso Wi-Fi y la tarjeta, el módulo RN1810 de microchip, según su hoja de datos, entrega este valor en dB.

Como se puede observar en la Figura 52, los datos fueron tomados cada 20 cm, haciendo el promedio con 5 lecturas, cada 5 segundos para InLo y cada 1 segundo para el celular.

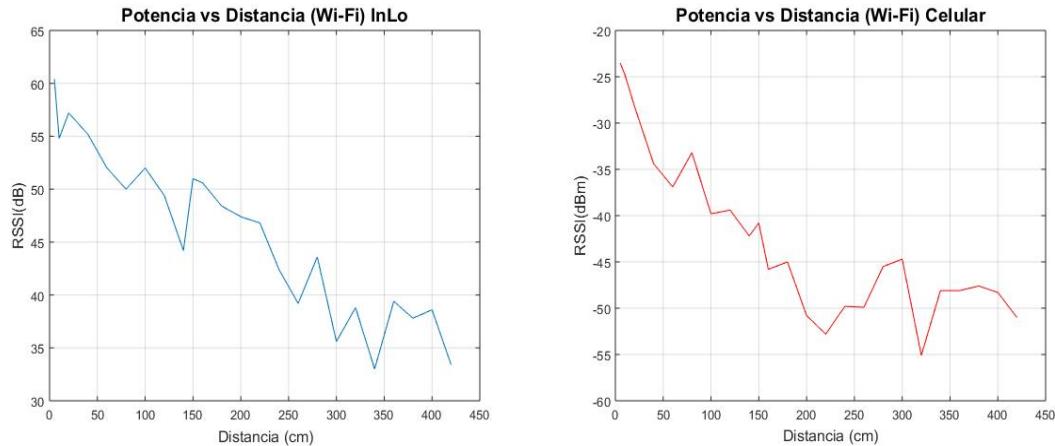


Figura 52. RSSI vs Distancia (Wi-Fi) - InLo.

En las Figuras 53, 54 y 55 únicamente se cambió la distancia de recepción, 1m, 2m y 4m respectivamente. Se tomaron 100 lecturas, con el objetivo de hallar la media aritmética y la dispersión de los datos por medio de una distribución Gaussiana.

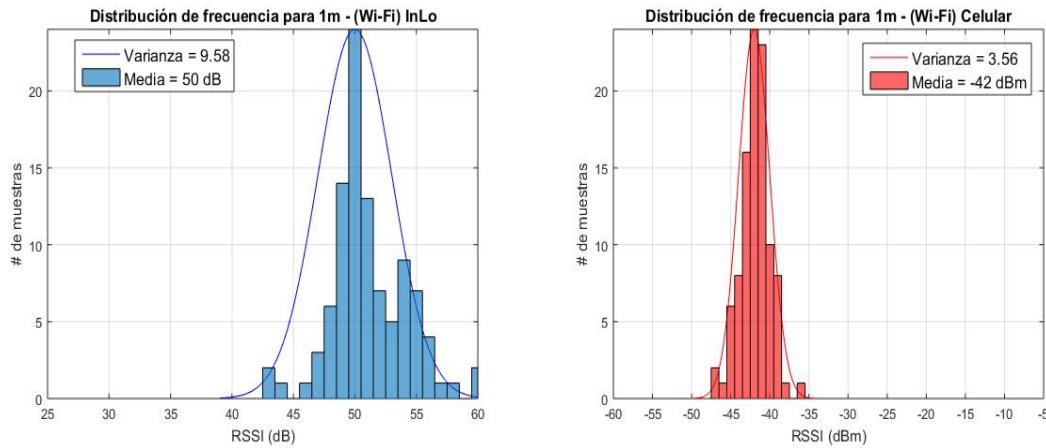


Figura 53. Distribución de frecuencia de Wi-Fi para 1m.

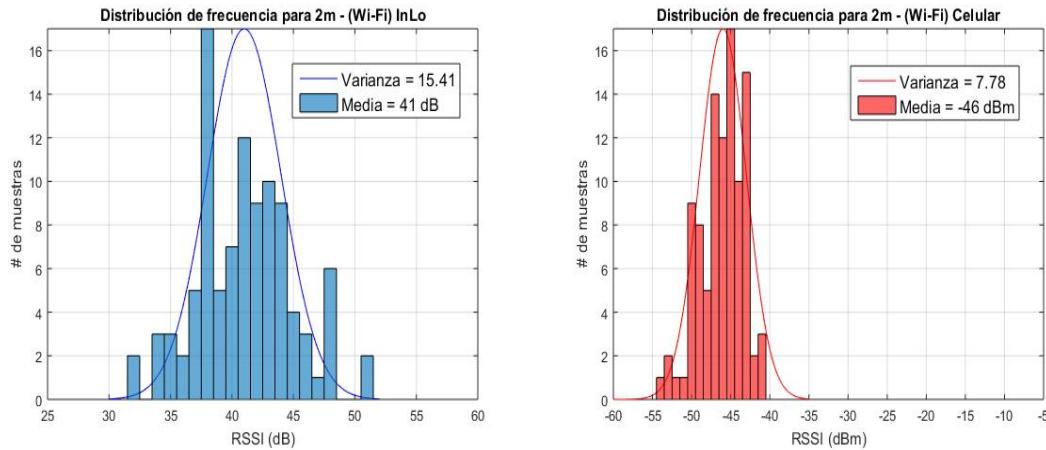


Figura 54. Distribución de frecuencia de Wi-Fi para 2m.

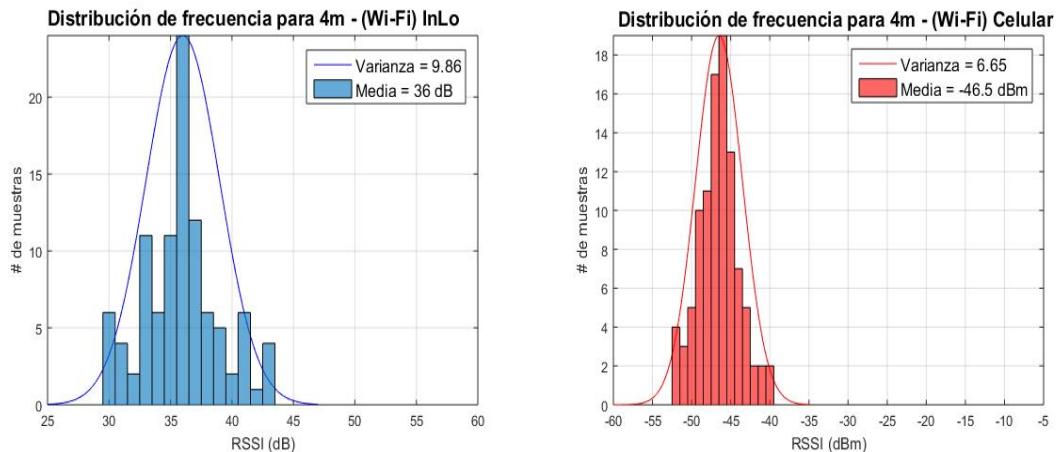


Figura 55. Distribución de frecuencia de Wi-Fi para 4m.

Análisis de los datos obtenidos por el módulo Wi-Fi

- Un aspecto que se debe mencionar es que en la fabricación de la tarjeta hubo un fallo en cuanto a la apertura de una vía, lo cual afectó directamente el funcionamiento del módulo Wi-Fi. Afortunadamente, se logró solucionar el problema con un cable externo que en pocas palabras le crea otro camino a la señal para su conexión con el microcontrolador.
- En las mediciones realizadas se detectó una anomalía. Pues, en la información del módulo RN1810 se especifica que los datos de RSSI que entrega son negativos y están en dB [37], mientras que el valor adquirido es positivo en dB. Al estar en dB es un valor relativo, por tanto, no está relacionado a valores de potencias [17] [23].

El formato en que se adquieren los datos desde el módulo a la hora de enviar el comando *SCAN* es el que se puede observar en la Tabla 15, siendo el valor de RSSI el tercero de izquierda a derecha:

Cuadro 15. Formato de respuesta del módulo Wi-Fi con el comando *SCAN*.

Index	Channel	RSSI	Security Mode	Capabilities	MAC Address	SSID
-------	---------	------	---------------	--------------	-------------	------

Los datos que se adquirieron en una lectura en un PC con la ayuda de un cable TTL a USB fueron los que se pueden observar en la Figura 56.

```
SCAN:Found 8
01,01,03,0142,0411,30:b5:c2:a3:2f:fa,PAULA Y DAVID
02,02,22,0142,0c11,88:d2:74:a7:6f:f4,Familia correia
trujillo
03,03,02,0163,0c11,30:99:35:9a:60:cf,DEYANDALY
04,08,08,0142,0c11,00:4a:77:49:10:58,Nelly
05,09,13,0142,0c11,88:d2:74:a8:7d:04,Andres Bolanos
06,10,13,0163,0c11,00:4a:77:49:71:c4,LAVERDE
07,11,40,0142,0c11,74:b5:7e:16:c4:74,FAMILIA DIAZ
08,11,13,0162,0411,c4:6e:1f:6a:1f:64,FAMILIA MARTINEZ
END:
```

Figura 56. Escaneo de redes Wi-Fi 2.

Por tanto, no se puede comparar las mediciones Wi-Fi con las de un celular, ya que las aplicaciones existentes permiten la lectura del valor RSSI únicamente en dBm, es decir, con referencia a 1mW. Para poder utilizar de manera adecuada dicho módulo, es necesario realizar una parametrización de los datos.

Aunque las mediciones no están con respecto a un valor definido de potencia, en el módulo Wi-Fi RN1810 también se puede observar el cambio de la señal RSSI con respecto a la distancia. De hecho, el problema con el RSSI es que, aunque sus valores están supuestamente expresados en dBm, en realidad el rango de valores representados pueden variar entre diferentes fabricantes y no están del todo estandarizados. Por ejemplo, existen algunos dispositivos de Cisco que entregan los datos en una escala de 0 a 100 [17].

- Otro análisis que se puede realizar es con respecto a las figuras 53, 54 y 55, la varianza en promedio del módulo RN1810 es de 11.61 frente a la varianza promedio del celular Huawei P8 de 5.99, recordando que en teoría se espera una varianza de cercana a 0, se concluye que la medición de la señal RSSI por parte de InLo tiene un poco más del doble de varianza con respecto a un celular, lo que se refiere directamente a una no tan buena precisión en las lecturas realizadas. En otras palabras, el celular es más preciso en un 193 % que InLo en la tecnología Wi-Fi.

5.3.2. Experimentos para BLE

En la Figura 57 se puede observar los datos de interés de la tecnología BLE para localización en interiores, en este caso se adquiere únicamente la MAC y el valor de RSSI dado en dBm. Es importante resaltar que en éste módulo se realiza un preprocesamiento interno con el objetivo de organizar las redes de la más cercana a la más lejana.



Figura 57. Lectura datos BLE.

En este experimento se tomaron mediciones de RSSI a diferentes distancias entre el *beacon* y la tarjeta, el módulo RN4870 entrega los datos de potencia en dBm, es decir, decibeles con referencia a 1mW. Como se puede observar en la Figura 58, los datos fueron tomados cada 20cm aproximadamente y para cada distancia, se hizo el promedio de 5 lecturas.

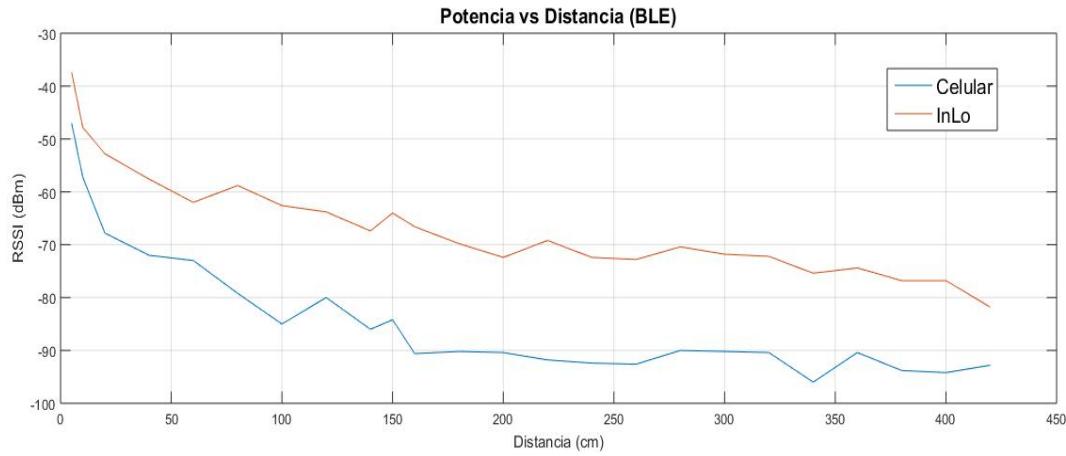


Figura 58. RSSI vs Distancia (BLE).

En las Figuras 59, 60 y 61 únicamente se cambió la distancia de recepción, 1m, 2m y 4m respectivamente. Se tomaron 100 lecturas, con el objetivo de hallar la media aritmética y la dispersión de los datos por medio de una distribución Gaussiana.



Figura 59. Distribución de frecuencia de BLE para 1m.

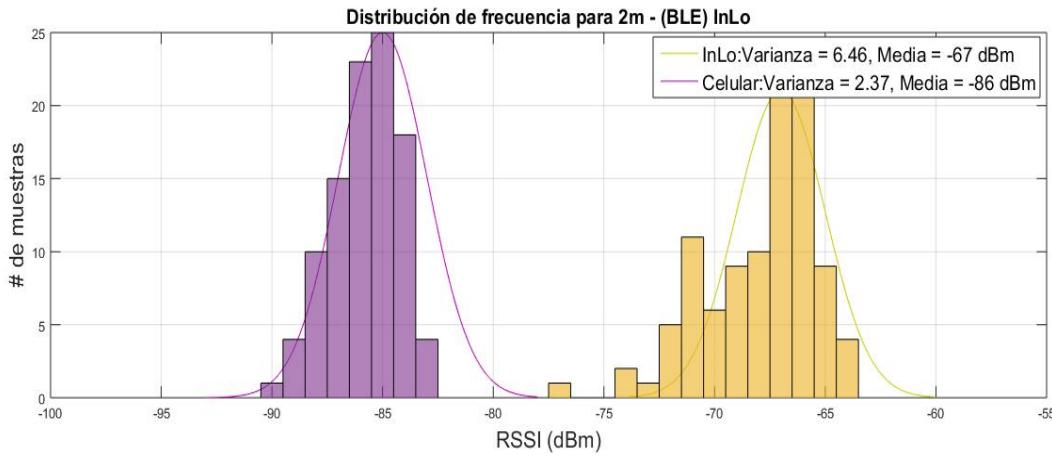


Figura 60. Distribución de frecuencia de BLE para 2m.

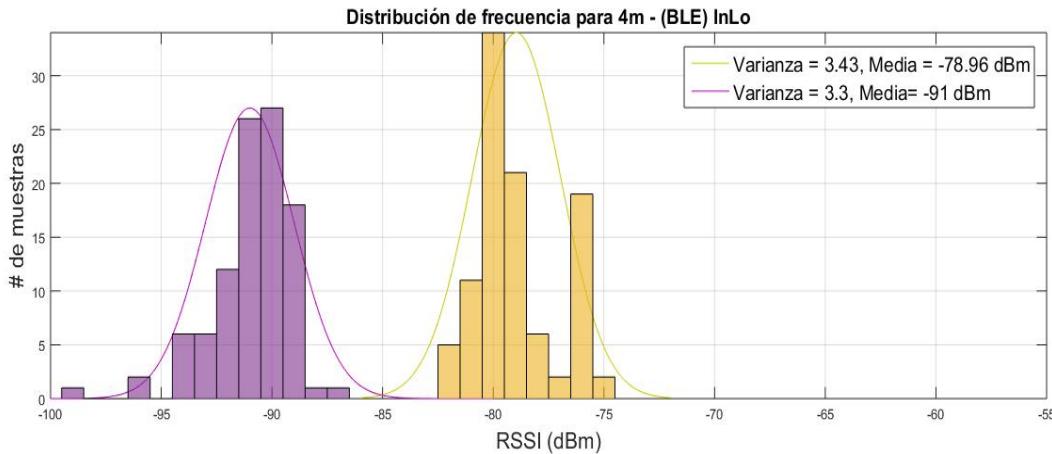


Figura 61. Distribución de frecuencia de BLE para 4m.

Análisis de los datos obtenidos por el módulo BLE

- Debido a que el módulo RN4870 sí permite hacer comparaciones con un celular, ya que arroja los datos de RSSI en dBm, se puede juzgar su desempeño. Antes que nada se debe aclarar que las lecturas de RSSI se realizan con respecto a la medida de potencia a 1 metro. En la Figura 58 se puede observar un desfase entre las lecturas del dispositivo desarrollado y las del celular. Lo anterior se debe principalmente a las pérdidas que se presentan en las comunicaciones de radiofrecuencia, también a las ganancias de las antenas y de hecho, también depende de los cambios en el escenario en el que se desarrolló el experimento.
- En promedio, la varianza de las lecturas de InLo es de 3.68 y del celular es de 4.27, por tanto, en principio, la tarjeta desarrollada cuenta con un módulo BLE que es más preciso en un 116 % que el celular en las mediciones realizadas.

5.3.3. Experimentos para IMU

Para este módulo las pruebas que se harán será únicamente en el eje Z debido a que es el eje que indica el sentido del movimiento desde la vista superior.

En el momento en que se enciende la tarjeta, el sensor IMU toma esa orientación como el origen. Se realizará la comparación con un transportador para tener un punto de comparación teórico. Se tomaron mediciones en varios ángulos, tal como se puede ver en las Figuras 62, 63 y 64.



Figura 62. Experimento con IMU a 0 grados.

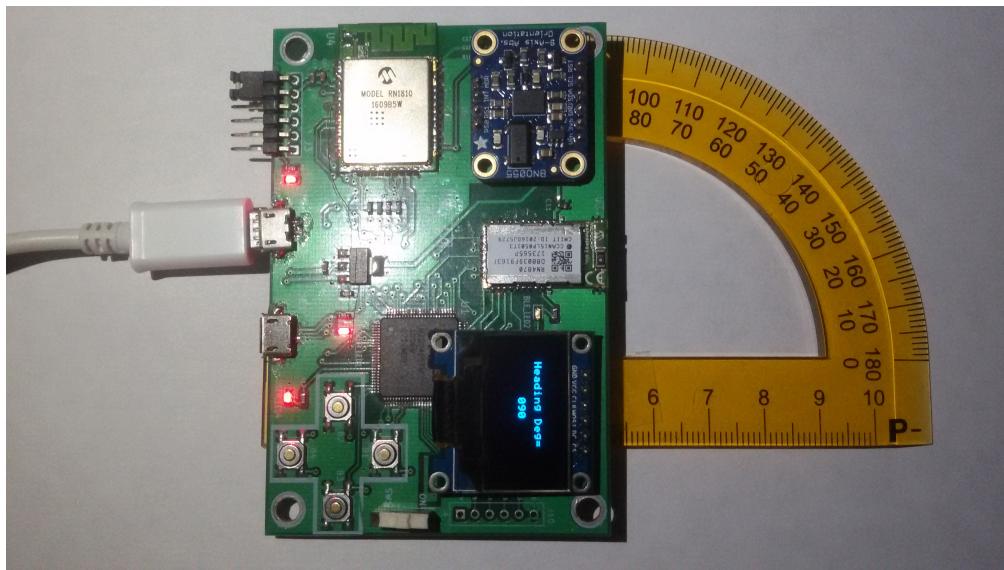


Figura 63. Experimento con IMU a 90 grados.

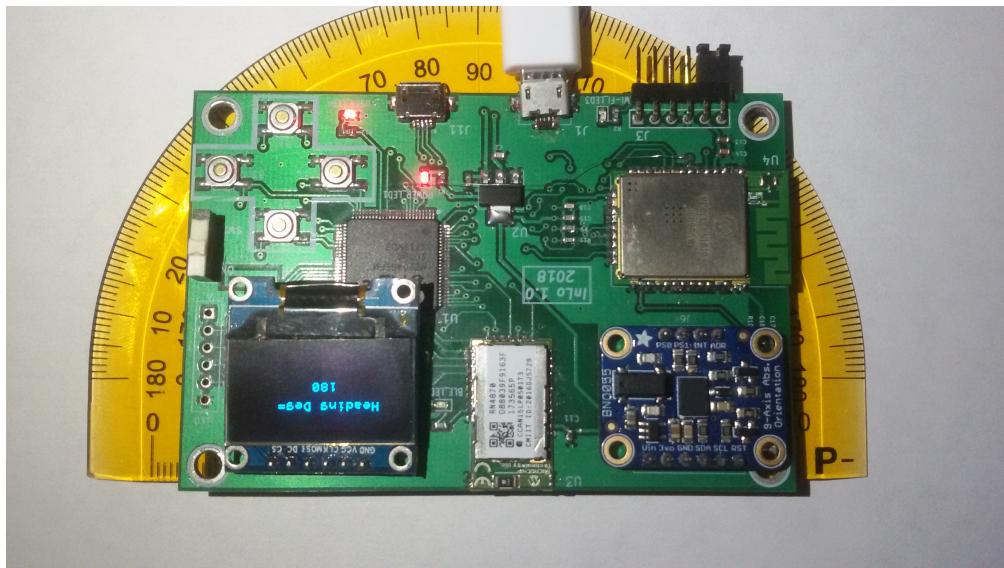


Figura 64. Experimento con IMU a 180 grados.

Análisis de los datos obtenidos por el módulo IMU

- Finalmente, en cuanto al sensor IMU se puede decir que es un módulo de gran precisión, pues en todas las pruebas que se realizaron no se encontraron errores mayores a 1° en los ángulos a la hora de comparar con un transportador. Tal vez los errores sean por décimas, pero para la aplicación de micro localización esto no sería de mayor importancia.

6. Conclusiones

- Se aconseja utilizar las técnicas de micro localización basadas en la adquisición de la señal RSSI en escenarios con poco movimiento radioeléctrico, es decir, en donde la naturaleza del entorno sea lo menos dinámica posible, ya que el simple hecho de que transiten personas en el lugar cambiará las mediciones realizadas previamente y técnicas como el *fingerprinting* arrojarían resultados que no tienen relación entre la potencia adquirida y distancia.
- En la actualidad no existe un estándar en los módulos aplicados al IoT en cuanto a las unidades del RSSI, esto a final de cuentas significa que la industria mundial no está trabajando en desarrollar módulos que se puedan aplicar en mercados horizontales, sino únicamente para mercados verticales, es decir, para aplicaciones específicas y no generales.
- El diseño de hardware orientado a pruebas se traduce en un primer prototipo con conectores que faciliten las mediciones, esto a su vez significa que se requiere de más espacio dentro del dispositivo. En un proyecto futuro se pueden obviar los puntos de prueba por lo que hará que el dispositivo tenga dimensiones más pequeñas.
- Cada protocolo de comunicación serial brinda ventajas y desventajas, por tanto, se debe analizar qué criterios se está dispuesto a sacrificar. Por ejemplo, I2C brinda capacidad de conexión hasta 127 dispositivos sin agregar más líneas de conexión, pero al utilizar este, se está sacrificando la alta velocidad de comunicación que brinda SPI y la sencillez por parte de UART, entre otras cosas.
- A medida de que se aleja el dispositivo del *beacon* o punto de acceso, la potencia adquirida en dBm para el caso del módulo BLE disminuye y en el caso del módulo Wi-Fi, dada en dB, aumenta. Esta relación se observó claramente tanto en InLo como en el celular en los experimentos de las dos tecnologías inalámbricas. Se debe tener precaución con el escenario que se utiliza para los experimentos, idealmente se deberían hacer en un lugar abierto o en una cámara anecoica.
- Según los experimentos realizados con InLo, la varianza es mayor en un 271.8 % con el uso del Wi-Fi que con el BLE, esto quiere decir que la tecnología BLE es más exacta y precisa en las mediciones de RSSI, mientras que el Wi-Fi es exacto, pero no preciso. Mientras que, por otro lado, en el Celular Huawei P8, la varianza es mayor en un 162.7 % con el Wi-Fi en comparación con bluetooth. En conclusión, el BLE arrojó mejores resultados en cuanto a precisión tanto en el celular como en InLo. Al comparar la tecnología BLE se concluye que InLo es más preciso que el celular en un 116 % y que el celular en el uso de Wi-Fi es más preciso que InLo en un 193 %.

7. Trabajos futuros

Este trabajo de grado es el primer paso para llegar a implementar un sistema de micro localización, sin embargo, quedan muchos más pasos para cumplir con este objetivo. Algunos de estos son:

- Desarrollo del algoritmo de micro localización, el cual utilice los sensores que se implementaron en InLo.
- Desarrollo de la interfaz de visualización, esta puede ser implementada tanto en un pc, como en una app para un dispositivo móvil.
- Complementar el sistema con un módulo GPS para que así se pueda localizar un objeto tanto en ambientes exteriores como en interiores.
- Para obtener un producto hardware más pequeño se recomienda implementar un módulo que integre las tecnologías BLE y Wi-Fi, quitar los botones de acción y el LCD ya que estos únicamente son para pruebas.

8. Anexos

Medellín, 28 de marzo de 2018

Señores
JONATHAN ALEXANDER DIAZ NARANJO

BOGOTA

Cordial saludo:



Somos Manufactura Electrónica Integral

porque además de los circuitos impresos,
suministramos los componentes electrónicos
y realizamos el ensamblaje de los mismos.

Su producto completamente
terminado en un solo lugar.

Por ser cliente
FORMATO ESTÁNDAR
recibes
BENEFICIOS ESPECIALES

Por la compra de
COMPONENTES ELECTRÓNICOS
en la tienda online
loscomponentes.com.co

**GANAS UN
10%**
Descuento
EN COMPONENTES

La presente es la cotización para la fabricación de el(los) circuito(s) impreso(s) solicitado(s) por usted(es):

PRODUCCIÓN EN FORMATO ESTANDAR

NOMBRE DEL PROYECTO: PCB_BLE_2-B

IMPORTANTE: El tiempo de despacho puede tener variación. Por tanto, en el momento de la aprobación estaremos informando los tiempos definitivos de producción.

CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	FLETE + SEGURO	TOTAL + IVA 19%	TIEMPO DE DESPACHO
1	\$65.800,00	\$65.800,00	\$9.558,00	\$87.860,00	5 DIAS HABILES
2	\$35.400,00	\$70.800,00	\$9.608,00	\$93.860,00	5 DIAS HABILES
3	\$24.283,33	\$72.850,00	\$9.628,50	\$96.320,00	5 DIAS HABILES
5	\$16.814,20	\$84.071,00	\$9.740,71	\$109.785,20	5 DIAS HABILES

Dimensiones (cm):

Material y Número de Capas:

Micraje de cobre:

Color de antisolder:

Color de mascara de componentes:

Recubrimiento:

Tiempo de Entrega:

Condiciones comerciales:

Forma de entrega:

6 X 9

TH 1.6 - 2 CAPAS

17 MICRAS

VERDE

BLANCO

Estño - plomo

Ver observaciones en los precios cotizados.

Anticipo 100%

ENVIO NACIONAL

Para el pago, tenga en cuenta los siguientes datos: TRANSFERENCIA ELECTRONICA o pago mediante RECAUDO EMPRESARIAL a la Cuenta Corriente Bancolombia 613-639742-62, a nombre de COLCIRCUITOS S.A.S. NIT: 900.381.799-4. Si el pago es realizado desde el exterior, el depositante debe asumir el costo de la transacción internacional. El valor aproximado son \$30 USD.

Los tiempos de despacho indicados en la presente cotización, están sujetos a la hora de ingreso a producción y de la capacidad disponible en dicho momento. La fecha de entrega definitiva será confirmada por Comercial.

Si se hace despacho, se entrega en la dirección indicada en la presente cotización.

El servicio de mensajería es contratado por Colcircuitos S.A.S. a través de un tercero especializado.

Si el cliente provee los archivos electrónicos debe entenderse que Colcircuitos no se hace responsable de problemas asociados al funcionamiento del circuito por razones de manejo de corriente, separación de pistas, perforaciones, distribución de componentes, interferencias electromagnéticas, entre otras. Colcircuitos realiza la manufactura del producto siguiendo de manera estricta las especificaciones suministradas por el cliente.

GARANTÍA: 3 meses por defectos de fabricación.

Figura 65. Cotización en Colcircuitos.

BOM InLo				
Descripción	Referencia	Designador	Valor	Costo USD
Pushbuttons	PTS525SM15SMTR2LFS	B1, B2, B3, B4	--	\$1,52
Red Led	APT1608EC	POWER_LED1, USER_LED4,BLE_LE D2, WIFI_LED3	--	\$1,48
Capacitor	CAP CER 1UF 0603	C1,C2,C12	1 uF	\$0,099
Capacitor	CAP CER 0.1UF 0603	C3,C4,C5,C6,C7,C8,C 9,C10,C14,C16,C17,C 19	0.1uF	\$0,390
Capacitor	CAP CER 10UF 0603	C11	10 uF	\$0,111
Capacitor	CAP CER 2.2UF 0603	C13,C15,C18	2.2 uF	\$0,200
Micro USB	Micro USB	J1,J11	--	\$1,500
IMU	IMU	J5,J6	--	\$34,950
Display	Display	J4	--	\$10,000
Angled Connector	M20-9960645	J3	--	\$0,350
Resistor	RES SMD 330 0603	R1,R2,R3,R4,R5,R6, R8,R12	330	\$0,088
Resistor	RES SMD 4.7K 0603	R7	4.7k	\$0,011
Resistor	RES SMD 100K 0603	R9,R11	100k	\$0,030
Resistor	RES SMD 10K 0603	R10	10k	\$0,113
Switch	CL-SA-12C-02	SW1	--	\$2,550
MCU	PIC32MZ2048EFM100-I/PF	U1	--	\$12,770
Regulator	AZ1117EH-3.3TRG1	U2	--	\$0,430
BLE	RN4870-V/RM118	U3	--	\$7,450
WIFI	RN1810-I/RM100	U4	--	\$17,820
Flash Memory	SST25VF010A-33-4I-SAE-T	U5	--	\$0,930
Crystal 24 MHz	ASDMB-24.000MHZ CMOS SMD	X1	--	\$1,260
Precio total de componentes USD				\$94,052
Costo de fabricación una tarjeta en Colcircuitos				\$28,99
Costo de un power bank de 10000 mAh				\$25
Total \$148,34 USD				

Figura 66. Lista de materiales y costos.

Bibliografía

- [1] I2c info – i2c bus, interface and protocol.
- [2] *Antenas*. 2002.
- [3] *Embedded Systems Architecture A comprehensive guide for engineers and programmers*. Elsevier Inc, 2005.
- [4] Kicad, 2018.
- [5] Agencia Nacional del Espectro. Mayor conectividad, espectro de uso libre e internet de las cosas, 2016.
- [6] Al Delta Innovación y Tecnología SAS. Normas internacionales basicas para el diseño de circuitos impresos y productos electrónicos, 2017.
- [7] Alonso Rios, Miguel Ángel. Sistema de localización de objetos en espacios cerrados por medio de rf, 2012.
- [8] Apple. ibeacon.
- [9] Autoridad de Supervisión del GNSS Europeo. Programas europeos de navegación por satélite, galileo y egnos. *Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas*, 2008.
- [10] S. Awad Núñez. ¿qué esperamos de las smart cities?, 2016.
- [11] C. Basics. Basics of uart communication.
- [12] Bluetooth. Bluetooth low energy, 2017.
- [13] Brian Chu, Microchip Technology Inc. Selecting the right battery system for cost-sensitive portable applications while maintaining excellent quality.
- [14] G. Carvalho. Sinal e canais wi-fi, 2012.
- [15] G. Carvalho. Rfid, 2016.
- [16] Colcircuitos. Requerimientos mínimos colcircuitos, 2017.
- [17] M. de Antonio. Wi-fi: entendiendo los db, dbm y rssi, 2016.

- [18] Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales de Colombia. Proyecto de resolución de la dian, donde se dictan normas para la implementación de dispositivos electrónicos de seguridad utilizados en el seguimiento y control de las operaciones de comercio exterior. 2017.
- [19] Embedded Tutorials Zone. Bluetooth low energy (ble) introduction, 2017.
- [20] Estimote. Beacons.
- [21] European Global Navigation Satellite Systems Agency. Gnss, 2017.
- [22] R. Faragher and R. Harle. Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons. *IEEE*, 2015.
- [23] P. Fernández. Decibelios a secas (db) y con apellido (dbm, dbw, dbspl...), 2017.
- [24] N. Forum. What it does.
- [25] A. Galiana. *Sistemas embebidos*. 2005.
- [26] C. Garcia. Zigbee, comunicación para dispositivos.
- [27] Gartner. Gartner's 2016 hype cycle for emerging technologies identifies three key trends that organizations must track to gain competitive advantage, 2016.
- [28] GLONASS. Information and analysis center for positioning, navigation and timing, 2016.
- [29] Google. Google beacon platform.
- [30] GPS. Global positioning system.
- [31] International Electrotechnical Commission. Standards for design, manufacture and assembly of printed circuits.
- [32] Konkakt. Location engine.
- [33] Laird Technologies. Bluetooth and wi-fi coexistence. 2012.
- [34] F. Leens. An introduction to i2c and spi protocols. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2009.
- [35] W. A. P. P. Martin Pereira Tapiro. Diseño e implementación de un prototipo de un sistema de localización en espacios cerrados (indoor), 2015.
- [36] O. Martínez. Localización indoor multimodal. Master's thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [37] Microchip Technology Inc. RN1810 WiFly Command Reference User's Guide, 2016.
- [38] J. Millán. UWB (Ultra Wide-Band), 2004.
- [39] MINTIC. Convocatoria en sectores estratégicos setic, 2017.

- [40] S. D. Molinera. Sistema de localización mediante rfid. Master's thesis, Universidad abierta de Cataluña.
- [41] J. Montemagno. Adding real-world context with estimote beacons and stickers, 2015.
- [42] Nahuel Vara, German Poletto, Manuel Cáceres, Arturo Busso. Cálculo de distancia entre los nodos de una red inalámbrica zigbee en función del parámetro rssi.
- [43] Revista ITNOW. ¿qué puede obtener el comercio al mezclar micro localización con análisis de datos?
- [44] RoHSGuide.com. Rohs guide, 2018.
- [45] M. Rueda Cruz. ¿qué son las smart cities?
- [46] N. Semiconductor. Range and robustness bluetooth 3.0 vs. bluetooth 5.0 @ +4db, 2018.
- [47] SensiEDGE. Sensible v1.0 ble network processor.
- [48] Serflo Realty. Interior de apartamento.
- [49] D. Vilaseca. Navegación integrada para ambientes cerrados, 2012.
- [50] Wayfindr. Indoor audio navigation for vision impaired people.
- [51] Wi-Fi ALLIANCE. Who we are.
- [52] Zigbee. What is zigbee.