

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

*Trabajo de titulación previo  
a la obtención del título de  
Ingeniero Electrónico*

**PROYECTO TÉCNICO:**

**“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE RADIOBALIZA PARA  
CICLISTAS, INTEGRADO EN LA BICICLETA Y EL CASCO, CON  
LA CAPACIDAD DE DETECCIÓN DE IMPACTOS EN LA CABEZA Y  
EMISIÓN DE ALERTAS”**

**AUTORES:**

DAVID GERARDO MOSCOSO MONTENEGRO  
DAVID FERNANDO ROMERO GUAYCHA

**TUTOR:**

ING. LUIS JAVIER SERPA ANDRADE

CUENCA - ECUADOR

2020

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, David Gerardo Moscoso Montenegro con documento de identificación N° 0105082705 y David Fernando Romero Guaycha con documento de identificación N° 0705212405, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE RADIOBALIZA PARA CICLISTAS, INTEGRADO EN LA BICICLETA Y EL CASCO, CON LA CAPACIDAD DE DETECCIÓN DE IMPACTOS EN LA CABEZA Y EMISIÓN DE ALERTAS”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Electrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2020



David Gerardo Moscoso M.  
C.I. 0105082705



David Fernando Romero G.  
C.I. 0705212405

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE RADIOBALIZA PARA CICLISTAS, INTEGRADO EN LA BICICLETA Y EL CASCO, CON LA CAPACIDAD DE DETECCIÓN DE IMPACTOS EN LA CABEZA Y EMISIÓN DE ALERTAS”**, realizado por David Gerardo Moscoso Montenegro y David Fernando Romero Guaycha, obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2020



Ing. Luis Javier Serpa Andrade

CI: 0103779096

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, David Gerardo Moscoso Montenegro con documento de identificación N° 0105082705 y David Fernando Romero Guaycha con documento de identificación N° 0705212405, autores del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE RADIOBALIZA PARA CICLISTAS, INTEGRADO EN LA BICICLETA Y EL CASCO, CON LA CAPACIDAD DE DETECCIÓN DE IMPACTOS EN LA CABEZA Y EMISIÓN DE ALERTAS”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio del 2020



David Gerardo Moscoso M.  
C.I. 0105082705



David Fernando Romero G.  
C.I. 0705212405

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>I</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>VI</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>VII</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>X</b>
<b>ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO</b> .....	<b>XI</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>XII</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>XIV</b>
OBJETIVO GENERAL .....	XIV
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XIV
<b>Capítulo 1: Fundamentación Teórica y revisión del Estado del Arte</b> .....	<b>1</b>
1.1. Cinemática de los Impactos en la Cabeza en el Ciclismo .....	1
1.2. Global Navigation Satellite System (GNSS) .....	3
1.2.1. Visión general del cálculo de posicionamiento de GNSS.....	3
1.3. Bluetooth Low Energy (BLE).....	4
1.3.1. Tipos de dispositivos Bluetooth.....	4
1.3.2. Bloques principales de los dispositivos Bluetooth.....	5
1.3.3. Pila de Protocolos .....	6
1.3.3.1. Capa física LE (PHY).....	6
1.3.3.2. Capa de Enlace .....	7
1.3.3.3. Conexión.....	8
1.3.3.4. Adaptación de protocolo y control de enlace lógico (L2CAP).....	9
1.3.3.5. Protocolo de atributo (ATT).....	9
1.3.3.6. Protocolo de administración de seguridad (SMP).....	9
1.3.3.7. Perfil de acceso genérico (GAP).....	10
1.3.3.8. Perfil de atributo genérico (GATT) .....	10
1.4. Tecnología Lora.....	10
1.4.1. Generalidades del espectro ensanchado.....	10
1.4.2. Capa física de lora .....	12
1.4.3. El protocolo LoRaWAN.....	12
1.5. The Things Network .....	14
1.6. Node-RED .....	15
1.7. Firebase.....	15

1.8. App Inventor .....	16
1.9. Twilio.....	17
<b>Capítulo 2: Marco Metodológico .....</b>	<b>18</b>
1.10. Descripción del sistema .....	19
1.11. Sistema Embebido en el Casco .....	22
1.12. Sistema Embebido en la Bicicleta.....	25
1.13. Implementación del Gateway LoRa.....	31
1.14. Implementación en la nube .....	32
1.15. Configuración del Servidor de red The Things Network .....	33
1.16. Creación de la base de datos en Firebase .....	34
1.17. Integración del sistema en Node-RED .....	35
1.18. Aplicación móvil.....	36
<b>2. Implementación y análisis de resultados.....</b>	<b>37</b>
<b>Capítulo 3: Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>42</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>44</b>
<b>APÉNDICE A: PLACA DE CIRCUITO IMPRESO PARA EL PROTOTIPO EN LA BICICLETA</b>	<b>44</b>
<b>APÉNDICE B: PLACA DE CIRCUITO IMPRESO PARA EL PROTOTIPO EN EL CASCO..</b>	<b>45</b>
<b>APÉNDICE C: DIMENSIONES DEL PROTECTOR PLÁSTICO PARA EL PROTOTIPO EN LA BICICLETA .....</b>	<b>46</b>
<b>APÉNDICE D: DIMENSIONES DEL PROTECTOR PLÁSTICO PARA EL PROTOTIPO EN EL CASCO .....</b>	<b>48</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>50</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismo de simulación de impactos en la cabeza [12].....	1
Figura 2 Datos de aceleración respecto al tiempo para caídas efectuadas con y sin casco según la metodología mostrada en la figura 1.1. Los datos corresponden a una caída de 2m de alto. La aceleración está expresada en g, donde un g representa 9.81 m/s <sup>2</sup> [12].....	2
Figura 3 Probabilidad de sufrir una lesión cerebral grave basado en los valores HIC, para caídas con y sin casco a diferentes alturas [12] .....	2
Figura 4 Constelación de satélites alrededor del planeta .....	3
Figura 5 Modos de los dispositivos Bluetooth [18] .....	5
Figura 6 Bloques principales en los dispositivos Bluetooth [18].....	5
Figura 7 Pila de Protocolos de BLE [18] .....	6
Figura 8 Canal físico de BLE [18].....	7
Figura 9 Eventos en los dispositivos BLE: escaneo pasivo y escaneo activo [18] .....	8
Figura 10 Eventos de conexión de dispositivos master y esclavo [18].....	9
Figura 11 Proceso de ensanchamiento en la modulación [21].....	11
Figura 12 Proceso inverso en la demodulación [21].....	11
Figura 13 Arquitectura de red LoRaWAN [19] .....	13
Figura 14 Pila de protocolos en LoRaWAN [19].....	14
Figura 15 Estructura general de una red LoRaWAN [24] .....	15
Figura 16 Estructura de programación Node-RED [25] .....	15
Figura 17 Firebase.....	16
Figura 18 Plataforma para aplicaciones Android.....	17
Figura 19 Algunas de las funciones que ofrece la plataforma Twilio.....	17
Figura 20 Método de validación en la detección de un accidente.....	20
Figura 21 Los dispositivos que componen el sistema mantienen comunicación BLE .....	20
Figura 22 Funcionamiento del sistema propuesto.....	21
Figura 23 En caso de robo, el ciclista puede localizar su bicicleta desde la aplicación móvil .....	22
Figura 24 Diferentes modos de operación del acelerómetro LIS2DH12 y su consumo [30] .....	24
Figura 25 Placa electrónica del prototipo para el casco.....	25
Figura 26 Carcasa de protección para sistema embebido del casco.....	25
Figura 27 Diagrama de Flujo del dispositivo montado en el casco .....	25
Figura 28 Vista frontal del sistema embebido de la bicicleta .....	28
Figura 29 Vista posterior del sistema embebido de la bicicleta.....	29
Figura 30 Carcasa de protección para sistema embebido de la bicicleta .....	29
Figura 31 Diagrama de Flujo del dispositivo montado en la bicicleta.....	30
Figura 32 Integración de servicios en la nube.....	33
Figura 33 Aplicación en The Things Network.....	33
Figura 34 Registro de nodo dentro de la aplicación.....	34
Figura 35 Base de datos en Firebase .....	34
Figura 36 Gestión de los mensajes de uplink, almacenamiento en la base de datos.....	35
Figura 37 Gestión de alertas presentes en la base de datos para envío de SMS .....	35
Figura 38 Gestión de los mensajes de downlink de TTN en caso de requerir búsqueda .....	36
Figura 39 Aplicación móvil para el usuario del sistema .....	36
Figura 40 Prototipos implementados en la bicicleta y el casco .....	37
Figura 41 Pruebas de detección de impactos en el casco.....	38

Figura 42 Pruebas de rotación aplicadas a la bicicleta en dos ejes .....	38
Figura 43 Ubicación del Gateway LoRaWAN para las pruebas de cobertura.....	39
Figura 44 Mensaje de alerta recibido por el contacto seleccionado.....	40
Figura 45 Mapa de cobertura del sistema en la ciudad de Cuenca .....	40
Figura 46 Punto de cobertura más lejano.....	41
Figura A 1 Placa de circuito impreso en la bicicleta, vista superior.....	44
Figura A 2 Placa de circuito impreso en la bicicleta, vista inferior.....	44
Figura B 1 Placa de circuito impreso en el casco, vista superior.....	45
Figura B 2 Placa de circuito impreso en el casco, vista inferior.....	45
Figura C 1 Vista isométrica de la base del protector plástico para el prototipo en la bicicleta.....	46
Figura C 2 Dimensiones de la base del protector plástico para el prototipo en la bicicleta.....	46
Figura C 3 Vistas isométricas de la cubierta del protector plástico para el prototipo en la bicicleta.....	47
Figura C 4 Dimensiones de la cubierta del protector plástico para el prototipo en la bicicleta.....	47
Figura D 1 Vista isométrica de la base del protector plástico para el prototipo en el casco.....	48
Figura D 2 Dimensiones de la base del protector plástico para el prototipo en el casco.....	48
Figura D 3 Vista isométrica de la tapa del protector plástico para el prototipo en el casco.....	49
Figura D 4 Dimensiones de la tapa del protector plástico para el prototipo en el casco.....	49



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de nRF52810 [29].....	23
Tabla 2 Características principales de LIS2DH12 [30] .....	24
Tabla 3 Características de nRF52832 [31].....	26
Tabla 4 Características principales de GPS Quectel L80-R [32].....	27
Tabla 5 Características del módulo LoRa RFM95 [33].....	28
Tabla 6 Características de Raspberry Pi B 3 [34] .....	31
Tabla 7 Características de RAK831 [35].....	32

# AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por el hogar que formaron juntos, en donde siempre ha estado presente su afecto y virtuosas enseñanzas incluso en los momentos más difíciles, quienes me han brindado la oportunidad de alcanzar este logro académico.

*David Moscoso Montenegro.*

Quiero agradecer principalmente a Dios y mis padres por ser el pilar fundamental en este logro académico, ya que con su apoyo y amor incondicional me ha sido posible alcanzar esta meta de vida. Agradezco también a mis hermanos quienes supieron siempre darme la mano en los momentos de adversidad.

*David Romero Guaycha.*

# DEDICATORIA

A mi hermano mayor, Daniel, me acompañaste en la etapa más importante de mi vida, aquella que definió a la persona que soy en el presente. Juntos aprendimos de los errores y de los aciertos, avanzando por un camino desconocido en donde cada paso es un recuerdo.

Tus ojos se cerraron, pero tal vez veas más que yo.

*David Moscoso Montenegro.*

Este trabajo de titulación va dedicado para mi familia, mi novia y mi hija.

*David Romero Guaycha.*

## RESUMEN

Se presenta el diseño e implementación de un sistema de radiobaliza para ciclistas, con el cual se pretende detectar de forma automática la ocurrencia de accidentes que involucren impactos en la cabeza a través del casco y posteriormente le envío de una notificación con los datos de posición del usuario a contactos previamente programados. Esta información es transferida mediante una red LoRaWAN.

La propuesta requiere de dos dispositivos a ser usados por el ciclista, uno adaptado al casco de seguridad y otro a la bicicleta, estos deben mantener comunicación Bluetooth Low Energy durante los recorridos. El primero posee un sensor encargado de monitorear la aceleración presente en el casco en tres ejes. El segundo integra un giroscopio, para de igual manera, detectar rotaciones que difieren de la cinemática normal durante la conducción del vehículo y que potencialmente podrían deberse a un accidente sufrido por el usuario, además, un receptor GNSS para obtener datos de posición y un transceptor LoRa para establecer enlaces de larga distancia con la radio base.

La detección de caídas sufridas por el ciclista tiene dos etapas de validación, la primera se da con la lectura de magnitudes de aceleración presentes en el casco, en búsqueda de valores que sobrepasen un valor umbral, y una segunda etapa que de igual manera verifique el sobrepaso de una magnitud límite en la velocidad angular de la bicicleta. Estos dos eventos deben suceder dentro de un corto margen de tiempo para que la detección de una caída sea válida, en caso contrario, es descartada.

Una vez se ha detectado una caída, se envía un paquete LoRaWAN con las coordenadas geográficas del ciclista obtenidas con el receptor satelital GNSS. Cuando el mensaje ha alcanzado el Gateway, la información es procesada en la nube y se emite un SMS hacia amigos o familiares que pueden asistir a la brevedad al lugar del accidente.

La capacidad bidireccional del protocolo LoRaWAN permite integrar una función adicional con la cual se activa un modo de rastreo en la bicicleta, así el nodo envía de forma periódica su ubicación hasta ser localizado, esta interacción con el usuario se realiza a través de una aplicación móvil.

Las pruebas de funcionamiento muestran que la implementación de múltiples entradas en el proceso de validación de la detección automática de un accidente, en este caso, parámetros cinemáticos provenientes del casco y de la bicicleta, tiene una mejor respuesta que aquellos casos que disponen de una sola, comúnmente, la del casco, pues son más efectivas para descartar falsos positivos.

Con el uso de la tecnología LoRa se logró crear un dispositivo compacto y de gran distancia de conexión, logrando cobertura en casi la totalidad del área urbana de la ciudad de Cuenca con un solo Gateway activo, una distancia máxima de 7.6Km y una pérdida de paquetes de 18%.

# INTRODUCCIÓN

Desde inicios del siglo XIX la búsqueda de una máquina que permita la movilidad humana de forma más eficiente que la caminata, que reciba potencia únicamente de los músculos del cuerpo, que sea cómoda y segura, ha llevado a una constante experimentación y desarrollo de lo que hoy llamamos "bicicleta" [1].

A medida que este medio de transporte se volvía más veloz y su presencia era cada vez mayor en el escenario vial junto con vehículos motorizados, surgió la necesidad de brindar protección a sus usuarios en caso de caídas, de esta manera el casco para ciclistas fue introducido en 1975. Los diseños y materiales utilizados han evolucionado continuamente, con el fin de preservar la integridad física de quienes lo usan, sin perturbar la comodidad y desempeño durante el recorrido [2].

La forma en la que el casco protege la cabeza del ciclista es interviniendo en la cinemática durante un impacto, reduciendo la aceleración craneal que se produce, y por consecuencia reduciendo el índice HIC (criterio de lesión encefálica, por sus siglas en inglés) que se relaciona con la probabilidad de sufrir un traumatismo cráneo encefálico [3].

Existen diferentes tecnologías que permiten cuantificar la aceleración de cuerpos u objetos, dispositivos que cumplen esta función llevan el nombre de acelerómetros. Estos han sido usados regularmente en el campo de la investigación, sin embargo, con los recientes avances, se han implementado progresivamente en dispositivos de uso cotidiano como teléfonos inteligentes o aquellos dedicados a la práctica deportiva o de monitoreo médico [4].

El proyecto descrito en este documento presenta el diseño de un prototipo de baliza de emergencia enfocado a ciclistas, que sea capaz de detectar de forma automática la ocurrencia de un accidente que involucre un impacto en la cabeza a través del casco y posteriormente emitir una alerta que permita asistir rápidamente a la persona herida. Este dispositivo debe cumplir tres funciones principales, detectar impactos en la superficie del casco, obtener su ubicación global y transmitir esta información a largas distancias.

# **ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO**

El uso de acelerómetros montados en un casco de protección ha sido implementado en deportes de contacto como el fútbol americano con el Sistema de Telemetría de Impactos en la Cabeza (o HIT, por sus siglas en inglés) para medir la magnitud, dirección y frecuencia de los golpes en la cabeza sufridos por los jugadores durante la competencia [5].

La mayoría de los estudios realizados sobre detección de accidentes son enfocados a automóviles debido a que los mecanismos de protección a sus ocupantes, como el despliegue de las bolsas de aire, son dependientes de esta capacidad de detección. Al no ser implementados mecanismos de seguridad similares en vehículos de dos ruedas, la experimentación con sistemas de detección automática de accidentes es escasa. El estudio llevado a cabo en [6] analiza un concepto experimental para la detección automática de accidentes aplicado a motocicletas, con la utilización de unidades de medición inercial distribuidas en el casco, el torso del conductor y la parte trasera de la motocicleta, logrando un sistema capaz de clasificar diferentes patrones de movimiento. Aunque no se define un algoritmo para validar un accidente, la metodología aplicada representa un paso adelante en la búsqueda de sistemas eficaces en la detección de accidentes, adaptándolos a las características propias de conducción del vehículo.

La localización de bicicletas de forma remota ha sido aplicada sobre todo en sistemas de bicicleta pública para la prevención de robos, como la propuesta presentada en [7], combinando la tecnología GPS para la obtención de coordenadas geográficas y módulos de conexión a la red móvil 3.5G para transferencia de datos.

# JUSTIFICACIÓN

La bicicleta representa el medio de transporte de millones de personas alrededor del mundo, esto debido a varios factores, entre ellos: su bajo costo, simplicidad de manejo y fácil desplazamiento en entornos densamente poblados. Su uso representa un beneficio social, dinamizando la movilidad humana al requerir menos espacio en las vías, reduciendo el uso de combustibles contaminantes y aumentando el nivel de actividad física del usuario.

El uso del casco al montar bicicleta representa una reducción del riesgo de lesiones de cabeza en 48%, lesiones de cabeza graves en 60%, lesiones traumáticas de cerebro en 53%, lesiones faciales en 23%, y el total de muertes o ciclistas heridos de gravedad en 34%. Estas estadísticas muestran de forma clara el beneficio de usar el casco, aunque también se advierte que su efectividad es diferente en determinadas situaciones, y por lo tanto existen escenarios en donde su uso no impide lesiones graves [8][9].

El grupo de investigación LactaLAB-Ciudades Sustentables en colaboración con la Fundación Biciacción, presentaron en el año 2018 los resultados de la “1ra Encuesta Nacional del Ciclista Urbano del Ecuador”, con una muestra de 2422 ciclistas de diferentes ciudades que completaron la encuesta, se recolectaron datos importantes acerca del perfil del ciclista ecuatoriano, sus actitudes y problemáticas al momento de usar la bicicleta. De este estudio se obtiene que el 28% de los ciclistas encuestados ha sufrido un accidente en el último año, el 44% usa constantemente su casco y un 22% lo hace de forma intermitente. En cuanto a las razones por las que creen que la gente no usa bicicleta en la ciudad, las principales son: el irrespeto por parte de los conductores, la delincuencia y la falta de ciclovías e infraestructura para bicicletas, aunque también se menciona el temor y riesgo de accidentes, entre otros [10].

Estas cifras reflejan las dificultades a las que se enfrentan las personas que se movilizan en bicicleta, y que limitan la posibilidad de que más personas elijan esta opción de transporte sobre otras, por ejemplo, el automóvil.

El índice de uso de bicicleta en Ecuador es bajo, pues apenas el 1.42% de la población se traslada desde su hogar al trabajo o establecimiento educativo de esta forma. Aunque un tercio de los hogares ecuatorianos disponen de al menos una



bicicleta, dentro de este grupo, sólo un 14.79% efectivamente usa este medio de transporte, por lo tanto, también existe una alta tasa de subutilización [11].

Las tecnologías de IoT han abierto innumerables posibilidades para mejorar la calidad de vida de las personas, dotando de “inteligencia” y conectividad a objetos con los que interactuamos día a día. Esta es la base de la propuesta presentada, que intenta ser una alternativa para que el ciclista se sienta más seguro en las vías sabiendo que recibirá atención oportuna en caso de un accidente, una situación en la que el tiempo es un factor primordial.

# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

Diseñar un prototipo de radiobaliza para ciclistas, con la capacidad de detección de impactos en la cabeza y emisión de alertas.

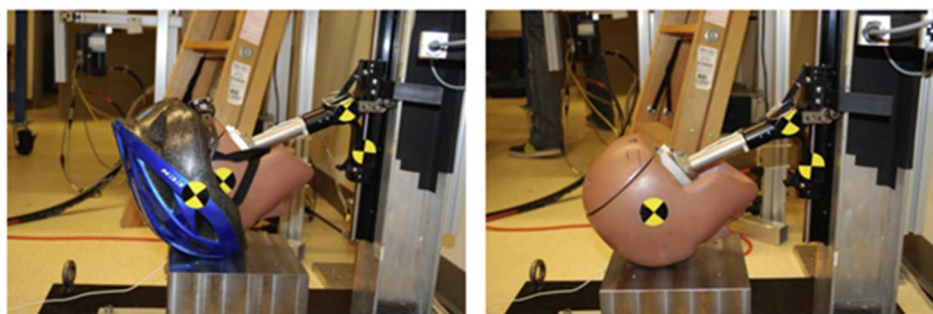
## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar el estado del arte de los protocolos de comunicación y tecnologías involucradas en el diseño del prototipo.
- Implementar un sistema de adquisición y procesamiento de datos provenientes de un acelerómetro para la detección de impactos craneales a través del casco del ciclista.
- Implementar un sistema de adquisición y procesamiento de datos de posicionamiento global provenientes de un receptor GNSS.
- Implementar un sistema de comunicación Bluetooth Low Energy entre los dispositivos del casco y de la bicicleta para la notificación de eventuales impactos.
- Implementar un sistema de comunicación LoRaWAN entre el dispositivo en la bicicleta y el servidor en la nube a través de un Gateway.
- Desarrollar una aplicación móvil para el sistema operativo Android que permita el rastreo de la bicicleta con la información que llega desde el servidor en la nube.
- Realizar pruebas de funcionamiento, rendimiento y capacidad del sistema.

# CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

## 1.1. Cinemática de los Impactos en la Cabeza en el Ciclismo

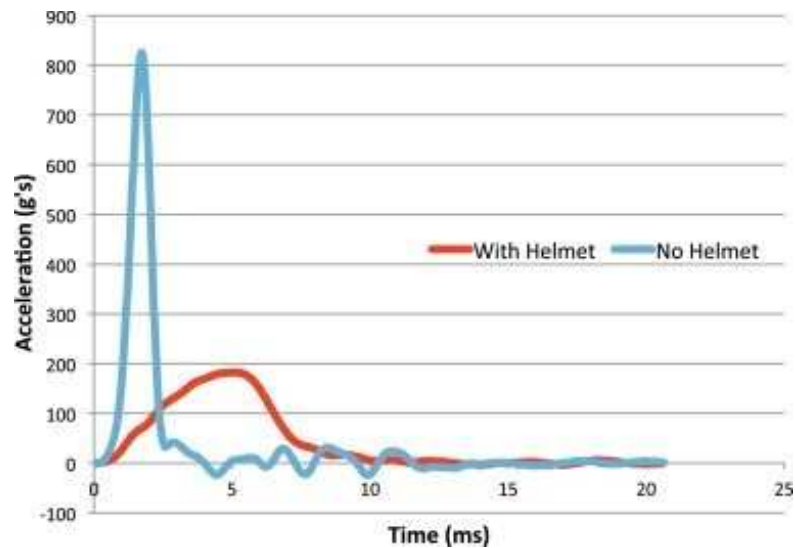
El estudio presentado en [12] lleva a cabo una experimentación con el objetivo de “evaluar la eficacia biomecánica de los cascos de bicicleta para reducir el riesgo de lesiones en la cabeza en impactos simulados desde alturas de caída consistentes con los estándares de cascos de bicicleta e impactos de cabeza en el ciclismo del mundo real”. En la figura 1 se muestra el mecanismo de simulación utilizado, consiste en una torre de caída con monorraíl, similar a los especificados en estándares de certificación para cascos. La aceleración lineal de la cabeza fue medida durante el impacto con el bloque de acero a diferentes alturas, dicho proceso se realizó para ambos casos, usando el casco y sin usarlo.



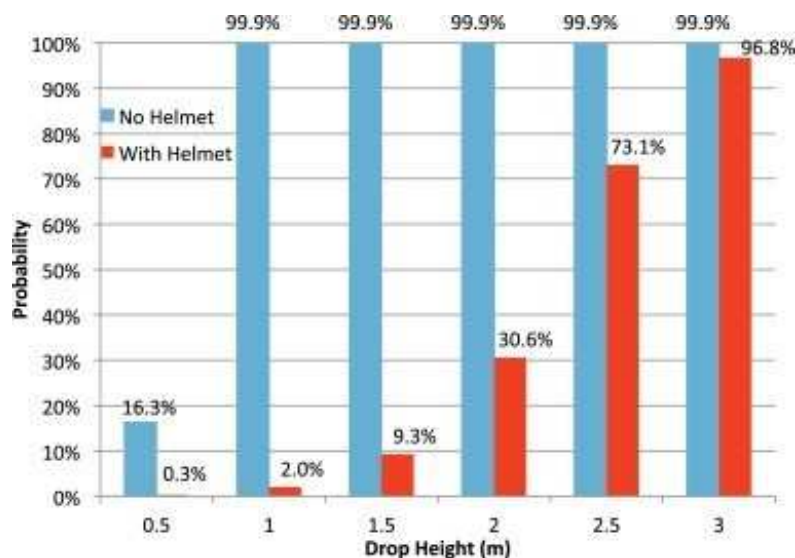
*Figura 1 Mecanismo de simulación de impactos en la cabeza [12]*

En la figura 2 se muestran las curvas de aceleración obtenidas, la magnitud es claramente reducida cuando existe el casco de por medio, además se produce un

retardo y ensanchamiento del pulso durante el choque debido al deslizamiento del casco con la superficie de contacto y su deformación. En la figura 3 se muestra la probabilidad de sufrir una lesión cerebral de gravedad, la diferencia entre las situaciones de uso y desuso del casco disminuye con la altura [12].



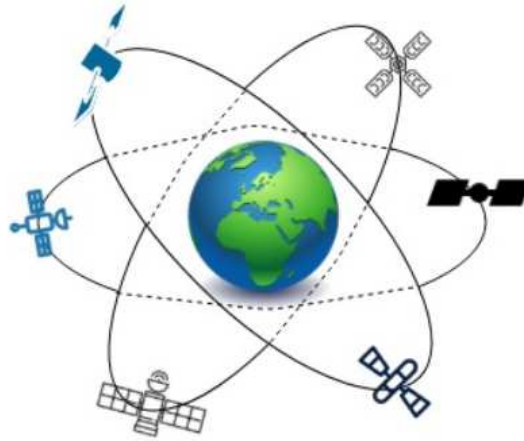
*Figura 2 Datos de aceleración respecto al tiempo para caídas efectuadas con y sin casco según la metodología mostrada en la figura 1.1. Los datos corresponden a una caída de 2m de alto. La aceleración está expresada en g, donde un g representa 9.81 m/s<sup>2</sup> [12]*



*Figura 3 Probabilidad de sufrir una lesión cerebral grave basado en los valores HIC, para caídas con y sin casco a diferentes alturas [12]*

## 1.2. Global Navigation Satellite System (GNSS)

GNSS es un sistema de posicionamiento y de tiempo global que está conformado por constelaciones de satélites ubicados en distintos planos orbitales, mismos que se desplazan alrededor de la tierra a distancia suficiente para lograr mayor cobertura, estas constelaciones son conformadas entre 20 a 30 satélites y se ubican entre 3 a 6 planos orbitales [13][14][15].



*Figura 4 Constelación de satélites alrededor del planeta*

### 1.2.1. Visión general del cálculo de posicionamiento de GNSS

Los sistemas GNSS constan de un control general maestro que adquiere señales de los satélites a través de los receptores ubicados en distintos puntos, esta información obtenida es utilizada para realizar correcciones en las orbitas y las derivadas de reloj de cada uno de los satélites, las correcciones son enviadas al satélite correspondiente y finalmente los satélites emiten esta información como parte del mensaje de datos de navegación del sistema. [13][14]

Un receptor con esta información (datos de navegación) puede determinar la hora y posición precisa del satélite en el instante que la señal es transmitida. El receptor captura las lecturas de reloj del satélite y las compara con las lecturas de su reloj interno. Asumiendo que la señal es transmitida directamente receptor-satélite el receptor puede calcular la distancia o pseudo-rango entre ellos (se denomina pseudo-rango, ya que el reloj interno del receptor tiene error). El receptor calcula la posición

de cada satélite a los que esté enlazado (mayor a 4 satélites) y con la ayuda de los mensajes de datos de navegación puede calcular su posicionamiento mediante la aplicación del principio de triangulación. [13][14]

### **1.3. Bluetooth Low Energy (BLE)**

Bluetooth Low Energy es una mejora realizada por la tecnología Bluetooth dirigido hacia dispositivos de muy bajo consumo y corto alcance, con una vida de operabilidad larga (meses o incluso años) alimentados por baterías muy pequeñas. Esta actualización en la tecnología Bluetooth fue pensada principalmente para sistemas con baja gestión de datos como: sensores, dispositivos de alertas, pagos móviles, deportes, etc. El rendimiento que se puede alcanzar con estos sistemas teóricamente va desde 1Mbps hasta 2Mbps (versiones 5.0 en adelante), óptimo para dispositivos que no necesitan transferencias de datos grandes y la banda de frecuencia utilizada para esta tecnología es de 2.4 GHz [16][17].

#### **1.3.1. Tipos de dispositivos Bluetooth**

BLE es una actualización del Bluetooth clásico (BR/EDR) con algunas modificaciones en los protocolos de capa superior y en las aplicaciones. Por esta razón a partir de las versiones 4.0 en adelante, no son compatibles con las versiones anteriores de dicha tecnología [16][18]. Para comunicar estos dos estándares de Bluetooth existen dos tipos de dispositivos:

- Single-mode o modo único (BLE)

Son dispositivos que implementa el estándar BLE, capaces de comunicarse solamente con dispositivos de modo único y de modo dual. [18]

- Dual-mode o modo dual (BLE y BR/EDR)

Son dispositivos Bluetooth que soportan las comunicaciones entre ambos estándares: BLE y BR/EDR. [18]

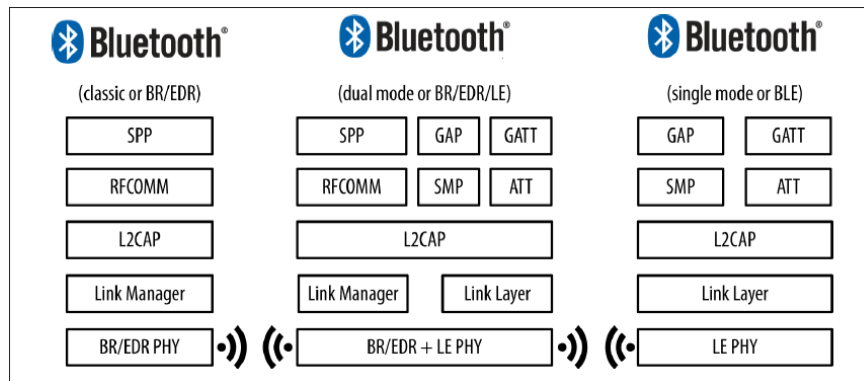


Figura 5 Modos de los dispositivos Bluetooth [18]

### 1.3.2. Bloques principales de los dispositivos Bluetooth

En los dispositivos Bluetooth existen tres tipos principales de bloques: aplicación, host y controlador. Además, se implementa un protocolo de comunicación que permite interoperabilidad entre el host y el controlador llamado: Host Interface Controller (HCI). [17][18]

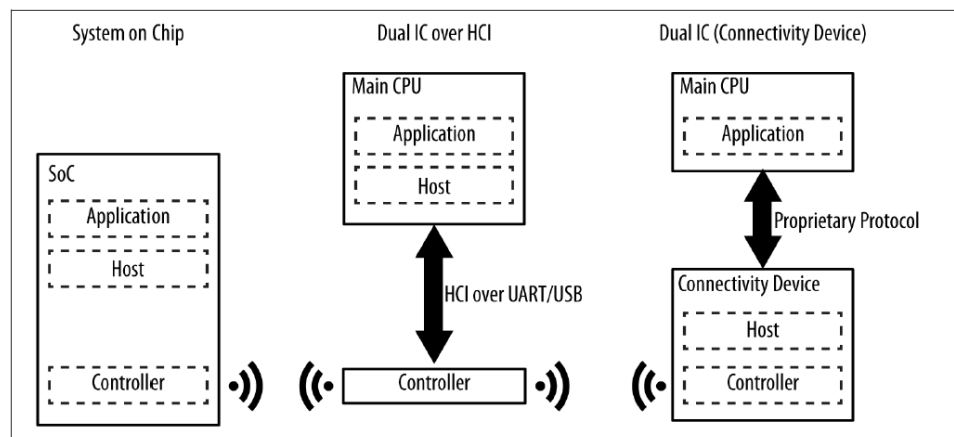


Figura 6 Bloques principales en los dispositivos Bluetooth [18]

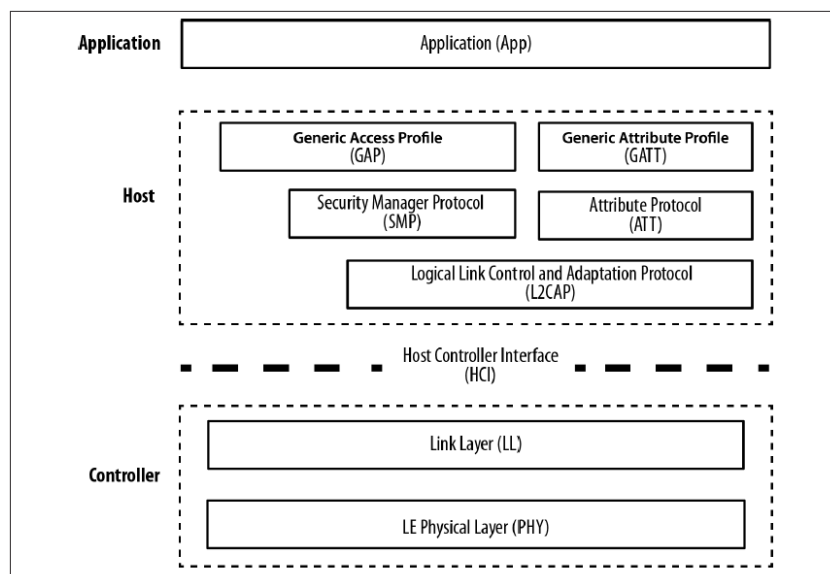
Como se puede observar estos tres tipos de configuraciones son los más comunes en el mercado [18]:

- System on Chip: Un solo IC es el encargado de arrancar la aplicación.
- Dual IC over HCI: Un IC pone en funcionamiento la aplicación y el host mientras el controlador es puesto en funcionamiento en otro IC diferente, estos dos ICs se comunican por medio de HCI.

- Dual IC (Connectivity Device): Un IC arranca la aplicación mientras que otro IC arranca el host y el controlador, estos dos ICs se comunican a través de un “proprietary protocol” (protocolo a elección del creador del sistema, diferente a las especificaciones de Bluetooth).

### 1.3.3. Pila de Protocolos

La pila de protocolos de BLE se divide en tres bloques principales: Controlador, host y aplicación. De los cuales se da una breve reseña.

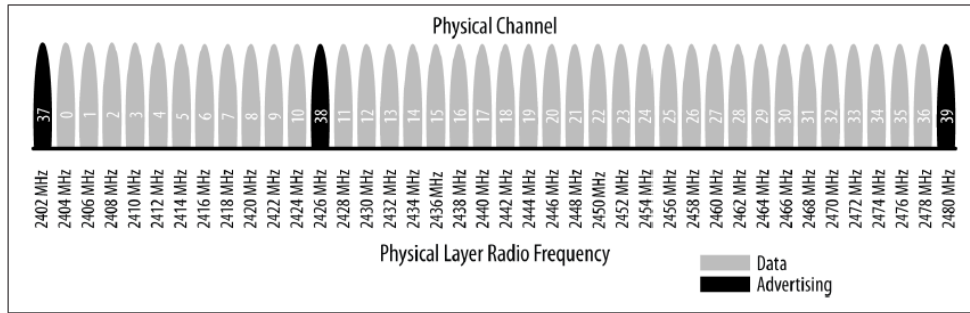


*Figura 7 Pila de Protocolos de BLE [18]*

#### 1.3.3.1. Capa física LE (PHY)

La capa física se encarga de la modulación, demodulación y transformación de señales analógicas a señales digitales. Usa las bandas no licenciadas ISM 2.4 GHz dividida en 40 canales que van desde los 2.400 GHz hasta los 2.835 GHz. De dichos canales se utilizan 3 como canales publicitarios 37, 38 y 39 (utilizados para iniciar un evento de conexión entre dos o más dispositivos) y los restantes 37 canales se utilizan para el envío de datos según la aplicación que emplee el usuario. [16][17][18]





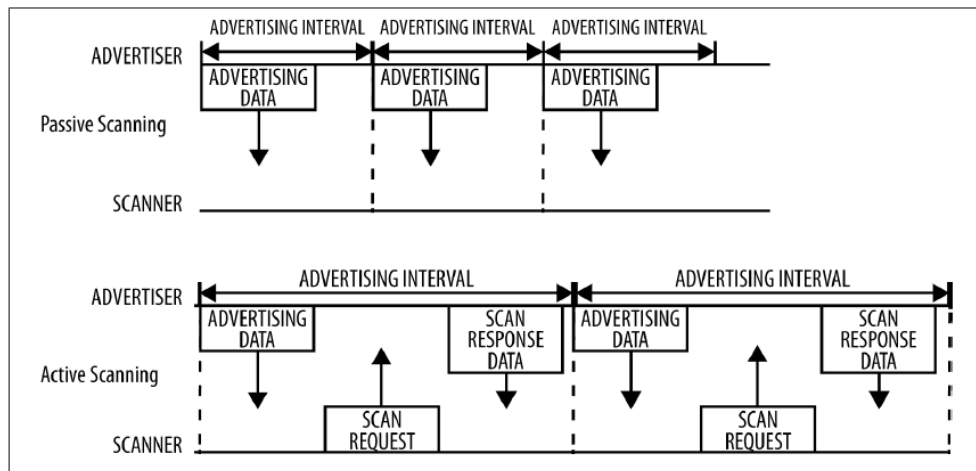
*Figura 8 Canal físico de BLE [18]*

### 1.3.3.2. Capa de Enlace

La capa de enlace interactúa directamente con la capa física y es una fusión entre hardware y software, además es la única capa en la pila de protocolos restringida en tiempo real, ya que debe cumplir con los requisitos de tiempo real que están definidos en la especificación de BLE. Algunas otras de las funciones que realiza esta capa son las siguientes. [17][18]

- Generación y verificación de CRC
- Preámbulo, dirección de acceso y estructura del protocolo on-air
- Blanqueamiento de datos
- Cifrado AES
- Generación de números aleatorios.

La capa de enlace también gestiona el estado de enlace de radio, establece como un dispositivo se conecta con otros, es decir, un dispositivo BLE puede actuar como un esclavo (anunciante) o como un master (escáner). Además esta capa establece dos tipos de procedimientos de escaneo, mismos que se aprecian en la figura 9. [16][18]



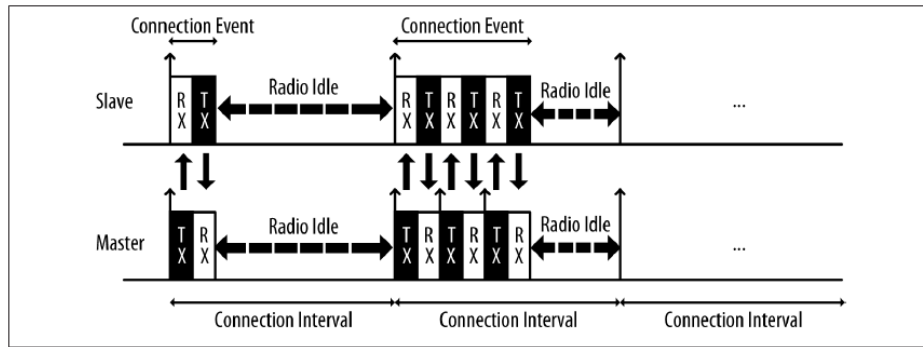
**Figura 9** Eventos en los dispositivos BLE: escaneo pasivo y escaneo activo [18]

- Escaneo pasivo (Passive Scanning): Es cuando el escáner escucha solamente mientras el anunciante ignora que el escáner este recibiendo paquetes de datos [18].
- Escaneo activo (Active Scanning): Es cuando el escáner envía una solicitud de escaneo de paquete (Scan Request packet) al haber recibido un paquete anunciante previamente. El anunciante recibe esta solicitud y enseguida responde con una respuesta de escaneo de paquete (Scan Response packet), luego duplica la carga útil efectiva para enviarla al escáner [18].

### 1.3.3.3. Conexión

Una conexión es establecida cuando un esclavo haya aceptado la solicitud de conexión del master. Durante un intervalo de conexión se producen dos eventos conocidos como: evento de conexión (intercambio de información entre los dispositivos master y esclavo) y el evento de radio inactivo (los dos dispositivos se apagan momentáneamente hasta el siguiente intervalo de conexión) [17][18].

Los intervalos de conexión pueden ser configurados desde rangos de 7ms hasta 4s dependiendo la aplicación, tomando en cuenta que mientras menor es el rango, mayor ahorro de energía [16].



*Figura 10 Eventos de conexión de dispositivos master y esclavo [18]*

### 1.3.3.4. Adaptación de protocolo y control de enlace lógico (L2CAP)

Este protocolo tiene dos funciones principales: Es un multiplexor de los protocolos de las capas superiores para luego encapsularlos bajo las normativas del formato de paquetes BLE. Otra función es la de fragmentación y recombinación de paquetes; para el envío toma grandes paquetes de las capas superiores y los fragmenta en pequeños pedazos de 27 bytes (tamaño de la carga útil BLE), en el receptor toma estos fragmentos de 27 bytes y los recombina en un solo paquete para posteriormente enviarlos a la entidad correspondiente en las capas superiores [16][17][18].

### 1.3.3.5. Protocolo de atributo (ATT)

Es un protocolo sin estado cliente/servidor, donde el servidor contiene datos organizados en forma de atributos (identificador de atributos, identificador único universal UUID, conjunto de permisos y valor) que son expuestos al cliente. Los dispositivos pueden actuar como cliente o servidor independientemente si es un master o esclavo, donde el cliente solicita información al servidor y posteriormente el servidor responde a esa solicitud y envía los datos (secuencia estricta del ATT) [16][17][18].

### 1.3.3.6. Protocolo de administración de seguridad (SMP)

Es un protocolo que gestiona la almacenamiento y generación de claves de cifrado e identidad en los dispositivos BLE, además genera y almacena direcciones aleatorias para las identidades de los dispositivos conocidos. De esta manera asegura la integridad en la seguridad de los enlaces. Este protocolo utiliza los servicios de la capa L2CAP para realizar sus procedimientos [17][18].

### **1.3.3.7. Perfil de acceso genérico (GAP)**

El perfil de acceso define la funcionalidad básica de los dispositivos BLE, incluyendo los modos de los mismos, también incluye los procedimientos genéricos para encontrar otros dispositivos cercanos, seguridad y establecimiento de conexiones [16][18].

GAP permite la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes, ya que incluye terminologías que este perfil recomienda a ser usada como, por ejemplo: nombre del dispositivo, passkey, dirección del dispositivo BLE, etc. [18].

### **1.3.3.8. Perfil de atributo genérico (GATT)**

El perfil de atributo genérico es un protocolo que permite el intercambio de datos y perfiles del usuario en una conexión entre un servidor y un cliente. Este perfil utiliza el protocolo de atributo (ATT) para definir procedimientos de como leer, escribir y obtener indicaciones de los atributos contenidos en el servidor, además define como realizar el envío de atributos entre los dispositivos [16][17][18].

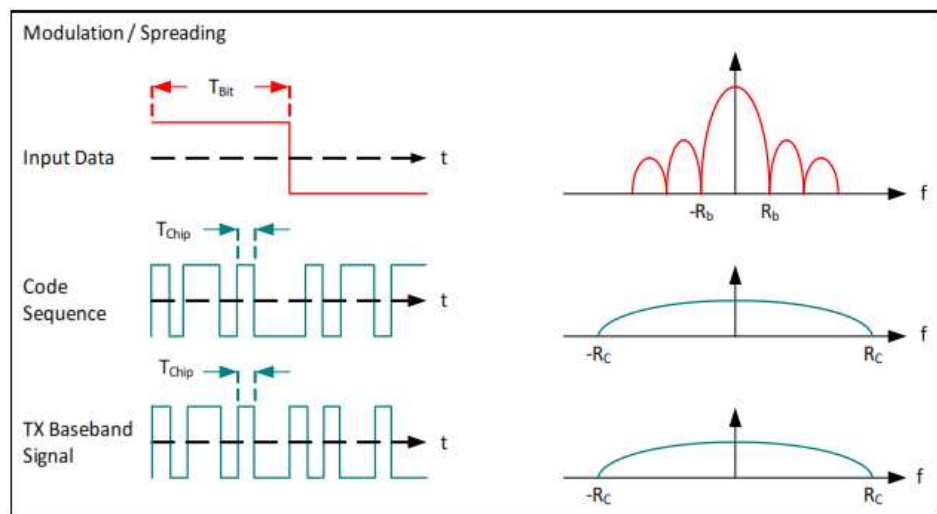
## **1.4. Tecnología Lora**

LoRa (Long-Range o largo alcance) es una tecnología de sistemas de comunicación de largo alcance desarrollada por Semtech y promovida por LoRa Alliance, fue diseñada con el propósito de utilizarla en dispositivos alimentados por baterías cuyo tiempo de vida sea prolongado. LoRa se divide en dos capas fundamentales: la capa física LoRa que es una modulación de espectro ensanchado de tipo Chirp (CSS) y la capa de control de acceso al medio (MAC) LoRaWAN [19][20].

### **1.4.1. Generalidades del espectro ensanchado**

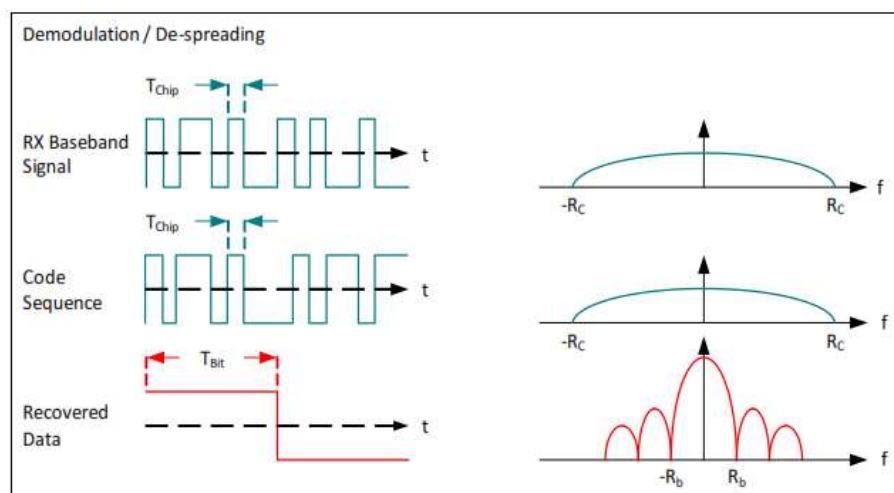
El incremento del ancho de banda de una señal es una técnica de modulación que permite reducir la degradación en la relación señal-ruido. Este es un proceso que consiste en multiplicar una señal de datos por una señal con un código de ensanchamiento o también se llama secuencia de Chip [21].

En la figura 11 se tiene una representación del proceso de ensanchamiento de banda de una señal.



*Figura 11 Proceso de ensanchamiento en la modulación [21]*

En cuanto al receptor, se realiza el mismo proceso de manera inversa, ya que recibe una señal de banda base, esta señal es multiplicada por la misma secuencia de código, luego de esta multiplicación, la señal resta su ancho de banda original [21].



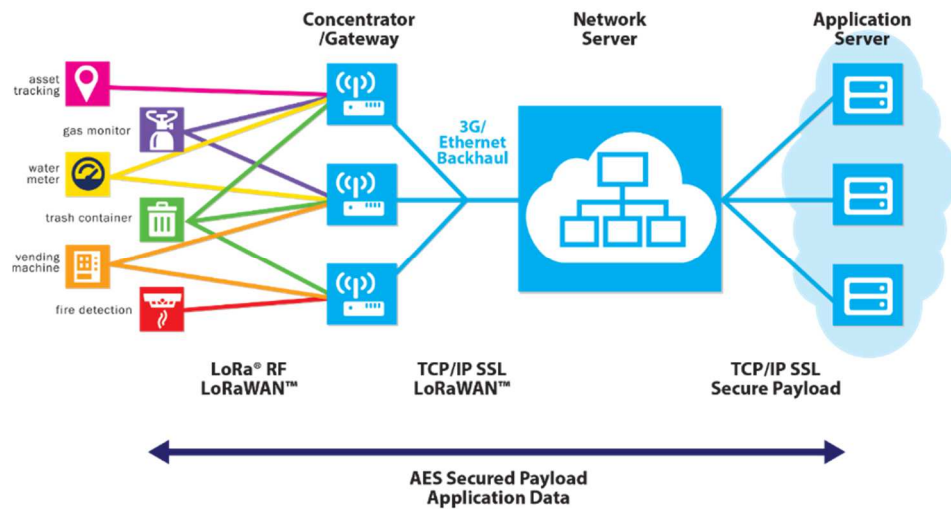
*Figura 12 Proceso inverso en la demodulación [21]*

### **1.4.2. Capa física de lora**

La capa física LoRa permite implementar sistemas de comunicación de largo alcance, bajo consumo de potencia y de bajo rendimiento, trabaja en las bandas no licenciadas ISM 433, 868 y 915 MHz. LoRa es una modulación de espectro ensanchado de tipo Chirp, este ensanchamiento se consigue generando una señal chirp que varía continuamente en frecuencia. La ventaja de utilizar este método es que los desplazamientos en frecuencia y en tiempo, tanto en el dispositivo receptor como en el transmisor son equivalentes, reduciendo la complejidad de diseño y costo del dispositivo receptor, lo que hace que esta modulación sea inmune al efecto Doppler. Otra de las propiedades que tiene la modulación LoRa es que, debido a que la duración del periodo de símbolo LoRa es mucho más largo que las ráfagas de corta duración de los sistemas de espectro ensanchado por saltos en frecuencia (FHSS), permite que estos sistemas tengan inmunidad a las interferencias AM. Consiguiendo así en el receptor una selectividad fuera del canal de 90 dB y un rechazo de co-canal de 20 dB. LoRa utiliza una topología de tipo estrella donde existen 3 tipos de dispositivos diferentes: dispositivo final (ED), Gateway LoRa y el servidor de red LoRa. En la modulación LoRa existen tres parámetros que pueden ser configurados: el ancho de banda (BW), el factor de ensanchamiento (SF) y la tasa de código (CR), estos tres factores influyen directamente en su resistencia a interferencias, su facilidad de decodificación y en la tasa de bits efectiva de modulación [19][20][22].

### **1.4.3. El protocolo LoRaWAN**

LoRaWAN es una capa de control de acceso al medio, diseñada para ser utilizada por la capa física LoRa. Se utiliza en dispositivos como sensores donde se tiene baja tasa de transmisión de datos y la comunicación se realiza en relativamente largos periodos de tiempo [19][20][22].



*Figura 13 Arquitectura de red LoRaWAN [19]*

Los componentes de este protocolo son tres [19][22][23]:

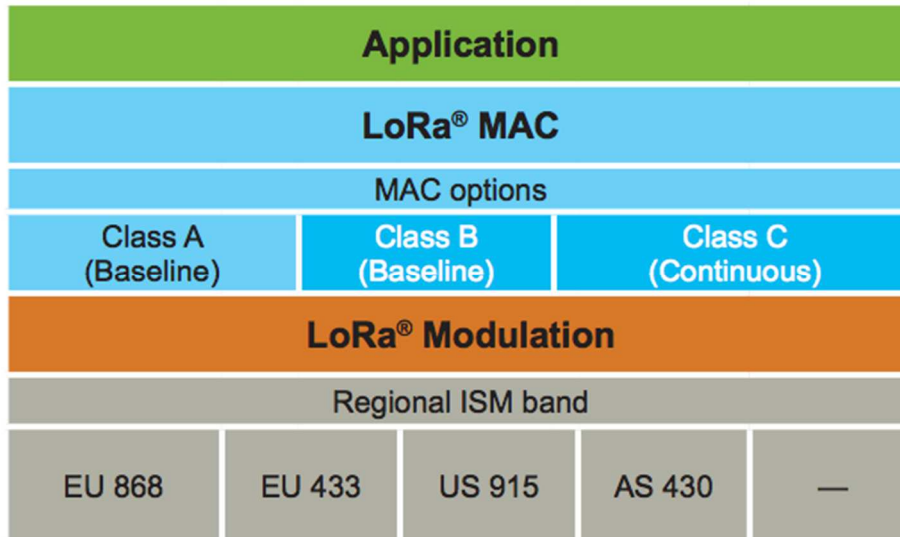
- **Dispositivos finales:** son sensores de bajo consumo energético que se comunican con el Gateway por LoRa.
- **Gateway:** Son dispositivos intermediarios que se encargan de comunicar los dispositivos finales con el servidor de red LoRa, varios gateways pueden recibir información de un solo dispositivo final.
- **Servidor de red:** Reciben la información de los dispositivos finales para su respectivo procesamiento y luego envían de regreso una respuesta a estos dispositivos.

Existen tres tipos de dispositivos finales que se distinguen solamente por su configuración de enlace descendente [19][22][23]:

- **Clase A:** Son dispositivos de comunicación bidireccionales, cuando su transmisión de enlace ascendente es activada, este es seguido por dos ventanas cortas de enlace descendente. Son de menor consumo energético.
- **Clase B:** Son dispositivos de comunicación bidireccionales los cuales cuentan con slots programables para recibir información cada cierto tiempo, se

sincronizan con el Gateway para que este sepa cuando el dispositivo final está escuchando. Son de mayor consumo energético que los de clase A.

- **Clase C:** Son dispositivos de comunicación bidireccionales que están habilitados continuamente para recibir o enviar información. Son los de mayor consumo energético.



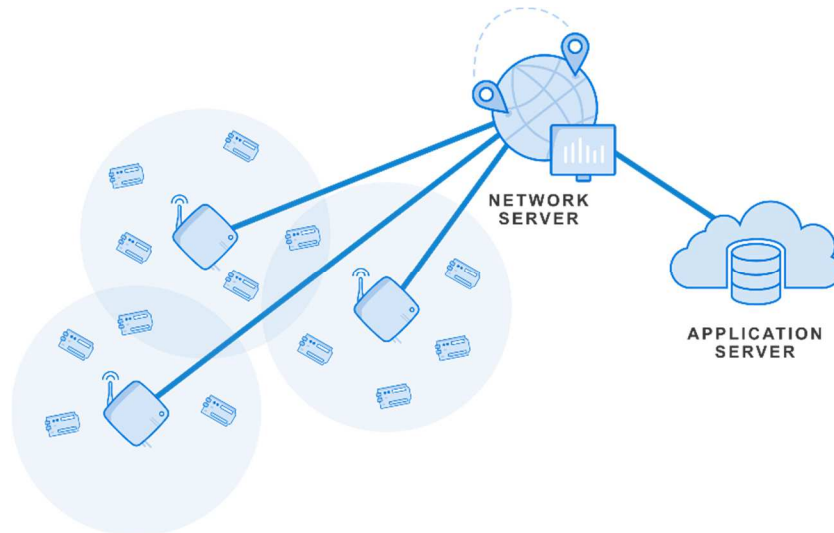
*Figura 14 Pila de protocolos en LoRaWAN [19]*

## 1.5. The Things Network

The Things Network es una plataforma descentralizada y de código abierto del internet de las cosas (IoT), cuyo objetivo es permitir a dispositivos de bajo consumo energético utilizar Gateways de largo alcance para comunicarse con una red para el intercambio de datos utilizando aplicaciones. The Thing Network es compatible con todo tipo de dispositivo LoRaWAN certificado [24].

Al utilizar LoRaWAN se requiere de un servidor de red que se encargue de algunos subprocesos propios del protocolo como la gestión de gateways, el enrutamiento de mensajes hacia la aplicación, seguridad, etc. [24].





*Figura 15 Estructura general de una red LoRaWAN [24]*

## 1.6. Node-RED

Node-RED es una herramienta de programación visual desarrollada por IBM que permite conectar APIs, dispositivos de Hardware y servicios online. Esta herramienta provee un editor de flujo basado en navegador, esta forma de programación permite estructurar aplicaciones en una red de Nodos, donde cada nodo tiene una función en específico. Node-RED tiene una biblioteca de nodos incorporada, no obstante, es posible crear funciones de JavaScript usando el editor de texto enriquecido y pueden ser guardadas en la biblioteca para reutilizarlos [25]

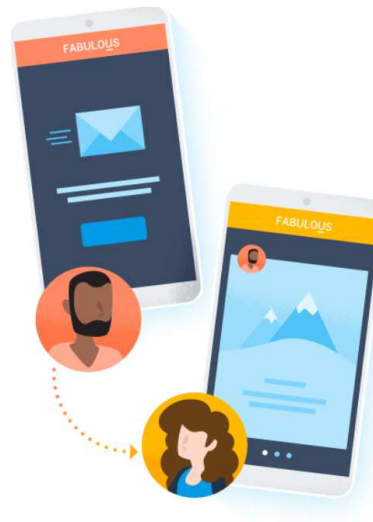


*Figura 16 Estructura de programación Node-RED [25]*

## 1.7. Firebase

Es una plataforma de servicios que contiene herramientas para permitir el intercambio de datos entre las aplicaciones móviles o web, inclusive se puede trabajar

para aplicaciones nativas como IOS y Android. Entre los servicios posee una base de datos en tiempo real lo que implica que la información en las aplicaciones puede ser actualizada de manera instantánea, además contiene métodos de autenticación para brindar mayor seguridad a los usuarios (permite autenticación con redes sociales como Facebook, Twitter, etc.) como también servicio de hosting en caso de compartir o publicar las aplicaciones [26].



*Figura 17 Firebase*

## **1.8. App Inventor**

App Inventor es una plataforma de desarrollo de software para aplicaciones Android. Es un entorno de programación visual que posee bloques con funciones básicas lo que facilita la creación de aplicaciones de mucha utilidad en menor tiempo que en los entornos de programación tradicionales [27].



*Figura 18 Plataforma para aplicaciones Android*

## **1.9. Twilio**

Twilio es un entorno de programación que permite desarrollar aplicaciones de comunicación en la nube y sistemas web. Las APIs que twilio ofrece a los usuarios proporciona una experiencia de comunicación adecuada de las aplicaciones web y móviles. Entre las funcionalidades que los desarrolladores pueden agregar a sus aplicaciones son: mensajes de voz, mensajes de texto, video llamadas, entre otros [28].



*Figura 19 Algunas de las funciones que ofrece la plataforma Twilio*

## **CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO**

Para el diseño del sistema se han tomado en cuenta las siguientes características:

- Que los dispositivos implementados sean de tamaño y peso reducido para que su uso no comprometa la comodidad y/o desempeño del ciclista durante sus recorridos.
- Que sea eficiente en cuanto al consumo energético, permitiendo de esta manera, el uso de baterías pequeñas y ligeras (por consiguiente, su capacidad será limitada) y que sean recargadas o reemplazadas en un período de tiempo extendido.
- Que el sistema requiera la mínima intervención por parte del usuario para su funcionamiento.
- Que sea eficaz al momento de la detección de accidentes que conlleven un impacto en la cabeza, evitando así los falsos positivos y/o falsos negativos.

## 1.10. Descripción del sistema

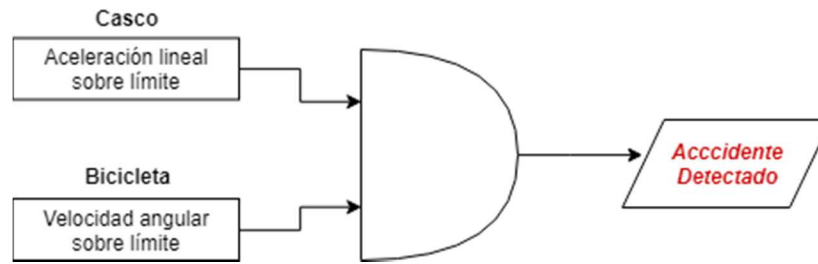
En la ocurrencia de un accidente durante la conducción de una bicicleta, tanto el ciclista, como su vehículo, experimentan aceleraciones y rotaciones de magnitud variable según la dinámica del suceso, pues es dependiente de varios factores, por ejemplo, la velocidad de desplazamiento, la fuerza de impacto, la dirección, etc.

En cuanto al ciclista, los valores de aceleración presentes en la cabeza son los más importantes al momento de determinar el riesgo en que se pudiera encontrar, ya que, en dicho escenario, se convierte en la parte del cuerpo más vulnerable a lesiones severas. Es por lo tanto necesario el uso de un acelerómetro triaxial implementado en el casco, que monitoree estos valores en búsqueda de picos de magnitud.

Si bien, una elevada aceleración presente en el casco, sin importar su dirección, puede ser producto de una caída, en el uso cotidiano también puede ser originada por acciones muy distintas, por ejemplo, dejar caer el casco contra el suelo. Para estos casos se debe contar con un método de validación adicional que proporcione mayor grado de certeza en la detección de accidentes que involucren un golpe craneal. Para este fin se hace uso de un segundo sensor para capturar parámetros cinemáticos, esta vez en la bicicleta.

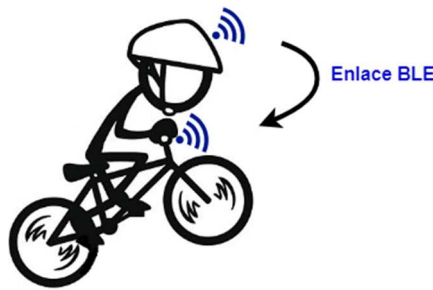
A diferencia de las mediciones en el casco, la aceleración en la bicicleta no es el parámetro más conveniente para tomar en cuenta para detectar un accidente, pues durante un recorrido, el vehículo puede ser sometido a grandes magnitudes de aceleración en los tres ejes dimensionales. Aquí la aproximación es otra, el parámetro a ser cuantificado y monitoreado es la velocidad de rotación, magnitud que no debería ser excesiva en condiciones de circulación normal, no así en una situación de caída o impacto, que comúnmente lleva al objeto a experimentar giros antes de alcanzar el reposo. Por lo tanto, es conveniente implementar un giroscopio que monitoree la velocidad angular en un número de ejes dependiente de su ubicación en la bicicleta.

Hasta este punto se ha hecho evidente la necesidad de dos sistemas embebidos, uno para el casco y otro para la bicicleta. Estos dispositivos deben mantener comunicación inalámbrica con el objetivo de verificar que ambas señales estén activas en un mismo rango de tiempo y así determinar la ocurrencia de un accidente.



*Figura 20 Método de validación en la detección de un accidente*

El protocolo de comunicación elegido para este enlace es BLE (Bluetooth Low Energy) debido a que sus características se acoplan a los requerimientos de eficiencia energética y periodos de conexión extendidos.



*Figura 21 Los dispositivos que componen el sistema mantienen comunicación BLE*

Debido a que el prototipo en el casco tiene limitaciones de dimensión y peso, más importantes en comparación a aquel integrado en la bicicleta, las funciones adicionales que debe cumplir el sistema son implementadas en el último.

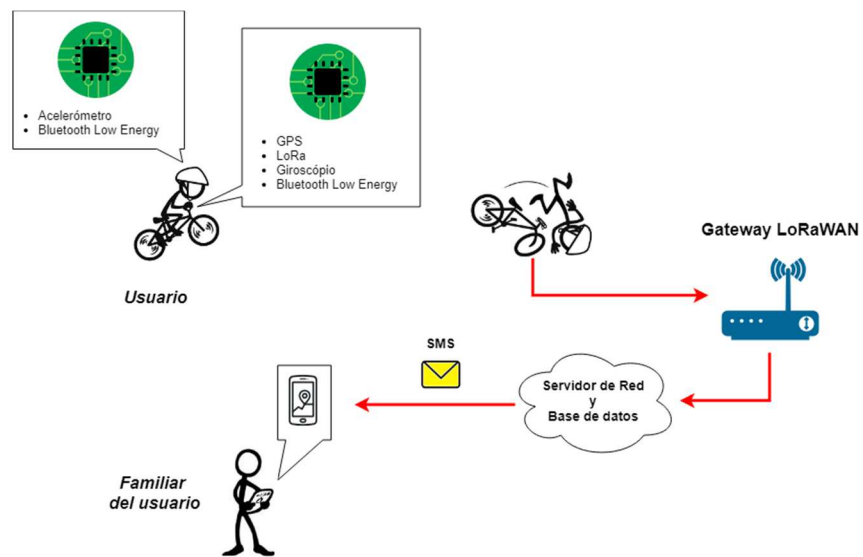
El sistema debe obtener los datos de posición global del lugar en donde sucedió el percance, para lo cual se hace uso de un receptor GNSS (Global Navigation Satellite System).

Para la transmisión de la información obtenida, el dispositivo principal, que es aquel montado en la bicicleta, es también un nodo móvil dentro de una red LoRaWAN mediante la inclusión de un transceptor de radio frecuencia dedicado para este protocolo. Cuando el paquete generado es receptado por un Gateway, la información es dirigida a los servidores en la nube y procesada para emitir alertas a los contactos telefónicos del usuario mediante un mensaje de texto (SMS).

En la figura 22 se muestra un diagrama que describe el funcionamiento del sistema propuesto.

El circuito en la bicicleta por sí solo es capaz de ejecutar algunas tareas sin necesidad de estar conectado al del casco, pues este último sólo hace parte de la

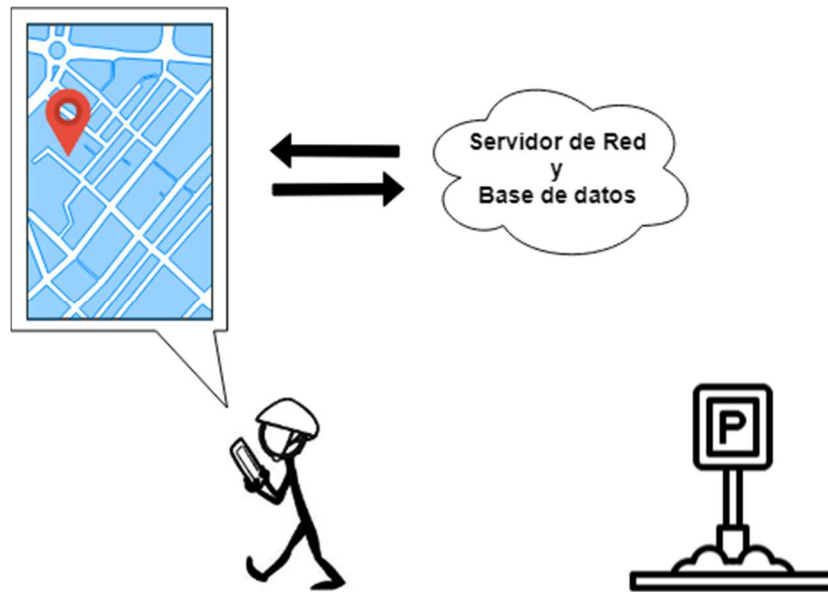
detección de impactos. Es por ello que se incluye una función adicional muy útil para los ciclistas, que consiste en el rastreo del vehículo en situaciones que lo ameriten, principalmente robo. Durante el funcionamiento normal, los datos de posición son sólo transmitidos luego de un accidente e incluyendo una alerta del suceso. El envío periódico de la ubicación de la bicicleta no es factible por el descenso drástico en el consumo de la batería al mantener activo el receptor GNSS y el transmisor por mucho más tiempo, además de ser intrusivo con la privacidad del usuario que probablemente hará uso del rastreo en escasas ocasiones.



*Figura 22 Funcionamiento del sistema propuesto*

Un método más efectivo es activar esta función en el nodo móvil de forma remota, y esto es posible gracias a la capacidad de transmisión de mensajes en enlace descendente del protocolo LoRaWAN. Debido a que en la clase A de LoraWAN, implementada para esta aplicación, un enlace descendente sólo puede darse en ventanas de tiempo posteriores a un enlace ascendente, el dispositivo emite pequeños paquetes de forma periódica en intervalos de una hora, los datos son mínimos para reducir el tiempo al aire del transmisor y reducir el consumo energético, esta información será el nivel de carga de la batería. De esta manera se tiene un canal de recepción habilitado en el dispositivo, que servirá para obtener un eventual comando de activación del protocolo de búsqueda que consiste en la transmisión de datos de posición en intervalos de tiempo más cortos, en este caso de un minuto.

La interacción del usuario con el sistema se hace desde una aplicación móvil en donde se puede verificar el estado de la batería, editar los contactos a notificar en caso de emergencia y activar el rastreo en caso de ser necesario, haciendo un seguimiento en un mapa que se actualiza con cada nuevo mensaje que llega desde el dispositivo.



*Figura 23 En caso de robo, el ciclista puede localizar su bicicleta desde la aplicación móvil*

### **1.11. Sistema Embebido en el Casco**

El sistema embebido en el casco debe cumplir dos tareas principales:

- Mantener comunicación BLE
- Tomar lecturas de aceleración en los tres ejes dimensionales

Para el diseño del prototipo se ha elegido el SoC (System on Package) nRF52810 que integra un microcontrolador y un módulo RF de 2.4GHz con soporte para BLE 5.0. En la tabla 1 se presentan sus principales características.



*Tabla 1 Características de nRF52810 [29]*

Características técnicas del SoC nRF52810	
Transceptor	2.4 GHz
Procesador	ARM® Cortex®-M4 32-bit
Alimentación	1.7 V–3.6 V
Memoria	192 kB flash and 24 kB RAM
Nordic SoftDevice ready	-
Soporte para multiprotocolo concurrente	-
Canales programables con ganancia configurable	8
Comparador	64 niveles
Sensor de temperatura	1
PWM	4 canales con EasyDMA
Temporizador	3x 32 bits con modo contador
Pines de propósito general	32
Interfaz de micrófono digital	1
SPI maestro / esclavo con EasyDMA	1
I2C compatible de 2 hilos maestro / esclavo	1
I2S con EasyDMA	1
UART (CTS/RTS) con EasyDMA	1
Decodificador de cuadratura (QDEC)	1
Real time counter	2
Dimensiones	6 × 6 mm

El modelo de acelerómetro elegido es el LIS2DH12, de medición lineal en tres ejes, entre sus características principales se encuentra que es un dispositivo de ultra bajo consumo de energía, posee escalas completas que pueden ser seleccionadas por el usuario de entre  $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$ , Interfaz serial I2C/SPI y tiene la capacidad de medir aceleraciones con frecuencia de datos de salida desde 1Hz hasta 5.3kHz [30].

**Tabla 2 Características principales de LIS2DH12 [30]**

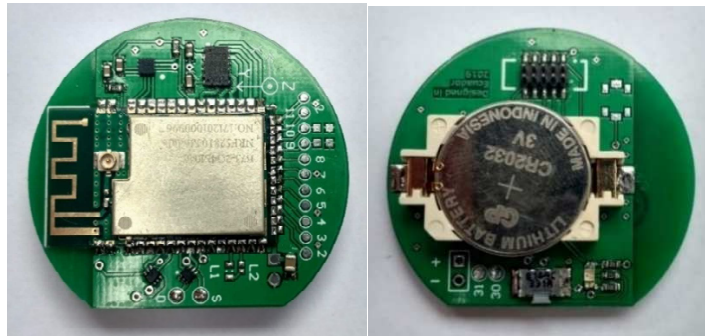
Características técnicas de LIS2DH12	
Dimensiones	2.0 x 2.0 x 1.0 mm
Alimentación	1.71 V a 3.6 V
Consumo	Hasta 2 $\mu$ A
Escalas	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$
Interfaz de salida digital	I2C/SPI
Interrupciones	2
Detección de orientación	6D/4D
Funciones	“Sleep-to-wake” y “return-to-sleep” Detección de caída libre Detección de movimiento
Sensor de temperatura	1

La configuración del acelerómetro se realizó aprovechando los canales de interrupción que este ofrece, así el microcontrolador puede permanecer en estado de inactividad y activarse con la interrupción en uno de sus pines. El formato de salida de los datos se configuró a 8-bits ya que la aplicación no requiere precisión adicional. La tasa de muestreo seleccionada es de 400Hz debido a que presenta el mejor balance entre respuesta de detección y drenaje de corriente como se puede observar en la información obtenida de la hoja de datos del circuito integrado en la figura 24. La escala de medición fue establecida en su valor máximo de 16G, que si bien no es elevada para la cuantificación de impactos fuertes, permite contar con un sensor económico que complementa un sistema más amplio en la detección de dichos eventos.

Operating mode [Hz]	Low-power mode (8-bit data output) [ $\mu$ A]	Normal mode (10-bit data output) [ $\mu$ A]	High resolution (12-bit data output) [ $\mu$ A]
1	2	2	2
10	3	4	4
25	4	6	6
50	6	11	11
100	10	20	20
200	18	38	38
400	36	73	73
1344	--	185	185
1620	100	--	--
5376	185	--	--

**Figura 24 Diferentes modos de operación del acelerómetro LIS2DH12 y su consumo [30]**

En la figura 25 se muestra la placa electrónica construida para el prototipo en el casco, mientras que en la figura 26 se muestra la carcasa plástica impresa en 3D.

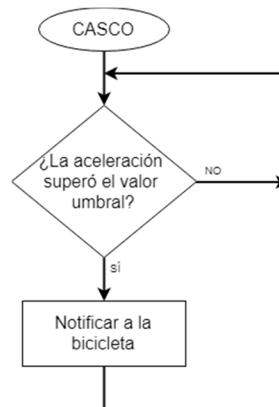


*Figura 25 Placa electrónica del prototipo para el casco*



*Figura 26 Carcasa de protección para sistema embebido del casco*

El algoritmo implementado se presenta en el diagrama de flujo de la figura 27, se trata de un bucle de verificación continua de valores de aceleración que en caso de exceder el valor umbral de 16G, se notifica mediante BLE al circuito en la bicicleta.



*Figura 27 Diagrama de Flujo del dispositivo montado en el casco*

## 1.12. Sistema Embebido en la Bicicleta

El sistema embebido en la bicicleta está diseñado para cumplir principalmente las siguientes tareas:

- Mantener comunicación BLE
- Medir la velocidad angular en dos ejes
- Obtener coordenadas de posición global
- Enviar y recibir mensajes LoRaWAN

El dispositivo en la bicicleta está diseñado para cumplir adicionalmente la función de un faro preventivo para los recorridos nocturnos, estos son ampliamente utilizados con el fin de aumentar la visibilidad del ciclista en las vías. Debido a esto, el prototipo será ubicado en el manubrio de la bicicleta y no sería útil la lectura del giroscopio en el eje Z, pues la rotación en este eje es propia de la conducción.

Se utiliza el SoC nRF52832, que es una variante del circuito integrado utilizado para el prototipo en el casco, pero con mayor capacidad de memoria, en la tabla 3 se presentan sus características principales.

**Tabla 3 Características de nRF52832 [31]**

Características técnicas de la nRF52832	
Transceptor	2.4 GHz
Procesador	ARM® Cortex®-M4 32-bit
Alimentación	1.7 V–3.6 V
Memoria	512 kB flash/64 kB RAM
	256 kB flash/32 kB RAM
Nordic SoftDevice ready	-
Soporte para multiprotocolo concurrente	-
Canales programables con ganancia configurable	8
Comparador	64 niveles
Comparador de baja potencia	15 niveles con activación desde modo de apagado del sistema
Sensor de temperatura	1
PWM	3x 4 canales con EasyDMA
Temporizador	5x 32 bits con modo contador
Pines de propósito general	32
Interfaz de micrófono digital	1

SPI maestro / esclavo con EasyDMA	Hasta 3
I2C compatible de 2 hilos maestro / esclavo	Hasta 2
I2S con EasyDMA	1
UART (CTS/RTS) con EasyDMA	1
Decodificador de cuadratura (QDEC)	1
Real time counter	3
Dimensiones	6 × 6 mm

Para la obtención de datos de posicionamiento se utiliza el módulo receptor GPS L80-R que integra una antena cerámica y reduce el espacio ocupado en la placa de circuito en comparación con otras alternativas en donde se requiere de una antena externa. Sus características se presentan en la tabla 4.

*Tabla 4 Características principales de GPS Quectel L80-R [32]*

Características técnicas de L80-R	
Dimensiones	15 × 15 × 4mm
Alimentación	3.3V
Tipo de receptor	GPS L1 1575.42MHz C/A Code
Sensibilidad	Adquisición: -148dBm/Re-Adquisición: -160dBm/Rastreo: -165dBm
Precisión de orientación horizontal	<2.5m CEP @-130dBm
Tasa de subida máxima	Hasta 5Hz, 1Hz por defecto de precisión
Detección de orientación	6D/4D
Precisión de señal 1PPS	±10ns
Precisión de velocidad	0.1 m/s
Precisión de aceleración	0.1 m/s <sup>2</sup>
Rendimiento dinámico	Máxima altitud: 18000 m Máxima velocidad: 515 m/s Aceleración: 4G
Puerto	UART
Rango de temperatura	Operación normal: -40 °C a 85 °C

El módulo transceptor LoRa empleado es el RFM95, que integra circuitos de sintonización, filtrado y osciladores en una pequeña PCB, simplificando el ensamblaje de la placa final. Sus características se presentan en la tabla 5.

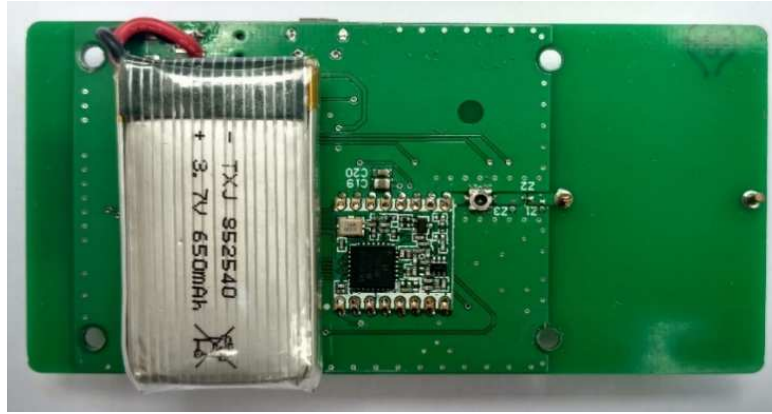
*Tabla 5 Características del módulo LoRa RFM95 [33]*

Características técnicas del módulo RFM95	
Dimensiones	16*16mm
Presupuesto de enlace máx.	168dB
Tasa de datos máxima	300kbps
Sensibilidad	-148 dBm
Corriente de RX	10 mA
Retención de registro	200nA
Salida de RF	20 dBm
Alimentación	100mW
Modulador	FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa y OOK
Rango dinámico RSSI	127 dB

En las figuras 28 y 29 se muestra la placa electrónica construida para el prototipo montado en la bicicleta, se trata de una placa de dos capas con elementos en ambas caras a fin de optimizar el espacio al máximo.

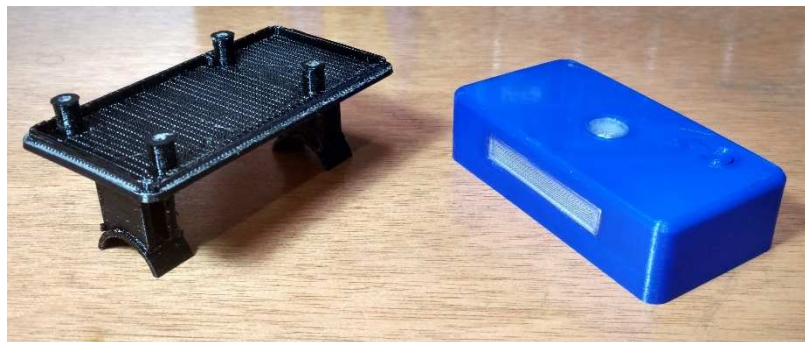


*Figura 28 Vista frontal del sistema embebido de la bicicleta*



*Figura 29 Vista posterior del sistema embebido de la bicicleta*

En la figura 30 se muestra la carcasa plástica impresa en 3D que consta de dos partes, una base, que se sujeta al manubrio de la bicicleta mediante correas plásticas y en donde se ubica la placa con la batería, y una cubierta que permite visualizar la luz de los leds indicadores, así como la interacción con los pulsantes.



*Figura 30 Carcasa de protección para sistema embebido de la bicicleta*

El algoritmo implementado parte de la verificación de recepción de un aviso de impacto proveniente del dispositivo en el casco mediante el enlace BLE, cuando este es afirmativo, se comprueba si también existe un aviso de rotación de la bicicleta. De ser así se inicia el protocolo de emergencia con la activación del GPS hasta obtener datos válidos y posteriormente transmitir la información mediante LoRaWAN. Adicionalmente se incluye una etapa de confirmación de recepción de la alerta, que se efectúa con la transmisión de un mensaje desde el Gateway. En caso de no existir una confirmación se continúa transmitiendo indefinidamente.

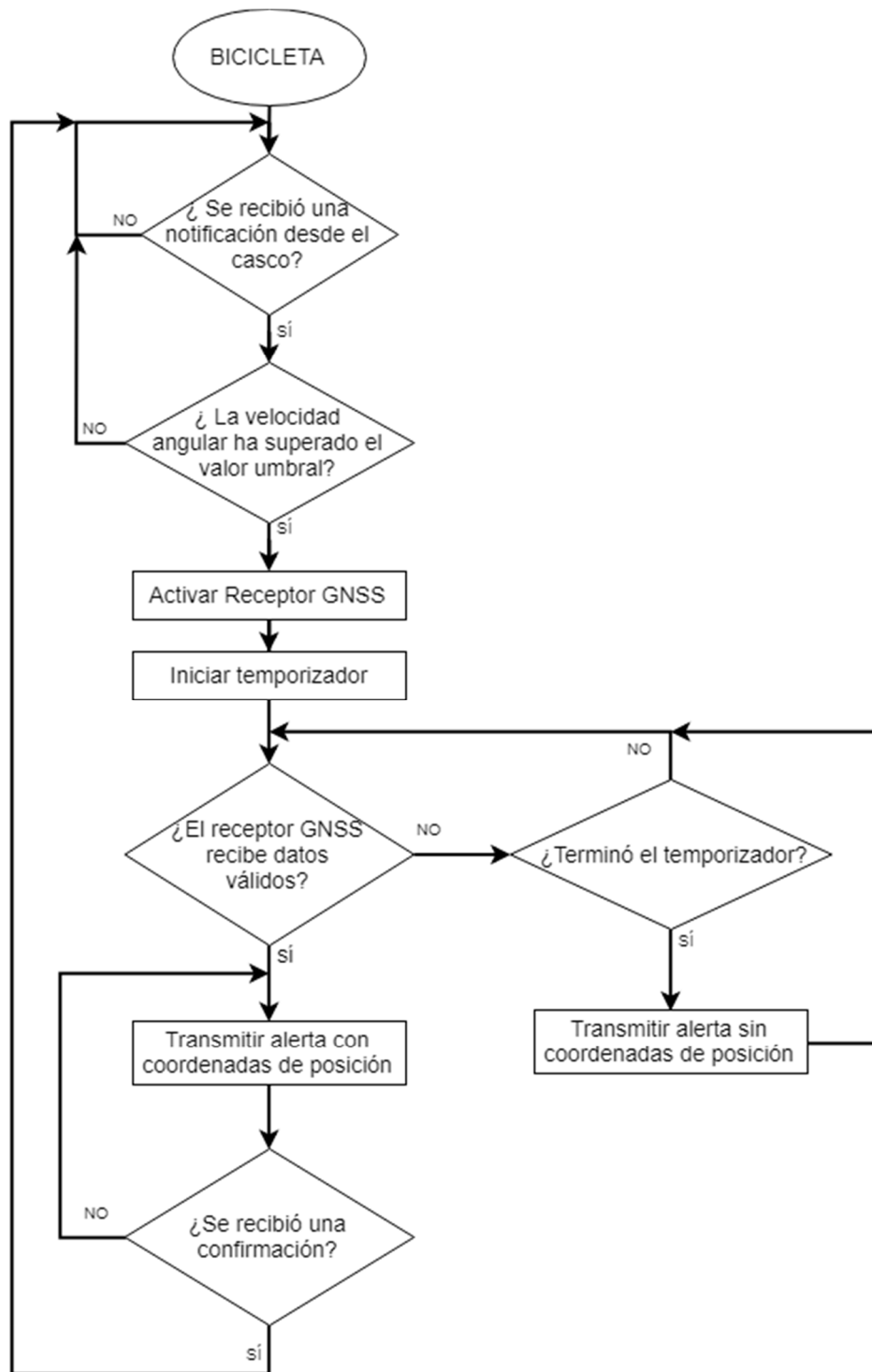


Figura 31 Diagrama de Flujo del dispositivo montado en la bicicleta



### 1.13. Implementación del Gateway LoRa

Está compuesto por hardware dedicado para cumplir la función de puente de enlace entre el protocolo LoRaWAN y el protocolo de internet (IP), conectado a una computadora Raspberry Pi. El firmware provisto por el fabricante se ejecuta sobre el sistema operativo basado en Linux, Raspbian.

Raspberry Pi 3 es una pequeña tarjeta de ordenador de código abierto basada en Linux que permite desarrollar innumerables actividades y aplicaciones como lo haría un ordenador de escritorio. Su poder de procesamiento y costo la hace ideal en aplicaciones de IoT (Inthernet of Things) [34].

*Tabla 6 Características de Raspberry Pi B 3 [34]*

Características técnicas de Raspberry Pi B 3	
Dimensiones	85 x 56 x 17mm
Procesador	ARM Cortex-A53
Velocidad de procesamiento	1.2GHz
Memoria	1GB LPDDR2
Sistema operativo	Linux y Windows 10 IoT
Alimentación	Micro USB socket 5V1, 2.5A
Puertos	4x USB 2.0 10/100 Ethernet s
Salida de video	HDMI
Conector GPIO	40 pines
Conector de cámara	15-pin MIPI Camera Serial Interface
Conector de display	Display Serial Interface
Slot tarjeta memoria	Push/pull Micro SDIO

La RAK831 es un concentrador LoRa que permite el desarrollo de una gran cantidad de aplicaciones como IoT, M2M y Smart Metering. Este dispositivo puede cumplir las funciones de Gateway con la ayuda de un sistema de host (Raspberry Pi, WisAP o WisCam) para su correcta operación y el procesador puede ser una PC conectado a través de USB o SPI. Otra de las características de este dispositivo es que puede recibir de forma simultánea hasta 8 paquetes LoRa cada uno con factores de propagación diferentes sobre canales diferentes [35].

*Tabla 7 Características de RAK831 [35]*

Características técnicas de la RAK831	
Dimensiones	80.0 x 50.0 x 5.0mm
Banda de frecuencias	433,470, 868,915MHz
Sensibilidad	-142.5 dBm
Presupuesto de enlace	162 dB
Procesador de banda base	SX1301
Caminos de demodulación paralelos	12
Demodulador	(G)FSK
Suministro de voltaje	5V
Receptor GPS	1
Leds de estatus	2

### **1.14. Implementación en la nube**

Una implementación en Node-RED que corre en el servicio IBM Cloud es la encargada de integrar las tres plataformas que componen el sistema: The Things Network, Firebase y Twilio. Los mensajes intercambiados entre el gateway y el nodo móvil en la bicicleta son gestionados en el servidor TTN, toda la información del usuario y el estado del dispositivo es almacenada en una base de datos en Firebase, el envío de SMS se realiza a través de una función de Twilio a la que se provee el texto y número de teléfono. En la figura 32 se muestra la estructura del sistema.

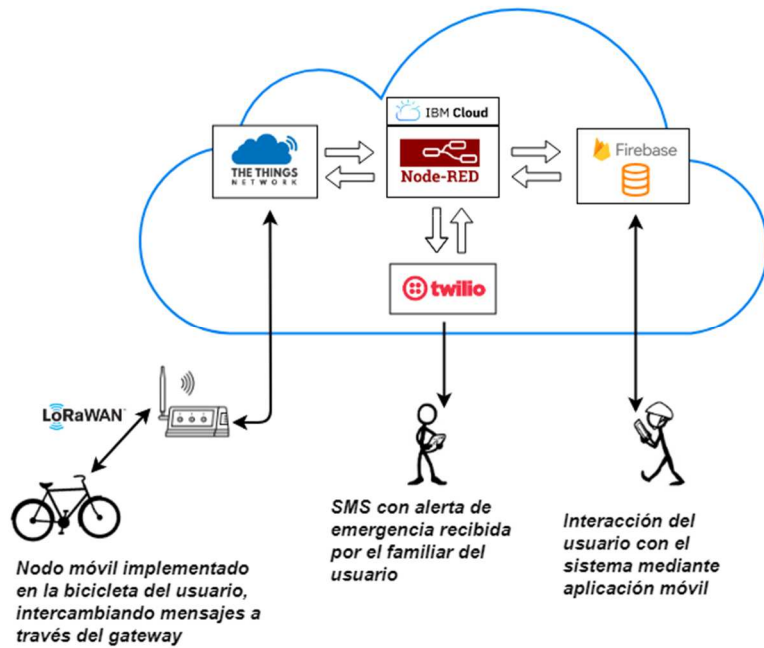


Figura 32 Integración de servicios en la nube

## 1.15. Configuración del Servidor de red The Things Network

Para la conexión de los nodos móviles con el Gateway, estos tienen que ser registrados en el servidor The Things Network. En la figura 33 y 34 se muestran los identificadores y llaves tanto para la aplicación como para el dispositivo.

**APPLICATION OVERVIEW**

Application ID `localizacion_bici`

Description Recibir datos de posición desde los nodos móviles montados en las bicicletas

Created 2 months ago

Handler ttn-handler-us-west

---

**APPLICATION EUI64**

<> 70 B3 D5 7E D0 01 C6 6D

Figura 33 Aplicación en The Things Network

Application ID **localizacion\_bici**

Device ID bici\_01

Activation Method **OTAA**

Device EUI <> 00 E8 21 A4 6E B1 5C 77

Application EUI <> 70 B3 D5 7E D0 01 C6 6D

App Key <> .....

Device Address <> 26 02 2C 48

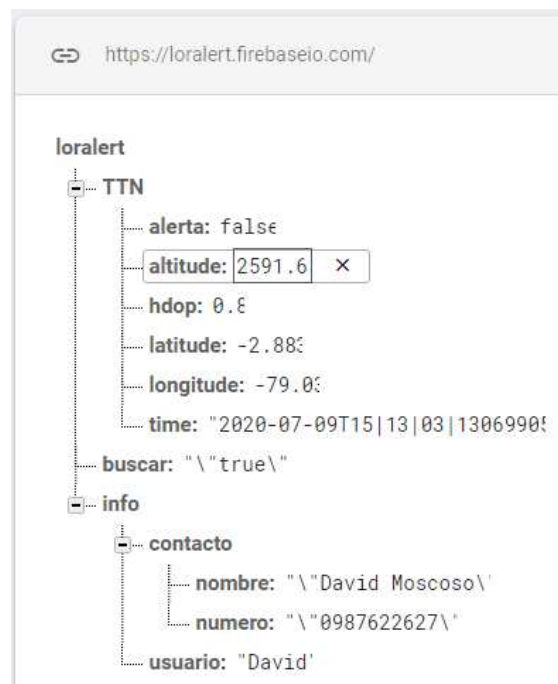
Network Session Key <> .....

App Session Key <> .....

*Figura 34 Registro de nodo dentro de la aplicación*

## 1.16. Creación de la base de datos en Firebase

La aplicación requiere de una base de datos en tiempo real que notifique de cambios existentes en las variables almacenadas, para este fin se ha creado una base de datos con los datos que se muestran en la figura 35.

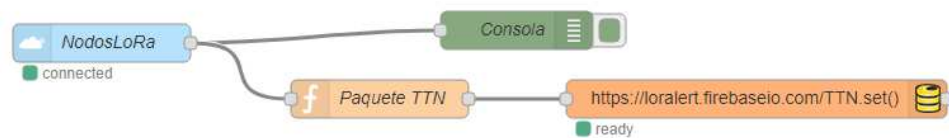


*Figura 35 Base de datos en Firebase*

## 1.17. Integración del sistema en Node-RED

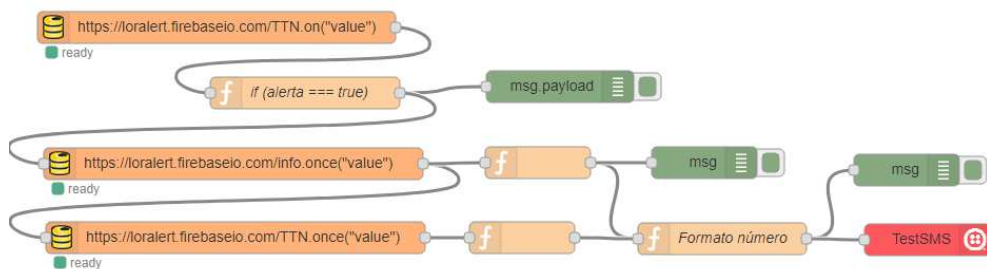
La interconexión de los distintos servicios en la nube que se utilizan en el proyecto se realiza mediante la plataforma Node RED. El host que contiene y ejecuta el servicio es IBM Cloud. Es necesaria la instalación de algunos paquetes de software adicionales que la instalación por defecto no incluye, estos son: node-red-contrib-firebase (para Firebase) y node-red-contrib-ttn (para The Things Network).

El primer flujo, gestiona los mensajes de uplink que llegan desde el servidor de red TTN y son redirigidos hacia la base de datos firebase.



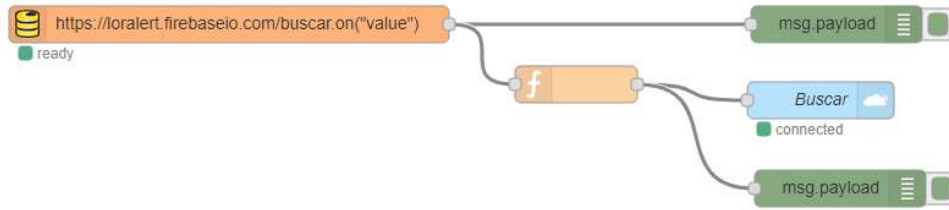
*Figura 36 Gestión de los mensajes de uplink, almacenamiento en la base de datos*

El flujo de gestión de alertas verifica el valor de la bandera “alerta” en la base de datos y en caso de tener un valor “true”, obtiene los datos de posición almacenados y emite un SMS.



*Figura 37 Gestión de alertas presentes en la base de datos para envío de SMS*

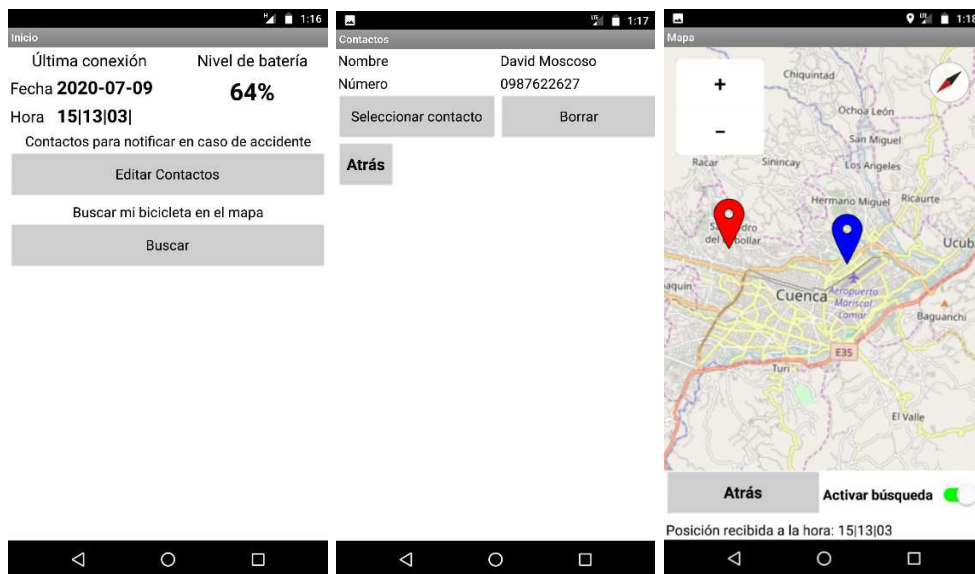
Para la activación del protocolo de búsqueda se monitorea cambios en el valor de la variable “buscar” y en caso de tener un valor “true”, se pone en cola de espera un mensaje descendente que llegará al dispositivo en la próxima ventana disponible.



*Figura 38 Gestión de los mensajes de downlink de TTN en caso de requerir búsqueda*

### 1.18. Aplicación móvil

La aplicación móvil tiene las siguientes funciones: mostrar el estado de batería del dispositivo junto con la fecha y hora de la última conexión, configurar los números de contacto a ser notificados en caso de emergencia y rastrear la bicicleta en caso de robo. Las diferentes pantallas se muestran en la figura 39, una vez activada la opción “Activar búsqueda” en la ventana de mapa, se muestra un marcador azul que representa al usuario con su teléfono móvil y otro en rojo con la ubicación de la bicicleta.



*Figura 39 Aplicación móvil para el usuario del sistema*

## 2. IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas de funcionamiento para la detección de accidentes se limitan a la manipulación directa del casco y de la bicicleta para someterlos a movimientos lineales y rotacionales. Estos movimientos son aplicados en primera instancia de forma aislada para constatar el grado de respuesta de cada uno, y luego, de forma simultánea para verificar el algoritmo de validación de un eventual accidente. En la figura 40 se muestran los prototipos implementados en la bicicleta y el casco.



*Figura 40 Prototipos implementados en la bicicleta y el casco*

El casco fue sometido a caídas sobre concreto a diferentes alturas, tal como se muestra en la figura 41.



*Figura 41 Pruebas de detección de impactos en el casco*

La bicicleta fue sometida a movimientos de rotación respecto a los ejes activados para su medición, aquellos colineales con el cuadro de la bicicleta y el manubrio.



*Figura 42 Pruebas de rotación aplicadas a la bicicleta en dos ejes*

La detección de impactos por parte del casco es prolija con caídas de altura superior a 2cm, mientras que la detección de rotaciones en la bicicleta se cumple de forma intermitente con mayor grado de efectividad en rotaciones respecto al eje del manubrio.

La implementación de la red LoRaWAN se ha realizado ubicando el Gateway en un sitio muy favorable para un enlace de radiofrecuencia en la parte urbana de la



ciudad de Cuenca debido a su altitud respecto al resto de edificaciones. Dicho lugar es el mirador del parque “La Libertad” con aproximadamente 60 metros de altura.

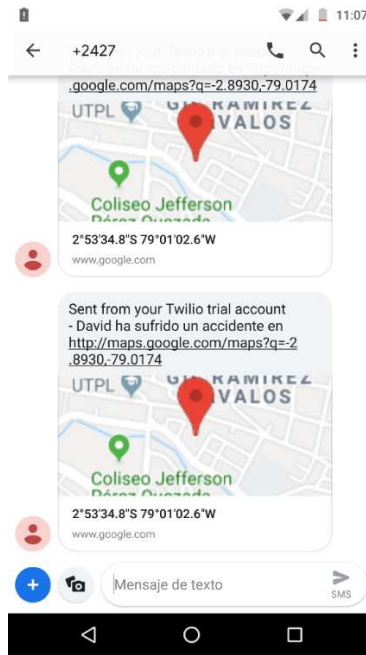


**Figura 43** Ubicación del Gateway LoRaWAN para las pruebas de cobertura



El gateway se alimentó con un banco de baterías de 5V y la conectividad a internet mediante WiFi con un teléfono inteligente con conectividad 4G configurado como punto de acceso.

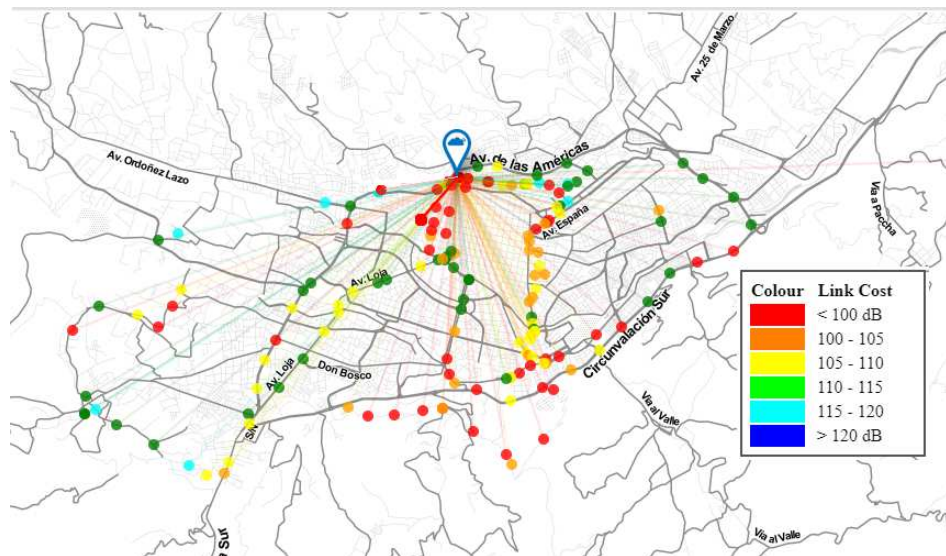
La notificación a través de un mensaje de texto al número de teléfono seleccionado se da con una latencia no mayor a 20 segundos una vez el estado de la alerta ha cambiado su estado en la base de datos. El mensaje recibido se muestra en la figura 44.



**Figura 44 Mensaje de alerta recibido por el contacto seleccionado**

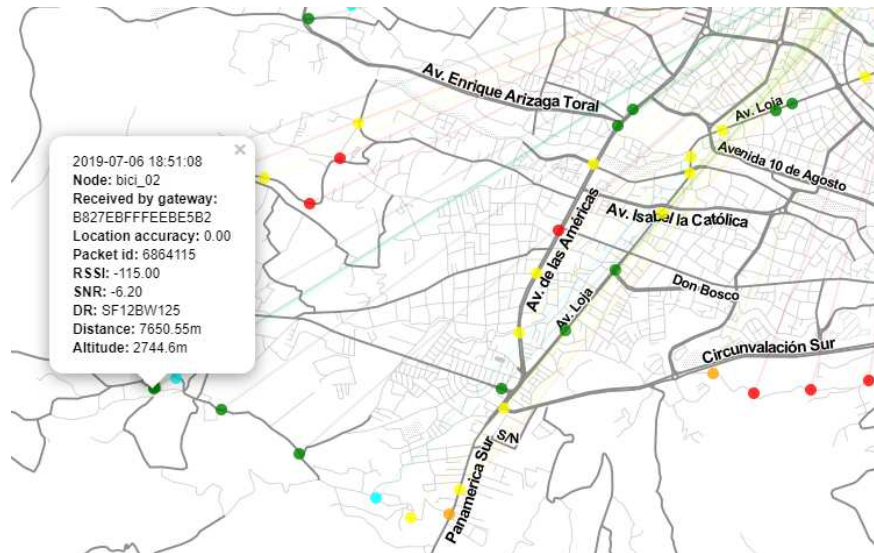
Las pruebas de campo para determinar el alcance y la factibilidad de la red LoRaWAN consistieron en montar el nodo en una bicicleta y recorrer distintos puntos de la ciudad. El dispositivo emitía mensajes con las coordenadas geográficas en intervalos de un minuto.

Se obtuvo un mapa que relaciona la ubicación geográfica en el momento de la emisión del mensaje y la potencia de arribo al Gateway, que es parte de los metadatos que se obtienen en el servidor de red.



**Figura 45 Mapa de cobertura del sistema en la ciudad de Cuenca**

El punto más lejano de cobertura se ubicó al suroeste, con una distancia estimada de 7.6 Km desde la locación de la radio base. De un total de 214 mensajes enviados por el nodo, 176 alcanzaron el Gateway y están representados en el mapa de cobertura. Por lo tanto, hubo una pérdida de paquetes del 18% que se presume corresponde a aquellas ubicaciones que tienen de por medio un número importante de edificaciones, por ejemplo, en el centro histórico



*Figura 46 Punto de cobertura más lejano*

## **CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES:**

El diseño e implementación del sistema de radiobaliza para ciclistas propuesto, ha mostrado resultados satisfactorios en cuanto a la metodología empleada, que se ha centrado en la distribución de sensores y transceptores.

El método de validación de accidentes implementado que tiene como entradas datos provenientes de un acelerómetro en el casco del ciclista y un giroscopio en su bicicleta permite discriminar aquellos casos que involucran aceleraciones de gran magnitud, pero que no son producto de caídas o golpes sufridas por el usuario, sino de acciones fortuitas como dejar caer el casco al suelo o montar la bicicleta por una rampa. De esta forma se logra un grado de efectividad mayor en la detección de accidentes, pues se obtiene patrones cinemáticos más precisos en donde las decisiones obtenidas por el algoritmo tienen una mayor probabilidad de ser correctas. Aunque el sistema propuesto ha mostrado algunas falencias sobre todo en la detección de giro repentino en la bicicleta, un estudio dedicado permitiría mayor certeza en distintos escenarios.

La red LoRaWAN desplegada para brindar conectividad al prototipo y que estaba compuesta por una sola radio base o Gateway permitió cubrir casi la totalidad del área urbana de la ciudad de Cuenca, por lo que es muy factible la implementación de esta tecnología en aplicaciones de alertas de emergencia o rastreo.

## **RECOMENDACIONES:**

En el diseño de un nodo en una red LoRaWAN es fundamental el uso eficiente de los modos de bajo consumo que presente el microcontrolador para extender la vida útil de la batería, lo cual es un factor crítico en la viabilidad de su implementación, de igual manera dispositivos periféricos como acelerómetros que presentan funciones de interrupción al momento de detectar eventos específicos contribuyen a reducir el consumo energético, por lo tanto, es recomendable una revisión detallada de dichas funciones en manuales y hojas de especificación.

En el despliegue de una red LoRaWAN en zonas urbanas se hace necesaria una mayor concentración de gateways debido al elevado número de obstáculos que reducen el nivel de intensidad de la señal recibida en los dispositivos terminales. La redundancia de paquetes es parte del protocolo y se gestiona en el servidor de red.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A: PLACA DE CIRCUITO IMPRESO PARA EL PROTOTIPO EN LA BICICLETA

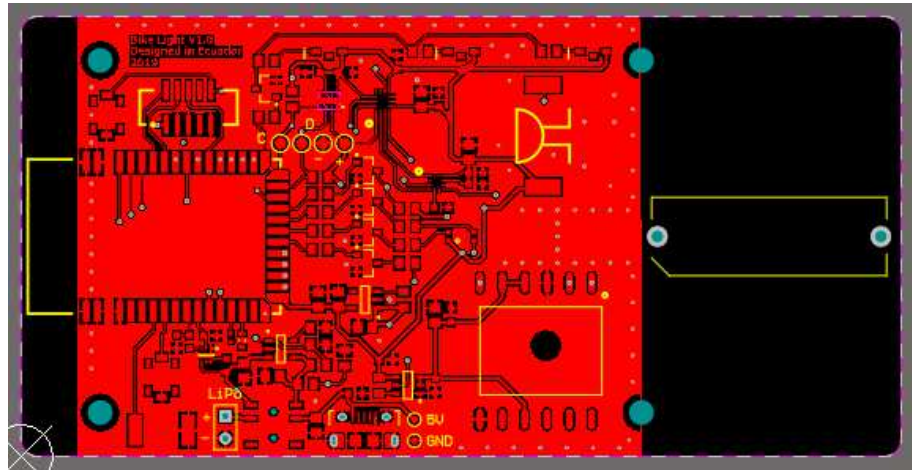


Figura A 1 Placa de circuito impreso en la bicicleta, vista superior

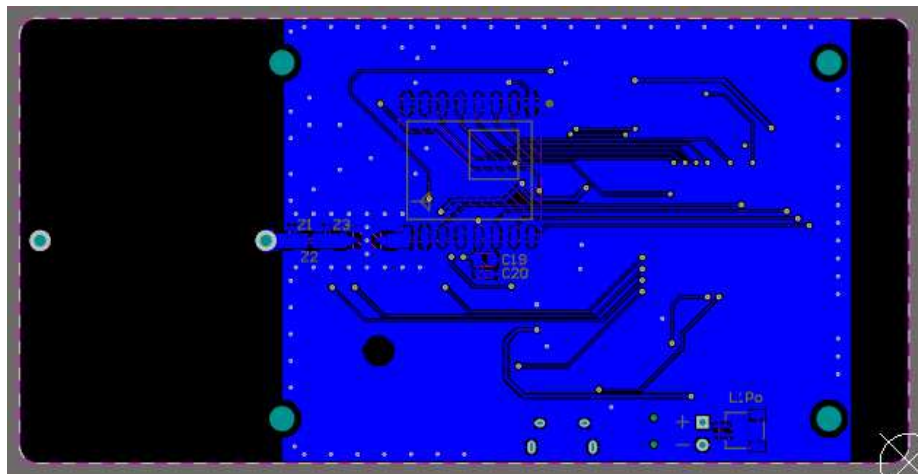


Figura A 2 Placa de circuito impreso en la bicicleta, vista inferior

## APÉNDICE B: PLACA DE CIRCUITO IMPRESO PARA EL PROTOTIPO EN EL CASCO

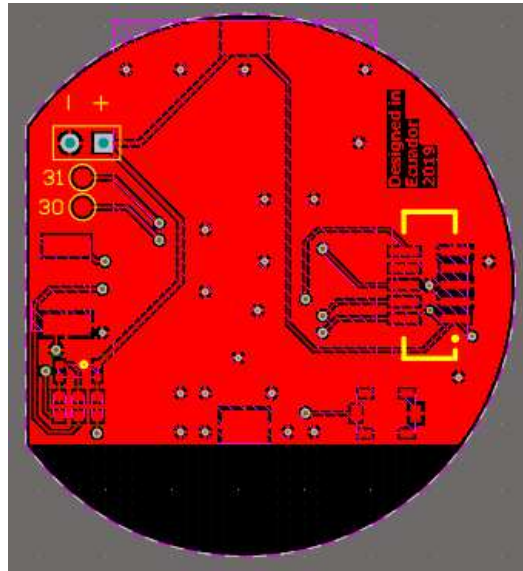


Figura B 1 Placa de circuito impreso en el casco, vista superior

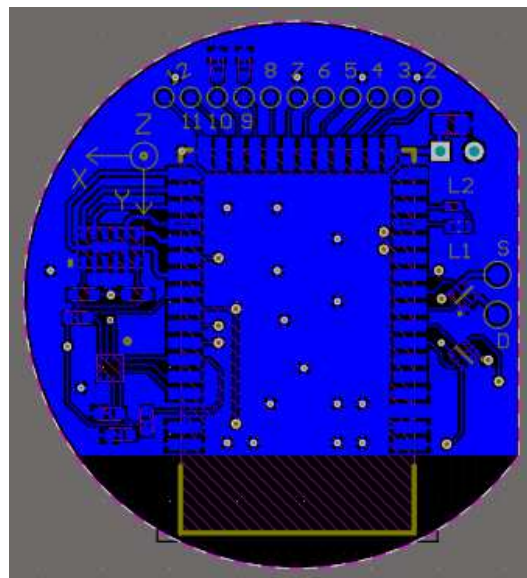


Figura B 2 Placa de circuito impreso en el casco, vista inferior

## APÉNDICE C: DIMENSIONES DEL PROTECTOR PLÁSTICO PARA EL PROTOTIPO EN LA BICICLETA

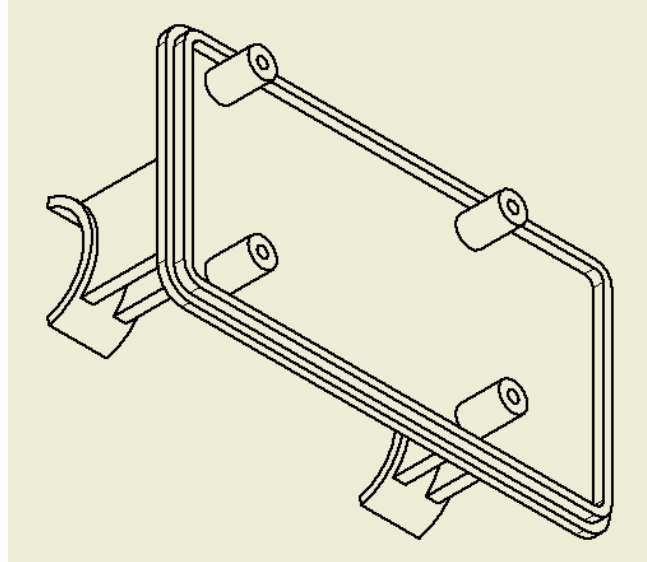


Figura C 1 Vista isométrica de la base del protector plástico para el prototipo en la bicicleta

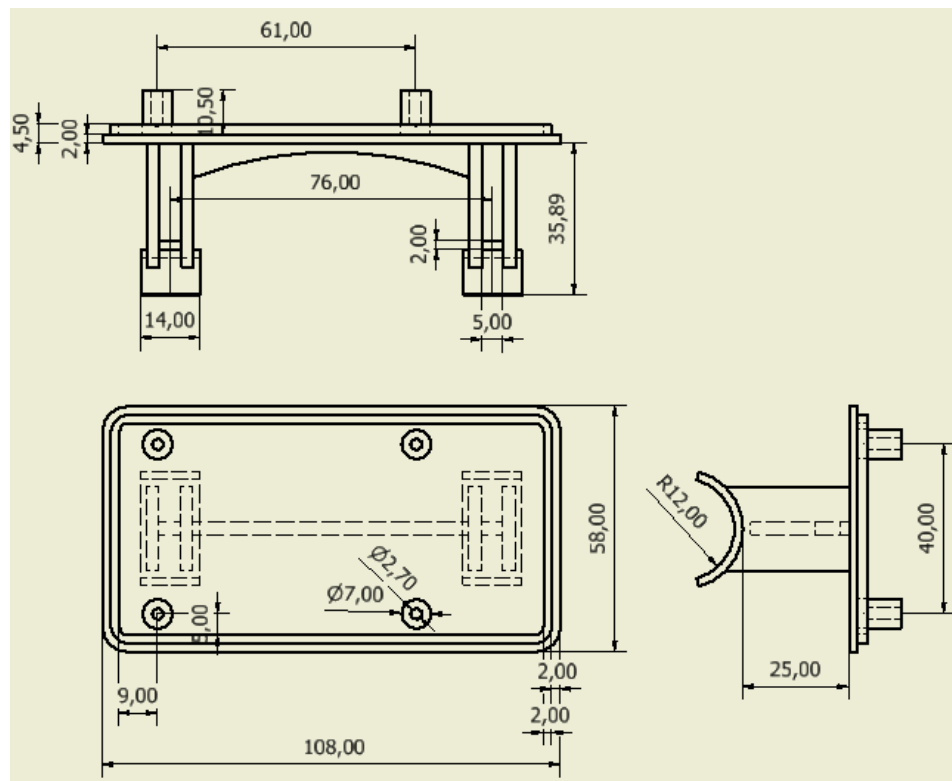


Figura C 2 Dimensiones de la base del protector plástico para el prototipo en la bicicleta



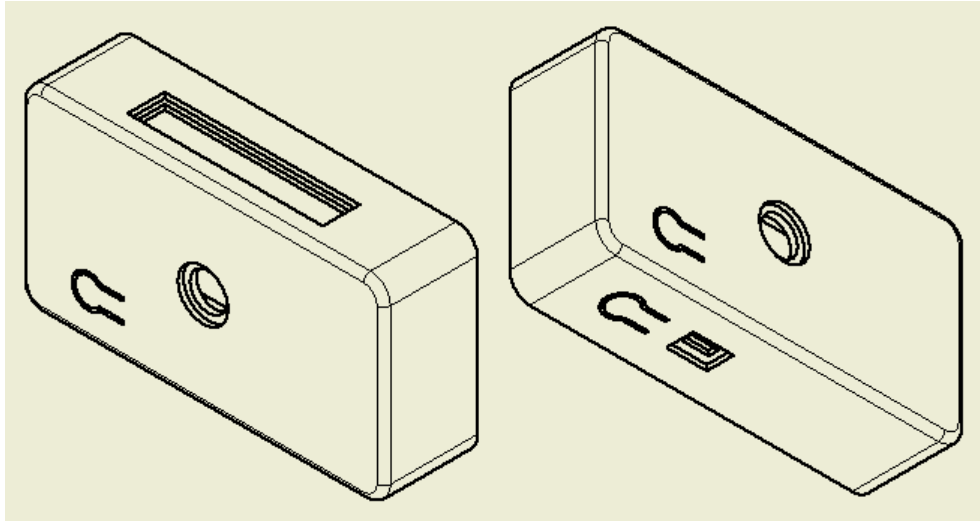


Figura C 3 Vistas isométricas de la cubierta del protector plástico para el prototipo en la bicicleta

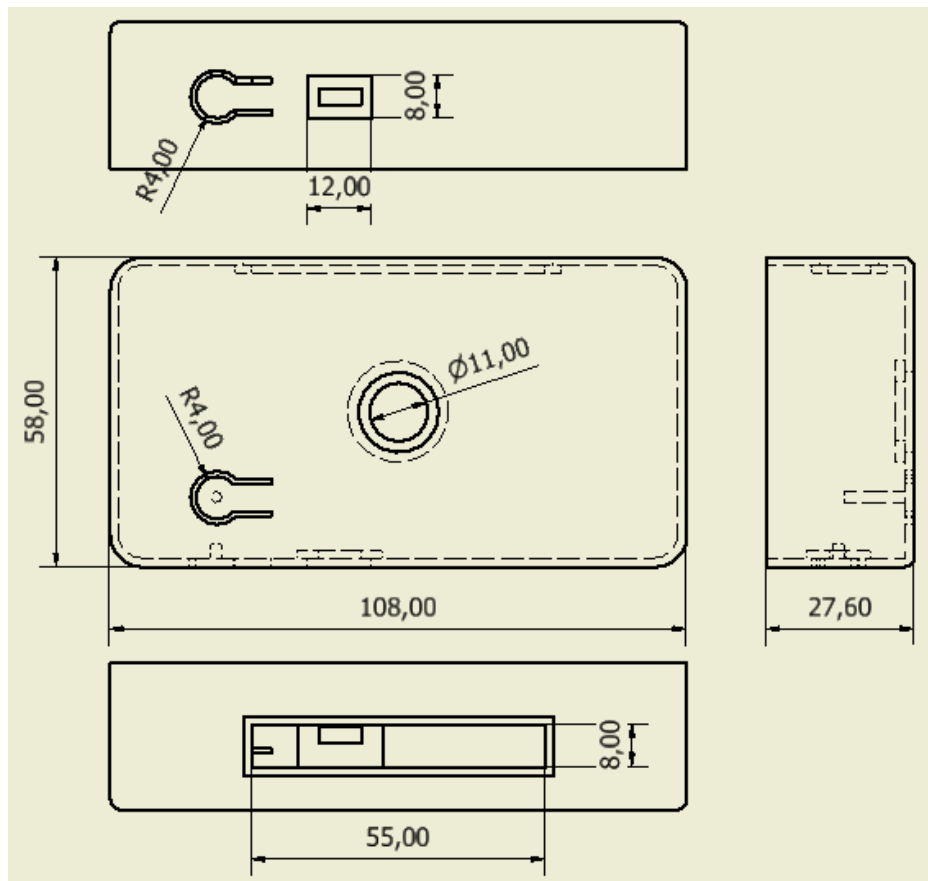


Figura C 4 Dimensiones de la cubierta del protector plástico para el prototipo en la bicicleta

## APÉNDICE D: DIMENSIONES DEL PROTECTOR PLÁSTICO PARA EL PROTOTIPO EN EL CASCO

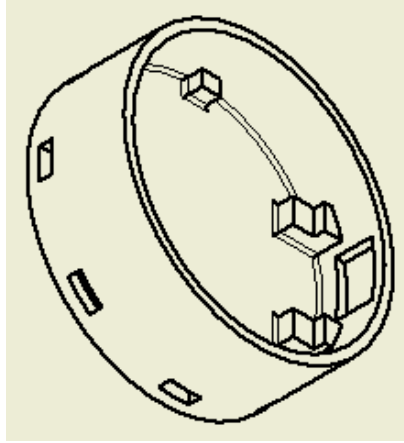


Figura D 1 Vista isométrica de la base del protector plástico para el prototipo en el casco

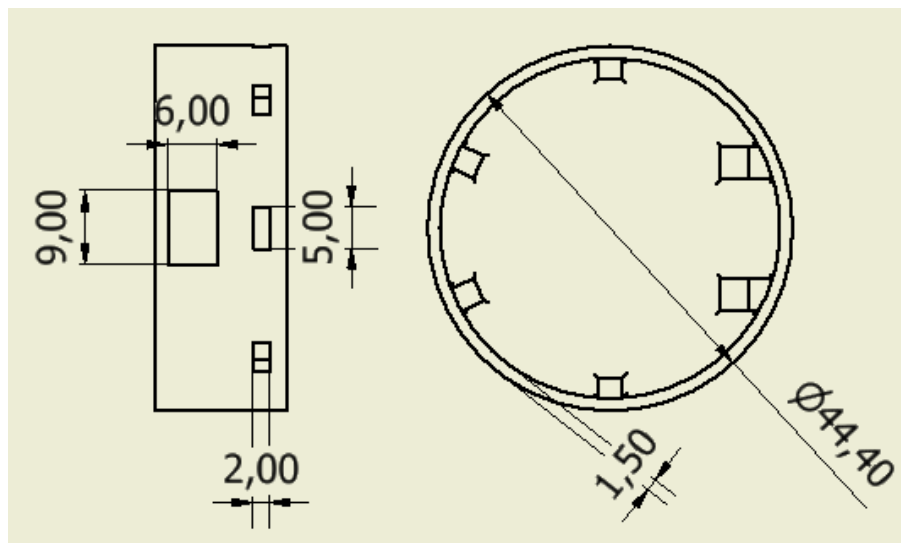


Figura D 2 Dimensiones de la base del protector plástico para el prototipo en el casco

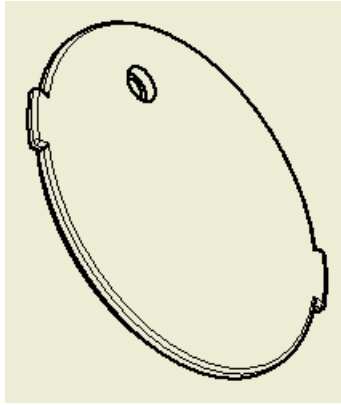


Figura D 3 Vista isométrica de la tapa del protector plástico para el prototipo en el casco

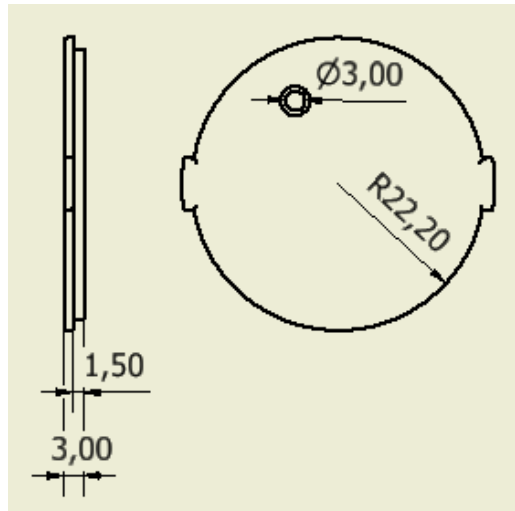


Figura D 4 Dimensiones de la tapa del protector plástico para el prototipo en el casco

# REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] M. Bopp, S. Dangaia, and D. Piatkowski, "In Bicycling for Transportation," in *In Bicycling for Transportation*, Elsevier, 2018, pp. 1–19.
- [2] Hennessey and L. Cristhina, *Bicycle: The History (Book)*. Library Journal, 2004.
- [3] K. Mizuno *et al.*, "Adult headform impact tests of three Japanese child bicycle helmets into a vehicle," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 73, no. 85, pp. 359–372, 2014.
- [4] P. S. Brito Andre and H. Varum, *Accelerometers: principles structure and applications*. New York: Nova Science Publishers Inc, 2013.
- [5] R. Jadischke, D. C. Viano, N. Dau, A. I. King, and J. McCarthy, "On the accuracy of the head impact telemetry (hit) system used in football helmets," *J. Biomech.*, vol. 46, no. 13, pp. 2310–2315, 2013.
- [6] J. Parviainen, J. Colliri, T. Pihlstrom, J. Takala, K. Hanski, and A. Lumiaho, "Automatic crash detection for motor cycles," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2014.
- [7] K. W. Chun, Z. H. Chen, and C. C. Sun, "IOT solution for public bicycle system," *2016 IEEE Int. Conf. Consum. Electron. ICCE-TW 2016*, pp. 7–8, 2016.
- [8] A. Høye, "Bicycle helmets – To wear or not to wear? A meta-analyses of the effects of bicycle helmets on injuries," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 117, no. March, pp. 85–97, 2018.
- [9] M. Bíl, M. Dobiáš, R. Andrášik, M. Bílová, and P. Hejna, "Cycling fatalities: When a helmet is useless and when it might save your life," *Saf. Sci.*, vol. 105, no. February, pp. 71–76, 2018.
- [10] E. Orellana, D., Zurita, C., Osorio, P., Puga, "1ra Encuesta del Ciclista Urbano del Ecuador," *Universidad de Cuenca y Fundación Biciacción*, 2018. [Online]. Available: <https://lactalab.ucuenca.edu.ec/perfilciclista/>. [Accessed: 04-May-

- 2019].
- [11] INEC, “Módulo de Información Ambiental en Hogares - Diciembre 2017,” 2017.
- [12] P. A. Cripton, D. M. Dressler, C. A. Stuart, C. R. Dennison, and D. Richards, “Bicycle helmets are highly effective at preventing head injury during head impact: Head-form accelerations and injury criteria for helmeted and unhelmeted impacts,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 70, pp. 1–7, 2014.
- [13] B. Hofmann-wellwnhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, *GNSS-Global Navigation Satellite System*. New York: SpringerWeinNewYork, 2008.
- [14] D. M. Bevly and S. Cobb, *GNSS For Vehicle Control*. Artech House, 2010.
- [15] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edi. Artech House, 2013.
- [16] Bluetooth SIG, “Specification Volume 0: Master Table of Contents & Compliance Requirements,” *Specif. Bluetooth Syst.*, vol. 0, no. December, 2014.
- [17] N. Gupta, *Inside Bluetooth Low Energy*, Second Edi. Boston: Artech House, 2016.
- [18] K. Townsend, C. Cufí, Akiba, and R. Davidson, *Getting Started with Bluetooth Low Energy*. Sebastopol: O’REILLY, 2014.
- [19] LoRa Alliance, “LoRaWAN: What it is?,” vol. 1, no. November, p. 20, 2015.
- [20] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 9, pp. 1–18, 2016.
- [21] Semtech, “LoRa™ Modulation Basics Semtech,” vol. AN1200.22, no. May, pp. 1–26, 2015.
- [22] R. Sanchez-Iborra, J. Sanchez-Gomez, J. Ballesta-Viñas, M. D. Cano, and A. F. Skarmeta, “Performance evaluation of lora considering scenario conditions,”

*Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 3, 2018.

- [23] LoRa™ Alliance, “LoRaWAN™ Specification v1.0.2,” *LoRaWAN™ 1.0 Specif.*, pp. 1–91, 2016.
- [24] The Things Industries, “The Things Network,” 2019. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org>. [Accessed: 24-Jun-2019].
- [25] Node-RED, “Node-RED : About.” [Online]. Available: <https://nodered.org/about/>. [Accessed: 24-Jun-2019].
- [26] Google, “Firebase.” [Online]. Available: [https://firebase.google.com/?gclid=Cj0KCQjwjMfoBRDDARIsAMUjNZrC63XmLpb4xLLtDLTfqr1goEU1lgjJgrMjklkyWpZDyWJF7cZB-18aAnrJEALw\\_wcB](https://firebase.google.com/?gclid=Cj0KCQjwjMfoBRDDARIsAMUjNZrC63XmLpb4xLLtDLTfqr1goEU1lgjJgrMjklkyWpZDyWJF7cZB-18aAnrJEALw_wcB). [Accessed: 25-Jun-2019].
- [27] MIT, “About Us | Explore MIT App Inventor.” [Online]. Available: <https://appinventor.mit.edu/explore/about-us.html>. [Accessed: 25-Jun-2019].
- [28] Twilio INC., “Twilio Docs: API Reference, Tutorials, and Integration - Twilio,” 2019. [Online]. Available: <https://www.twilio.com/docs/>. [Accessed: 27-Jun-2019].
- [29] Nordic Semiconductor, “nRF52810 Product Specification,” vol. 1.0, 2017.
- [30] STMicroelectronics, “LIS2DH12 MEMS accelerometer,” no. May, pp. 1–48, 2017.
- [31] Nordic Semiconductor, “nRF52832 Product Specification,” vol. 1.4. 2017.
- [32] Quectel, “L80-R Hardware Desing,” vol. 1.1, 2015.
- [33] E. Hoperf, “Rfm95/96/97/98 ( w ) ,” vol. 1.0.
- [34] Raspberry Pi, “Raspberry Pi 3 Model B,” *Raspberry Pi*, p. 2837, 2018.
- [35] SHENZHEN RAKWIRELESS TECHNOLOGY, “RAK831 Lora Gateway,” vol. 1.3, 2017.